

движения жидкости и вращательного движения внутренней конической поверхности. Показано, каким образом вращение поверхности, то есть действие центробежных сил, может влиять на перепад давлений. Даны расчётные зависимости.

Перелік посилань

1. Ракович В.Я., Кривошеев В.С. Особенности течения масел в цилиндрических зазорах// Вісник Сумського держ. ун-ту. – Серія технічні науки (машинобудування)-2003. -№12(58). –С. 139-143.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 5-е, перераб. –М.: Наука, 1978. -736 с., ил.
3. Ульев Л.М. Ламинарные течения в соосных конических каналах: Монография: В 2-х т.; Под ред. Л.Л. Тобажнянского – Т. 2.-Харьков: НТУ «ХПИ», 2006.-706 с., ил.
4. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. – М.: Машиностроение, 1970. -332 с., ил.

УДК 624.2

С.Г. ТКАЧУК, докт. техн. наук

ПРАКТИЧНІ ФОРМУЛИ ГРАНИЧНОЇ І РОЗРАХУНКОВОЇ ГЛИБИНИ МІСЦЕВОГО РОЗМИВУ

На підставі фундаментального закону збереження енергії виводиться практична формула для визначення граничної глибини вирви місцевого розмиву. Вважається, що вся питома (на одиницю об'єму) енергія потоку витрачається на роботу по підняттю з вирви одиниці об'єму ґрунту. Апроксимуючи натурні відносні глибини місцевого розмиву з кадастру М.М.Журавльова, отримується розрахункова залежність з врахуванням її надійності. Гранична глибина вирви місцевого розмиву є контрольною величиною, тому що розрахункова глибина ні за яких обставин не може бути більшою за неї.

На основании фундаментального закона сохранения энергии выводится практическая формула для определения предельной глубины воронки местного размыва. Считается, что вся удельная (на единицу объема) энергия потока расходуется на работу по поднятию из воронки единице объема грунта. Аппроксимирующих натурные относительные глубины местного размыва из кадастра М. М. Журавлева, получаемый расчетная зависимость с учетом ее надежности. Предельная глубина воронки местного размыва является контрольной величиной, так как расчетная глубина ни при каких обстоятельствах не может быть больше нее.

On the basis of the fundamental law of conservation of energy is derived and practical formula for determining the maximum depth of local erosion crater. It is believed that all the specific (per unit volume) energy of the flow is spent on the work of raising the funnel of a unit volume of soil. Full-scale approximating the relative depth of local erosion of the inventory M. Zhuravleva, obtained the

calculated dependence with regard to its reliability. Maximum depth of local erosion crater is a reference value, as estimated depth under no circumstances be greater than it.

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:

під 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:

$$E_0 = \rho g \left(h + \frac{\alpha V^2}{2g} \right) \quad (1)$$

Для підняття одиниці об'єму ґрунту на висоту, що дорівнює глибині вирви Δh , необхідно виконати роботу:

$$A = g(\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon)\Delta h \quad (2)$$

де: ρ і ρ_s – густина води і наносів; g – прискорення вільного падіння; h – природна глибина руслового потоку при розрахунковому рівні води; V – середня швидкість потоку; Δh – глибина вирви розмиву; α – коректив

кінетичної енергії; ε – коефіцієнт пористості наносів; $1-\varepsilon$ – коефіцієнт суцільності, який за різними літературними джерелами становить, табл. 1

Таблиця 1

№	Вид наносів	Коефіцієнт суцільності в %
1	Пухкий мул після двох днів осідання	7,5 – 20,5
2	Легко при трамбований мул з річки	28
3	Відкладення в сухому руслі	42
4	Відкладення піску в річці	62
5	Гравій з русла ріки	68
6	Суміш піску з гравієм	78

При досягненні граничної величини місцевого розмиву вся питома енергія потоку (1) витрачається на роботу (2) по екскавації наносів з вирви. Тому, порівнявши залежності (1) і (2), матимемо формулу для відносної граничної глибини місцевого розмиву:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\rho}{(\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon)} (1 + 0,5Fr) \quad (3)$$

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. Величина дробу в правій частині формули:

$$A_s = \frac{\rho}{(\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon)}$$

враховує фізико-механічні властивості наносів і для пісків в середньому дорівнює – 0,978; гравію – 0,891; піщано-гравійної суміші – 0,777. Для мулистих пісків і мулу ця величина може сягати 2 ... 3 і навіть більше.

