

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**БАШКЕВИЧ ІРИНА ВАСИЛІВНА**

УДК 627.15

**МОДЕЛЬ ЗАЛИШКОВОГО РОЗМИВУ В ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВИХ  
ПЕРЕХОДІВ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ**

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі мостів та тунелів Національного транспортного університету Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Ткачук Сергій Григорович,**  
Національний транспортний університет,  
завідувач кафедри мости та тунелі

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Щодо Олексій Євгенович,**  
Національний університет водного  
господарства та природокористування  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри гідротехнічного  
будівництва.

кандидат технічних наук, доцент  
**Кіяшко Ігорь Володимирович,**  
Харківський національний автомобільно-  
дорожній університет Міністерства освіти і  
науки України, професор кафедри  
будівництва та експлуатації автомобільних  
доріг

Захист відбудеться «\_\_»\_\_\_\_\_2015 р. о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою: 01010, Україна, м.Київ, вул.Суворова, 1, ауд. 333.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного транспортного університету : 01103, Україна, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42.

Автореферат розісланий «\_\_»\_\_\_\_\_2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.І.Каськів

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Автомобільна дорога – складова частина транспортної інфраструктури, яка служить для пересування людей і транспорту, і давно стала невід'ємною частиною людського існування. У наш час без доріг повноцінне життя уявити неможливо. Подібно до артерій, вони багаторазово перетинають населені пункти, несучи у всіх можливих напрямках нескінченні потоки автомобілів. У зв'язку з цим, будівництво нових доріг, а також реконструкція тих, що вже знаходяться в експлуатації, є одним з найбільш важливих і актуальних завдань розвитку транспорту.

Автомобільні дороги перетинають водні перешкоди різної величини, що обумовлює необхідність спорудження транспортних споруд, зокрема мостових переходів. При цьому вартість будівництва транспортних споруд складає в середньому 20% вартості всієї дороги (10% – вартість мостових переходів; 10% – вартість малих водопропускних споруд). В районах з підвищеною водонебезпечністю ця цифра може бути значно більшою. Мостові переходи, крім навантажень від рухомого складу, за час своєї експлуатації сприймають і витримують по декілька разів дію водної стихії і наражаються на небезпеку затоплення, підмиву і розмиву текучою водою. Фундаменти та опори мостів можуть експлуатуватися 100–150 років, а сучасні збірні залізобетонні прогонові будови в середньому 40 років. З цієї причини надійність розрахункового рівня розмиву має бути вищою за надійність мостових конструкцій, тому що саме вона забезпечує стійкість і довговічність мостових переходів в цілому.

Проектування мостових переходів тісно пов'язано з прогнозуванням руслових деформацій в зоні їх впливу. В результаті гідравлічних розрахунків і прогнозу розвитку загальних руслових деформацій, виникаючих внаслідок стиснення водного потоку насипами підходів, визначаються генеральні розміри мостових переходів – довжини мосту, розрахунковий розмив, мінімальна відмітка підходів.

Загальні руслові деформації перебувають у прямій залежності від міри стиснення ріки мостовим переходом. Чим більше стиснення, а отже, чим менше отвір, тим більше величина загального розмиву. Тому в більшості випадків головним критерієм для обґрунтування ширини отвору мосту розглядається глибина загального розмиву.

Проблема залишкового розмиву виникає через необхідність багаторічного прогнозування руслових деформацій на мостових переходах. Залишковий розмив – це величина загального розмиву, яка утворилась на момент звільнення заплав від води і є початковими умовами для наступного паводку. Таким чином, розроблення математичної моделі для визначення залишкового розмиву в системі багаторічного прогнозування величини загального розмиву є актуальною науковою проблемою, і це обґрунтовує **актуальність теми** дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до держбюджетних тем науково-дослідної роботи кафедри мостів та тунелів Національного транспортного університету № 62

«Розробити методику довгострокових прогнозів руслових деформацій на мостових переходах через Карпатські річки» (державний реєстраційний номер 0108U000880) та № 83 «Розв'язання проблеми залишкового розмиву на мостових переходах автомобільних доріг» (державний реєстраційний номер 0110U000122).

