

**УДК 625.745**

**Ткачук С.Г., д-р техн. наук**

### **ТЕОРЕТИЧНА ФОРМУЛА ГРАНИЧНОЇ ГЛИБИНИ МІСЦЕВОГО РОЗМИВУ БІЛЯ МОСТОВИХ ОПОР В ЗВ'ЯЗНИХ ГРУНТАХ**

**Анотація.** На підставі аналізу вад існуючих формул місцевого розмиву у зв'язних грунтах, пропонується теоретична залежність для визначення граничної глибини вирви біля мостових опор. В її основу покладена гіпотеза, що вся питома на одиницю об'єму потоку енергія витрачається на роботу по руйнуванню і виносу одиниці об'єму зв'язних наносів з вирви місцевого розмиву.

**Ключові слова:** місцевий розмив, гранична глибина вирви, зв'язні наноси, місцевий розмив.

**УДК 625.745**

**Ткачук С.Г., д-р техн. наук**

### **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА ПРЕДЕЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ МЕСТНОГО РАЗМЫВА У МОСТОВЫХ ОПОР В СВЯЗНЫХ ГРУНТАХ**

**Аннотация.** На основании анализа недостатков существующих формул местного размыва в связных грунтах, предлагается теоретическая зависимость для определения предельной глубины воронки у мостовых опор. В ней используется гипотеза, что вся удельная на единицу объема потока энергия расходуется на работу по разрушению и выносу единицы объема связных наносов из воронки местного размыва.

**Ключевые слова:** местный размыв, предельная глубина воронки, связные наносы, местный размыв.

UDC 625.745

Тkachuk S. H., Dr. Tech. Sci.

## THE THEORETICAL FORMULA FOR THE LIMITING DEPTH LOCAL EROSION AT BRIDGE PIERS IN COHESIVE SOILS

**Abstract.** Based on the analysis of drawbacks of existing formulas of local scour in cohesive soils, a theoretical dependence for determining the maximum depth of a crater near the piers. It uses the hypothesis that all the specific per unit flux station energy is spent for work on the destruction and removal of unit volume of cohesive sediment out of local erosion crater.

**Keywords:** local scour, the maximum depth of the crater, cohesive sediments, local scour.

Проблема розмивів на мостових переходах постала в кінці XIX століття внаслідок бурхливого розвитку залізничного транспорту. За більш ніж столітній період була розроблена і реалізована на практиці теорія загального розмиву, але визначення глибини місцевого розмиву біля опор на фундаментах у зв'язних ґрунтах так і залишилась на рівні емпіричних (теоретико-емпіричних) залежностей. Серед них насамперед треба згадати теоретико-емпіричну формулу І.А.Ярославцева [1], яка, незважаючи на свою недосконалість, 20 років застосовувалась в проектуванні мостових переходів:

$$h_{m.p} = K_{\phi} K_v \left( a + K_H \frac{V^2}{g} - 30 d_{85} \right), \quad (1)$$

де  $K_{\phi}$  – коефіцієнт форми опори, що дорівнює для круглого її перерізу 10,0, а для прямокутного – 12,4;  $K_v = f(V^2/gb)$  і  $K_H = f(H/b)$  – коефіцієнти швидкості і глибини потоку;  $a = 0,6 - 1,0$  – стала, що характеризує форму епюри швидкостей в руслі і на заплавах;  $V$  – середня швидкість потоку;  $V_{0,3B}$  – нерозмиваюча швидкість для зв'язного ґрунту;  $g$  – прискорення вільного падіння. Згідно формули (1) глибина вирви місцевого розмиву зменшується із збільшенням глибини потоку, що суперечить спостереженням і фізиці процесу. Через це при

виведенні спрощеного варіанту формули (1) приймалося, що для великих глибин потоку (принаймні 15 – 20 м) коефіцієнт глибини  $K_H = 0,05$ , а  $+ K_H = 0,65$ , а коефіцієнт швидкості на підставі експериментальних досліджень І.А.Ярославцева

$$K_v = 0,58 \left( \frac{V^2}{gb} \right)^{-0,1}.$$

Тоді глибина вирви місцевого розмиву

$$h_{м.р} = 3,8 K_\phi \left( \frac{V^2}{g} \right)^{0,9} b^{0,1} - 6 \frac{V_{0,36}^2}{g} \quad (2)$$

Формула (2) не покращує отриману раніше формулу (1), тому що поширює і на малі глибини потоку значення коефіцієнту  $K_H$ , обчисленого для великих глибин, чим робить ще більшим розходження розрахункових глибин розмиву з фактичними глибинами вирви в напрямку їх зменшення.