Формула (3) враховує основні чинники задіяні в процесі місцевого розмиву, за винятком ширини лобової грані опори. Щодо впливу ширини опори на глибину місцевого розмиву, то можна констатувати відсутність єдиної думки як серед зарубіжних, так і серед вітчизняних дослідників. Хоча у всіх розробках глибина розмиву виявляє пряму залежність з редуційною шириною опори, тобто $h = f(b^c)$, проте показник степені c коливається від 0,10 до 0,65. Так у І.А.Ярославцева [5] він дорівнює – 0,10; М.М.Журавльова [2] – 0,4 і 0,6; Е.М.Лаурсена [6] і Х.В.Шенна [8] – 0,65. Така строкатість даних може свідчити тільки про невирішеність цього питання.

Ширина опори є поперечним розміром і тому, якщо дотримуватись логіки, визначає інтегральну дію спадних токів на дно вирви, не впливаючи на їх інтенсивність. Причому найбільший вплив ширини опори на розвиток місцевого розмиву спостерігається для опор прямокутного перерізу, для яких властиве нормальне набігання потоку по всій передній грані. Для опор з округленою чи загостреною передньою гранню взаємодія потоку і опори відбувається під деяким змінним кутом, що послаблює сумарну інтенсивність спадаючих токів. Саме це спонукає зробити висновок, що в процесі місцевого розмиву більшу вагу має не ширина опори, а її форма поперечного перерізу, точніше форма її передньої грані. Вплив цього важливого чинника в усіх існуючих формулах враховується коефіцієнтом форми опори k_{ϕ} , який досліджений і визначений емпірично, а отримані результати добре узгоджуються у різних авторів. Проте варто відмітити, що найбільш ретельно ця проблема досліджена І.А.Ярославцевим [5] і його дані рекомендуються для практичного застосування.

Наявність у деяких емпіричних формулах місцевого розмиву ширини опори обумовлюється необґрунтованим вибором головного критерію для обробки емпіричних даних. Це або площа перерізу опори $B \cdot H$, або відношення B/H . В першому випадку місцевий розмив пов'язується з додатковим тиском потоку на опору, в другому – з довільним безрозмірним комплексом. Обидва критерії не можуть бути репрезентативними, тому що важко розділити внесок кожної з величин, які їх складають. Причому достеменно відомо, що глибина в цих критеріях є явно домінуючою. Якщо ж окремо говорити про зв'язок між гідродинамічним тиском на опору і місцевим розмивом, то він безумовно є і до того ж прямий. Але яка його частка буде безпосередньо задіяна в розробці вирви розмиву якраз і залежить від умов обтікання, тобто від форми передньої грані.

Ширина і форма опори визначають здебільшого планові розміри та форму вирви місцевого розмиву і, врешті-решт, об'єм винесеного з вирви ґрунту. Ці обставини визначають темп розмиву, і в межах реального часу повені можуть бути істотними, але для граничної величини, коли пік гіпотетичної повені тримається невизначено довго, їх вплив зводиться майже нанівець.

Виявлення деякого впливу ширини опори на місцевий розмив ґрунтується, головним чином, на результатах експериментальних досліджень в лабораторних умовах, де поперечні розміри опори і потоку сумірні. Тому варіативність опор з різною шириною позначається на загальному стисненні потоку, що і призводить до збільшення швидкостей в створі споруди для більш широких опор і, як наслідок, інтенсифікації розмиву. На реальних мостових переходах стиснення потоку опорами не перевищує декількох відсотків, і тому ним можна знехтувати.

Щодо залежності місцевого розмиву від крупності наносів, натурні та експериментальні дані свідчать наступне. При майже однакових числах Фруда на річках Амудар'я і Чирчик, річища яких складають відповідно мулисті піски $d = 0,20$ мм і галька $d = 100$ мм (співвідношення 1 : 500), глибини вирв

відрізняються лише в 1,5 – 2 рази. Пояснення цьому полягає в тому, що головним чинником в процесі розмиву є не крупніють наносів, а загальна маса алювію, винесеного з вирви, на що раніше вказували М.М.Журавльов [2], а К.Ізард, І.Бредлі [7], Е.Лаурсен [6] взагалі вважають, що глибина вирви не залежить від розміру наносів.