#### **Мета та задачі дослідження.**

Метою дисертаційної роботи є розроблення і реалізація моделі залишкового розмиву русла на мостових переходах в системі багаторічного прогнозування руслових деформацій, що дозволить підвищити надійність та довговічність мостових споруд.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі **задачі**:

- проведено аналіз існуючих моделей багаторічного прогнозування руслових деформацій;
- розроблено математичну модель прогнозування величини загального розмиву русла за багаторічний період, яка б враховувала залишковий розмив, і провести оцінку адекватності запропонованої моделі;
- обґрунтовано коефіцієнт стиснення потоку під мостом та довжину зони стиснення на момент залишкового розмиву;
- досліджено вплив залишкового розмиву на величину загального максимального розмиву русла при багаторічному прогнозуванні руслових деформацій;
- розроблено інженерну методику визначення залишкового розмиву в зоні впливу мостових переходів на автомобільних дорогах.

**Об'єкт дослідження** – руслові процеси на мостових переходах.

**Предметом дослідження** є модель залишкового розмиву при багаторічному прогнозуванні руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів на автомобільних дорогах.

**Методи дослідження.** У рамках дисертаційної роботи застосовувалися методи математичного моделювання, теорії ймовірності і математичної статистики, класичні аналітичні методи розв'язання диференціальних рівнянь з частинними похідними.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- *вперше* розроблено критеріальне рівняння залишкового розмиву, яке дає можливість визначити коефіцієнт стиснення потоку під мостом та довжину зони стиснення на момент залишкового розмиву;
- *вперше* розроблено і здійснено аналітичну реалізацію математичної моделі прогнозування залишкового розмиву русла з використанням лінійної характеристики трансформації руслової витрати;
- удосконалено залежність між залишковим розмивом і максимальним багаторічним прогнозуванням руслових деформацій;
- застосовано кубічні сплайни в похилах, як початкові умови при визначенні залишкового розмиву;
- розроблено інженерну методику для визначення залишкового розмиву русла і побудови поздовжнього профілю залишкового розмиву перед мостовим

переходом з використанням кубічного сплайна в похилах.

**Достовірність наукових висновків** і рекомендацій підтверджується теоретичними розробками, які ґрунтуються на теорії руслових процесів, збіжністю результатів з достовірними даними натурних спостережень та результатами інших авторів.

Результати досліджень та отриманих аналітичних розв'язків порівнювалися з даними офіційного звіту про натурні проміри глибин загального розмиву під час вишукування в розрахунковому створі моста через р. Ворскла ДП «Укрдіпдор» (архівний номер 463).

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у тому, що теоретичні положення дисертаційної роботи доведені до рівня алгоритмів, програмних засобів та інженерної методики визначення залишкового розмиву в системі багаторічного прогнозування руслових деформацій, достовірність яких обґрунтовано порівнянням результатів з натурними даними.

Матеріали досліджень були впроваджені в ДП «ДерждорНДІ», а також ПАТ «Київсоюзшляхпроект» для розрахунку основних гідравлічних параметрів при визначенні залишкового розмиву та прогнозування мінімальної відмітки дна в руслі. Також результати дисертаційної роботи можуть бути використані на інших підприємствах при проектуванні, будівництві та експлуатації мостових переходів.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри мостів та тунелів Національного транспортного університету при викладанні дисципліни «Розвідування і проектування мостових переходів і тунельних пересічень» для студентів за напрямом «Будівництво», при формуванні програм лекційних занять і в дипломному проектуванні.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням. Автором самостійно сформульовані і обґрунтовані наукові ідеї, теоретичні розробки, висновки і рекомендації, а також практичне впровадження результатів дисертаційної роботи.

