

**Онищук В. В.**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

**ОЦІНКА ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ РУСЕЛ ГІРСЬКИХ РІЧОК**

**Ключові слова:** пропускна здатність русла, гідравлічний коефіцієнт загального опору русла, руслоформуюча витрата води і транспортувальних наносів

**Актуальність проблеми.** Проходження високих паводків на гірських річках, які завдають значних соціальних і економічних збитків, спонукають до необхідності проведення фундаментальних досліджень стосовно впливу природно-антропогенних факторів на інтенсивність розвитку процесів руслоформування. Відомо, що гідроморфодинамічна стійкість русло-заплавного комплексу визначається характером проходження руслоформуючих витрат води і транспортувальних наносів та впливом динаміко-кінематичного ефекту на темпи формування рельєфу заплави. У теперішній час визначення руслоформуючих витрат води і транспортувальних наносів, при рівнях домірних відміткам руслових брівок (bankfull), якщо не спостерігаються на досліджуваних ділянках незворотних руслових деформацій, а також витрат води і наносів при інших рівнях, зазвичай використовується формула Шезі-Манінга в її класичному вигляді. Але практика оцінки гідроморфодинамічного стану гірських річок [1] показує, що при наявності значних антропогенних навантажень, особливо на фоні розвитку незворотних руслових деформацій, при проведенні комплексу руслових розрахунків необхідно підходити з позицій системного аналізу в оцінці гідравлічного опору як реакції від дії різноманітних кріплень і споруд, кар'єрних виїмок, гідровузлів, розміщених на урбанізованих ділянках русла. Всі руслові споруди у тій чи іншій мірі впливають на інтенсивність розвитку руслових процесів.

**Аналіз попередніх досліджень.** Визначення витрат води за існуючими формулами, як правило, проводиться з використанням величини коефіцієнта Шезі  $C$ , для якого запропоновано багато формул, а також спеціальних таблиць для визначення коефіцієнта шорсткості  $n$  [2], який входить у цілий ряд формул для визначення коефіцієнта  $C$ .

Точність руслових розрахунків на основі існуючого методичного підходу є досить низькою, оскільки максимальні відхилення від норми можуть сягати  $\pm 10\%$ . Якщо, приміром, руслоформуюча витрата річки складає  $500\text{ м}^3/\text{с}$ , то для крупноалювіальних русел похибка може бути наближеною до  $\pm 50\text{ м}^3/\text{с}$ .

**Виклад основного матеріалу.** За методичними підходами, викладеними в роботі [3, 4], під терміном руслоформуюча витрата рекомендується розуміти витрату водотоку ( $Q_{\text{рф}}$ ), яка еквівалентна дії інтегрованої витрати за багаторічний період спостережень, спрямованої на формування відповідного типу русла. При цій витраті ГДС<sub>п-р</sub> перебуває у динамічній рівновазі. Розрахунок руслоформуючої витрати проводиться за рівнянням наступного вигляду [4]:

$$\frac{\omega_{\text{рф}} (h_{\text{рф}}^{0,666})}{Q_{\text{рф}}} \sqrt{\frac{\Delta Z \pm \Delta(V_0^2 / 2g)}{\Delta e}} - \frac{\varphi^{0,5} R_{\text{рф}}^{0,166}}{(2g)^{0,5} (4 \lg h_{\text{рф}} / D_{\text{ср.зв}} + 4,25)} = 0, \quad (1)$$

де  $\omega_{\text{рф}}$  - площа поперечного перерізу водотоку при проходженні розрахункової витрати  $Q_{\text{рф}}$  ( $Q_{\text{рф}} = h_{\text{рф}} \cdot V_{\text{рф}} \cdot V_{\text{д.р}}$ , де  $V_{\text{рф}}$  – ширина потоку по вільній поверхні при  $Q_{\text{рф}}$

, як правило, це ширина в бровках русла;  $h_{pф}$  – середня глибина потоку при  $Q_{pф}$ ;  $V_{д.р}$  – середня швидкість потоку при  $Q_{pф}$ , що відповідає динамічній рівновазі ГДС<sub>п-р</sub>;  $\frac{\Delta Z}{\Delta e}$  – гідравлічний похил водотоку при квазірівномірному гідравлічному режимі на ділянці обстеження довжиною  $\Delta e$  при проходженні паводків з витратою  $Q_{pф}$  ( $\frac{\Delta Z}{\Delta e} = I \approx i$ , де  $i$  – похил дна русла при  $Q_{pф}$ );  $\frac{\Delta(V_0^2/2g)}{\Delta e}$  – градієнт питомої кінетичної енергії на ділянці обстеження при проходженні витрати  $Q_{pф}$ ;  $\varphi$  – коефіцієнт гідравлічного опору руслових форм, який змінюється від 1 до 1,3 в залежності від типу русла;  $R_{pф} = (h_{pф} \cdot B_{pф}) / \chi_{pф}$  – найвигідніший гідравлічний радіус водотоку в умовах вільного прояву процесів руслоформування при проходженні паводку з витратою  $Q_{pф}$ ;  $g$  – прискорення сили земного тяжіння;  $D_{сер.зв}$  – середньозважений діаметр частинок наносів поверхневого шару дна русла (шару самовимощення), який дорівнює середньозваженій абсолютній висоті виступів шорсткості дна русла –  $D_{сер.зв} \approx \Delta_{сер.зв}$  [5].

Дане рівняння розв'язується шляхом підбору значень вихідних гідравлічних і руслових параметрів з визначенням  $V_0 \approx V_{д.р}$ . та використанням для корегування розрахункових даних гідроморфологічних зв'язків  $Q = f(h)$ ,  $Q = f(v)$ ,  $Q = f(\omega)$ ,  $V = f(h)$ .