На підставі такого аналізу формула (3) набуває виду, де відносна гранична глибина вирви позначена через $\eta = \Delta h/h$:

$$\eta_r = k_\phi A_s (1 + 0,5Fr) \quad (4)$$

При спрямуванні числа Фруда до нуля у формулі (4) відносна глибина місцевого розмиву збігає до границі $k_\phi A_s$, 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 [4] назвав показником збереження потенціальної енергії τ :

$$\tau = \frac{h + \frac{\alpha V^2}{2g}}{\frac{\alpha V^2}{2g}} \quad (5)$$

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

$$Fr = \frac{2}{\tau - 1}, \quad (6)$$

яка графічно відтворена на рис. 1

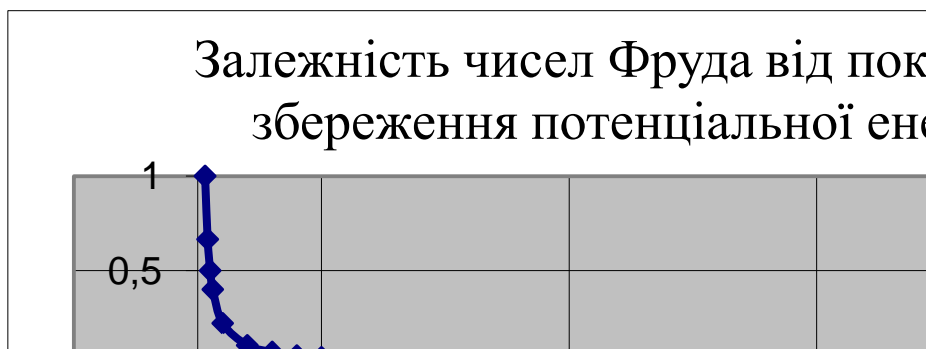


Рис. 1. Залежність числа Фруда від показника збереження потенціальної енергії

Графік функції (6) 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 (4) перетворюється на:

$$\eta_r = k_\phi A_s \tau \frac{Fr}{2} \quad (7)$$

В останню формулу при числах Фруда $Fr \leq 0,01$ треба підставляти $\tau = 200$, при $Fr > 0,01$ величина τ обчислюється за формулою (6), переписаною в такий спосіб:

$$\tau = \frac{Fr + 2}{Fr} \quad (8)$$

Формула (7) вже фізично не суперечлива, бо при $Fr = 0$ відносна глибина вирви теж дорівнює нулю $\eta = 0$.

Надійність обґрунтування граничного місцевого розмиву за формулами (4) і (7) залежить від точності визначення числа Фруда і ймовірності безвідмовної роботи споруди. Щоб визначити відносну середню квадратичну похибку числа Фруда, його доцільно записати у морфометричному виді:

$$Fr = \frac{C^2 I}{g}$$

де: C – коефіцієнт Шезі, відносна середньоквадратична похибка якого становить $\bar{\sigma}_c = 0,1$ [3]; I – гідравлічний похил, який, вважаючи русловий потік рівномірним, дорівнює похилу дна та похилу вільної поверхні і може бути визначеним з відносною середньою квадратичною похибкою $\bar{\sigma}_l = 0,1$ [3]. Тоді згідно математичної теорії помилок матимемо:

$$\bar{\sigma}_{Fr} = \sqrt{(2\bar{\sigma}_c)^2 + \bar{\sigma}_l^2} = \sqrt{(2 \cdot 0,1)^2 + 0,1^2} = 0,22$$

За припущенням Л.Г.Бегамма і В.Ш.Ципіна [1] про нормальний розподіл випадкових величин задіяних в русловому процесі на мостових переходах, характеристика надійності γ_n при заданій ймовірності безвідмовної роботи $P_\%$ знаходиться з неявної залежності:

$$P_\% = 0,5 + \Phi_0 \left(\frac{\gamma_n - 1}{\bar{\sigma}} \right) \quad (9)$$

