ГІДРОТЕХНІКА

УДК 556. 537:532

Хлапук М. М., д.т.н., професор, Ясінська Л. Р., к.т.н., інженер, Фещенко Л. В., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ВПЛИВ ГІДРАВЛІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ РУСЛА ТА ЗАПЛАВИ НА ПЕРЕДГІРСЬКИХ ДІЛЯНКАХ РІЧОК

В статті представлено теоретичні та експериментальні дослідження впливу гідравлічних параметрів водного потоку на питому витрату і осереднену швидкість в руслі та на заплаві.
***Ключові слова*: пропускна здатність русла та заплави, розподіл осереднених швидкостей.**

Вступ. Проходження високих паводків на передгірських ділянках річок, які завдають значних соціальних і економічних збитків народному господарству, державі та населенню, спонукають до необхідності проведення досліджень із визначення впливу гідравлічних параметрів потоку, шорсткості дна на пропускну здатність русла та заплави.

Питаннями дослідження пропускної здатності русла займались відомі вчені: М.А. Веліканов, Г.В. Железняков, Ф. Форхгеймер, М. Еглі та ін. [1; 2].

Передгірські ділянки річок мають поздовжні уклони дна в межах *0,0002...0,01* і характеризуються великим коефіцієнтом шорсткості. Глибини потоку в паводок досягають *1,5...3,0 м* і більше, а швидкості – *1,5...3,0 м/с*. Числа Фруда змінюються в межах *0,2...0,5* [3; 4; 5]. Дослідженнями руху води в цій області займалися М.М. Павловський, В.М. Гончаров, Й.І. Агроскін та ін.

Однак, необхідно відмітити, що на даний час немає єдиного загально визначеного наукового підходу щодо визначення пропускної здатності русла та заплави при різних значеннях шорсткості дна. Існуючі теоретичні методи базуються на суттєвих спрощеннях і частково чи повністю не враховують цілу низьку діючих факторів.

Одним з необхідних завдань для розробки методики визначення пропускної здатності русла і заплави при різних шорсткостях дна є удосконалення методів гідравлічного розрахунку пропускної здатності з врахуванням кінематичної структури потоку в руслі та на заплаві.

Метою гідравлічних досліджень є вивчення впливу гідравлічних параметрів потоку на пропускну здатність русла та заплави.

З метою обґрунтування і реалізації поставленої задачі була складена блок-схема досліджень (рис. 1).

