

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОННИХ ПОРОГІВ НА СТРУКТУРУ ВОДНОГО ПОТОКУ ПЕРЕД НИМИ НА ПЕРЕДГІРСЬКИХ ДІЛЯНКАХ РІЧОК

© Хлапук М.М., Шинкарук Л.А., Ясінська Л.Р., 2013

Визначено вплив донних порогів на зміну глибини потоку перед ними та на положення кривої підпору. Розкрито за допомогою двошарової моделі структуру водного потоку перед донними порогами, побудовою епіюру розподілу осереднених та миттєвих пульсаційних швидкостей.

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

The influence of the bottom sills on the stream depth and the backwater curve position is estimated in this article. The structure of the flow in front of the bottom sills is disclosed by a two-layer model by plotting the diagrams of the averaged and instantaneous fluctuating velocities.

Key words: foothill areas of the rivers, two-layer flow model, the averaged and instantaneous velocities, bottom sill.

Вступ

Здійснення протипаводкового захисту населених пунктів, територій і об'єктів від руйнування є актуальною проблемою. Сьогодні поширеними методами протипаводкового захисту на річках Українських Карпат є регулювання русел за допомогою гідротехнічних регуляційних споруд [1]. 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. Ці ділянки мають поздовжні ухили дна у межах $0,0002...0,01$ і значні коефіцієнти шорсткості. Глибини потоку у паводок досягають $1,5...3,0$ м і більше, а швидкості – $1,5...3,0$ м/с. Числа Фруда змінюються у межах $0,2...0,5$ [2–4].

Донні пороги – це гідротехнічні регуляційні споруди, що використовуються для зменшення розмивних процесів дна та берегів річок під час проходження паводків та повеней [2].

Донні пороги бувають монолітні і збірні. Монолітні бувають у вигляді підпірних стінок з бетону, бутобетону або армобетону. Збірні виконують з армобетону або залізобетону. Також влаштовують габіонні пороги з використанням гнучкої підстилки та кам'яно-хмизові пороги з фашинної кладки.

Досвід будівництва донних порогів показує, що переважно їх висота становить $0,5-3,0$ м, оскільки, за рекомендаціями Херхеулідзе І.І., економічно недоцільно зводити масивні споруди вище $4...5$ м. Зі збільшенням висоти споруд важче забезпечити їхню стійкість і захист русла від розмиву нижче від споруди [5].

Метою гідралічних досліджень є вивчення впливу донних порогів на структуру водного потоку на передгірських ділянках річок під час проходження повеней та паводків, що дасть змогу визначити їх вплив на структуру твердого стоку. Такі дослідження у повному обсязі можливо виконати лише в лабораторних умовах, і, на відміну від досліджень в натурі (в польових умовах), вони дають змогу виконати експерименти у ширшому діапазоні зміни діючих чинників водного

поток, розмірів донного порога тощо. Крім того, точність експериментів у лабораторних умовах значно вища, ніж у натурних умовах.

Експериментальна установка

Експериментальні гідравлічні дослідження проводили у лабораторії кафедри гідротехнічних споруд Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП) у дзеркальному лотку. Загальна довжина лотка становить 38,8 м, ширина – 1,0 м і висота бокових стінок – 1,0 м (рис. 1).

Лоток складається з двох ділянок. Перша ділянка (стаціонарна) завдовжки 23,2 м з нульовим ухилом дна. Друга ділянка (рухома), завдовжки 15,6 м, розміщена на металевій фермі, яка спирається на опорний шарнір і за допомогою підйомників може змінювати ухил дна i . Бокові стінки лотка виконані зі 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 [6]). У кінці лотка влаштовано металевий клапанний затвор для регулювання глибини потоку. На рухомій ділянці лотка був влаштований донний поріг у вигляді дерев'яної балки, просоченої оліфою, розміри якої приймали за умовами дослідження.

Подачу води у лоток здійснювали трубопроводом з напірного бака гідротехнічної лабораторії. Витрату води Q контролювали за допомогою мірного трикутного водозливу. Після водозливу вода проходила через систему гасників, які забезпечували рівномірне надходження води у лоток.

