

УДК 672.42; 627.512

Ясінська Л. Р., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ РІВНОМІРНОГО ВОДНОГО ПОТОКУ НА ПЕРЕДГІРСЬКИХ ДІЛЯНКАХ РІЧОК

В статті дано характеристику основних параметрів рівномірного водного потоку на передгірських ділянках річок. Розкрито за допомогою двохшарової моделі структура водного потоку шляхом побудови епюр розподілу осереднених та миттєвих пульсаційних швидкостей по його глибині.

Ключові слова: передгірські ділянки річок, двохшарова модель водного потоку, осереднені та миттєві пульсаційні швидкості.

Вступ. Повені та паводки, які часто проходять на річках Українських Карпат, завдають великих збитків народному господарству держави та населенню цього регіону. Паводки – це звичні природні явища для Карпатського регіону, але виникають вони раптово, їх складно передбачити. Здійснення протипаводкового захисту населених пунктів, територій і об'єктів від руйнування є актуальною проблемою. На сьогодні поширеними методами протипаводкового захисту на річках Українських Карпат є регулювання русел за допомогою гідротехнічних регуляційних споруд [1]. Даними питаннями регулювання русел займалися В.Ф. Талмаза, А.Н. Крошкін, Я.І. Каганов, І.І. Кірієнко та ін.

Передгірські ділянки річок розташовуються на виході річок з гір і характерні тим, що мають в часі змінний водний режим, який може призвести до значних деформацій русла. Деформаційні процеси виникають тільки під час проходження паводків та повеней. Ці ділянки 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 $0,2...0,5$ [2,3,4].

Метою гідравлічних досліджень є вивчення структури водного потоку на передгірських ділянках річок під час проходження паводків, що є основою для визначення структури твердого стоку і прогнозування деформацій русла. Вивчення структури водного потоку можливо лише на основі детальних лабораторних експериментальних досліджень.

Експериментальна установка. Експериментальні гідравлічні дослідження проводили в лабораторії кафедри гідротехнічних споруд 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. 1).

Лоток 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 i , 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 (коефіцієнт шорсткості $n=0,013$, абсолютна висота виступів шорсткості $\Delta=0,0012$ м [5]). 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.

Результати дослідження гідравлічних параметрів водного потоку та їх аналіз. Перед проведенням основних експериментальних досліджень було виконано тарування рухомої ділянки лотка, з метою встановити в яких діапазонах можуть змінюватись значення гідравлічних параметрів потоку під час дослідів, виходячи з конкретних геометричних розмірів лотка та потужності насосної станції. Досліди виконувались при максимальній витраті і глибинах, які наведені в табл. 1. Нахил лотка підбирався експериментально. Числа Фруда і Рейнольдса та коефіцієнт гідравлічного опору визначали за залежностями

