УДК 624.21
UDC 624.21

DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-089-098

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕУСТАЛЕНОГО РУХУ РІДИНИ ВІДКРИТИХ РУСЕЛ

RESEARCH OF THE UNSTEADY MOVEMENT OF LIQUID IN OPEN CHANNELS

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, +380442807978, https://orcid.org/0000-0001-8872-8415.

Снитко Валерій Пилипович, *кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail:* valeriysnytko49@gmail.com, +380442807978, 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, +380442807978
https://orcid.org/0000-0003-0307-0306

Рубльов Андрій Валерійович, *кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, Національний транспортний університет, Київ, Україна,*
e-mail: rublev@ukr.net, +380442807978
https://orcid.org/0000-0002-4142-1325

Анотація. У роботі було проведено дослідження перехідних процесів та виконано кількісні розрахунки на прикладі зрошувальних каналів, що розташовані на півдні України. Проведено натурні, лабораторні та математичні дослідження перепускної спроможності гідротехнічних споруд. Було досліджено перехідні процеси, які виникають у процесі перерегулювання режиму водоспоживання або внаслідок аварійних ситуацій, які є важливими аспектами функціонування зрошувальних каналів. Основу таких процесів становить неусталений рух рідини. Для вивчення особливостей неусталеного руху в зрошувальних каналах, було визначено загальні характеристики хвилі наповнення, зроблено аналізування миттєвих профілів вільної поверхні потоку та зміни рівнів води за часом у фіксованих перерізах уздовж каналу, проведено порівняння теоретичних розрахунків з даними результатів натурних спостережень. Також було встановлено зміни середньої швидкості розповсюдження фронту хвилі наповнення вздовж каналу та вивчено умови трансформації максимальних витрат по всій довжині русла. У алгоритмі розв'язання задачі використано раніше розроблену модель, яка базується на чисельному інтегруванні рівнянь Сен-Венана. Чисельні розрахунки перехідних процесів проводились за допомогою програми, яка дозволила виконати розрахунки оптимальних варіантів регулювання, оцінити ефективність обраного способу автоматизованого регулювання водопостачання, а також можливість розрахувати типові експлуатаційні режими роботи каналу. Як приклад, для розв'язання задачі управління водорозподілом, було розглянуто різноманітні схеми автоматичного регулювання витрат та рівнів води на Північно-Кримському каналі. Експериментально перевірено в реальних умовах при однакових вихідних даних отримані результати розрахунків. Експерименти проводились на спорудах, розташованих на Роздольненському каналі. Результати натурних спостережень було змодельовано та протестовано в гідравлічному лотку лабораторії кафедри. Проведені натурні та лабораторні дослідження підтвердили результати попередніх розрахунків.

Ключові слова: гідротехнічні споруди, неусталений рух, трансформація максимальних витрат, водні ресурси, зрошувальні системи.

Вступ. Внаслідок воєнних подій, що розгорнулися на території України, гідротехнічні споруди та інші транспортні споруди зазнали значних руйнувань. Післявоєнна відбудова стає унікальною можливістю для радикальної модернізації економіки та проведення структурних реформ, але також викликає необхідність заміни та розширення існуючих транспортних споруд на більш сучасні та функціональні гідротехнічні об'єкти.

Курс структурних трансформацій та економічної реконструкції має бути націлено на європейську перспективу, спрямовуючи країну до повноцінного членства в Європейському Союзі. У цьому контексті спільна робота міжнародних та європейських банківських установ над створенням спеціалізованих Фондів відновлення України стає критичною для подолання наслідків збройної агресії.

В Україні активно відбувається збір коштів для вирішення найгостріших проблем, що виникли внаслідок війни. Серед них - підтримка малого та середнього бізнесу, економічне відновлення, підтримка армії, відновлення майна та зруйнованої інфраструктури тощо. Оцінювання збитків поки не завершено через обмежений доступ до окремих територій та постійне зростання кількості зруйнованих об'єктів у зв'язку зі збройною агресією, що ще триває.

Однією з ключових складнощів відновлення іррігаційої інфраструктури сільськогосподарських земель, та інших захисних інженерних конструкцій. Реконструкція зруйнованих об'єктів гідротехнічних споруд може не лише відновити їхню функціональність, але й забезпечити більш стійкі та сучасні рішення для розвитку та вдосконалення сільськогосподарського виробництва. Враховуючи

важливість цього завдання, стаття спрямована на необхідність прийняття обґрунтованих рішень щодо відновлення гідротехнічних споруд або розширення та ремонту існуючих.