Виходячи з положень центроструменевого руслоформування [6] ступінь стійкості русел річок, а також основні їх параметри можна визначити за допомогою наступного рівняння:

$$\left( \frac{B_{pф}}{h_{pф}} \right)^{0,25} - \kappa_e \frac{I_0^{0,125}}{F_{чц}} = 0, \quad (2)$$

де  $\kappa_e$  – коефіцієнт ергодичності ерозійно-аккумулятивного процесу, який при відсутності незворотних руслових деформацій має змінюватись у межах саморозвитку ГДС<sub>п-р</sub> від 3,14 до 5,1;  $F_{чц} = V_{др}^{0,5} / (gh_{pф})^{0,25}$  – число Фруда для центрального планового струменя.

На основі рівняння (2) величина руслоформуючої витрати визначається за формулою:

$$Q_{pф} = [\kappa_e h_{pф} (gB_{pф})^{0,25} I_0^{0,125}]^2. \quad (3)$$

Широке вживання для оцінки ступеня стійкості річкових русел має рівняння відносної локальної інваріантності К. В.Грішаніна [7] у наступному вигляді:

$$M_x = \frac{h(gB)^{0,25}}{Q^{0,5}}. \quad (4)$$

Дане рівняння для крупноалювіальних русел при проходженні руслоформуючих витрат (при динамічній рівновазі ГДС<sub>п-р</sub>) має осереднене значення 0,55 [6, 8, 9], тобто вираз можна записати у такому вигляді:

$$\frac{h_{pф} (gB_{pф})^{0,25}}{Q_{pф}^{0,5}} = 0,54 \quad (5)$$

Межі змін цього показника зі збереженням відносної динамічної рівноваги ГДС<sub>п-р</sub> по аналогії з  $M_x$  для рівнинних річок домірні величини  $\sqrt{0,4\pi\Phi} \approx 1,41$  (де  $\Phi$  – число Фібоначчі, яке для стійкого стану системи дорівнює 1,618) Отже зміна меж для крупноалювіальних русел відповідно дорівнює  $0,45 < M_x < 0,64$ . За умовами відхилень від наведених значень мають відбуватися незворотні руслові деформації або ділянка річки відноситься до умов рівнини і її необхідно оцінювати за показником  $M_x$  при середньому значенні 0,9.

З рівняння (5) отримуємо:

$$Q_{рф} = 3,37h_{рф}^2 (gB)^{0,5}. \quad (6)$$

Структура формули (6) вказує на нелінійність зв'язку між руслоформуючою витратою і формою русла/водопропускного коридору. Форма русла ділянки річки в свою чергу визначається особливостями прояву руслових процесів (типом русла).

Для контролю отриманих результатів розрахунків за рівняннями (1,3 і 6) можна також використати рівняння Шезі-Маннінга у наступній модифікації:

$$Q_{рф} = (2g)^{0,5} \lambda_3^{-0,5} h_{рф}^{1,5} B_{рф} I_0^{0,5}, \quad (7)$$

де  $\lambda_3$  – величина загального гідравлічного опору русла з відповідним проявом розвитку руслових процесів, яка повинна враховувати вплив зернистої шорсткості дна русла, опір руслових форм, реакцію берегів та ін.

**Порівняльний аналіз методик визначення руслоформуючих витрат у форматі їх адаптації до типів русел.** Для порівняльного аналізу указаних вище методик відібрана вихідна інформація для річок Українських Карпат на 28 гідрологічних постах (табл. 1). Були відібрані ділянки річок для яких є багаторазові відбори проб шару самовимощення і підстильної основи (руслових відкладів) [10]. Контрольні величини витрат  $Q_{рф}$  були підраховані за допомогою рівняння (7).

При використанні рівняння (1), з метою уточнення отриманих результатів, рекомендується адаптацію до типів русел виконувати за допомогою параметра  $\lambda_3$ . При цьому, для оцінки опору русла використано методичний підхід суперпозиційного накладання складових у вигляді  $\lambda_3 = \lambda_\Delta + \lambda_\delta + \lambda_{рф}$  (де права частина формули містить коефіцієнти опору структур русла за окремими складовими – опору зернистої шорсткості  $\lambda_\Delta$ , опору берегів  $\lambda_\delta$  і опору руслових форм  $\lambda_{рф}$ , які беруть на себе орієнтовно 80% впливів природно-антропогенних факторів в умовах відсутності активних споруд) [3]. Складова  $\lambda_\delta$  у наведеному рівнянні вводиться вперше, а тому для неї необхідно запропонувати формулу для розрахунку з відповідною оцінкою достовірності результатів.

Оскільки ГДС<sub>п-р</sub> у своїй основі є дисипативною, то для відносно стабільної ділянки річки дисипація енергії  $\epsilon_0$  може бути виражена через руслоформуючу витрату води  $Q_{рф}$  і похил вільної поверхні  $I_0$  у вигляді втрати доли потужності водотоку [11]:

$$\epsilon_0 = \rho g Q I_0. \quad (8)$$

З другого боку стійкість системи підпорядкована прояву властивості самоорганізації ГДС<sub>п-р</sub> і тому дисипація енергії  $\epsilon_0$  може бути визначена через внутрішні турбулентні характеристики системи згідно гіпотези О. Н. Колмогорова [11] -  $\epsilon_0 = k (\bar{U}^3)/\lambda$  (де  $k$  – емпіричний коефіцієнт;  $\bar{U}$  - середня квадратична швидкість, яка визначається за рівнем енергії турбулентності;  $\lambda$  – лінійний масштаб системи). Значення  $\epsilon_0$  можна також записати через гідравлічні параметри у наступному вигляді [11]:

Таблиця 1. Значення основних вихідних і розрахункових характеристик на репрезентативних гідрологічних постах