В опублікованих у співавторстві роботах здобувачу належать: врахування початкових умов із застосуванням кубічного сплайну, вираженого через похили [3, 7], розв'язання математичної моделі залишкового розмиву [1, 9], складання алгоритмів розрахунків [2, 8], проведення математичних експериментів і аналіз їх результатів [4 – 6].

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи і її основні положення доповідались й обговорювались на 65 – 71 наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів Національного транспортного університету (2009 – 2015 рр., м. Київ, НТУ), Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 90-річчю з Дня народження академіка М. Г. Бондаря та 100-річчя з Дня народження професора М. Н. Гольдштейна «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (27.05 – 28.05.2010 р., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна), Сьомій науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (27 – 29 вересня

2011 р., Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), III-тій міжнародній науково-практичній конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (11 – 12 жовтня 2012, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна), Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні методи і технології проектування, будівництва та експлуатації інженерних споруд на автомобільних дорогах» (4 – 5 квітня 2013 р., м. Київ), IV-тій міжнародній науково-практичній конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (2014, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, магістрантів та студентів «Науково-технічний прогрес на транспорті» (2015, м. Дніпропетровськ).

**Публікації.** У процесі виконання дисертаційної роботи теоретичні та практичні положення надруковані у наукових фахових виданнях, збірниках наукових праць та в тезах доповідей на конференціях. Всього 13 публікацій – із них 9 одноосібних. У фахових виданнях України – 8 статей, у закордонних виданнях – 1 стаття, тез доповідей на наукових конференціях – 4.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Загальний обсяг роботи складає 165 сторінок, зокрема 140 сторінок основного тексту, 29 рисунків, 9 таблиць і список використаних джерел із 122 найменувань. Прикладені довідки про впровадження результатів досліджень в практику проектування мостових переходів та свідоцтва про реєстрацію авторського права.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить загальну характеристику роботи. В ньому обґрунтована актуальність вибраної теми, сформульовані мета та задачі досліджень, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів дисертації. Наведено відомості про апробацію та публікації результатів досліджень.

**У першому розділі** виконано аналіз сучасного стану проблеми прогнозування загальних руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів. Наводяться основні принципи розрахунку розмивів під мостами, основні математичні моделі, числові та аналітичні реалізації рівняння балансу наносів.

Основні роботи належать Белелюбському М.А., Андрєєву О.В., Каншину А.А., Срібному М.Ф., Зброжеку Ф.Г., Латишенкову А.М., Ліштвану Л.Л., Херхеулідзе І.І., Бернадському Н.М., Веліканову М.А., Леві І.І., Факторовичу М.Є., Гришаніну К.В., Войновичу П.А., Дементьєву М.А., Федотову Г.А., Ротенбургу Й.С., Росинському К.І., Кузьміну І.А., Базилевичу В.А., Розовському І.Л., Векслеру А.Б., Доненбергу В.Н., Даденкову Ю.М., Большакову В.О., Щодро О.Є., Рассказову О.О., Савенку В.Я., Славінській О.С., Ткачуку С.Г., Корецькому А.С.

Аналіз показав, що в літературі математичні моделі і залежності для

розрахунку руслових деформацій не враховують деяких особливостей при визначенні залишкового розмиву. Зокрема те, що на момент залишкового розмиву зменшується довжина зони стиснення та коефіцієнт стиснення потоку під мостом.

У другому розділі обґрунтовується математична модель загального розмиву на мостових переходах. Математична модель руслових деформацій, враховуючи двофазність потоку, складається на чотирьох рівняннях – динамічних і нерозривності, відповідно для води і наносів.