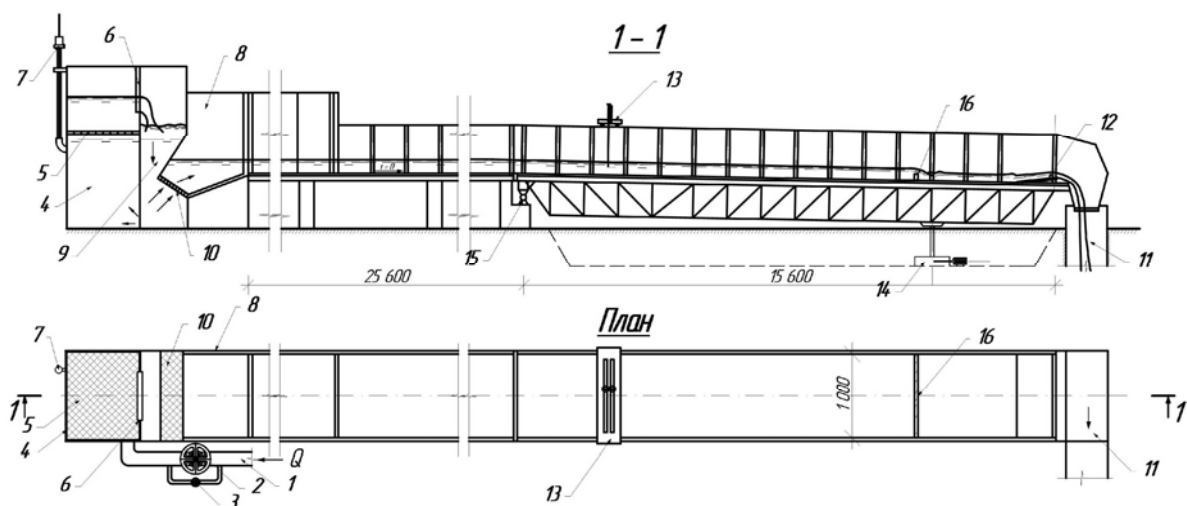


Рис. 1. Схема експериментальної установки:

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 – дерев'яна решітка 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 – дерев'яна решітка 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 ухилу лотка (гвинтовий домкрат); 15 – шарнір; 16 – донний поріг

Умови дослідження гідравлічних параметрів водного потоку та їх аналіз

На основі аналізу апріорної інформації (результатів натурних спостережень на передгірських ділянках річок, нормативної та проектної документації) були визначені межі значень основних діючих чинників (число Фруда, нормальна глибина потоку та висота донного порога), які є визначальними під час дослідження впливу донних порогів на структуру потоку, на його руйнівну спроможність. Умови гідравлічних досліджень структури водного потоку на передгірських ділянках річок за наявності донних порогів для природи (моделі) наведено у табл. 1.

Умови гідравлічних досліджень

Чинники		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральний вид	кодований вид	-1	0	+1	
Число Фруда за нормальної глибини Fr	X_1	0,20	0,35	0,50	0,15
Нормальна глибина h_0 , м	X_2	1,50 (0,075)	2,25 (0,1125)	3,00 (0,150)	0,75 (0,0375)
Висота донного порога p , м	X_3	0,00 (0,000)	1,50 (0,075)	3,00 (0,150)	1,50 (0,075)

Матрицю дослідження та вихідні параметри потоку для моделі наведено у табл. 2.

У результаті проведених розрахунків та їх аналізу і з врахуванням діапазону досліджених гідравлічних параметрів потоку лотка остаточно був прийнятий масштаб моделі $M=20$ [7].