№ п/п	Річка - пункт (гідрологічний пост)	$d_{ср.зв}$ , м	$D_{ср.зв}$ , м	$S_0 = 0,75 (d_{25}/d_{75})$	$J_0$	$h_{ср}$ , м	$B_0$ , м	$\omega$ , м <sup>2</sup>	$V_0$ , м/с	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	Тип русла	$\lambda_{з=1\lambda} + \lambda_{р.ф} + \lambda_{б}$
1	Тиса - м.Рахів	0,115	0,23	0,36	0,0084	2,2	48	105,6	3,43	362	Русло з нер.алюв.формами	0,031
2	Чорна Тиса - смт. Ясеня	0,07	0,144	0,35	0,0157	1,4	28	39,2	3,56	140	Русло з нер.алюв.формами	0,032
3	Біла Тиса - с. Ростоки	0,10	0,22	0,30	0,017	1,5	25	37,5	3,74	140	Русло з нер.алюв.формами	0,035
4	Тересва - с.Усть Чорна	0,185	0,22	0,35	0,0126	2,0	48	96,0	3,84	368	Русло з нер.алюв.формами	0,032
5	Тересва - с. Нересниця	0,10	0,20	0,40	0,005	2,3	86	197,8	3,14	622	Руслова багаторукав.	0,0238
6	Теребля - с. Колочава	0,185	0,37	0,33	0,008	1,7	46	78,2	2,47	193	Русло з роз.алюв.формами	0,035
7	Ріка - смт. Міжгір'я	0,095	0,20	0,35	0,011	2,2	50	110,0	3,98	438	Русло з роз.алюв.формами	0,03
8	Ріка - м. Хуст	0,05	0,09	0,40	0,005	2,2	100	220	3,05	670	Руслова багаторукав.	0,023
9	Боржава - с. Довге	0,06	0,15	0,28	0,013	2,2	50	110,0	3,40	400	Вільне меандрування	0,025
10	Латориця - с. Підполоззя	0,09	0,20	0,29	0,013	2,1	40	84,0	3,40	230	Русло з роз.алюв.формами	0,03
11	Латориця - м. Мукачеве	0,07	0,165	0,30	0,0045	2,4	112	268,8	2,66	715	Русло з роз.алюв.формами	0,03
12	Уж - с. Жорнава	0,09	0,248	0,25	0,018	1,5	40	60,0	3,00	180	Русло з нер.алюв.формами	0,028
13	Уж - м. Ужгород	0,04	0,07	0,42	0,007	2,3	90	207,0	3,89	805	Каналіз. русло (дамби)	0,021
14	Сірет - м. Сторожинець	0,023	0,047	0,35	0,0047	2,0	45	90,0	3,04	274	Вільне меандрування	0,02
15	Прут - с. Кремінці	0,175	0,30	0,35	0,012	1,6	34	54,4	3,00	166	Русло з нер.алюв.формами	0,035
16	Прут - м. Чернівці	0,025	0,05	0,40	0,0012	2,6	190	494	1,80	890	Русло з роз.алюв.формами	0,024
17	Черемош - с. Устеріки	0,115	0,25	0,35	0,008	1,8	54	97,2	3,40	330	Русло з нер.алюв.формами	0,024
18	Білий Черемошс.Яблонія	0,12	0,25	0,40	0,01	1,6	42	67,2	3,53	237	Русло з нер.алюв.формами	0,025
19	Чорн. Черемошс.Верховина	0,10	0,20	0,35	0,011	1,5	54	81,0	3,46	280	Русло з нер.алюв.формами	0,027
20	Дністер - с.Стрілки	0,075	0,20	0,27	0,006	1,7	60	102,0	2,58	265	Русло з роз.алюв.формами	0,03
21	Дністер - м.Галич	0,04	0,066	0,45	0,006	3,0	180	540,0	2,95	1593	Вільне меандрування	0,02
22	Стрій - с. Матків	0,06	0,165	0,25	0,0075	1,4	38	53,2	2,46	130	Русло з роз. алюв.форами	0,034
23	Стрій - с. Верх. Синевидне	0,085	0,184	0,33	0,005	2,3	120	276,0	2,88	825	Руслова багаторукав.	0,027
24	Лімниця - с. Осмопода	0,14	0,33	0,30	0,0145	2,1	30	63,0	2,95	186	Русло з нер.алюв.формами	0,026
25	Луква - с. Боднарів	0,06	0,11	0,40	0,0064	2,1	30	63,0	3,34	210	Русло з роз. алюв.форами	0,024
26	Бистриця - с. Ямниця	0,50	0,08	0,45	0,005	2,3	160	368	3,0	1104	Вільне меандрування	0,022
27	Бистриця-Надв.-с. Пасічне	0,16	0,376	0,28	0,012	1,7	45	76,5	3,65	286	Русло з нер.алюв.формами	0,03
28	Бистриця-Солот.-с. Гута	0,185	0,32	0,26	0,03	1,5	32	48,0	5,3	254	Русло з нер.алюв.формами.	0,03

$$\varepsilon_0 = \frac{\rho g}{C_0^2} \frac{V^3}{hf_0} \omega, \quad (9)$$

де  $C_0$  – коефіцієнт Шезі;  $V$  – середня швидкість потоку;  $h$  – середня глибина потоку;  $\omega$  – площа поперечного перерізу руслового потоку.

Слід відмітити, що  $C_0$  в свою чергу є складною функцією внутрішніх і зовнішніх факторів ( $C_0 = f(h/D; h/h_r; V/h; \omega_{\phi}/\omega_{p\phi} \dots)$ ) [11].

В заключному варіанті із рівнянь (8 і 9) отримуємо рівняння динамічної рівноваги ГДС  $n-p$  за рівнем дисипації енергії у наступному вигляді:

$$Q_{p\phi} I_0 = \frac{\rho g}{C_0^2} \frac{V^3}{hf_0} \omega, \quad (10)$$

Рівняння (10) доцільно привести до наступного вигляду:

$$f_0 = \frac{V^3 B h}{C_0^2 h Q I_0} = \frac{V^2 \lambda_{\Delta}}{2 g h I_0} = \frac{\lambda_{\Delta}}{2 \lambda_{\delta}}, \quad (11)$$

де  $f_0$  – коефіцієнт звивистості русла;

Таким чином, опір берегів  $\lambda_{\delta}$  залежить від опору зернистої шорсткості дна русла і від форми русла по довжині річки через коефіцієнт звивистості  $f_0$  однорукавного русла під час проходження  $Q_{p\phi}$  (рис. 1). Звивистість русла є продуктом прояву явища меандрування, яке можна виразити через дію внутрішніх і зовнішніх силових факторів, зокрема через тенденцію розвитку вертикальних і горизонтальних деформацій при зміні форми русла ( $V/h$ ).