Домінантним для математичних моделей руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів є диференціальне рівняння балансу наносів, яке є рівнянням нерозривності для твердої фази руслового потоку і виражає фундаментальний закон збереження речовини. Для умов стиснення ріки мостовими переходами і для русла з нерозмивними берегами це рівняння в розгорнутому виді:

$$\frac{\partial G}{\partial l} - B_p \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

де  $G$  – транспортуюча спроможність руслового потоку;

$l$  – відстань від початку стиснення потоку мостовим переходом;

$B_p$  – ширина русла;

$h$  – середня глибина в живому перерізі;

$t$  – час.

Рівняння (1) відноситься до диференціальних рівнянь в частинних похідних першого порядку і набуло поширеного застосування в практиці інженерних прогнозів руслових деформацій підмостових русел. Для умов стиснення ріки мостовими переходами рівняння балансу наносів вперше застосував О.В. Андрєєв. Рівняння балансу наносів (1) придатне як для визначення руслових переформувань в природних умовах, так і прогнозування деформацій дна при будь-якому стисненні ріки гідротехнічними чи транспортними спорудами. Але при цьому треба мати на увазі два застереження:

- береги русла повинні бути стійкими до розмиву;
- на розрахунковій ділянці повинні бути відсутні притоки і бічне надходження наносів через брівки русла.

Як показали численні лабораторні та натурні дослідження багатьох авторів, формула транспортуючої спроможності потоку має вигляд:

$$G = A \cdot Q \cdot Fr^{1,5}, \quad (2)$$

де  $A$  – коефіцієнт, який враховує фізичні властивості наносів;

$Q$  – витрата потоку;

$Fr$  – число Фруда (параметр кінетичності).

Третє рівняння математичної моделі – це рівняння, яке встановлює зв'язок між витратою рідини і середньою, в кожному живому перерізі, швидкістю у довільний момент часу:

$$Q = B_p \cdot h \cdot V, \quad (3)$$

де  $V$  – середня в перерізі швидкість руслового потоку.

При цьому сама витрата води в загальному випадку може змінюватися як за часом, так і по довжині.

Гідрологічний режим ріки й гідроморфологічні параметри її русла являють собою систему, що може підсилювати або послабляти інтенсивність загальних руслових деформацій у зоні впливу мостових переходів. Однак головним фактором розвитку загального розмиву є величина й характер трансформації руслової витрати, обумовлена стисненням ріки підходами до мосту. Загальний розмив під мостом залежить як від абсолютної величини коефіцієнта трансформації руслової витрати, так і від характеру його зміни в границях зони стиснення. Тому варто встановити зв'язок між величиною загального розмиву під мостом і різними характеристиками трансформації руслової витрати.

З цією метою четверте рівняння математичної моделі для визначення характеристики трансформації руслової витрати записується з узагальненим показником степеню:

$$\beta = \frac{1}{\left(1 - \frac{l}{R}\right)^n}, \quad (4)$$

де  $R$  – параметр центральної струмини – відстань від початку зони стиснення до точки, де ширина центральної струмини лінійно збігає до нуля (дослідження Абрамова Ю.В., Соловйової Л.Г.), який визначають за залежністю:

$$R = \frac{l_c \cdot \beta_m}{\beta_m - 1}, \quad (5)$$

де  $l_c$  – довжина зони стиснення потоку;

$\beta_m$  – коефіцієнт трансформації руслової витрати під мостом.

Якщо врахувати як визначається параметр центральної струмини, матимемо:

$$\beta = \frac{1}{\left(1 - \frac{l}{l_c} \cdot b\right)^n}, \quad (6)$$

де  $b = 1 - \frac{1}{\beta_m}$ .

Для перевірки зроблених перетворень розглядаються граничні умови: коли  $l = 0$ , маємо  $\beta = 1$  – початок зони стиснення;



коли  $l = l_c$ , маємо  $\beta = \beta_m^n$  – під мостом.

Надаючи показнику степеню різні значення від 0,2 до 1,3, одержимо різні характеристики трансформації руслової витрати. Якщо розглянути зону, яка відповідає залишковому розмиву (рисунок 1), то можна побачити, що при невеликому стисненні, тобто в момент залишкового розмиву, характеристика трансформації руслової витрати змінюється практично за лінійним законом.