$$Fr = \frac{V^2}{gh} = \frac{Q^2}{gb^2h^3}, \quad (1)$$

$$Re_h = \frac{Vh}{\nu}, \quad (2)$$

$$\lambda_h = \frac{2ghi}{V^2}, \quad (3)$$

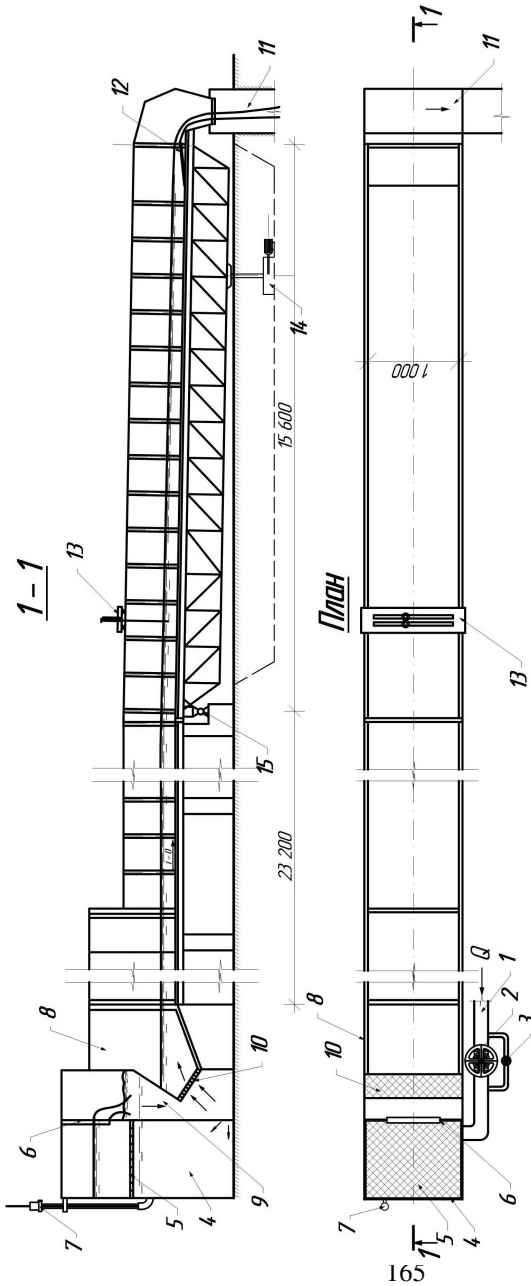


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – трубопровід для подачі води в лотік; 2 – засувка для грубого регулювання витрати води; 3 – засувка для точного регулювання витрати води; 4 – напірний бак; 5 – решітка для гасіння енергії потоку в напірному баку; 6 – мірний трикутний водозлив; 7 – пізометр 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 гастером і вертушкою; 14 – пристрій для встановлення уклону лотка; 15 – шарнір

де h – нормальна глибина потоку, м; b – ширина лотка, $b=1$ м; V – середня швидкість потоку, м/с; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; g – прискорення сили тяжіння, $g=9,81$ м/с²; i – уклон дна лотка.

Таблиця 1

Діапазон досліджених гідравлічних параметрів потоку в лотку

Q_{max} л/с	h , м	i	h/Δ	Fr	$Re_h \cdot 10^{-3}$	$\lambda_h \cdot 10^3$
130	0,075	0,01613	62,5	4,10	114,3	7,90
130	0,150	0,00159	125,0	0,51	113,9	6,23
130	0,500	0,00003	416,7	0,01	114,3	4,35

На рис. 2 наведено графіки залежності коефіцієнта гідравлічного опору модельного русла від числа Рейнольдса та гладкості дна за даними А.П. Зегжда [5, 6]. На цьому рисунку також показано графіки зміни коефіцієнта гідравлічного опору дзеркального лотка від числа Рейнольдса для глибин 0,075 м, 0,150 м і 0,500 м, що відповідають гладкості дна лотка 62,5, 125 і 416,7. На основі аналізу графіків видно, що в дзеркальному лотку можна проводити дослідження потоків для перехідної та квадратичної областей турбулентного режиму.

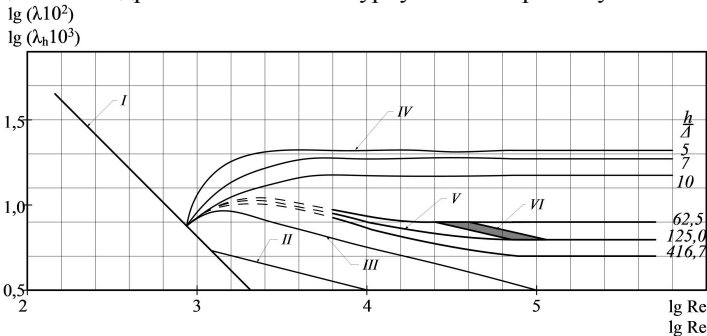


Рис. 2. Графіки залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса та гладкості поверхні: I – ламінарний режим в трубах, $\lg(\lambda \cdot 10^2)$ за даними Нікурадзе; II – турбулентний режим (область гладких труб, $\lg(\lambda \cdot 10^2)$) за формулою Блазіуса; III – турбулентний режим (область гладких стінок в лотку, $\lg(\lambda_h \cdot 10^3)$) за формулою А.П. Зегжда; IV – турбулентний режим (перехідна область та область шороховатих стінок в лотку $\lg(\lambda_h \cdot 10^3)$), за даними А.П. Зегжда; V – турбулентний режим (перехідна область та область шороховатих стінок в дзеркальному лотку, $\lg(\lambda_h \cdot 10^3)$), за даними автора; VI – область реалізації плану експерименту