І.А.Ярославцев загалом правильно пояснює причини місцевого розмиву. Він має рацію, коли стверджує, що надлишковий тиск від набігаючого на опору потоку трансформується в спадні струмини, які біля дна утворюють комірцевоподібні вихори, що і розмивають дно біля опори. Цілком справедливо втрата енергії в такій спотвореній течії приймається пропорційною глибині вирви розмиву. Але в його розрахунковій формулі (1) ці втрати енергії для незв'язних наносів залежать лише від розмірів алювію, хоча у відповідності із законами механіки зміна енергії дорівнює роботі задіяних в процесі сил.

У формулі (3) для зв'язних ґрунтів відсутня їх визначальна характеристика коефіцієнт зчеплення  $C_{зч}$ , який замінюється нерозмиваючою швидкістю  $V_{0,зв}$ , отриманою для рівномірного потоку, що дуже відрізняється від вихрового руху у вирві місцевого розмиву.

В.С.Муромов [2] для визначення місцевого розмиву у зв'язних ґрунтах запропонував формулу

$$h = h_0 \left( 2 \frac{V}{V_{0,зв}} - 1 \right)^{0,75} K_\phi K_\alpha, \quad (3)$$

в якій нерозмиваюча швидкість  $V_{0,зв}$  обчислюється за переробленою формулою Ц.Є.Мірцхулави [3]

$$V_{0,3\epsilon} = \frac{0,4}{\epsilon} (3,34 + l g H) \sqrt{0,15 + C_p}, \quad (4)$$

де  $\epsilon$  – коефіцієнт зменшення нерозмиваючої швидкості;  $C_p$  – розрахункове зчеплення в ґрунті, що в цій формулі має розмірність  $10^4$  Па;  $K_\phi$  і  $K_\alpha$  – коефіцієнти форми опори і косини набігання потоку;  $h_0$  – гранична глибина місцевого розмиву біля циліндричної опори в незв'язному ґрунті при  $V = V_0$ , що подається залежністю

$$h_0 = \frac{6,2 \beta_1 H}{\left(\frac{V_0}{w}\right)^{\beta_1}}, \quad (5)$$

де  $H$  – глибина потоку;  $\beta_1 = 0,18(b/H)^{0,87}$ ;  $V_0$  – нерозмиваюча швидкість за формулою Б.І.Студенічнікова:

$$V_0 = 3,6 \sqrt[4]{Hd}, \quad (6)$$

в якій  $d$  – середній діаметр наносів, м;  $w$  – гідравлічна крупність, що у формулі (5) приймається для еквівалентного по розмиває мості незв'язного ґрунту, середній діаметр якого (в метрах) знаходиться з формули (6)

$$d_e = \frac{V_0^4}{168H} \quad (7)$$

Застосування еквівалентного діаметру суперечить лабораторним дослідженням Ц.Є.Мірцхулави, який експериментально довів, що розмір відокремлюваних частинок зв'язного ґрунту не може перевищувати 4 мм, а за методом В.С.Муромова можна отримати частинки розміром в декілька десятків міліметрів.

М.М.Журавльов рекомендує при визначенні місцевих розмивів у зв'язних ґрунтах використовувати отримані ним формули для незв'язних наносів [4], в яких донна каламутнююча швидкість для зв'язних ґрунтів виводиться з умови пропорційності нерозмиваючим швидкостям. Так, для донної каламутнюючої швидкості

$$V_{\text{дк.зв}} = V_{\text{ок}} \frac{V_{0,3\epsilon}}{V_0} \quad (8)$$

де  $V_{\text{дк. зв}}$  і  $V_{\text{дк.}}$  – донні каламутніючі швидкості у зв’язних і незв’язних ґрунтах;  $V_{0. \text{ зв}}$  і  $V_0$  – нерозмиваючі швидкості у зв’язних і незв’язних ґрунтах, причому остання без пояснень записується у вигляді