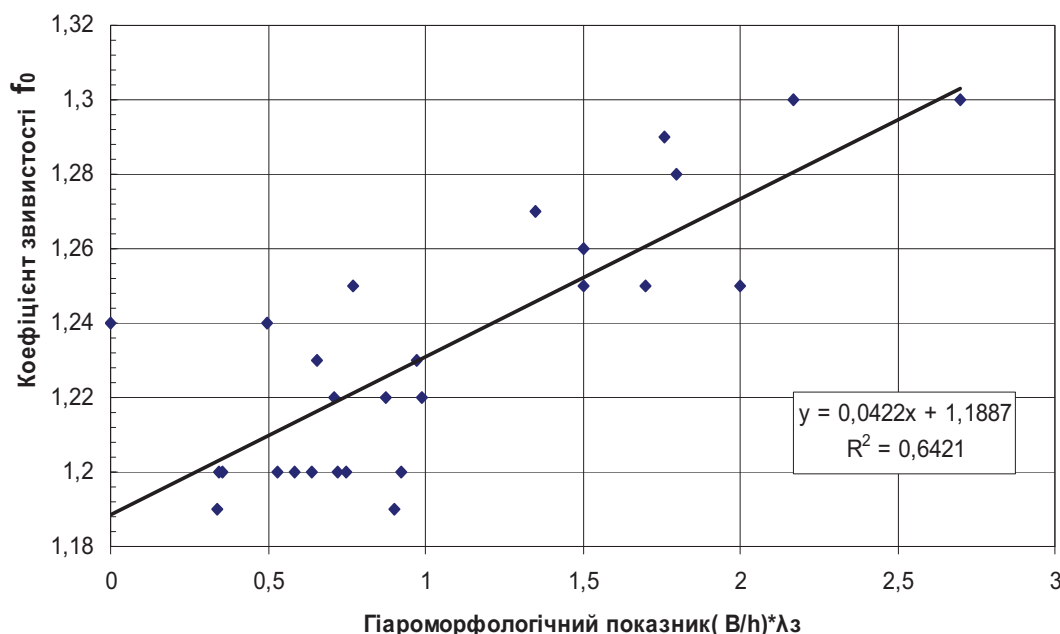


Рис 1. Графік зв'язку між коефіцієнтом звивистості русла і гіроморфологічним показником  $(V/h) \lambda_z$ .

Третьою складовою загального гідравлічного опору  $\lambda_{p,\phi}$  є вплив структурних форм на русловий потік. Морфологічні структури для крупноалювіальних русел при проходженні руслоформуєчих витрат води і наносів мають форму гряд, які

відносяться до мезоструктур (різномасштабних гряд), та макроstruktur у вигляді боковиків, осередків і островів.

Розрахунок  $\lambda_{p.ф.}$  рекомендується визначати за формулою наступного вигляду:

$$\frac{1,41}{\sqrt{\lambda_{p.ф.}}} = k \left( \frac{h_{p.ф.}}{h_{\tau}} \right)^{\alpha} \quad (12)$$

де  $\alpha$  - корегуючий коефіцієнт, величина якого залежить від площі поперечного перерізу структурної форми  $\omega_{p.ф.} = h_{\tau(сеп.)} B_{p.ф.}$  (де  $B_{p.ф.}$  ширина руслової форми в її основі); при  $\omega_{p.ф.}$  рівному 10% від  $(h_{p.ф.} \cdot B_{p.ф.})$  величину  $\alpha$  рекомендується приймати орієнтовно домірною 1,15; при  $\omega_{p.ф.} = 20\%$  від  $(h_{p.ф.} \cdot B_{p.ф.})$  –  $\alpha = 1,4$  і при  $\omega_{p.ф.} = 30\%$  від  $(h_{p.ф.} \cdot B_{p.ф.})$  –  $\alpha = 1,6$  (вплив островів);  $h_{\tau}$  - середня висота гряди, яка домірна максимальній круглості частинок шару самовимощення дна русла або розраховується за формулою  $h_{\tau} = 0.20 + 0.1h$  [15].

За даними експериментів А. П. Зегжди і Х. Є. Базена для русел з неоднорідними крупнозернистими матеріалами, які за висотою виступів шорсткості  $\Delta_{сер.зв}$  наближається до висоти мезоформ, залежність (12) набуває наступного вигляду:

$$\frac{1,41}{\sqrt{\lambda_{p.ф.}}} = 8^{\alpha} \left( \frac{h_{p.ф.}}{h_{\tau}} \right)^{0,2} \quad (13)$$

На деяких ділянках річок може виникнути необхідність урахування також опору рослинності на водний (паводковий) потік  $\lambda_{рос.}$  У цьому випадку для розрахунків можна скористатися формулою наступного вигляду [ 15 ]:

$$\lambda_{рос.} = 4 \frac{V_p^2}{V^2} S_M C_D \kappa_B \frac{1}{M_p^2} \quad (14)$$

де  $V_p$  – середня швидкість течії у межах рослинного шару;  $V$  - середня швидкість течії у чистому від рослинності руслі;  $S_M$  - площа мідельового перерізу елементів рослинності, яка залежить від  $h_p$  і  $d_p$ ;  $C_D$  – коефіцієнт гідродинамічного опору елемента рослинності може мінятися від 0,1 до 1 [17];  $\kappa_B = F_i / F_1 \approx 0,2-1$  [16] (де  $F_i$  – сила опору рослинного елемента в масиві,  $F_1$ - сила опору одиночного елемента у водному потоці, а також по формулі ( $\kappa_B = 1 - (1,5d_p / L)$  (де  $L$  – віддаль між елементами [15]));  $M_p$  – середній розмір площі дна морфологічної форми на якій закріплений елемент рослинності.