де функція Φ_0 пов'язана з інтегралом ймовірності, для якої розроблені розрахункові таблиці. Так, наприклад, для ймовірності безвідмовної роботи $P_{\%} = 0,995$ функція $\Phi_0 = 0,995 - 0,5 = 0,495$. Такому значенню функції Φ_0 в таблиці [1] відповідає величина $(\gamma_H - 1)/\bar{\sigma} = 2,58$. Тоді характеристика надійності $\gamma_H = 1 + 2,58 \cdot 0,22 = 1,57$. Відповідно при $P_{\%} = 0,99$ характеристика надійності $\gamma_H = 1,36$. Таким чином, відносна гранична глибина вирви місцевого розмиву становитиме:

$$\eta_{\Gamma} = \gamma_{H_{\Gamma}} k_{\Phi} A_s \tau \frac{Fr}{2} \quad (10)$$

Гранична глибина вирви дорівнює:

$$\Delta h_{\Gamma} = \gamma_{H_{\Gamma}} \eta_{\Gamma} h \quad (11)$$

де h – природна глибина в руслі.

При $\bar{\sigma}_h = 0,15$ відносна середня квадратична похибка граничної глибини вирви дорівнює $\bar{\sigma}_{\Delta h} = 0,266$, а характеристика надійності, відповідно:

$$P_{\%} = 0,995; \gamma_{H_{\Gamma}} = 1,69$$

$$P_{\%} = 0,99; \gamma_{H_{\Gamma}} = 1,44$$

Беручи до уваги, що нормативний термін експлуатації мостового переходу не перевищує 100 років, то ймовірність безвідмовної роботи для них може бути призначена $P_{\%} = 0,99$. Тоді розрахункова формула для граничної глибини місцевого розмиву буде такою:

$$\Delta h_{\Gamma} = 0,72 k_{\Phi} A_s h \tau Fr \quad (12)$$

Для оцінювання адекватності граничних глибин місцевого розмиву за формулою (10) були використані натурні дані з кадастру М.М.Журавльова [2]. Після приведення цих натурних замірів до залежності між відносною глибиною вирви η і числом Фруда та нанесення їх на графік, матимемо точкове поле (рис. 2).

