

ГІДРАВЛІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ВОДНОГО ПОТОКУ НА ПЕРЕДГІРСЬКИХ ДІЛЯНКАХ РІЧОК

Ясінська Л.Р., *аспірант*, Шинкарук Л.А., *к.т.н., доц.*,
Безусяк О.В., *к.т.н., доц.*

*Національний університет водного господарства
та природокористування, Рівне, Україна*

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 і 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, 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, прогнозування деформацій русла. Це можливо виконати 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).

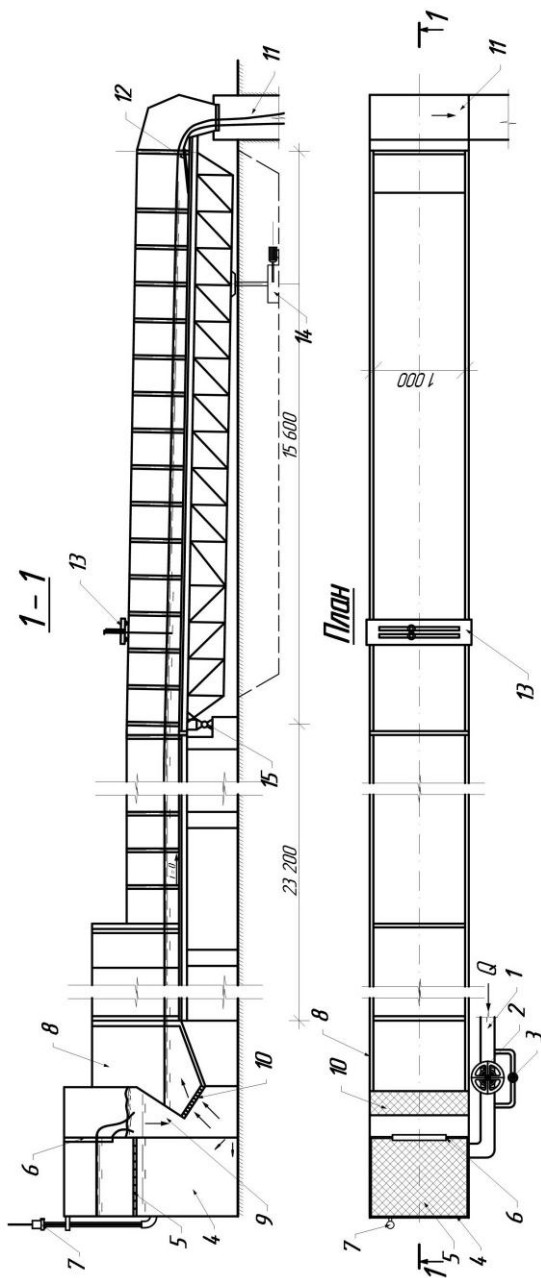


Рис.1. Схема експериментальної установки: 1 - трубопровід для подачі води в лоток; 2 - засувка для грубого регулювання витрати води; 3 - засувка для точного регулювання витрати води; 4 - напірний бак; 5 - рейстка для гасіння енергії потоку в напірному баку; 6 - мірний трикутний водозлив; 7 - п'єзометр мірного трикутного водозливу; 8 - дзеркальний лоток; 9 - камера для гасіння енергії падаючого потоку; 10 - рейстка для гасіння енергії потоку при вході в дзеркальний лоток; 11 - зливна траншея; 12 - клапанний затвор для забезпечення нормальної глибини; 13 - каретка з тастером і вертушкою; 14 - пристрій для встановлення уклону лотка; 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 і. 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, як показали експериментальні дослідження, становить $n=0,013$, а висота виступів шорсткості за рекомендаціями [5] складає $\Delta=0,0012$ м. 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 гідралічних 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 гідралічних параметрів потоку під час дослідів, виходячи з конкретних геометричних розмірів лотка та потужності насосної станції (табл.1).

Числа Фруда та Рейнольдса визначали за залежностями:

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

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

де h – нормальна глибина потоку, м; b – ширина лотка, $b=1$ м; V – середня швидкість потоку, м/с; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, m^2/s ; g – прискорення сили тяжіння, $g=9,81$ м/с².