Виклад основного матеріалу. У листопаді 2022 року після підриву Каховської ГЕС було нанесено значну шкоду довкіллю південного регіону. Крім того після падіння рівня води в Каховському водосховищі припинилось нормальне функціонування зрошувальної системи сільськогосподарських угідь південного регіону, що значно погіршило стан сільсько господарських угіддя, які й так зазнали значної шкоди внаслідок воєних дій.

Північно-Кримський канал (ПКК), споруджений у період з 1961 по 1971 роки, відігравав важливу роль у вирішенні проблем посушливих зон півдня України та зрошення сільськогосподарських угідь дніпровськими водами. Протягом експлуатування каналу виникало багато технічних та економічних питань, які потребували вирішення.

У період будівництва ПКК та на початку його експлуатування з метою знаходження відповідей на питання підвищення родючості земель та поліпшення потреб у водних ресурсах народного господарства півдня України, було залучено співробітників кафедри гідравліки Київського автомобільно-дорожнього інституту, що нині відома як кафедра мостів, тунелів та гідротехнічних споруд НТУ. Протягом періоду з 1967 по 1987 рік проводилися систематичні натурні, лабораторні та математичні дослідження неусталеного руху на Північно-Кримському каналі, які сприяли розробці ідей та прийняттю рішень. [1]

Висновки та розробки, здобуті під час цих досліджень, увійшли до циклу праць "Теорія і технологія ресурсозберігаючого управління вододільними системами з впровадженням їх у виробництво". У 1998 році цей цикл праць був нагороджений Державною премією України в галузі науки та техніки. Один із лауреатів, який увійшов до авторського колективу, - завідувач кафедри "Гідравліки", доктор технічних наук, професор Валерій Олексійович Большаков.

Результати цих досліджень внесли вагомий внесок у розуміння та оптимізацію перехідних явищ, а також у вдосконалення проєктування та функціонування зрошувальних систем. Динаміка процесів, які були вивчені, дозволяє більш точно пристосовувати системи до змінних умов та ефективно використовувати водні ресурси в умовах змінного водоспоживання у різних точках каналу.

Упродовж кількох років було здійснено дослідження перехідних процесів та кількісні розрахунки на прикладі каналів, що розташовані на півдні України. Було проведено натурні, лабораторні та математичні дослідження перепускної здатності споруд, що розміщені на Північно-Кримському каналі (рисунок 1, 2). Велику увагу було приділено проєктуванню та будівництву технічно-досконалих зрошувальних систем з автоматизованим регулюванням водопостачання.

Особливою рисою роботи таких систем є їх динамічність. Це пов'язано зі змінами водоспоживання як у часі, так і вздовж русла каналу.

Рисунок 1 – Загальний вигляд основної споруди ПКК
Figure 1 – General view of the main building of the PCC

Перехідні процеси, які виникають під час перерегулювання режиму водоспоживання або внаслідок аварійних ситуацій, є важливим аспектом функціонування зрошувальних каналів. Основу таких процесів становить неусталений рух рідини у каналах, який математично можна описати за допомогою рівнянь Сен-Венана (1):

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

При розробленні алгоритму розв'язання цієї задачі використовувалась раніше розроблена модель, яка базується на чисельному інтегруванні рівнянь Сен-Венана. Створена програма дозволила провести чисельні розрахунки перехідних процесів з метою отримання оптимальних варіантів регулювання та оцінювання ефективності обраного способу автоматичного регулювання водопостачання. Крім того, за допомогою цієї програми було можливо розрахувати типові експлуатаційні режими роботи каналу. [2,3]

Для розв'язання задачі автоматизованого управління водорозподілом на Північно-Кримському каналі розглядалися різноманітні схеми автоматичного регулювання витрат та рівнів води. Метою натурних спостережень, проведених співробітниками кафедри, було експериментально перевірено результати розрахунків у реальних умовах при однакових вихідних даних.

Для проведення експерименту були вибрані споруди, розташовані на Роздольненському каналі. Результати натурних спостережень були змодельовані та протестовані в гідравлічному лотку лабораторії кафедри. Проведені натурні та лабораторні дослідження підтвердили результати попередніх розрахунків.