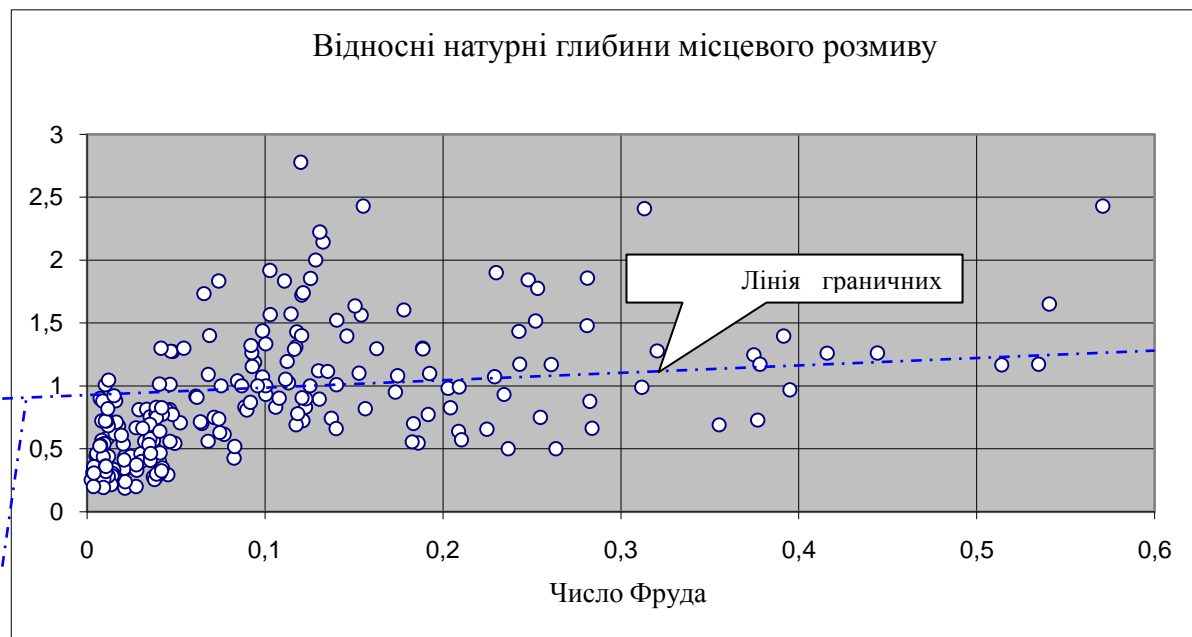


Рис. 2. Відносні натурні глибини місцевого розмиву

Починаючи з $Fr = 0,05$ чимало натурних точок розташовано вище лінії граничних глибин, нанесеною на графік з врахуванням її характеристики надійності. Всі ці точки зняті на мостових переходах через річки з русловою багаторукавністю. І хоча сам по собі тип руслового процесу не впливає на процес місцевого розмиву, але від нього залежить точність замірів глибини вирви. На річках з русловою багаторукавністю, наприклад, блукаючих – як Амудар’я, чи осередкових – як Чирчик та деяких ділянках Карпатських річок безладні коливання відміток дна наближаються до коливань рівня води. До того ж для мулистих пісків Амудар’ї коефіцієнт $A_s \gg 0,882$, величини прийнятої за середню при нанесенні лінії граничних глибин. Тому в цих умовах марно сподіватися на бодай задовільну точність гідрометричних робіт. Крім того заміри глибин і швидкостей на одному й тому ж переході важко узгодити в часі. Звідси невідомо: на якій фазі паводку здійснювались гідрометричні роботи і чи були вони синхронні. І, нарешті, немає даних на яких саме вертикалях вимірювалися швидкості і глибини. На доказ цього легко знайти групу точок, які для одного й того ж переходу показують різні відносні глибини місцевого розмиву при майже однакових числах Фруда. Причому ніякої закономірності в розташуванні точок не простежується. Спостерігається і зворотне явище, коли майже однаковим відносним глибинам відповідають різні значення чисел Фруда. Все це доводить наявність значних похибок, що об’єктивно супроводжують гідрометричні роботи в натурних умовах. Похибку замірів натурних глибин місцевого розмиву в кадастрі сам М.М.Журавльов [2] оцінює $\pm 50\%$.

Після вилучення даних про місцеві розмиви на мостах через річки з русловою багаторукавністю і деяких явно сумнівних замірів, матимемо:

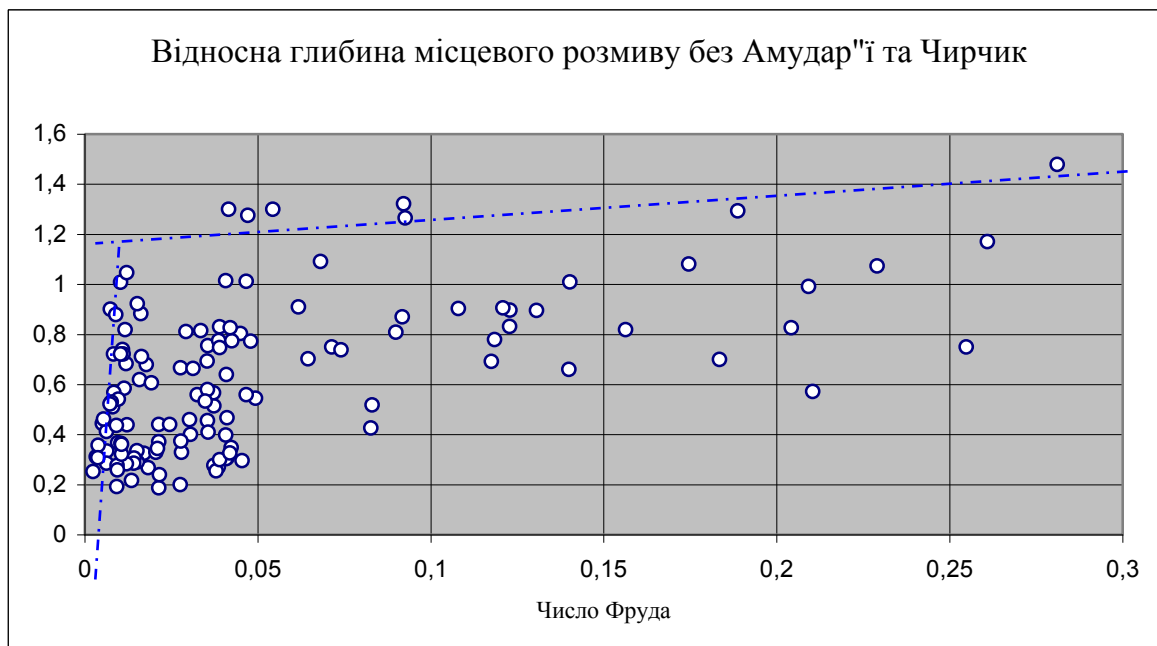


Рис.3. Відносні глибини місцевого розмиву в піщаних руслах

Апроксимуючи натурні точки на рис. 3, отримується емпірична розрахункова залежність відносної глибини місцевого розмиву:

$$\eta_p = 1,3036 Fr^{0,2447} \quad (13)$$

Враховуючи, що всі дані „кадастру” М.М.Журавльов привів до опор круглого перерізу, розрахункова глибина вирви дорівнюватиме:

$$\Delta h_p = 1,3036 \gamma_{н_p} k_{\Phi} Fr^{0,2447} \quad (14)$$

де характеристика надійності при ймовірності безвідмовної роботи $P_{\%} = 0,99$ становить $(\gamma_{н_p})_p = 1,36$, при $P_{\%} = 0,995$, $(\gamma_{н_p})_p = 1,40$.

В Україні блукаючих річок подібних до Амудар'ї немає. Але в передгір'ях Карпат протікають річки з крупним алювієм, на окремих ділянках яких спостерігається осередковий вид руслової багатуруканості. Для мостових переходів через такі річки при визначенні відносної глибини місцевого розмиву можна рекомендувати формулу (13), яка практично співпадає з апроксимаційною кривою для моста через р.Чирчик, рис. 4.