Таблиця 2

Матриця планування експерименту та вихідні параметри для моделі

№ з/п	Кодовані значення чинників			Натуральні значення чинників			Розрахункові гідравлічні параметри потоку	
	X_1	X_2	X_3	Fr	h_0 , м	p , м	h_0 , м	h_{cm} , м
1	+1	+1	-1	0,50	0,150	0,000	0,1500	0,1500
2	+1	-1	-1	0,50	0,075	0,000	0,0750	0,0750
3	-1	+1	-1	0,20	0,150	0,000	0,1500	0,1500
4	-1	-1	-1	0,20	0,075	0,000	0,0750	0,0750
5	+1	+1	0	0,50	0,150	0,075	0,2144	0,2063
6	+1	-1	0	0,50	0,075	0,075	0,1478	0,1365
7	-1	+1	0	0,20	0,150	0,075	0,1899	0,1878
8	-1	-1	0	0,20	0,075	0,075	0,1329	0,1282
9	+1	+1	+1	0,50	0,150	0,150	0,2888	0,2797
10	+1	-1	+1	0,50	0,075	0,150	0,2200	0,2086
11	-1	+1	+1	0,20	0,150	0,150	0,2580	0,2548
12	-1	-1	+1	0,20	0,075	0,150	0,2051	0,1986

Дослідження впливу донних порогів на глибину потоку перед ними та на положення кривої підпору

Під час проведення експериментальних досліджень усталеного рівномірного руху (досліди 1–4) (табл. 2) нормальну глибину потоку згідно з планом експерименту встановлювали витратою води та ухилом дна, і забезпечували по усій довжині лотка сталою за допомогою клапанного затвора [7]. Під час дослідження нерівномірного плавномірного руху, який створювався за рахунок влаштування донних порогів (досліди 5–12), глибина потоку перед ними h_0 у створі $ст.0$ (на відстані $(3\div 5)H$) за тих самих значень чисел Фруда Fr та нормальних глибин h_0 встановлювалась у природний спосіб.

Глибину перед порогом (рис. 2) визначали за рівнянням

$$h_0 = p + H, \quad (1)$$

де p – висота донного порога, м; H – напір на донному порозі, м.

Величину напору на донному порозі (в нашому випадку водозливів з тонкою стінкою) визначали за такою залежністю:

$$H = H_0 - \frac{V^2}{2g}; \quad (2)$$

$$H_0 = \left(\frac{Q}{mb\sqrt{2g}} \right)^{2/3}, \quad (3)$$

де p – висота донного порога, м; H – напір на донному порозі, м; H_0 – напір на донному порозі з врахуванням швидкості підходу, м; Q – витрата води, м³/с; g – прискорення сили тяжіння, $g = 9,81$ м/с²; b – ширина лотка, м; m – коефіцієнт витрати донного порога.

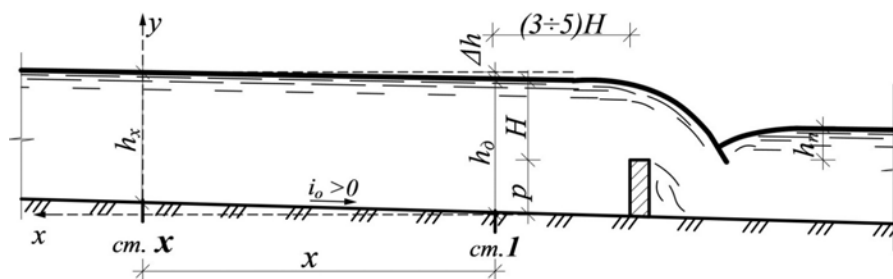


Рис. 2. Схема до визначення глибини потоку перед донним порогом

Коефіцієнт витрати залежить від профілю водозливної стінки, її висоти, напору та режиму роботи водозливу.

У нашому випадку для визначення коефіцієнта витрати невідтопленого водозливу з тонкою стінкою прийнята залежність

$$m = 0,402 + 0,054 \frac{H}{p}. \quad (4)$$

Для побудови кривої підпору перед донним порогом використано основне рівняння вільної поверхні у природних руслах, яке в диференціальній формі має вигляд

$$i_0 dl = dh + d \left(\frac{V^2}{2g} \right) + dh_w, \quad (5)$$

де i_0 – ухил дна ($i_0 > 0$); l – довжина ділянки, м.