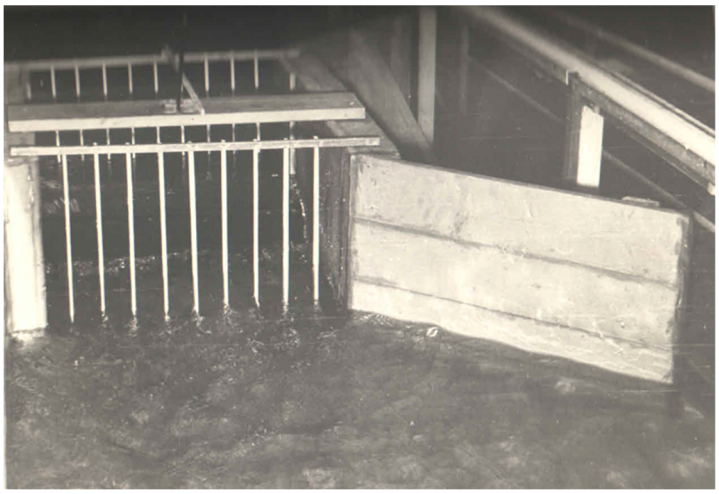

Рисунок 2 **–** Модель споруди у гідравлічному лотку лабораторії кафедри в масштабі 1:40
Figure 2 **–** Model of the structure in the hydraulic tray of the department's laboratory at a scale of 1:40

Було зроблено висновок, що для розрахунку руху води в зрошувальних каналах при автоматичному регулюванні, доцільно застосовувати математичну модель у вигляді граничної задачі для рівнянь Сен-Венана. Оскільки водоспоживання в таких каналах змінюється з часом, реальні умови протікання води відповідають режиму неусталеного руху.

Науковцями кафедри було проведено теоретичні та експериментальні дослідження неусталеного руху води в Красноперекопській зрошувальній системі. Для вивчення особливостей неусталеного руху в зрошувальних каналах та при порівнянні теоретичних розрахунків з даними результатів натурних спостережень, було визначено загальні характеристики хвилі наповнення, зроблено аналіз миттєвих профілів вільної поверхні потоку та зміни рівнів води за часом у фіксованих перерізах уздовж каналу. Також було встановлено зміни середньої швидкості розповсюдження фронту хвилі наповнення вздовж каналу та вивчено умови трансформації максимальних витрат по всій довжині русла [4].

Проведені натурні дослідження підтвердили результати попередніх розрахунків з визначення впливу різних факторів на елементи неусталеного руху, зокрема руху хвилі наповнення. Для подальших досліджень був застосований метод чисельного розв'язку диференційних рівнянь Сен-Венана за явною різницевою схемою.

Застосування математичної моделі у вигляді граничної задачі для рівнянь Сен-Венана дозволило отримати оптимальні варіанти регулювання, які забезпечили мінімізацію не виробничих скидів, а також оцінити ефективність обраного способу автоматичного регулювання водопостачання.

З гідравлічної точки зору головною спорудою ПКК є водозлив. Для визначення коефіцієнта витрат та коефіцієнта затоплення споруди при різних положеннях затвора були проведені експериментальні дослідження. Під час експерименту як критерій подібності використовувалось число Фруда.

Загальною тенденцією при експлуатуванні зрошувальних каналів є перехід на автоматичний режим регулювання подачі води через перегороджувальні споруди. Автоматизація сприяє кращій роботі зрошувальних систем, тому її слід розглядати не відокремлено, а в єдиному комплексі з загальними питаннями раціонального устрою іригаційних каналів.

Надалі метою дослідження було визначення зміни характеристик неусталеного руху при багатоінтервальному графіку попуску, що визначає умову роботи перегороджувальної споруди. Було зроблено розрахунок, виходячи з вихідних даних, які відповідали реальним умовам: русло завширшки - 10 метрів, закладення укосів m= 3, коефіцієнт шорсткості n = 0,02, русло завдовжки 5000 з ухилом дна i = 0,00008. Початкова глибина приймалася h_s = 1 метр з відповідною витратою Q = 3,03 м^3/сек. Вибір такого значення h не викликає жодних відхилень у результатах розрахунків і відповідає реальним умовам [5].

Для оцінювання ступеня розпластування максимальної витрати при багатоінтервальному графіку попуску було побудовано графік зміни витрати в часі для нульового створу і створу, розташованого на відстані 5000 метрів. На графік було нанесено криву, що відноситься до проміжного створу, розташованого на відстані 1000 метрів. Таким чином, цей графік дозволяє судити про ступінь розпластування витрати за довжиною русла при багатоінтервальному графіку попуску (рисунок 3).