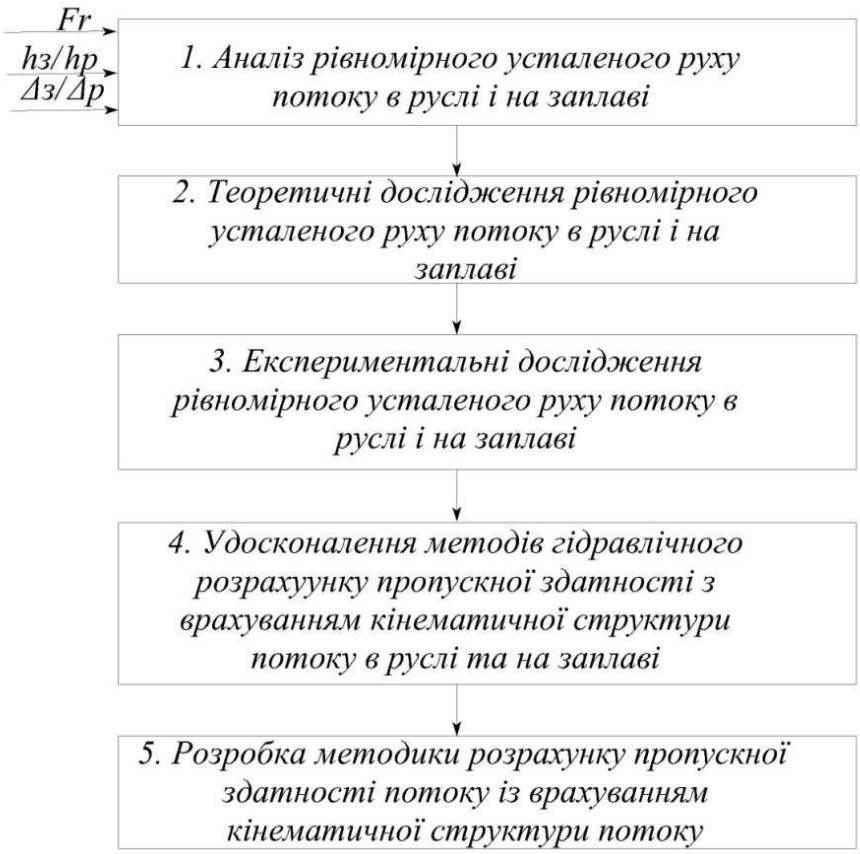

Рис. 1. Блок-схема досліджень: Fr – число Фруда; h_p – глибина в руслі, м; $h_з$ – глибина на заплаві, м; Δ_p – висота виступів шорсткості в руслі, м.; $\Delta_з$ – висота виступів шорсткості на заплаві

Лабораторні дослідження основних параметрів гідравлічних процесів водного потоку русел в період паводка, на відміну від натурних (проведення яких в польових умовах не завжди можливе), дозволяють виконати експерименти в необхідному діапазоні їх зміни. Крім цього, точність експерименту в лабораторних умовах значно вища, ніж в натурних.

Експериментальні гідравлічні дослідження проводили в лабораторії кафедри гідротехнічного будівництва Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП) в дзеркальному лотку. Загальна довжина лотка складає 38,8 м, ширина 1,0 м і висота бокових стінок 1,0 м (рис. 2).