Для течії у рослинному шарі частково зарослого русла коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda_{рос.}$  можна обрахувати за формулою:

$$\lambda_{рос.} = \frac{8ghI}{V_p^2} \left( 1 - \frac{h_1}{h} \right) \quad (15)$$

де  $h_1$ - глибина потоку над рослинністю. Після підстановки в формулу (15)  $V_p = \sqrt{2} \cdot u \cdot j$  отримуємо :

$$\lambda_{\text{рос}} = \frac{4}{u \cdot j \cdot 2} \left(1 - \frac{h_1}{h}\right) \quad (16)$$

де  $j = \frac{M\rho^2}{S_m C_D \kappa_B}$  - комплексна характеристика рослинного шару;  $u_* = ghI$  - динамічна швидкість потоку.

Для визначення величини гідравлічного опору  $\lambda_{\text{кор}}$ , як реакції на дію сили Кориоліса, був використаний третій закон Н'ютона. Згідно цьому закону кориолісова сила визначається за формулою:

$$F_{\text{кор}} = -m a_{\text{кор}} = -2m (\omega_3 \times \dot{u}_3), \quad (17)$$

де  $a_{\text{кор}} = -2(\omega_3 \times \dot{u}_3)$  - прискорення сили Кориоліса;  $m$  - маса річкового потоку, яка діє на одиницю площі ( $1\text{м}^2$ ) на відповідний берег, яка може бути визначена за формулою:

$$m = 1 \times h_{\text{рф}} B_{\text{ф}} \cos \alpha \times \rho_{\text{см}}, \quad (18)$$

де  $h_{\text{рф}}$  - глибина потоку при руслоформуєчій витраті води, яка при відсутності незворотних руслових деформаціях відповідає глибині потоку біля берега при відмітці брівки русла на розрахунковому створі;  $B_{\text{ф}}$  - довжина фронту дії сили Кориоліса при проходженні руслоформуєчій витраті води і транспортувальних наносів, яка визначає довжину водного стержня ( $1 \times h_{\text{рф}} B_{\text{ф}} \cos \alpha$ ), цей вираз вказує на те, що при  $\alpha = 90^\circ$  сила  $F_{\text{кор}}$  має діяти за течією (як на деяких річках Аляски, Латориці, Ужу, на деяких ділянках Дунаю), що обумовлює деяке прискорення потоку, або проти течії (як, наприклад, на ряді річок земної кулі - Прип'яті, Сіверському Дінці, Амурі, Амазонці, на деяких ділянках Дунаю), що обумовлює незначне підсилення інтенсивності розвитку явища меандрування на річках з великими значеннями поздовжнього похилу та цілком суттєво на великих рівнинних річках [20];  $\rho_{\text{см}} = \rho(1 - S) + \rho_s S$ , де  $\rho_{\text{см}}$  - питома віртуальна щільність водного потоку, взятої в об'ємних одиницях (де  $\rho$  - питома густина води;  $S$  - каламутність руслового потоку, взятої в об'ємних одиницях;  $\rho_s$  - питома щільність частинок наносів);  $u_3$  - середня швидкість обертання планети Земля навколо своєї орбіти, яка визначається за формулою  $u_3 = (2\pi r_3)/t_{\text{доб.з}} = (2 \times 3,145 \times 6371300) / 86201 = 464,9\text{м/с}$ ;  $\omega_3$  - кутова швидкість обертаючої системи відліку, яка визначається за формулою:

$$\omega_3 = (m \times u_{\text{р.п}}) / r_3 = (1 \times h_{\text{рф}} B_{\text{ф}} \cos \alpha \times u_{\text{р.п}}) / r_3, \quad (19)$$

де  $u_{\text{р.п}}$  - середня швидкість руслового потоку при проходженні руслоформуєчій витраті води з транспортувальними наносами у розрахунковому створі (по фронту дії сили Кориоліса при  $B_{\text{ф}} = B_{\text{рф}}$ ).

Таким чином, коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda_{\text{кор}}$ , для відповідного берега річки або самого річкового потоку, при дії сили Кориоліса, можна визначити за формулою:

$$\lambda_{кор} = \frac{2(h_{рф} B_{\phi} \cos \alpha \rho_{см})^2 v_3 v_{р.п}}{r_3^2} \quad (20)$$

Приклад розрахунку  $\lambda_{кор}$  для гірської річки та інтерпретація отриманого результату.

Вихідні дані для розрахунку значення  $\lambda_{кор}$ . У якості розрахункового створу взято гідрологічний пост Сірет – м. Сторожинець:  $h_{рф} = 2,1\text{м}$ ;  $B_{рф} = 70\text{м}$ ;  $\cos \alpha = 1$ ;  $\rho_{см} = 1,04$  при  $S = 1000\text{г/м}^3$ ;  $u_3 = 464,9\text{м/с}$ ;  $u_{р.п} = 2,15\text{м/с}$  і  $r_3 = 6371300\text{м}$ . При цих значеннях вихідних параметрів  $\lambda_{кор} = 0,0000115$ . Це говорить про те, що сила Кориоліса не може слугувати першопричиною виникнення явища меандрування. Також ця сила не може суттєво впливати на розвиток меандрування при різних схемах її дії. Але силу Кориоліса варто враховувати  $\lambda_{кор}$  для самих великих річок (рр. Об, Єнісей, Лена, Амазонка) при оцінці як пропускної здатності русла, так і при оцінці інтенсивності розвитку явища меандрування.

У цьому контексті слід зауважити, що сила Кориоліса аналогічним чином впливає на океанські течії та синоптичні циркуляції. Наприклад, під дією цієї сили течія Гольфстрім є дещо прискореною в Індійському океані і уповільненою вздовж скандінавського півострова, що підсилює процес дисипації центроструменевого руслоформування (при значно малих похилах відбувається розгалуження русла. В атмосфері сила Кориоліса прискорює переміщення антициклонів і сповільнює рух циклонів у північній півкулі.