$$V_0 = 1.15^4 \sqrt{Hd},$$

що суперечить формулі Б.І.Студенічнікова (6). Враховуючи за даними Ц.Є.Мірцхулави, що середній діаметр відокремлених частинок зв’язного ґрунту дорівнює 4 мм, для яких гідравлічна крупність становить  $w = 0,22$  м/с, М.М.Журавльов виводить середню каламутніючу швидкість

$$V_{\text{к.зв}} = 2,03 H^{0,14} V_{0. \text{ зв}}, \quad (9)$$

яка і підставляється до формул

$$h = 1,1 \sqrt{bH} \left( \frac{V}{V_{\text{к.зв}}} \right)^n K_\phi K_\alpha \quad \text{при } V > V_0, \quad (10)$$

$$h = 1,1 b^{0,6} H^{0,4} \left( \frac{V}{V_{\text{к.зв}}} \right)^n K_\phi K_\alpha \quad \text{при } V \geq V_0. \quad (11)$$

Показник степені  $n = 1$  при відношенні швидкостей  $> 1$  і  $n = 2/3$  при відношенні швидкостей  $\leq 1$ .

Розглянутим методам визначення місцевого розмиву властива одна спільна вада – стабілізація глибини вирви пояснюється досягненням на її дні нерозмиваючої швидкості, в основі якої закладається формула Б.І.Студенічнікова (6), що є справедливою для рівномірних потоків в руслах з незв’язними наносами.

Процес руйнування зв’язних ґрунтів досліджувався в роботах І.І.Леві [5] і Ц.Є.Мірцхулави [4], але місцевий розмив зв’язних ґрунтів біля мостових опор залишився поза їх увагою.

Процес місцевого розмиву в околі мостових опор є результатом активної взаємодії трьох агентів: потоку, опори та розмивного дна. Цей нестационарний в реальному часі процес має складну трьохвимірну структуру і розгортається на тлі загального розмиву та природного руслового процесу. Крім того, формування вирви місцевого розмиву в часовому мікромасштабі виявляє явно випадкову природу, принаймні, через анізотропну турбулентність потоку, що обтікає опору,

та випадковість гідрологічних характеристик паводків і повеней. З огляду на ці об'єктивні складнощі, створення більш-менш адекватної математичної моделі місцевого розмиву досі не реалізовано. Тому в теоретичному сенсі мова може йти лише про граничну глибину вирви, яка на кожному конкретному мостовому переході досягається за таких гіпотетичних умов:

- пік паводку триває невизначено довго, принаймні, стільки, скільки необхідно для стабілізації розмиву;
- відмітки дна русла за межами вирви не змінюються, тобто загальний розмив і руслові переформування не розглядаються;
- частинки руслового алювію виносяться з вирви місцевого розмиву по найкоротшій вертикальній траєкторії;
- вся питома (на одиницю об'єму) енергія потоку витрачається на роботу по підняттю з вирви до рівня дна недеформованого русла одиниці об'єму наносів;
- втрати енергії річкового потоку в межах вирви місцевого розмиву не враховуються.

Нормування енергії річкового потоку і вирви розмиву по об'єму є наріжним у визначенні граничної глибини, бо дозволяє уникнути необхідності в обчислюванні всього об'єму вирви, контури якої розрахувати досить складно.

Таким чином, енергія на одиницю об'єму водного потоку становить:

$$E_0 = \rho g \left( h + \frac{\alpha V^2}{2g} \right). \quad (12)$$

Для підняття одиниці об'єму ґрунту на висоту, що дорівнює глибині вирви  $\Delta h$ , необхідно виконати роботу:

$$A = g(\rho_s - \rho)\Delta h + C_{зч} \quad (13)$$

де  $\rho$  і  $\rho_s$  – густина води і наносів;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $h$  – природна глибина руслового потоку при розрахунковому рівні води;  $V$  – середня швидкість потоку;  $\Delta h$  – глибина вирви розмиву;  $\alpha$  – коректив кінетичної енергії;  $C_{зч}$  – питома коефіцієнт зчеплення, що враховує віднесену до об'єму роботу на руйнування зв'язних наносів, значення якого наведені в таблиці 1.