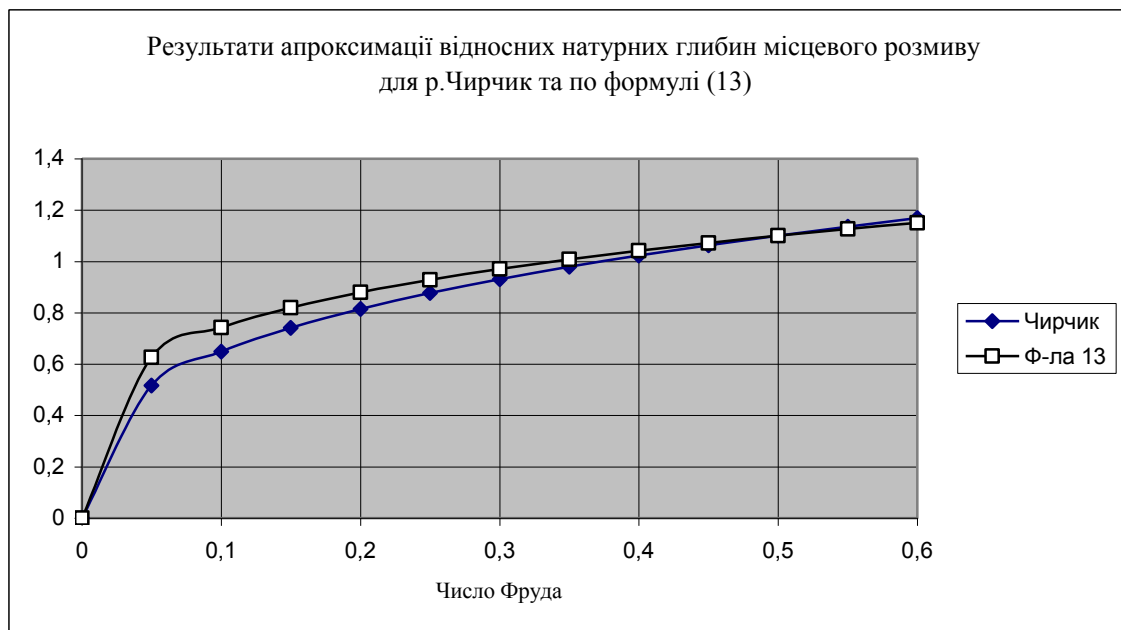


Рис. 4. Відносні натурні глибини місцевого розмиву в руслах з крупним алювієм

Висновки

1. Розрахункова глибина вирви місцевого розмиву за формулою (14) та за всіма іншими формулами ні за яких обставин не може перевищувати граничну величину (12).
2. Розрахунковий рівень розмиву (PPP) належить визначати як суму розмивів місцевого (14), загального та природних руслових переформувань обумовлених типом руслового процесу.
3. Природні руслові переформування не впливають на процес місцевого розмиву, але від них залежить точність вимірювання глибини вирви.

Перелік посилань

1. Бегам Л.Г., Цыпин В.Ш. Надежность мостовых переходов. – М.: Транспорт, 1984. - 253 с.
2. Журавльов М.М. Местный размыв у опор мостов.- М.: Транспорт, 1984-112 с.
3. Лучшева А.А. Практическая гидрометрия.-Л.: Гидрометеиздат, 1972.-380 с.
4. Угинчус А.А. Применение показателя сохранения потенциальной энергии потока.- М-Л.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1951.-148 с.
5. Ярославцев И.А. Расчет местного размыва у мостовых опор. ЦНИИС, Сообщение № 80. – М.: 1956. – 16 с.
6. Laursen E.M., Toch A., Scour Around Bridge and Abutment Iowa Highway Research Board, Bulletin № 4 , Iowa, 1956, 60 pp.

7. Izzard C.F., Bradley I.N. Field Verification of Model Tests on Flow Through Highway Bridges and Culverts, -“Proc. Seventh Hydraulic Conference University of Iowa”, 1957.
8. Shen H.W., Schneider V.R. Karaki S. Local scour around bridge piers. Proc. of the ASCE, Journal of the Hydraulics Division, 1969, Nov., HY 6, pp 1919-1940.

УДК 629.74 : 532.53

В.А.КОВАЛЕВ, канд. техн. наук.

ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ В ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЪЕМАХ

Приведен анализ результатов экспериментальных исследований поведения жидкости в ограниченных объемах при разворотах космического аппарата на орбите Земли. Полученные профили скоростей жидкости в баках аппроксимируются степенными рядами, которые в сочетании с критериальными оценками адекватно представляют картину инерционного течения топлива в баках.

Наведений аналіз результатів експериментальних досліджень поведінки рідини в обмежених об'ємах при розворотах космічного апарата на орбіті Землі. Отримані профілі швидкостей рідини у баках апроксимуються ступеневими рядами, які у сполученні з критериальними оцінками адекватно представляють картину інерційного руху палива у баках.

The results of experimental investigations of liquid flows in spacecraft tanks during its orbital motions are presented. The flow velocity profiles are approximated by power series that in combination with similarity criteria provide the adequate picture of inertial fuel flows in spacecraft tanks.

Создание объектов ракетной и космической техники включает в себя разработку многочисленных узлов и агрегатов, взаимодействующих между собой и обеспечивающих работоспособность и высокую надежность работы объекта в целом. Одной из ключевых систем космического аппарата (КА) является объединенная двигательная установка (ОДУ), включающая в себя реактивные двигатели с соответствующей запорно-регулирующей аппаратурой и топливные баки с компонентами жидкого топлива и окислителя.

При движении КА на различных участках полета на жидкие компоненты топлива действуют внешние силы, обуславливая случайные и неконтролируемые движения жидкости в топливных баках [1,2]. В свою очередь, движущаяся жидкость затем воздействует на стенки баков и внутри-баковые конструкции и может вызвать отклонения КА от штатной траектории полета и нормального режима работы двигателей. Для компенсации таких инерционных воздействий на борту КА и обеспечения стабильности и надежности управления объектом периодически включается система ориентации и стабилизации (СОС) КА, работа которой требует дополнительного расхода топлива, запасы которого на борту