Протидію руслового потоку вітровим навантаженням можна оцінити через параметр  $\lambda_{eim}$ . Цей параметр можна визначити за формулою:

$$\lambda_{eim} = \frac{W_{10} B_{\phi} \cos \alpha}{v} \quad (21)$$

де  $W_{10}$  – швидкість вітру на висоті 10м від поверхні води;  $B_{\phi} \cos \alpha$  – довжина фронту дії сили вітру;  $v$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, значення якого залежать від температури річкової води [21]. Специфіка дії вітру на річковий потік аналогічна дії сили Кориоліса, тільки у вигляді нагінних хвиль на поверхні потоку.

Визначення гідравлічного коефіцієнта  $\lambda_{хв}$  рекомендується виконувати за формулою:

$$\lambda_{хв} = \frac{(W_{10} - v_{р.п}) B_{\phi} \cos \alpha}{v}, \quad (22)$$

де  $(W_{10} - v_{р.п})$  – характеризує дію ефекту ежекції на поверхню води, обумовленого електромагнітним полем, яке формується на межі між поверхнею води і вітровим фронтом [22].

На урбанізованих ділянках русел необхідно враховувати вплив на русловий потік берегозахисних кріплень та захисно-регулювальних споруд. Можливість активного управління русловими процесами викладено в роботі [19]. У даній статті намічено врахувати вплив різних поверхонь на величину коефіцієнтів гідравлічного опору  $\lambda_{б.к}$  і  $\lambda_{з-р.с}$ , які змогли б у повній мірі охопити різнопланові види берегозахисних кріплень та захисно-регулювальних споруд. Для визначення впливу берегозахисних кріплень на величину коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda_{б.к}$  рекомендується розрахункова формула наступного вигляду:



$$\lambda_{б.к} = \frac{2(h_{рф} B_{\phi} \cos \alpha \rho_{см})^2 + v_{ноп}}{\rho_{см} I_0 v_{р.п}}, \quad (23)$$

де  $U_{ноп}$  – середня поперечна швидкість руслового потоку;  $I_0$  – поздовжній гідравлічний похил руслового потоку.

Наведена формула (7) показує як впливають берегозахисні кріплення на розподіл силових напружень (тиск питомої рухомої маси води і транспортувальних наносів руслового потоку на розподіл потенціалу придонної динамічної швидкості по рівнодіючій сили  $B_{\phi} \cos \alpha$ ) на русловий потік у поперечному вимірі. Таким чином, формула (7) характеризує процес трансформації гідродинамічної системи «потік – русло» у гідродинамічну систему «потік – споруда – русло».

Для визначення впливу захисно-регулювальних споруд на величину коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda_{з-р.с}$  рекомендується розрахункова формула наступного вигляду:

$$\lambda_{з-р.с} = \frac{2(h_{з.р} B_c \cos \alpha \rho_{см})^2 + v_{ноп}}{\rho_{см} I_n v_{р.п.с}}, \quad (24)$$

де  $h_{з.р}$  – середня глибина руслового потоку при наявності поперечних захисно-регулювальних споруд типу напівзагат;  $B_c$  – ширина русла у створі дії поперечних споруд, які виступають в русло зі значним стисненням живого перерізу;  $I_n$  – поперечний похил руслового потоку;  $v_{р.п.с}$  – середня швидкість зрегульованого русла активними поперечними спорудами.

Зміни конфігурації рельєфу русло-заплавного комплексу можуть впливати на пропускну здатність русла. Одним із прикладів таких змін може слугувати двохбічне обвалування русла за схемою різкого обмеження ширини водопропускного коридору. В роботі [19] даються ряд рекомендацій стосовно визначення необхідної ширини  $B_p$  русло-заплавного комплексу, але у цьому контексті необхідно також оцінити можливі зміни гідравлічного опору на ділянках видозмінених русел. Для визначення складової гідравлічного опору для умов обмеження території заплави пропонується розрахункова формула наступного вигляду:

$$\lambda_{р-з} = \frac{B_p + 0,2 B_{п.м} v_{ноп}}{\rho_{см.з} I_{0.з} v_{з.п}}, \quad (25)$$

де  $\lambda_{р-з}$  – гідравлічний опір від впливу видозміни заплави на руслові процеси;  $B_p$  – розрахункова ширина водопропускного коридору;  $B_{п.м}$  – ширина поясу меандрування;  $U_{ноп}$  – середня поперечна швидкість заплавного потоку;  $\rho_{см.з}$  – віртуальна щільність заплавного потоку (водний потік з транспортувальними наносами);  $I_{0.з}$  – поздовжній гідравлічний похил заплавного потоку;  $v_{з.п}$  – середня поздовжня швидкість заплавного потоку.

Значний забір води з річок також впливає на гідроморфологічний стан русла, оскільки при цьому відбувається деградація річки шляхом її замулення. Урахувати гідроморфологічні зміни русла можна за допомогою оцінки вертикальних руслових деформацій. Що стосується оцінки пропускну здатності таких русел, то визначити їх гідравлічний опір можна урахувавши додаткову складову  $\lambda_{з.в}$ , яка враховує вплив заборів води на господарські потреби з умовою недопущення розвитку процесу

деградації річки, Для визначення  $\lambda_{з.в}$ , рекомендується розрахункова формула наступного вигляду:

$$\lambda_{з.в} = \frac{h_{рф} B_{рф} + 0,9Q_{рф}}{\rho_{см} I_0 v_{р.п}}, \quad (26)$$

де  $Q_{рф}$  – руслоформуєча витрата води.

Значні за об'ємами кар'єрні виїмки є одним із активних антропогенних факторів, які у значній мірі впливають на розвиток руслових процесів. При цьому відбуваються тривимірні руслові деформації, які при проходженні руслоформуєчого паводку можуть викликати незворотні руслові деформації, на можливий довгий період часу, у вигляді трансформації типів русел. Додаткову складову гідравлічного опору  $\lambda_{к.в}$ , яка ураховує вплив кар'єрних виїмок для умов недопущення розвитку незворотних руслових деформацій (просідання рівнів води), рекомендується визначати за формулою

$$\lambda_{к.в} = \frac{h_{рф} B_{рф} + 0,2Q_{рф}}{\rho_{см} I_0 v_{р.п}} \quad (27)$$

Греблі водосховищ і гідротехнічних вузлів найбільш активно впливають на розвиток руслових процесів. Кардинальні зміни руслової ситуації не дають можливість побачити річку, так як верхній і нижній б'єфи займають великі ділянки русла. Вплив цих споруд на руслові процеси є незворотнім на весь період їх існування.