**Таблиця 1**

Грунт	Показник текучості	Характеристики	Значення $C_{зч}$ , кПа при коефіцієнті пористості $e$						
			0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Супісок	$0 \leq J_L \leq 0,25$	$C_{зч}$	21	17	15	13	-	-	-
	$0,25 < J_L \leq 0,75$	$C_{зч}$	19	15	13	11	9	-	-
Суглинок	$0 \leq J_L \leq 0,25$	$C_{зч}$	47	37	31	25	22	19	-
	$0,25 < J_L \leq 0,5$	$C_{зч}$	39	34	28	23	18	15	-
	$0,5 < J_L \leq 0,75$	$C_{зч}$	-	-	25	20	16	14	12
Глина	$0 < J_L \leq 0,25$	$C_{зч}$	-	81	68	54	47	41	36
	$0,25 < J_L \leq 0,5$	$C_{зч}$	-	-	57	50	43	37	32
	$0,5 < J_L \leq 0,75$	$C_{зч}$	-	-	45	41	36	33	29

При досягненні граничної величини місцевого розмиву вся питома енергія потоку (12) витрачається на роботу (13) руйнування та екскавації наносів з вирви. Тому, прирівнявши залежності (12) і (13), матимемо формулу для відносної граничної глибини місцевого розмиву:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\rho}{(\rho_s - \rho)}(1 + 0,5Fr) - \frac{C_{зч}}{(\rho_s - \rho)gh}, \quad (14)$$

де  $Fr = \alpha V^2/gh$  – число Фруда (параметр кінетичності), яке з фізичної точки зору є відношенням питомих (віднесених до одиниці ваги потоку) подвійної кінетичної енергії до потенціальної.

При спрямуванні числа Фруда до нуля у формулі (14) відносна глибина місцевого розмиву збігає до кінечної границі

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\rho}{\rho_s - \rho} - \frac{C_{зч}}{(\rho_s - \rho)gh},$$

що суперечить фізичному змісту - тому що рівність числа Фруда  $Fr = 0$  означає відсутність течії в руслі, а отже відсутність і причини місцевого розмиву. Щоб усунути цю суперечність слід розглянути іншу енергетичну характеристику потоку, що подається відношенням повної питомої (на одиницю ваги) енергії потоку до його питомої кінетичної, яку О.А.Угінчус [6] назвав показником збереження потенціальної енергії  $\tau$ :

$$\tau = \frac{h + \frac{\alpha V^2}{2g}}{\frac{\alpha V^2}{2g}}. \quad (15)$$

Між показником збереження потенціальної енергії потоку і числом Фруда існує проста залежність:

$$Fr = \frac{2}{\tau - 1}, \quad (16)$$

$$Fr = \frac{2}{\tau - 1}, \quad (16)$$

яка графічно відтворена на рис. 1

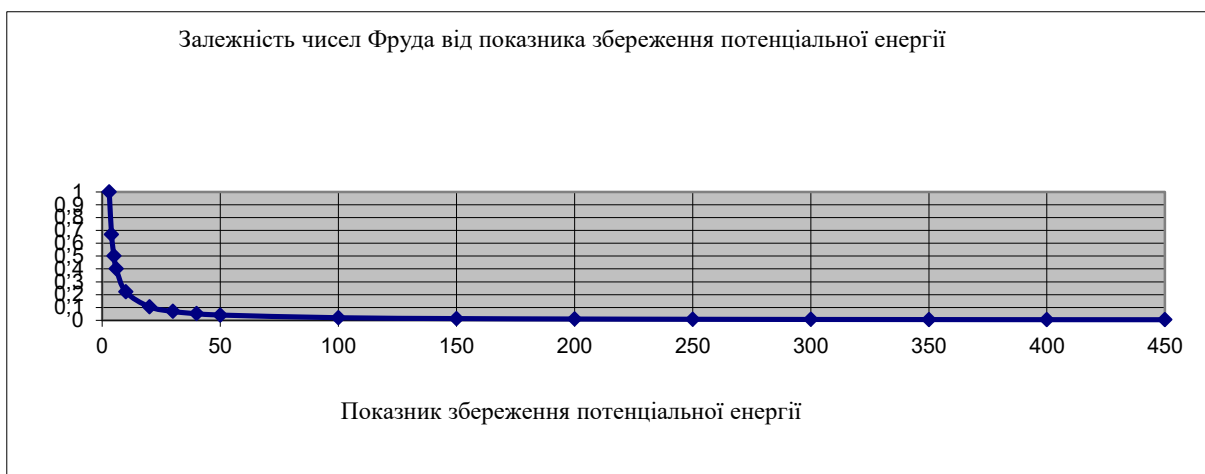


Рисунок 1 – Залежність числа Фруда від τ

Графік функції (16) на рис. 1 свідчить, про практичну незалежність показника збереження потенціальної енергії потоку від числа Фруда, якщо його значення  $Fr \leq 0,01$ , що дозволяє в діапазоні чисел Фруда від 0 до 0,01 величину τ вважати сталою, рівною  $\tau = 200$ .

Послуговуючись величиною τ, формула (14) перетворюється на:

$$\eta_r = \frac{\Delta h}{h} = \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \tau \frac{Fr}{2} - \frac{C_{34}}{(\rho_s - \rho)gh}. \quad (17)$$

В останню формулу при числах Фруда  $Fr \leq 0,01$  треба підставляти  $\tau = 200$ , при  $Fr > 0,01$  величина τ обчислюється за формулою (16), переписаною в такий спосіб:



$$\tau = \frac{Fr + 2}{Fr}. \quad (18)$$

При  $Fr = 0$  відносна глибина вирви у формулі (17) дорівнює від'ємній величині

$$\eta_r = -\frac{C_{зч}}{(\rho_s - \rho)gh},$$

що треба розуміти як відсутність місцевого розмиву. Дійсно, якщо в ній глибину потоку  $h$  виразити через число Фруда, то матимемо залежність

$$\eta_r = -\frac{C_{зч} Fr}{(\rho_s - \rho)V^2},$$

яка при  $Fr = 0$  стає математично невизначеною, а у фізичному сенсі неможливою.

У формулах (14) і (17) відсутня ширина лобової грані опори, тому що вони отримані з фізичних величин (енергія і робота) нормованих по об'єму. До того ж, якщо прийняти, що лобова грань опори впливає на місцевий розмив, то це повинна бути не її ширина, а її форма, яка враховується коефіцієнтом форми опори  $K_f$ .

Зіставити результати розрахунків за формулою (17) з натурними глибинами вирв місцевого розмиву із кадастру М.М.Журавльова досить не просто через вкрай не точні дані про коефіцієнт зчеплення зв'язних наносів  $C_{зч}$ , що залягають в річищі біля опори. Про це пише і сам М.М.Журавльов [4]. Проблема полягає в тому, що зчеплення залежить не тільки від хімічного і гранулометричного складу ґрунту, але й від показника текучості в природному стані  $J_L$ , точно визначити який, дотримуючись обов'язкової процедури підготовки зразків до лабораторного аналізу, дуже важко.

### Таким чином, можна зробити такі висновки.

1) Теоретична формула для визначення глибини вирви місцевого розмиву біля мостових опор у зв'язних ґрунтах (17) є науково обґрунтованою, бо отримана на підставі закону збереження енергії.

2) Для доведення адекватності формули (17) необхідні додаткові натурні дослідження, під час яких величина коефіцієнту зчеплення  $C_{зч}$  визначалась би на місці будь-яким досконалим експрес-методом.

### Література

1. Ярославцев И.А. Расчёт местного размыва у мостовых опор. ЦНИИС, Сообщение № 80. – М.: 1956. – 16 с.
2. Технические указания по расчёту местного размыва у опор мостов, струенаправляющих дамб и траверсов. ВСН 62/69 Минтрансстрой. – М.: 1970. – 40 с.
3. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. – М.: Колос, 1967. – 178 с.
4. Журавльов М.М. Местный размыв у опор мостов. – М.: Транспорт, 1984. – 110 с.
5. Леви И.И. Динамика русловых потоков. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 252 с.
6. Угинчус А.А. Применение показателя сохранения потенциальной энергии потока. – М.-Л.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1951. – 148с.

**Рецензенти:**

Савенко В.Я., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.

Кузло М.Т., д-р техн. наук, Національний університет водного господарства та природокористування.

**Reviewers:**

Savenko V, Ya., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Kuzlo M.T., Dr. Tech. Sci., National University of Water and Environmental Engineering.

Стаття надійшла до редакції: **24.03.2017 р.**