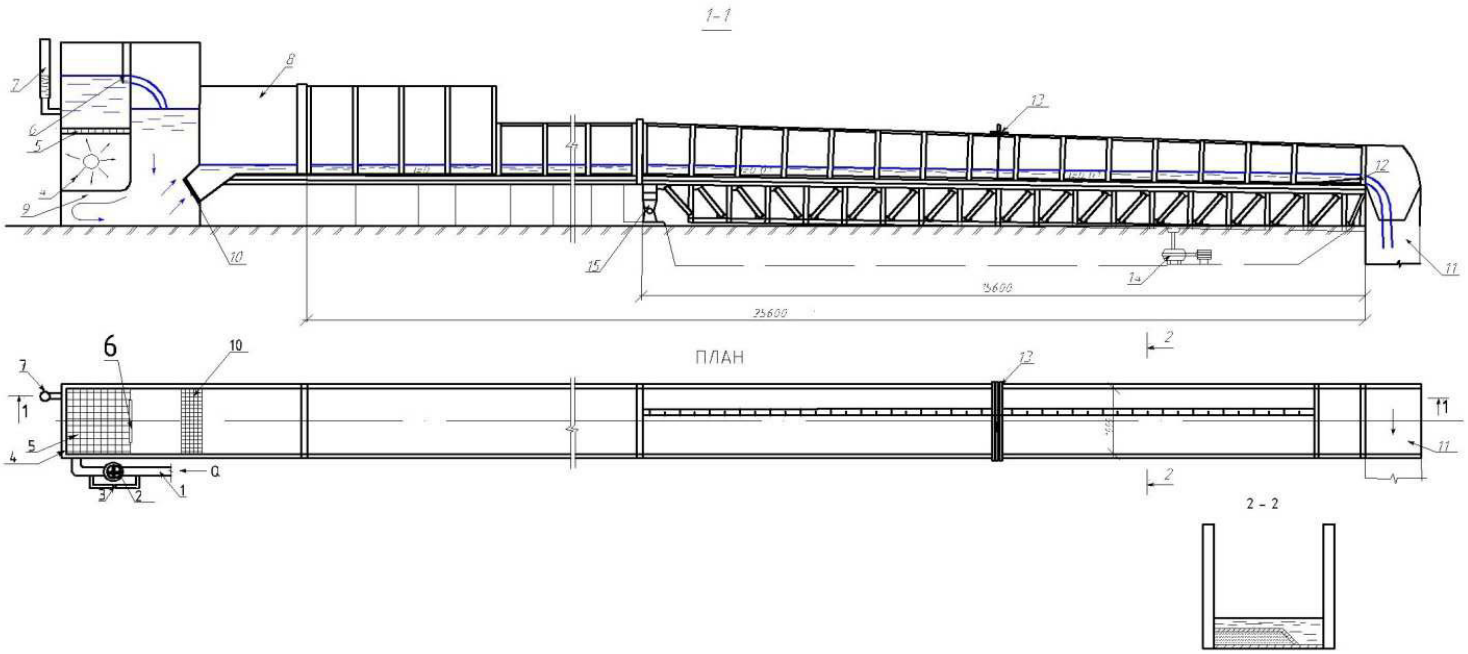

Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – трубопровід для подачі води в лотік з напірного баку насосної станції; 2 – засувка для грубого регулювання витрати води; 3 – засувка для точного регулювання витрати води; 4 – напірний бак; 5 – решітка для гасіння енергії потоку в напірному баку; 6 – мірний трикутний водозлив; 7 – п'єзометр мірного трикутного водозливу; 8 – дзеркальний лотік; 9 – камера для гасіння енергії падаючого потоку; 10 – решітка для гасіння енергії потоку при вході в дзеркальний лотік; 11 – зливна траншея; 12 – клапанний затвор для забезпечення нормальної глибини; 13 – каретка з тастером і вертушкою; 14 – пристрій для встановлення уклону лотка (гвинтовий домкрат); 15 – шарнір

Лотік складається з двох ділянок. Перша ділянка (стаціонарна) довжиною 23,2 м з нульовим уклоном дна. Друга ділянка (рухома), довжиною 15,6 м, розміщена на металевій фермі, яка опирається на опорний шарнір і, за допомогою підйомників може змінювати уклон дна *i*. Бокові стінки лотка виконано з скла. Нерухома ділянка лотка з'єднана з рухомою за допомогою спеціальної гідроізоляційної гуми. Дно лотка опоряджено цементно-піщаним розчином абсолютна висота виступів шорсткості (Δ=0,0012 м) [6]. В кінці лотка влаштовано металевий клапанний затвор для регулювання глибини потоку.

Подачу води в лоток здійснювали по трубопроводу з напірного баку гідротехнічної лабораторії. Витрату води Q контролювали за допомогою мірного трикутного водозливу. Після водозливу вода проходила через систему гасників, які забезпечували рівномірне надходження води в лотік.

При першій серії експериментів, результати якої представлено, на рухомій ділянці лотка дно русла і заплави покривалось цементно-піщаним розчином (жорстка модель). Друга серія експериментів передбачає покриття крихтою чи щебенем (розмивні моделі) відповідної фракції в залежності від виду шорсткості дна, яке підлягає моделюванню.

Відліки фізичної поверхні дна, водного потоку в прийнятих створах лотка вимірювали за допомогою тастера, закріпленого на рухомій каретці (рис. 3).

Рис. 3. Вид лотка та тастера, закріпленого на рухомій каретці

Вимірювання осереднених швидкостей в заданих точках потоку виконувалось мікровертушкою Х-6 з перетворювачем числа його обертів.

На основі аналізу апріорної інформації було визначено межі основних діючих факторів потоку на передгірських ділянках річок: розрахункової висоти виступів шорсткості дна, чисел Фруда та нормальних глибин. Визначена область натурних досліджень і за способом О.П. Зегжди прийнято остаточно масштаб моделі $M_l = 40$ (рис. 4).