На основі аналізу результатів натурних спостережень передгірських ділянках річок, вивчення нормативної та проектної документації

було визначено межі основних діючих факторів потоку, які є визначальними при прогнозуванні розмивів дна, його руйнівної та транспортуючої спроможності. Умови гідравлічних досліджень структури водного потоку на передгірських ділянках річок для природи наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Умови гідравлічних досліджень параметрів потоку для природи

Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральний вид	кодований вид	-1	0	+1	
Число Фруда	X_1	0,20	0,35	0,50	0,15
Нормальна глибина, м	X_2	1,50	2,25	3,00	0,75

Матриця дослідження та вихідні параметри потоку для натурних умов (V – швидкість потоку, q – питома витрата, L – довжина ділянки моделювання) наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Матриця дослідження і вихідні параметри потоку для натурних умов

№ п/п досліді	Кодовані значення факторів		Натуральні значення факторів		Гідравлічні параметри потоку		
	X_1	X_2	Fr	$h, м$	$V, м/с$	$q, м^2/с$	$L, м$
1	+1	+1	0,5	3,0	3,8	11,5	300
2	+1	-1	0,5	1,5	2,7	4,1	300
3	-1	+1	0,2	3,0	2,4	7,3	300
4	-1	-1	0,2	1,5	1,7	2,6	300

В результаті проведених розрахунків та їх аналізу, й з врахуванням діапазону досліджених гідравлічних параметрів потоку лотка, остаточно було прийнято моделювання за спотвореним вертикальним масштабом.

В таблиці 4 наведено матрицю планування експерименту та вихідні параметри, які можливо відтворити в дзеркальному лотку при лінійному вертикальному масштабі $M_H=20$ і лінійному плановому масштабі $M_T=30$.

Під час виконання експериментів встановлювали відповідні витрати і уклони дна, які забезпечували прийнятні, згідно матриці планування, числа Фруда та нормальні глибини. За результатами гідравлічних досліджень було визначено швидкості по вертикалі, які заміряли за допомогою мікровертушки, а також поверхневі швидкості, що визначали за допомогою поплавків.

Таблиця 4

Матриця планування експерименту та вихідні параметри для моделі

№ з/п	Кодовані значення факторів		Значення факторів для моделі		Гідрравлічні параметри потоку для моделі		
	X_1	X_2	Fr	$h, м$	$V, м/с$	$q, м^2/с$	$L, м$
1	+1	+1	0,5	0,150	0,860	0,129	10
2	+1	-1	0,5	0,075	0,600	0,045	10
3	-1	+1	0,2	0,150	0,540	0,081	10
4	-1	-1	0,2	0,075	0,387	0,029	10

Значення осереднених швидкостей було апроксимовано універсальною двошаровою моделлю І.К. Нікітіна [7]. Згідно цієї моделі потік складається з пристінного шару та турбулентного ядра. Пристінний шар товщиною δ з лінійним розподілом швидкостей плавно спряжується з логарифмічним профілем турбулентного ядра.

Профіль швидкості для пристінного шару $0 \leq y/\delta \leq 1$ завжди лінійний і його розраховують за залежністю:

$$\frac{u}{u_{*\delta}} = Re_{*\delta} \frac{y}{\delta}, \quad (4)$$

де $Re_{*\delta}$ – коефіцієнт пропорційності, що визначає товщину пристінного шару, $Re_{*\delta} = Re_{*\delta\infty} / \psi(h/\delta)$; $Re_{*\delta\infty}$ – параметр, який дорівнює граничному значенню $Re_{*\delta}$ в потоках з $h/\delta \rightarrow \infty$ при великих значеннях Re , у нашому випадку $Re_{*\delta\infty} = 5,24$ при умові $\delta = \Delta = 0,0012$ м, y – ордината глибини потоку, динамічна швидкість $u_{*\delta} = 0,0552u_{cp}$; u_{cp} – середня швидкість потоку.