Таблиця 1

Діапазон досліджених гідралічних параметрів потоку в лотку

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

На рис.2 наведено графіки залежності коефіцієнта опору модельного русла від числа Рейнольдса та гладкості дна за даними А.П.Зегжда

[5,6]. На цьому рисунку також показано графіки зміни коефіцієнта 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.

Коефіцієнт опору визначали за залежністю:

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

де i – уклон дна лотка.

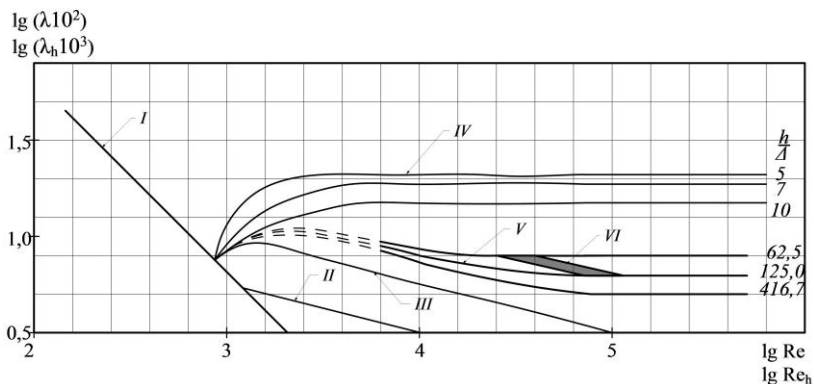


Рис.2. Графіки залежності коефіцієнта опору від числа Рейнольдса та гладкості поверхні: I – ламінарний режим в трубах, $\lg(\lambda 10^2)$) за даними Нікурадзе;

II – турбулентний режим (область гладких труб, $\lg(\lambda 10^2)$) за формулою

Блазіуса; III – турбулентний режим (область гладких стінок в лотку,

$\lg(\lambda_h 10^3)$) за формулою А.П.Зегжда; IV – турбулентний режим (перехідна область та область шорховатих стінок в лотку $\lg(\lambda_h 10^3)$) за даними Зегжда; V – турбулентний режим (перехідна область та область шорховатих стінок в дзеркальному лотку, $\lg(\lambda_h 10^3)$) за даними автора; VI – область реалізації плану експерименту

На рис. 2 видно, що в дзеркальному лотку можна проводити дослідження потоків для перехідної та квадратичної областей турбулентного режиму.

На основі аналізу результатів натурних спостережень передгірських ділянок річок, вивчення нормативної та проектної документації було визначено межі основних діючих факторів потоку (числа Фруда та глибина), які є визначальними при прогнозуванні розмивів дна. його руйнівної та транспортуючої спроможності. Умови гідравлічних досліджень структури водного потоку на передгірських ділянках річок для натури наведено в табл. 2.

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

Таблиця 2

Умови гідравлічних досліджень параметрів потоку для натурн

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

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	V	q	L
				m	m/c	m^2/c	m
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.

За рекомендаціями А.П.Зегжди [5] найбільш правильно базуватися на основних формулах гравітаційної подібності, які задовольняють умові подібності плавновзмінного усталеного руху, тобто моделюванню руслового потоку за формулами:

- масштаб швидкості:

$$M_v = \sqrt{M_H}, \quad (4)$$

- масштаб витрати:

$$M_Q = M_l \cdot M_H^{3/2}, \quad (5)$$

- масштаб уклону:

$$M_l = \frac{M_H}{M_l}, \quad (6)$$

- відношення коефіцієнтів опору для природи і моделі:

$$\frac{\lambda_n}{\lambda_m} = \frac{M_H}{M_l}, \quad (7)$$

- масштаб чисел Рейнольдса:

$$M_{Re} = M_H^{3/2}, \quad (8)$$

де M_H – лінійний вертикальний масштаб; M_l – лінійний плановий масштаб.

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

Таблиця 4

Матриця планування експерименту та вихідні параметри для моделі

№ п/п	Кодовані значення факторів		Значення факторів для моделі		Гідрравлічні параметри потоку для моделі		
	X_1	X_2	Fr	h	V	q	L
				m	m/c	m^2/c	m
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

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

Значення осереднених швидкостей було апроксимовано універсальною двохшаровою 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.