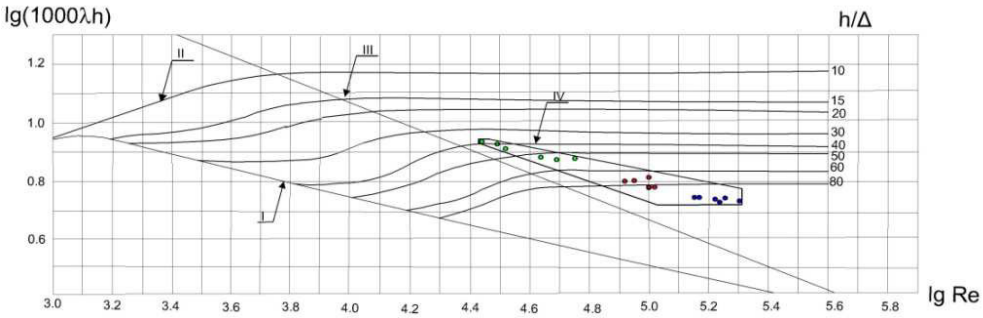

Рис. 4. Графіки залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса і гладкості дна: *I* – турбулентний режим (область гладких стінок в лотку, $lg(\lambda_h 10^3)$) за формулою О.П. Зегжди; *II* – турбулентний режим (перехідна область та область шорстких стінок в лотку $lg(\lambda_h 10^3)$) за даними О.П. Зегжди; *III* – нижнє граничне значення числа Рейнольдса для автомодельної області квадратичного опору; *IV* – область реалізації плану експерименту

На графіку Зегжди, залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса і гладкості дна приведено область досліджень реалізації плану експерименту.

Аналіз графіку показав, що всі точки прийнятого плану експерименту на моделі знаходяться в автомодельній області квадратичного опору при масштабі моделі $M_l = 40$.

Теоретичні дослідження В основу теоретичних досліджень було покладено універсальну двошарову модель І.К. Нікітіна (рис. 5) [7], яка дає можливість будувати профілі осереднених та пульсаційних швидкостей. Згідно двохшарової моделі турбулентного руху в потоці існує пристінний шар товщиною δ з лінійним розподілом швидкостей, що плавно спрягається з логарифмічним профілем турбулентного ядра.

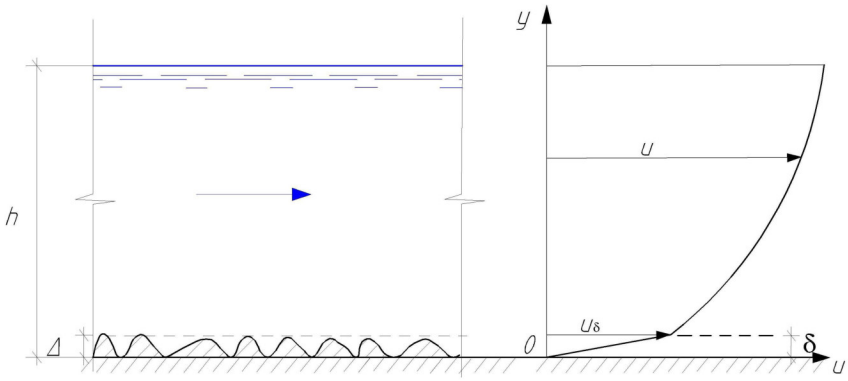

Рис. 5. Двошарова модель потоку при режимі з повним проявом шорсткості ($\delta = \Delta$)

Профіль швидкості для пристінного шару $0 \le y \le \delta$ завжди лінійний і визначається за залежністю

$$u = u_{*\delta}\, Re_{*\delta} \frac{y}{\delta}, \tag{1}$$

де $u_{*\delta}$ – динамічна швидкість, м/с; $\mathrm{Re}_{*\delta}$ – коефіцієнт пропорційності товщини пристінного шару; y – координата точки по вертикалі, м; δ – товщина пристінного шару, м.

Для турбулентного ядра $\delta \le y \le h$ профіль швидкості визначається за залежністю

$$u = u_{*\delta}\, \mathrm{Re}_{*\delta}\left(1{,}15 \lg \frac{y}{\delta} + 1{,}5 - 0{,}5\frac{\delta}{y}\right). \tag{2}$$

Для розрахунку шорсткій області квадратичного опору, яке характерне для передгірських ділянок річок І.К. Нікітін рекомендує рівняння

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_h}} = \mathrm{Re}_{*\delta\infty}\left(0{,}813 \lg \frac{h}{\delta} + 0{,}706\right). \tag{3}$$

де λ_h – коефіцієнт гідравлічного опору; h – глибина потоку, м.