Рівняння (5) приводять до вигляду:

$$-dz = d \left(\frac{V^2}{2g} \right) + dh_w, \quad (6)$$

де dz – перепад кривої вільної поверхні на елементарній ділянці dl ; dh_w – загальні гідравлічні втрати напору на елементарній ділянці dl .

Рівняння (4) після математичних перетворень [8,9] приводять до вигляду:

$$-(z_{i+1} - z_i) = \int_i^{i+1} (1 + \zeta) d \left(\frac{\alpha V^2}{2g} \right) + \int_i^{i+1} \frac{V^2}{C^2 R} dl. \quad (7)$$

Розв'язком цього рівняння займались М.М. Павловський, О.М. Рахманов, Чарномський, Хестед, Н.В. Мастицький, Н.М. Бернадський та ін. [8, 9].

У нашому випадку для побудови кривої вільної поверхні прийнято числовий метод Чарномського за рівнянням (8)–(9):

$$\Delta z_{i-(i+1)} = Q^2 \left[\alpha \frac{1 + \bar{\zeta}}{2g} \left(\frac{1}{\omega_{i+1}^2} - \frac{1}{\omega_i^2} \right) + \frac{\Delta l_{i-(i+1)}}{K^2} \right]. \quad (8)$$

де ω_i, ω_{i+1} – площа живого перерізу відповідно у i -му та $(i+1)$ -му створах; \bar{K} – середнє значення модуля витрати на ділянці завдовжки $\Delta l_{i-(i+1)}$; $\bar{\zeta}$ – коефіцієнт опору, що враховує зміну площі живого перерізу, повороту динамічної осі русла тощо ($\bar{\zeta} = 0$ – на ділянках, що звужуються вниз за течією; $\bar{\zeta} = -1$ – на ділянках, що розширюються вниз за течією, знак «-» показує, що відбувається втрата енергії потоку).

Глибину потоку в створі ($cm.x$), що знаходиться на відстані l від створу ($cm.l$), розраховано за залежністю

$$h_x = h_o + \sum_{i=1}^n \left(Q^2 \left[\alpha \frac{1+\bar{\zeta}}{2g} \left(\frac{l}{\omega_i^2} - \frac{l}{\omega_{i+1}^2} \right) + \frac{\Delta l_{i-(i+1)}}{K^2} \right] - i \Delta l_{i-(i+1)} \right). \quad (9)$$

На основі проведених досліджень на експериментальній установці з коефіцієнтом шорсткості дна $n=0,013$ і статистичної обробки їх результатів була підтверджена адекватність рівнянь (1) і (9) за 95 % рівня довірчої імовірності. Розрахункові значення глибин перед порогом h_o і для створу ($cm.7$) h_7 , який знаходиться на відстані 7 м від порога, наведено у табл. 2.

Дослідження впливу донних порогів на зміну структури водного потоку перед ними

Під час виконання експериментів встановлювали відповідні витрати і ухили дна, які забезпечували прийнятті, згідно з матрицею планування, числа Фруда та нормальні глибини. За результатами гідравлічних досліджень були визначені швидкості по вертикалі, які заміряли за допомогою мікровертушки, а також поверхневі швидкості – за допомогою поплавків.

Значення осереднених швидкостей було апроксимовано універсальною двошаровою моделлю І.К. Нікітіна [10]. Згідно з цією моделлю потік складається з пристінного шару та турбулентного ядра. Пристінний шар завтовшки 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

$$\frac{u}{u_{*\delta}} = Re_{*\delta} \frac{y}{\delta}, \quad (10)$$

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 $Re_{*\delta}$ у потоках з $h/\delta \rightarrow \infty$ за великих значень Re ; δ – товщина пристінного шару, м; у нашому випадку (за великих значень Re (табл. 3) [7]) $\delta = \Delta = 0,0012$ м; y – ордината глибини потоку, м; $u_{*\delta}$ – динамічна швидкість, м/с.