На межі пристінного шару дотичні напруження τ_δ складаються з в'язких і турбулентних напружень:

$$\tau_\delta = \rho \left(\nu \frac{du}{dy} - \overline{u'v'} \right)_\delta, \quad (9)$$

де u' і v' - складові турбулентної пульсації швидкості; ρ - густина води.

Динамічна швидкість на зовнішній границі пристінного шару $y=\delta$ дорівнює:

$$u_{*\delta} = \sqrt{\tau_{\delta}/\rho}. \quad (10)$$

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

$$\frac{u}{u_{*\delta}} = \text{Re}_{*\delta} \frac{y}{\delta}, \quad (11)$$

де $\text{Re}_{*\delta}$ - коефіцієнт пропорційності, що визначає товщину пристінного шару, $\text{Re}_{*\delta} = \text{Re}_{*\delta\infty}/\psi(h/\delta)$; $\text{Re}_{*\delta\infty}$ - параметр, який дорівнює граничному значенню $\text{Re}_{*\delta}$ в потоках з $h/\delta \rightarrow \infty$ при великих значеннях Re , у нашому випадку $\text{Re}_{*\delta\infty}=5,68$ при умові $\delta=\Delta=0,0012$ м, y – ордината глибини потоку [7].

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

$$\psi(h/\delta) = (1 - \delta/h)^2 \left[1 + \frac{0,5 \delta/h}{(1 - \delta/h)(1,151gh/\delta + 1)} \right]. \quad (12)$$

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

$$\frac{u}{u_{*\delta}} = \text{Re}_{*\delta} \left(1,151g \frac{y}{\delta} + 1,5 - 0,5 \frac{\delta}{y} \right). \quad (13)$$

Товщину пристінного шару δ визначають з рівняння:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_h}} = \text{Re}_{*\delta\infty} \left(0,8131g \frac{h}{\delta} + 0,706 \right). \quad (14)$$

Динамічну швидкість визначали методом найменших квадратів шляхом апроксимації експериментальних точок осереднених швидкостей двошаровою аналітичною моделлю І.К.Нікітіна.

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

$$\sqrt{(u')_m^2} = u_{*\delta} \left\{ -0,51g [g(\lambda_h \cdot 10^3)] + 1,36^2 \right\}^{1/2}; \quad \sqrt{(v')_m^2} = 1,05u_{*\delta}. \quad (15)$$

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

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

Таблиця 5

Розрахункові параметри двошарової моделі

X_1	X_2	$\lambda_h \cdot 10^3$	$\delta, \text{ м}$	$Re_{*\delta}$	$\psi(h/\delta)$	$u_{*\delta}, \text{ м/с}$	$\sqrt{\overline{(u')^2}}, \text{ м/с}$	$\sqrt{\overline{(v')^2}}, \text{ м/с}$
+1	+1	6,2	0,00201	5,78	0,982	0,048	0,133	0,050
+1	-1	7,9	0,00200	5,89	0,965	0,038	0,099	0,039
-1	+1	6,2	0,00201	5,78	0,982	0,030	0,084	0,032
-1	-1	7,9	0,00200	5,89	0,965	0,024	0,063	0,025

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

$$\sqrt{\overline{(u')^2}} = \sqrt{\overline{(u')^2}_m} y/\delta, 0 < y < \delta, \quad (16)$$

$$\sqrt{\overline{(v')^2}} = \sqrt{\overline{(v')^2}_m} \frac{0,677y/h}{y/h + 0,036} \left[(y/h)^2 - 2,03y/h + 2,112 \right], 0 < y < h. \quad (17)$$

Епюри осереднених та пульсаційних швидкостей водного потоку, отримані на моделі дали можливість розрахувати аналогічні епюри швидкостей для натурних умов (епюри представлено на рис. 3).

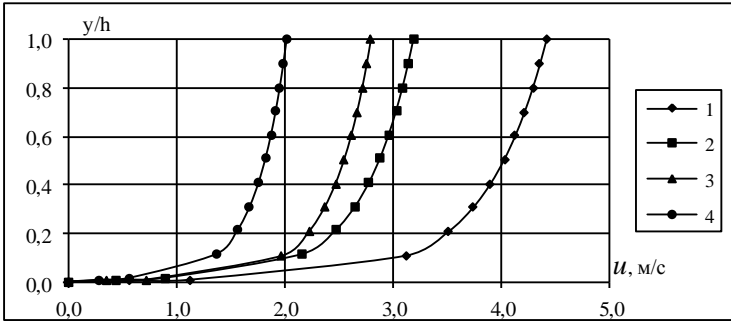
Визначені осереднені і пульсаційні швидкості водного потоку на передгірських ділянках річок є вихідними параметрами для оцінки структури твердого стоку і розмивної спроможності та проектування регуляційних гідротехнічних споруд комплексного протипаводкового захисту [7].