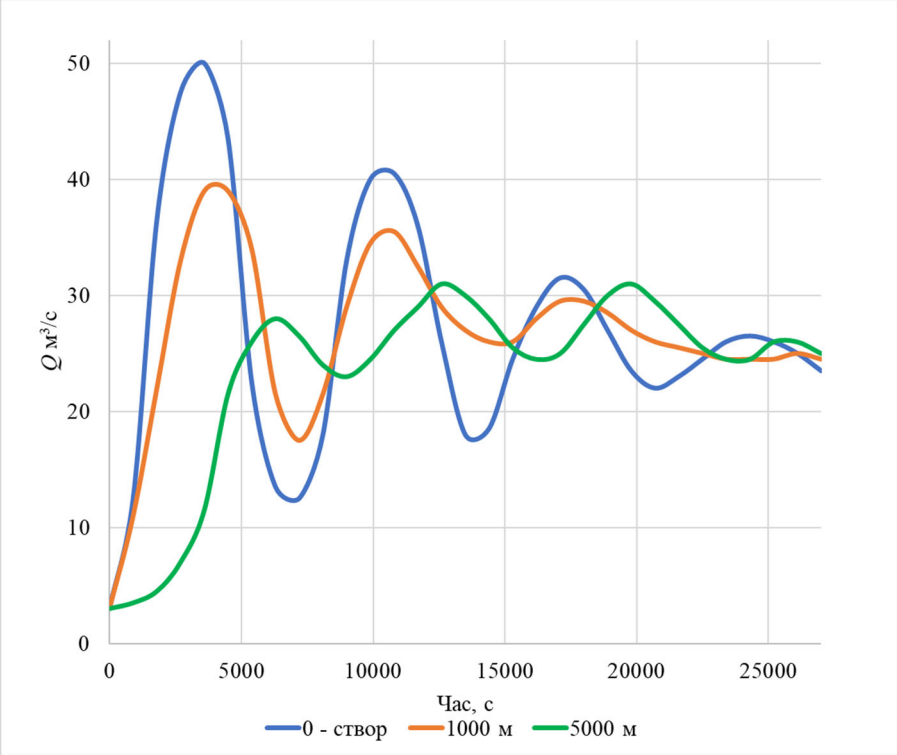

Рисунок 3 – Графік зміни витрати в часі для нульового створу і створів розташованих на відстані 1000 та 5000 метрів

Figure 3 – Graph of flow rate change over time for the zero well and wells located at a distance of 1000 and 5000 meters

З метою кількісного оцінювання ефекту розпластування було визначено коефіцієнт трансформації φ_Q, який дозволив оцінити рівень зменшення максимальної витрати по довжині потоку. Коефіцієнт трансформації φ_Q - відношення максимальної витрати (багатоінтервального графіка попуску) в даному перерізі до максимальної витрати того ж самого графіка попуску в початковому перерізі. Величину φ_Q було визначено для всіх вибраних багатоінтервальних графіків попусків та

перерізів, які розташовано на відстані 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 метрів. Необхідно відзначити, що на величину трансформації максимальної витрати впливають характеристики графіка попуску, така як величина A - кутовий коефіцієнт, що є відношенням $\frac{Q_{\max}}{W}$ [6].

Отримані результати підтвердили факт впливу ступеня підйому графіка попуску (величина A) на розпластуваність потоку. Отримані значення коефіцієнтів трансформації дали змогу оцінити ступінь розпластуваності потоку, яка набуває більшого значення зі зменшенням відношення $\frac{Q_{\max}}{W}$ або ж зі збільшенням кутового коефіцієнта $A = \frac{Q_{\max}}{W}$

Порівняльний аналіз впливу параметрів Q і h, що характеризують неусталений рух, з величинами Q і h, які стосуються усталеного руху, дасть змогу оцінити необхідність виконання розрахунку споруд з урахуванням фактора часу.

Порівняння проводилося для значень Q і h, обчислених в основних розрахункових перерізах.

Для умов усталеного руху пропускну здатність споруди визначали за загальною формулою водозливу:

$$Q = \sigma_3 k m b_{cn} \sqrt{2g}\, H_0^{3/2}. \quad (2)$$

Користуючись цією формулою, можна проводити розрахунки для всіх схем протікання потоку і різних вихідних даних [7].