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

$$\psi(h/\delta) = (1 - \delta/h)^2 \left[1 + \frac{0,5 \delta/h}{(1 - \delta/h)(1,15 \lg h/\delta + 1)} \right]. \quad (11)$$

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

$$\frac{u}{u_{*\delta}} = Re_{*\delta} \left(1,15 \lg \frac{y}{\delta} + 1,5 - 0,5 \frac{\delta}{y} \right). \quad (12)$$

Товщину пристінного шару δ визначають з рівняння

$$\frac{l}{\sqrt{\lambda_h}} = Re_{*\delta\infty} \left(0,813 \lg \frac{h}{\delta} + 0,706 \right). \quad (13)$$

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

$$\sqrt{(u')_m^2} = u_{*\delta} \left\{ -0,5 \lg [\lg(\lambda_n \cdot 10^3)] + 1,36^2 \right\}^3; \quad \sqrt{(v')_m^2} = 1,05 u_{*\delta}. \quad (14)$$

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

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

$$\sqrt{(u')^2} = \sqrt{(u')_m^2} y/\delta, 0 < y < \delta; \quad (15)$$

$$\sqrt{(v')^2} = \sqrt{(v')_m^2} \frac{0,677y/h}{y/h + 0,036} [(y/h)^2 - 2,03y/h + 2,112], 0 < y < h. \quad (16)$$

Рівняння (10) і (12) включають невідомі параметри $Re_{*\delta}$ і $u_{*\delta}$.

Для визначення цих параметрів були проведені експериментальні дослідження, умови та результати яких наведені у табл. 3 (λ_h – коефіцієнт гідравлічного опору; L – довжина кривої підпору, м).

Таблиця 3

Умови та результати досліджень структури водного потоку

X_1	X_2	X_3	$\lambda_h \cdot 10^3$	$lgRe$	$u_{*\delta}, \text{м/с}$	$\sqrt{(u')_m^2}, \text{м/с}$	$\sqrt{(v')_m^2}, \text{м/с}$	$L, \text{м}$
+1	+1	-1	6,3	5,05	0,048	0,133	0,050	-
+1	-1	-1	7,8	4,60	0,034	0,089	0,035	-
-1	+1	-1	6,3	4,85	0,030	0,084	0,031	-
-1	-1	-1	7,8	4,40	0,021	0,056	0,022	-
+1	+1	0	5,7	5,05	0,033	0,096	0,035	71,0
+1	-1	0	6,4	4,60	0,017	0,047	0,018	51,0
-1	+1	0	5,9	4,85	0,024	0,067	0,025	129,0
-1	-1	0	6,6	4,40	0,012	0,032	0,012	108,0
+1	+1	+1	5,3	5,05	0,025	0,072	0,026	146,5
+1	-1	+1	5,7	4,60	0,011	0,033	0,012	89,0
-1	+1	+1	5,4	4,85	0,017	0,051	0,018	258,0
-1	-1	+1	5,8	4,40	0,008	0,022	0,008	203,0

Аналіз впливу донних порогів на структуру водного потоку

Проведені експериментальні дослідження у прийнятих межах гідравлічних параметрів водного потоку дали можливість виявити якісну картину і визначити кількісну оцінку впливу донних порогів на гідравлічні параметри потоку. На основі експериментальних епюр усереднених швидкостей за рівномірного руху потоку в лотку і нерівномірного (за наявності донних порогів) у створі (см.7) були визначені невідомі параметри $Re_{*\delta}$ і $u_{*\delta}$.

Статистична обробка результатів досліджень показала, що двошарова модель адекватно описує дослідні профілі за $Re_{*\delta} = 5,24$ і відповідних значень динамічної швидкості з 95 % довірчою імовірністю.

На рис. 3 показано графік залежності динамічної швидкості від середньої швидкості для виконаних дослідів.

Аналіз графіка показує, що динамічна швидкість має лінійну залежність від середньої швидкості потоку і описується рівнянням

$$u_{*\delta} = 0,0558 u_{cp}, \quad (17)$$

де u_{cp} – середня швидкість потоку.

Залежності (1), (9), (17) для умов експериментальної установки ($\Delta = 0,0012\text{м}$) дають можливість визначити динамічну швидкість, яка необхідна для побудови профілів осереднених та пульсаційних швидкостей у будь-якому створі перед порогом.