Таким чином, загальний коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda_з$  складається з дванадцяти складових елементів гідравлічного опору, які наведені у вигляді суперпозиційної арифметичної суми

$$\lambda_з = \lambda_{\Delta} + \lambda_{рф} + \lambda_{б} + \lambda_{рос} \pm \lambda_{кор} \pm \lambda_{віт} \pm \lambda_{хв} + \lambda_{б.к} + \lambda_{з-р.с} + \lambda_{р-з} + \lambda_{з.в} + \lambda_{к.в}. \quad (28)$$

Слід відмітити, що для ділянок русел річок у місцях розташування гідрологічних постів (табл. 1), як правило, не треба виконувати розрахунки параметра  $\lambda_{рос}$ . Русла гірських річок є практично чисті від рослинності. Лише на обмеженій частині ділянок річок зі складною формою русла можна зустрітися з рослинністю (русло в гірській частині на деяких ділянках річок має так зване «внутрішнє» русло, яке можна виокремити зарослими відмілинами).

Стосовно визначення  $\lambda_r$  необхідно відмітити наступне [17, 23] – в гравійно-гальково-валунних руслах донний градовий рельєф проявляється досить слабо в сезонному циклі (найбільш рельєфні гряди формуються на піку проходження паводку з руслоформуєчими витратами води з транспортом гравійних наносів, а при спаді паводку вони досить швидко трансформуються у напрямі зменшення їх висоти до 75%). Гідравлічний опір в таких руслах в цілому визначається формою поперечного перерізу потоку на конкретній ділянці і зернистою шорсткістю дна русла й досить слабо залежить від швидкості течії; гребні перекатів після спаду рівнів розмиваються досить повільно або в умовах формування шару самовимощення не розмиваються взагалі і їх форма досить наближена до водозливу з широким порогом.

У результаті обрахунків руслоформуєчих витрат за наведеними вище формулами можна виконати порівняльний аналіз даних методик і визначити межі практичного їх використання. Із даних таблиці 2 видно, що руслоформуєчі витрати, отримані за формулами (1 і 3), є більш наближеними до даних колонки (3), обчислених за контрольною формулою (7).

Таблиця 2. Руслоформуючі витрати води за формулами порівняльного аналізу

№ п/п	Річка -пункт (гідрологічний пост)	Qрф, м3/с. форм.(7)	Qрф, м3/с. форм.(1)	Qр, м3/с. форм.(3)	Qрф, м3/с. форм.(6)	Qрф(сер.), м3/с, контроль.
1	Тиса - м.Рахів	362	360	326	350	352
2	Чорна Тиса - смт. Ясеня	140	143	125	108	129
3	Біла Тиса - с. Ростоки	140	142	134	117	133
4	Тересва - с.Усть Чорна	368	380	317	289	338
5	Тересва - с. Нересниця	622	600	583	512	579
6	Теребля - с. Колочава	193	215	212	204	206
7	Ріка - смт. Міжгір'я	185	190	180	175	182
8	Ріка -м. Хуст	818	800	795	652	767
9	Боржава - с. Довге	400	400	396	422	405
10	Латориця - с. Підполоззя	230	235	240	235	235
11	Латориця - м. Мукачеве	715	720	714	636	696
12	Уж - с. Жорнава	180	265	176	148	192
13	Уж - м.Ужгород	805	795	727	523	712
14	Сірет - м. Сторожинець	274	270	270	280	274
15	Прут - с. Кременці	166	177	163	156	165
16	Прут -м. Чернівці	890	790	665	972	829
17	Черемош - с. Устеріки	330	328	258	248	291
18	Білий Черемошс.Яблониця	237	232	167	173	202
19	Чорн.Черемошс.Верховина	280	275	172	172	224
20	Дністер - с.Стрілки	215	260	225	233	211
21	Дністер - м.Галич	1600	1585	1540	1540	1566
22	Стрій - с. Матків	130	130	129	126	129
23	Стрій - с. Верх. Синевидне	825	790	780	720	779
24	Лімниця - с. Осмолода	186	270	269	252	244
25	Луква - с. Боднарів	210	205	254	252	230
26	Бистриця - с. Ямниця	1020	1190	950	955	1029
27	Бистриця-Надв.-с. Пасічне	265	275	206	202	237
28	Бистриця-Солот.-с. Гута	254	260	170	200	221

**Висновки.** 1. Визначення руслоформуючих витрат води з транспортувальними наносами для гірських річок Українських Карпат рекомендується виконувати за модифікованою формулою (7) Шезі-Манінга при умові відсутності незворотних руслових деформацій та за формулою (1). При наявності незворотних руслових деформацій у більшій мірі підходить формула (1), побудованою у правій частині на основі використання комплексного коефіцієнта гідравлічного опору/тертя  $\lambda_3$  (у вигляді  $0,226\lambda_3^{0,5}R^{0,166}$ ). На ділянках річки з типом русла – вільне меандрування можна використати всі приведені для аналізу формули.

2. Використання комплексного коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda_3$  дає можливість оцінити долю впливу кожної із складових, що є особливо важливим при управлінні русловими процесами на урбанізованих ділянках річок.