Висновок

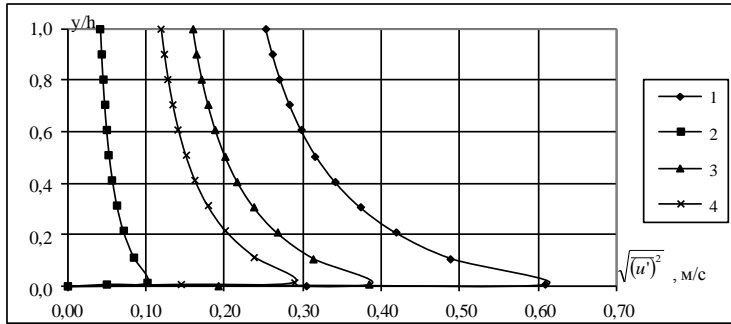
1. На основі аналізу результатів натурних спостережень, нормативної та проектної документації передгірських ділянок річок був визначений діапазон зміни основних гідравлічних параметрів водного потоку, характерних для зазначених ділянок річок.

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

a)



б)



в)

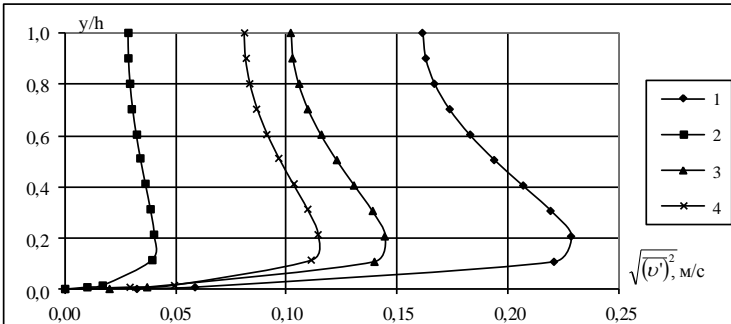


Рис.3. Профілі осереднених швидкостей (а); профілі складових пульсаційних швидкостей для природи: б) $y/h = f(\sqrt{(u')^2})$; в) $y/h = f(\sqrt{(v')^2})$ при умовах: 1 – $Fr=0,5, h=3$ м; 2 – $Fr=0,5, h=1,5$ м; 3 – $Fr=0,2, h=3$ м; 4 – $Fr=0,2, h=1,5$ м

3. Результати лабораторних досліджень дали можливість визначити основні параметри двошарової моделі розподілу осереднених та миттєвих 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.

SUMMARY

The main parameters of the river flows on the foothill areas are determined for this article. The plan of the experimental studies is implemented for this condition. The structure of the flow is disclosed by a two-layer model. The experimental and statistical models for the distribution of the bed sediments by the diameter depending on the transport capacity of the flow are obtained.

Література

1. Хлапук М.М., Шинкарук Л.А., Чіпак В.П., Кисіль О.А. Обґрунтування напрямків наукового супроводу протипаводкових заходів для регіону Закарпаття // 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 – 150с.

3. Расчет устойчивых аллювиальных русел горных рек при проектировании гидротехнических сооружений: методические указания/ Киргизский научно-исследовательский институт водного хозяйства. – М.: «Колос», 1972. – 66с.

4. Проектирование регуляционных сооружений на реках Карпат: методические рекомендации/ Украинский ордена дружбы народов институт инженеров водного хозяйства. – Киев, 1991. – 150с.

5. Моделирование речных потоков/ Гиляров Н.П. – Л: Гидрометеоздат, 1973. – 600с.

6. Богомолов, А. И. Гидравлика: учебник для вузов/ А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – 2-е изд. - М.:Стройиздат.-1965. – 632 с.

7. Сложные турбулентные течения и процессы тепломассопереноса/ Никитин И.К. – К.: Наук. думка, 1980. – 240с.