На рис. 4–6 показані профілі осереднених та пульсаційних швидкостей, які розраховані за допомогою двошарової моделі для умов дослідів $x_1 = +1$, $x_2 = +1$ прийнятого плану експерименту у створі (см.7) за відсутності та наявності донних порогів.

Аналіз графіків показує, що під час влаштування донних порогів глибина потоку перед порогом збільшується, а осереднені та пульсаційні швидкості по вертикалі відповідно зменшуються.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дають можливість за допомогою емпіричних осереднених та пульсаційних швидкостей охарактеризувати структуру потоку перед порогом, на будь-якій відстані від нього. Структура водного потоку є визначальною характеристикою під час прогнозування розмивної здатності.

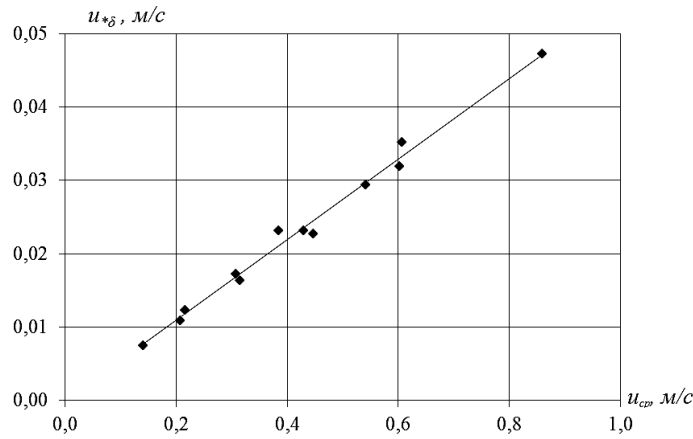


Рис. 3. Графік залежності динамічної швидкості $u_{*δ}$ від середньої швидкості u_{cp}

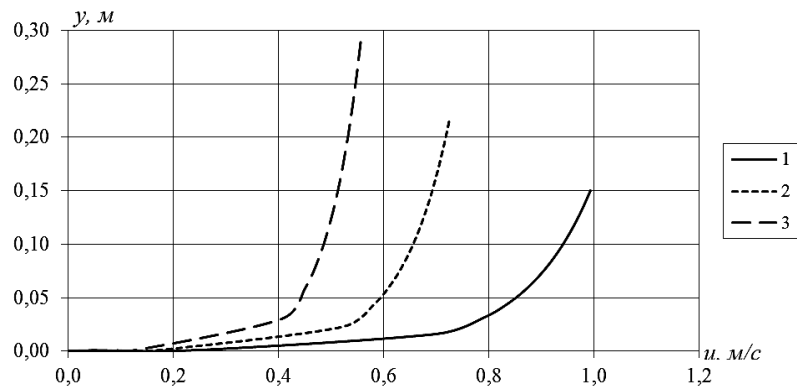


Рис. 4. Профілі осереднених швидкостей за відсутності (1) та за наявності донних порогів заввишки $p=0,075$ м (2) і $p=0,150$ м (3) для умов досліду $x_1=+1$, $x_2=+1$

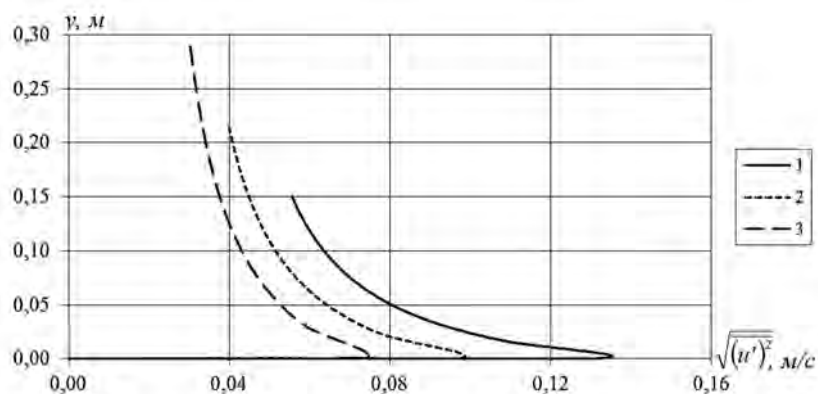


Рис. 5. Профілі пульсаційних швидкостей $\sqrt{(u')^2}$ по осі x за відсутності (1) та за наявності донних порогів заввишки $p=0,075$ м (2) і $p=0,150$ м (3) для умов досліду $x_1=+1$, $x_2=+1$