Згідно з [7], доведена тотожність розрахункової висоти виступів шорсткості Δ (залежність О.П. Зегжди) товщині пристінного шару δ у режимі з повним проявом шорсткості в двошаровій моделі І.К. Нікітіна. В результаті було визначено динамічну швидкість $u_{*\delta}$

$$u_{*\delta} = q \Big/ \left(Re_{*\delta\infty}\left(\frac{\Delta}{2} + \frac{1{,}15}{ln10}\left(h\, ln\frac{h}{\Delta} + \Delta - h\right) + 1{,}5(h-\Delta) + 0{,}5\Delta\, ln\frac{\Delta}{h}\right)\right). \tag{4}$$

Використовуючи рівняння двошарової моделі, нами було отримано залежність для визначення питомої витрати потоку, яке може бу-

ти застосоване як в руслі, так і на заплаві:

$$q = u_{*\delta}\, Re_{*\delta} \frac{\Delta}{2} + u_{*\delta}\, Re_{*\delta} \left(\frac{1{,}15}{ln10} \left(h\, ln \frac{h}{\Delta} + \Delta - h \right) + 1{,}5(h - \Delta) + 0{,}5\Delta\, ln \frac{\Delta}{h} \right). \quad (5)$$

На основі (5), отримано залежність відношення питомої витрати на заплаві і в руслі від співвідношення глибин для першої серії експериментів

$$\frac{q_з}{q_p} = f\left(\frac{h_з}{h_p}; \frac{\Delta_з}{\Delta_p} \right); \qquad \frac{q_з}{q_p} = \left(\frac{h_з}{h_p} \right)^k, \text{ при } \frac{\Delta_з}{\Delta_p} = 1, \quad (6)$$

де $q_з$ – питома витрата на заплаві; q_p – питома витрата в руслі; $h_з$ – глибина потоку на заплаві, м; h_p – глибина потоку в руслі, м, *k* – показник степеня.

При виконанні експериментальних досліджень було застосовано математичне планування експерименту, що дало можливість обрати оптимальний об'єм експериментальних робіт і забезпечити статистичні вимоги. Перед проведенням експериментальних досліджень була складена матриця планування експериментів, яка наведена в таблиці.

Основними діючими факторами були прийняті число Фруда, глибина потоку в руслі.

Структуру потоку визначали шляхом побудови епюр осереднених швидкостей. Значення осереднених швидкостей визначали за допомогою поверхневих поплавків та мікровертушки.

При визначенні швидкостей за допомогою мікровертушки, за рекомендацією І.К. Нікітіна, був застосований статистичний метод, який полягав у тому, що повторні значення визначали за допомогою зміни положення вертикалі в плані.

Отримані експериментальні точки апроксимовані залежностями з надійністю 95%.

У результаті проведених експериментальних досліджень визначено межі основних діючих факторів потоку на передгірських ділянках річок: розрахункову висоту виступів шорсткості, число Фруда та нормальну глибину потоку. За способом О.П. Зегжди, остаточно прийнято масштаб моделі рівний $M_l = 40$, який забезпечує реалізацію плану експерименту в автомодельній зоні квадратичного опору. На основі двошарової моделі І.К. Нікітіна, було отримано залежності для визначення питомої витрати потоку. Також отримано залежність відношення питомої витрати на заплаві і в руслі від співвідношення

глибин, у випадку однакової шорсткості на заплаві і в руслі та підтверджено її адекватність з довірчою ймовірністю 95%.