Величина $\psi(h/\delta)$, яка враховує зміну $Re_{*\delta}$ від відношення h/δ визначають за залежністю

$$\psi(h/\delta) = (1 - \delta/h)^2 \left[1 + \frac{0,5 \delta/h}{(1 - \delta/h)(1,15 \lg h/\delta + 1)} \right]. \quad (5)$$

Для турбулентного ядра $1 \leq y/\delta \leq h/\delta$ профіль швидкості визначають за залежністю

$$\frac{u}{u_{*\delta}} = Re_{*\delta} \left(1,15 \lg \frac{y}{\delta} + 1,5 - 0,5 \frac{\delta}{y} \right). \quad (6)$$

Товщину пристінного шару δ визначають з рівняння

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_h}} = Re_{*\delta\infty} \left(0,813 lg \frac{h}{\delta} + 0,706 \right). \quad (7)$$

Максимальні складові пульсаційних швидкостей $\sqrt{(u')_m^2}$ та $\sqrt{(v')_m^2}$ розраховували за залежностями

$$\sqrt{(u')_m^2} = u_{*\delta} \left\{ -0,5 lg \left[lg (\lambda_h \cdot 10^3) \right] + 1,36^2 \right\}; \quad \sqrt{(v')_m^2} = 1,05 u_{*\delta}. \quad (8)$$

В табл. 5 наведено розрахункові значення основних параметрів двохшарової моделі для реалізованого плану експерименту.

Таблиця 5

Розрахункові параметри двохшарової моделі

X_1	X_2	$\lambda_h \cdot 10^3$	$\delta, м$	$Re_{*\delta}$	$\psi(h/\delta)$	$u_{*\delta}, м/с$	$\sqrt{(u')_m^2}, м/с$	$\sqrt{(v')_m^2}, м/с$
+1	+1	6,3	0,0012	5,24	0,989	0,048	0,134	0,050
+1	-1	7,8	0,0012	5,24	0,979	0,038	0,090	0,036
-1	+1	6,3	0,0012	5,24	0,989	0,030	0,085	0,032
-1	-1	7,8	0,0012	5,24	0,979	0,024	0,057	0,022

Розрахункові профілі складових турбулентних пульсаційних швидкостей $\sqrt{(u')^2}$ і $\sqrt{(v')^2}$ відповідно по осях x і y визначали за залежностями

$$\sqrt{(u')^2} = \sqrt{(u')_m^2} \left[0,25 + \frac{0,21}{0,28 + \frac{y-\delta}{h-\delta}} \right], \quad \delta < y < h,$$

$$\sqrt{(u')^2} = \sqrt{(u')_m^2} y/\delta, \quad 0 < y < \delta, \quad (9)$$

$$\sqrt{(v')^2} = \sqrt{(v')_m^2} \frac{0,677 y/h}{y/h + 0,036} \left[(y/h)^2 - 2,03 y/h + 2,112 \right], \quad 0 < y < h. \quad (10)$$

Епюри осереднених та пульсаційних швидкостей водного потоку представлено на рис. 3, 4 (а, б).

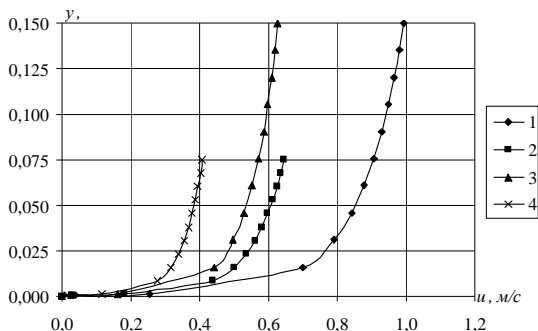


Рис. 3. Профілі осереднених швидкостей для умов: 1 – $Fr=0,5$, $h=0,15$ м; 2 – $Fr=0,5$, $h=0,075$ м; 3 – $Fr=0,2$, $h=0,15$ м; 4 – $Fr=0,2$, $h=0,075$ м