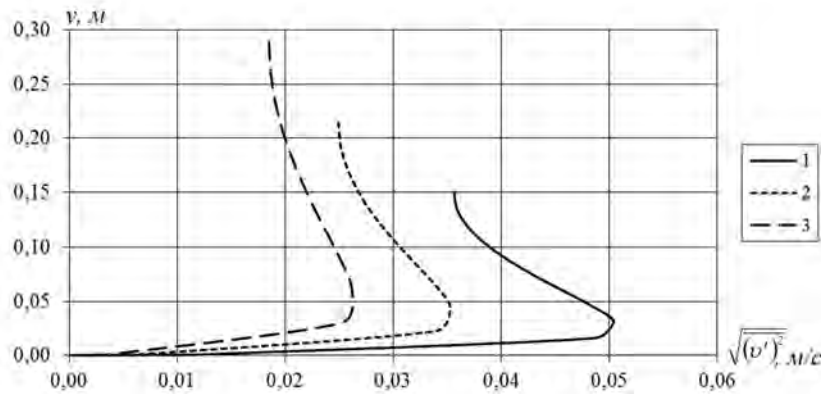


Рис. 6. Профілі пульсаційних швидкостей $\sqrt{(v')^2}$ по осі y за відсутності (1) та за наявності донних порогів заввишки $p=0,075$ м (2) і $p=0,150$ м (3) для умов досліду $x_1=+1$, $x_2=+1$

Висновки:

1. На основі аналізу апріорної інформації (результатів натурних спостережень, нормативної та проектної документації) був визначений діапазон основних гідравлічних параметрів водного потоку та розміри донних порогів.
2. Результати лабораторних досліджень дали можливість визначити вплив донних порогів на зміну глибини потоку перед ними та на положення кривої підпору.
3. На основі статистичної обробки експериментальних даних були визначені основні параметри двохшарової моделі, які дають можливість охарактеризувати за допомогою профілів осереднених та пульсаційних швидкостей структуру водного потоку на будь-якій відстані від порога.
4. Отримані результати є базовими для дослідження впливу донних порогів на розвивну здатність потоку перед ними.

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. пр. – 2007. – № 4 (40), Ч.2. – С. 63–73. 2. Регулювання русел річок. Норми проектування: ВБН В.2.4-33-2.3-03-2000. – К.: Держводгосп України, 2000. – 150 с. 3. Расчет устойчивых аллювиальных русл горных рек при проектировании гидротехнических сооружений: метод. указ. / Киргизский научно-исследовательский институт водного хозяйства. – М.: «Колос», 1972. – 66 с. 4. Проектирование регуляционных сооружений на реках Карпат: метод. реком. / Украинский ордена дружбы народов институт инженеров водного хозяйства. – К., 1991. – 150 с. 5. Херхеулидзе И.И. Сквозные защитные и регулирующие сооружения из сборного железобетона на горных реках / И.И. Херхеулидзе. – М.: Гидрометеиздат, 1967. – 131 с. 6. Гиляров Н.П. Моделирование речных потоков / Н.П. Гиляров. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 600 с. 7. Ясінська Л.Р., Шинкарук Л.А., Безусяк О.В. Гідравлічні дослідження структури водного потоку на передгірських ділянках річок // Вісник ОДАБА: зб. наук. пр. – 2012. – №48, Ч.2. – С.273–282. 8. Богомолов, А. И. Гидравлика: учеб. для вузов / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1965. – 632 с. 9. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселев. – М.: Энергия, 1972. – 316 с. 10. Никитин И.К. Сложные турбулентные течения и процессы теплопереноса / И.К. Никитин. – К.: Наук. думка, 1980. – 240 с.