#### Список літератури

1. Руслові процеси річки Лімниця / Ободовський О. Г., Онищук В. В., Гребінь В. В. та ін. – К. : Ніка-Центр, 2010. - 256 с. 2. Ободовський О. Г. Оцінка стійкості русел і класифікація паводків гірських річок / О. Г. Ободовський // Україна та глобальні процеси : географічний вимір : зб. наук. матеріалів у 4-х тт. – К. – Луцьк : Вежа, 2000. Т. 2. – С. 205-209. 3. Онищук В. В. Физическое моделирование русловых процессов горных рек / В. В. Онищук, А. С. Бильчук, О. Н. Козицкий // Мелиорация и водное хозяйство. – 1989. – Вып. 70. – С. 60–65. 4. Ободовський О. Г. Руслоформуючі витрати та класифікація паводків на гірських річках / Ободовський О. Г., Онищук В. В., Коноваленко О. С. // Вісник Київського університету. Сер. Географія. – 2002. – Вип. 48. – С. 42–47. 5. Базилевич В. А. Оценка шероховатости ложа естественных русел, сложенных из неоднородных несвязных грунтов / Базилевич В. А., Бухин М. Н., Онищук В. В. // Мелиорация и водное хозяйство. – 1984. – Вып. 52. – С. 53–66. 6. Онищук В. В. Результати досліджень функціональних зв'язків між основними гідравлічними й русловими характеристиками річок Українських Карпат / В. В. Онищук // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2007. – Т.12. – С. 58–71.

7. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов / К. В. Гришанин. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 143 с. 8. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел / К. В. Гришанин. – Л. : Гидрометеиздат, 1992. – 182 с. 9. Ободовський О. Г. Оцінка гідродинамічної стійкості судноплавного русла Дніпра в акваторії нижнього б'єфу Канівського гідровузла / О. Г. Ободовський, В. В. Онищук // Україна : географічні проблеми сталого розвитку: зб. наук праць у 4-х тт. – К. : ВГЛ Обрії, 2004. – Т. 3. – С. 155–158. 10. Онищук В. В. Оценка гранулометрического состава русловых отложений горных рек / В. В. Онищук, А. Н. Кафтан // Вопросы гидротехники и мелиорации на Украине. – К. : Укр НИИГиМ, 1982. – С. 101-113. 11. Сидорчук А. Ю. Структура рельефа речного русла / А. Ю. Сидорчук. – СПб. : Гидрометеиздат, 1992. – 126 с. 12. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах / А. П. Зегжда. – Л. : Гос. изд-во лит-ры по стр-ву и архитектуре, 1957. – 278 с. 13. Кадыров А. О. Гидравлические сопротивления в каналах с гравелистопесчаными руслами / А. О. Кадыров, С. Тахиров. – Л. : Гидрометеиздат, 1988. – Т. X, кн.1. – С. 260–265. 14. Кондратьев Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сниценко Б. Ф. – Л. : Гидрометеиздат, 1982. – 272 с. 15. Боровков В. С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях / В. С. Боровков. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 297 с. 16. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1975. – 560 с. 17. Морфодинамика русел равнинных рек / Чалов Р. С., Алабян А. М., Иванов В. В. и др. – М. : Изд-во МГУ, 1998. – 288 с. 18. Бухин М. Н. Исследование начальных скоростей влечения частиц неоднородных несвязных грунтов / М. Н. Бухин, В. В. Онищук // Мелиорация и водное хозяйство. – 1997. – Вып. 41. – С. 81-89. 19. Ободовський О. Обґрунтування оптимальних управлінських рішень для протипаводкового захисту урбанізованих заплавної території в басейні р. Латориця / Ободовський О., Онищук В., Федів Р. // Водне господарство України. – 2009. – №4. – С. 17–24. 20. Онищук В. В. Принципові властивості відкритих динамічних систем у контексті еволюції руслових процесів: інваріантність, ергодичність, меандрування / В. В. Онищук // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2006. – Т. 10. – С. 9–20. 21. Справочник по гидравлике / под. ред. В. А. Большакова. – К. : Вища школа, 1977. – 280 с. 22. Онищук В. В. Принципові властивості відкритих динамічних систем та їх роль при регулюванні русел річок / В. В. Онищук // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2012. – Т.1(26). – С. 19-27. 23. Онищук В. В. Аналіз методик визначення руслоформуєчих витрат води для русел гірських річок у контексті оцінки стоку наносів / В. В. Онищук // Україна: географія цілей та можливостей : зб. у 4-х тт. – К. : ВГЛ Обрії, 2012. – Т.1. – С. 231-236.

#### **Оцінка пропускної здатності русел гірських річок**

**Онищук В. В.**

*Проведено порівняльний аналіз руслоформуєчих витрат води і транспортувальних наносів для русел гірських річок, визначених за чотирьома формулами з урахуванням коефіцієнтів гідравлічного опору зернистої шорсткості, руслових форм і берегів. Крім того, даються рекомендації стосовно урахування інших дев'яти складових опору від дії зовнішніх сил, які необхідно враховувати в залежності від місця розташування річки і напрямів їх впливів.*

**Ключові слова:** пропускна здатність русла, гідравлічний коефіцієнт загального опору русла, руслоформуєча витрата води і транспортувальних наносів.

#### **Оценка пропускной способности русел горных рек**

**Онищук В. В.**

*Проведено сравнительный анализ руслоформирующих расходов воды и транспортирующих наносов для русел горных рек, определенных за четырьмя формулами с учётом коэффициентов гидравлического сопротивления зернистой шероховатости, русловых форм и берегов. Кроме этого, даются рекомендации касательно учёта других девяти составляющих в зависимости от места расположения речки и направления их действия.*

**Ключевые слова:** пропускная способность русла, гидравлический коэффициент общего сопротивления русла, руслоформирующий расход воды и транспортирующих наносов.

#### **Score transporting capacity of highlands river gannels**

**Onischuk V. V.**

*A comparative analysis channel bed water flow channels for the rivers. We used four formulas based on hydraulic resistance coefficients granular roughness, channel forms and the coast. Also makes recommendations regarding consideration other nine components of resistance to the action of external forces. These forces must be considered, depending on the location of rivers and areas of influence. Recommended for use in the formula Shezy-Maninha coefficient total hydraulic resistance / terttya as superpozytsiynoyi arithmetic sum of twelve components. Among them are the key elements in the granular bed roughness, channel forms, shores, vegetation Koryolisa power, wind, waves, coast belt, protective and regulatory structures, configuration*

**Keywords:** bandwidth channel, the hydraulic resistance coefficient common channel, channel bed form water flow and transporting sediment.

**Надійшла до редколегії 30.01.2013**

**Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2013. – Т.1(28)**