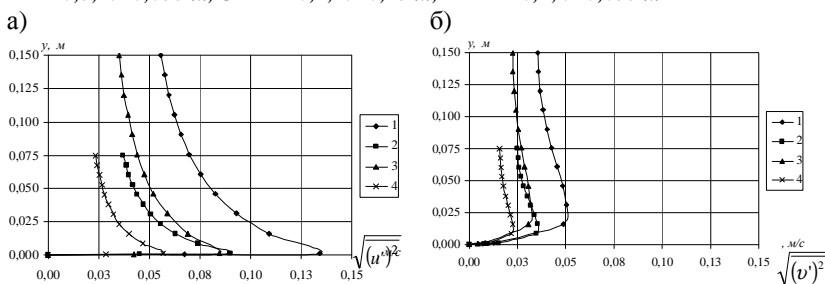


Рис. 4. Профілі складових пульсаційних швидкостей а) $\sqrt{(u')^2}$ та б) $\sqrt{(v')^2}$ для умов: 1 – $Fr=0,5$, $h=0,15$ м; 2 – $Fr=0,5$, $h=0,075$ м; 3 – $Fr=0,2$, $h=0,15$ м; 4 – $Fr=0,2$, $h=0,075$ м

Визначені осереднені і пульсаційні швидкості водного потоку на передгірських ділянках річок є вихідними параметрами для оцінки структури твердого стоку і розмивної спроможності потоку та проектування регуляційних гідротехнічних споруд комплексного протипаводкового захисту.

Висновки

1. На основі аналізу результатів натурних спостережень, нормативної та проектної документації передгірських ділянок річок був визначений діапазон зміни основних гідравлічних параметрів водного потоку, характерних для зазначених ділянок річок.

2. Експериментальні дослідження структури водного потоку на конкретній лабораторній установці дозволили вибрати та обґрунтувати вид моделювання, масштаб моделі та план проведення експерименту.

3. Результати лабораторних досліджень дали можливість визначити основні параметри двохшарової моделі розподілу осереднених та мит-

тевих пульсаційних швидкостей по глибині потоку на моделі і для натурних умов.

4. Отримані експериментальні дані є вихідними для вивчення структури твердого стоку на передгірських ділянках річок та проведення протипаводкових заходів шляхом регулювання русел за допомогою гідротехнічних регуляційних споруд.

1. Обґрунтування напрямків наукового супроводу протипаводкових заходів для регіону Закарпаття / Хлапук М. М., Шинкарук Л. А., Чіпак В. П., Кисіль О. А. // Вісник НУВГП : зб. наук. праць. – 2007. – № 4 (40). Част. 2. – С. 63-73.
2. ВБН В.2.4-33-2.3-03-2000. Регулювання русел річок. Норми проектування. – К. : Держводгосп України, 2000. – 150 с.
3. Расчет устойчивых аллювиальных русл горных рек при проектировании гидротехнических сооружений: методические указания / Киргизский научно-исследовательский институт водного хозяйства. – М. : Колос, 1972. – 66 с.
4. Проектирование регуляционных сооружений на реках Карпат: методические рекомендации / Украинский ордена дружбы народов институт инженеров водного хозяйства. – Киев, 1991. – 150 с.
5. Гиляров Н. П. Моделирование речных потоков / Н. П. Гиляров. – Л. : Гидрометеониздат, 1973. – 600 с.
6. Богомолов А. И. Гидравлика: учебник для вузов / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 1965. – 632 с.
7. Никитин И. К. Сложные турбулентные течения и процессы тепломассопереноса / И. К. Микитин. – К. : Наук. думка, 1980. – 240 с.

Рецензент: д.т.н., професор Хлапук М. М. (НУВГП)

Yasinska L. R., Post-graduate Student (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

THE RESEARCH OF THE STEADY FLOW STRUCTURE OF THE FOOTHILL AREAS OF THE RIVERS

The main parameters of the river flows on the foothill areas are determined in this article. The structure of the flow is disclosed by a two-layer model with the flow diagrams of the averaged and instantaneous velocities distribution in its depth.

Keywords: foothill areas of the rivers, two-layer flow model, the averaged and instantaneous velocities.

Ясинская Л. Р., аспирант (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ РАВНОМЕРНОГО ВОДНОГО ПОТОКА НА ПРЕДГОРНЫХ УЧАСТКАХ РЕК

В статье дана характеристика основных параметров равномерного водного потока на предгорных участках рек. Раскрыта с помощью двухслойной модели структура водного потока путем построения эпюр распределения осредненных и мгновенных пульсационных скоростей по его глубине.

Ключевые слова: предгорные участки рек, двухслойная модель водного потока, осредненные и мгновенные пульсационные скорости.