Таблиця

Матриця планування експериментальних досліджень

Кодовані значення факторів		Натуральні значення факторів		Вихідні параметри		
		Число Фруда	Глибина в руслі	Середня швидкість	Коефіцієнт гідравлічного опору	Уклон
X_1	X_2	Fr	h	V, м^2/с	λ	$I_{розрах.}$
1	2	3	4	5	6	7
1	1	0,8	0,250	1,40	0,0055	0,0022
1	0	0,8	0,230	1,34	0,0056	0,0022
1	-1	0,8	0,210	1,28	0,0057	0,0023
0	1	0,5	0,250	1,11	0,0055	0,0014
0	0	0,5	0,230	1,06	0,0056	0,0014
0	-1	0,5	0,210	1,01	0,0057	0,0014
-1	1	0,2	0,250	0,70	0,0055	0,0005
-1	0	0,2	0,230	0,67	0,0056	0,0006
-1	-1	0,2	0,210	0,64	0,0057	0,0006

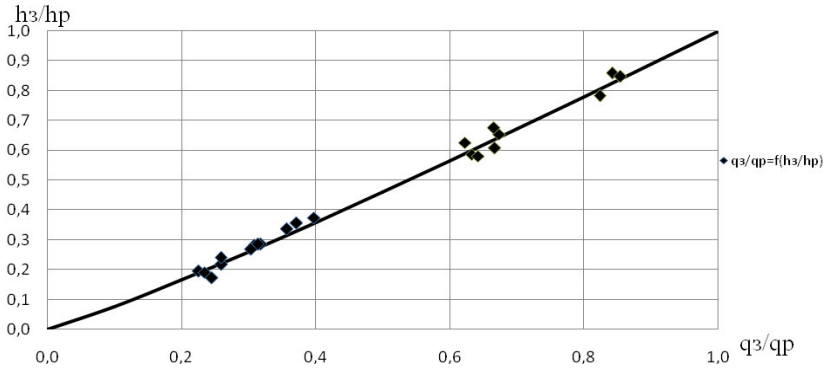

Рис. 6. Графік залежності відношення питомої витрати на заплаві та в руслі від співвідношення глибин

1. Борышников Н. Б. Гидравлические сопротивления речных русел / Н. Б. Борышников. – СПб. : изд. РГГМУ, 2003. – 147 с. **2.** Железняков Г. В. Про-

пускная способность русел каналов и рек / Г. В. Железняков. – Л. : Гидрометеоиздат, 1981. – 309 с. **3**. ВБН В.2.4-33-2.3-03-2000. Регулювання русел річок. Норми проектування. – К. : Держводгосп України, 2000 – 150 с. **4**. Расчет устойчивых аллювиальных русел горных рек при проектировании гидротехнических сооружений: методические указания/ Киргизский научно-исследовательский институт водного хозяйства. – М. : «Колос», 1972. – 66 с. **5**. Проектирование регуляционных сооружений на реках Карпат: методические рекомендации / Украинский ордена дружбы народов институт инженеров водного хозяйства. – Киев, 1991. – 150 с. **6**. Гиляров И. П. Моделирование речных потоков / И. П. Гиляров. – Л. : Гидрометеоиздат, 1973. – 200 с. **7**. Ясінська Л. Р. Удосконалення методів гідравлічного розрахунку параметрів донних порогів на передгірських ділянках річок : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.16 "Гідравліка інженерна та гідрологія" / Л. Р. Ясінська. – Рівне, 2014. – 22 с.

Рецензент: д.т.н., професор Щодро О. Є. (НУВГП)

Khlapuk M. M., Doctor of Engineering, Professor, Yasinska L. R., Candidate of Engineering, Engineer, Feshchenko L. V., Post-graduate Student (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

INFLUENCE OF THE STREAM FLOW HYDRAULIC PARAMETERS ON THE BED AND FLOODPLAIN DISCHARGE CAPACITY ON THE FOOTHILL AREAS OF THE RIVERS

The article presents theoretical and experimental studies of the stream water hydraulic parameters influence on the river bed on floodplain specific charge and average velocity.
***Keywords*: discharge capacity of the river bed and floodplain, average velocities distribution.**

Хлапук Н. Н., д.т.н., профессор, Ясинская Л. Р., к.т.н., инженер, Фещенко Л. В., аспирант (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ВЛИЯНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ РУСЛА И ПОЙМЫ НА ПЕРЕДГОРНЫХ УЧАСТКАХ РЕК

В статье представлены экспериментальные исследования влияния гидравлических параметров водного потока на удельный расход воды и осредняющую скорость в русле и на пойме.
***Ключевые слова*: пропускная способность русла и поймы, распределение осредненных скоростей.**