Для подальших розрахунків було прийнято натурні вихідні дані: русло - трапецеїдальної форми із закладенням укосів - 3, шириною русла по дну - 10 м, коефіцієнт шорсткості n - 0,020, ухил дна i - 0,00003, ділянка русла завдовжки - 5000 м. Початкова глибина води h_0 = 1,0 м і відповідна витрата Q_0 = 3,03м^3/сек. Підмостовий переріз було обрано із закладенням укосів - 1,5.

Умову на лівій границі було прийнято у вигляді трикутного (одиночного) графіка попуску. На трансформацію потоку істотно впливає схема протікання потоку в перерізі споруди і ступінь стиснення спорудою (умова на правій границі). Розглядалось три значення ступеня затоплення:

$\sigma_з$ = 1 - затоплення відсутнє;

$\sigma_з$ = 0,84 - затоплення спостерігається;

$\sigma_з$ = 0,40 - сильне затоплення;

і три параметри, що визначають стиснення $k = \frac{b_{cn}}{b_{русл}} = 1,0$ (стиснення відсутнє); $k = \frac{b_{cn}}{b_{русл}} = 0,75$; $k = \frac{b_{cn}}{b_{русл}} = 0,5$.

З метою визначення кількісної оцінки різниці було визначено коефіцієнт ψ_Q, який є відношенням витрати при неусталеному русі за різних умов на правій границі (затоплення плюс стиснення) до витрати усталеного руху за тих самих умов на лівій границі. Отримані результати дають можливість оцінити найсуттєвіші моменти роботи споруди, коли особливо яскраво виражена необхідність урахування неусталеного руху. Аналізуючи отримані значення коефіцієнта ψ_Q, слід відмітити, що врахування нестаціонарного руху рідини потоку, дає найбільший ефект за максимального значення співвідношення $\frac{Q_{0\max}}{W}$. За відсутності затоплення, величина стиснення суттєвої ролі (коли довжина l =5000 м) не відіграє. Загальний висновок за проведеними порівняльними

розрахунками полягає в тому, що врахування неусталеного руху дає найбільш помітні результати для попусків з найбільшим значенням співвідношення $\frac{Q_{0\max}}{W}$, що характерно для будь-якого ступеня затоплення.

Для більш детального аналізу було досліджено глибини, що відповідають усталеному і неусталеному рухам. Глибину в останньому створі (у перерізі перед спорудою), що характеризує усталений рух, було визначено з умови (2), тобто як напір перед мостом. Цей параметр, що визначає напір перед мостом для неусталеного руху, було отримано на підставі чисельного експерименту. Проведений аналіз дав змогу дійти висновку, що величина напору перед спорудою в разі усталеного руху більша, ніж за неусталеного руху рідини потоку. Ця різниця зростає зі збільшенням витрати $Q_{0\max}$ (або зі співвідношення $\frac{Q_{0\max}}{W}$) і ступеня стиснення русла [8].

Початок затоплення не призводить до помітного коливання рівня води.

З метою кількісного оцінювання різниці між значеннями введено коефіцієнт ψ_h., який представляє собою відношення величини напору за неусталеного руху до його значення за усталеного руху за тих самих граничних умов.

Висновки.

За результатами досліджень було зроблено такі висновки:

- Перепускна здатність споруди залежить від рівня води в каналі, тому для забезпечення цієї умови необхідно збільшити перепускну можливість самого каналу.

- Ураховувати неусталений рух під час розрахунку споруди на відкритих руслах, особливо необхідно в разі, коли в кінцевому перерізі спостерігається збільшення напору H, а це буває, у випадку, коли споруда працює за затопленою схемою або ж споруда призводить до стиснення потоку в плані.

- Значення підпору перед мостом, визначене з умов неусталеного руху, істотно може позначитися на визначенні величини $b_{сп}$. Проведений аналіз дає змогу оцінити необхідність розрахунку споруд, зважаючи на умови неусталеного руху потоку.

Неусталений рух відповідає реальним умовам роботи зрошувальних каналів. Враховуючи вплив неусталеного руху потоку, можна отримати більш економічні рішення в разі визначення отвору споруди b або величини допустимого напору H.

Було виконано натурні спостереження на характерних ділянках каналу для визначення фактичного коефіцієнта шорсткості. З огляду на нерівномірність руху води в каналі, для визначення коефіцієнтів шорсткості було застосовано методику з використанням рівнянь нерівномірного руху.

Перелік посилань

1. Дидковский М.М., Родионов И.А. Сопротивление движению воды в больших земляных каналах. Киев, изд-во АН УССР – 1956 г.

2. ДНАОП. ДБН В.2.5-74.2013 Водопостачання зовнішньої мережі та споруди. Основні положення проектування.

3. ДНАОП. ВНД 33-5-02-98 Методика определения зон возможного затопления на реках Украины (укр.)

4. ДНАОП. ДБН В.2.4-1-99. Мелиоративных системы и сооружения (43040)

5. Ткачук С.Г. Гідравліка, гідрологія, гідрометрія. Київ, «Кафедра», 2013 р., 390 с.

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

7. Константінов Ю.М.,Гіжа О.О. Технічна механіка рідини та газу. – К.:Вища школа.-2002.-227с.

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

RESEARCH OF THE UNSTEADY MOVEMENT OF LIQUID IN OPEN CHANNELS

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, +380442807978, https://orcid.org/0000-0001-8872-8415,
Snytko Valerii, PhD (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, тел. +380442807978, https://orcid.org/0000-0002-9530-4589
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, tel..+3800505433772, https://orcid.org/0000-0003-0307-0306
Andrii Rublev, PhD (Candidate of Technical Science) , Associate Professor, Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures, Associate Professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: rublev@ukr.net, tel.+380930631712, https://orcid.org/0000-0002-4142-1325

Summary. In this work, the transient processes were studied and quantitative calculations were performed on the example of irrigation canals located in the south of Ukraine. Field, laboratory, and mathematical studies of the hydraulic structures' throughput capacity were carried out. Transient processes that arise in the process of re-regulation of the water consumption regime or as a result of emergencies, which are important aspects of the functioning of irrigation canals, were investigated. The basis of such processes is the unsteady fluid motion. To study the peculiarities of unsteady motion in irrigation canals, the general characteristics of the filling wave were determined, the instantaneous profiles of the free surface of the flow and changes in water levels over time in fixed sections along the canal were analyzed, and theoretical calculations were compared with the results of field observations. Changes in the average velocity of the filling wave front propagation along the channel were also determined, and the conditions for the transformation of the maximum flow along the entire length of the channel were studied. The algorithm for solving the problem uses a previously developed model based on the numerical integration of the Saint-Venant equations. Numerical calculations of transient processes were performed using a program that made it possible to calculate optimal control options, evaluate the effectiveness of the chosen method of automated water supply regulation, and calculate typical operating modes of the canal. As an example, to solve the problem of water distribution management, various schemes of automatic regulation of water flows and levels on the North Crimean Canal were considered. The results of the calculations were experimentally verified in real conditions with the same initial data. The experiments were carried out at the facilities located on the Razdolnensky Canal. The results of field observations were modeled and tested in the hydraulic tray of the department's laboratory. The field and laboratory studies confirmed the results of preliminary calculations.

Keywords: hydraulic structures, unsteady motion, maximum flow transformation, water resources, irrigation systems.

References

1. Didkovsky M.M., Rodionov I.A. Resistance to the movement of water in large earthen channels. Kyiv, publishing house of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR – 1956 [in Russian].

2. DNAOP. DBN V.2.5-74.2013 Water supply of external networks and structures. Basic provisions of design. [in Ukrainian].

3. DNAOP. VND 33-5-02-98 Methodology for determining zones of possible flooding on the rivers of Ukraine. [in Ukrainian]

4. DNAOP. DBN B.2.4-1-99. Reclamation systems and structures (43040) [in Ukrainian]

5. Tkachuk S.G. Hydraulics, hydrology, hydrometry. Kyiv, "Department", 2013, 390 p. [in Ukrainian]

6. Yevseichyk Y.B., Medvediev K.V., Parovenko O.M., Sviatyshenko I.I. Determination coefficient of roughness for calculating flow of an unsteady motion of liquid Scientific and technical collection Motor roads and road construction, 2022, Vol. 112, P.163-169, http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/112/163-169.pdf

7. Konstantinov Yu.M., Gizha O.A. "Technical mechanics of liquids and gases", K,, ed., house "Higher education", 2002, 227 p. [in Ukrainian].

8. Konstantinov Yu.M., Gizha O.A. "Engineering hydraulics", K,, ed., house "Slovo", 2006, 432 p. [in Ukrainian].

Дата надходження до редакції 26.02.2024.