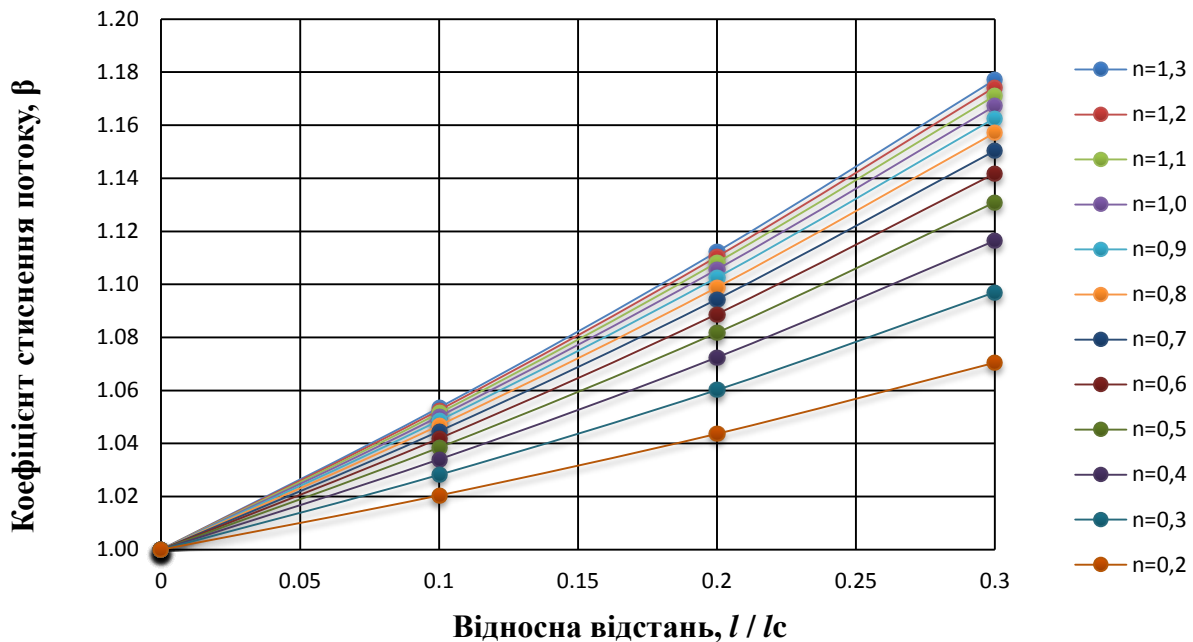


Рисунок 1 – Коефіцієнт стиснення потоку на початку зони стиснення

Для одержання змістовних результатів, що відбивають сутність впливу різних умов формування змінної уздовж шляху руслової витрати на величину загального розмиву під мостом, досить обмежитись аналізом його верхньої границі. У зв'язку із цим виникає необхідність в одержанні аналітичного виразу для верхньої границі загального розмиву, що враховує різні характеристики трансформації руслової витрати.

Математична модель для розв'язку поставленої задачі має вигляд (7) і складається з диференціального рівняння балансу наносів, транспортуючої спроможності потоку, рівняння нерозривності потоку, характеристики трансформації руслової витрати з узагальненим показником степені:

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial l} - B_p \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \\ G = A \cdot Q \cdot Fr^{1,5} \\ Q = h \cdot B_p \cdot V \\ \beta_p = \left(1 - \frac{l}{l_c} \cdot b\right)^{-n} \end{cases}, \quad (7)$$

де  $\beta_p$  – коефіцієнт трансформації руслової витрати в зоні стиснення.

Після всіх перетворень основна розрахункова залежність для визначення загального розмиву під мостом набуває такого виду:

$$h = h_{j-1} \cdot \left[ 1 + \frac{4 \cdot \left(4 + \frac{1}{n}\right) \cdot A_g \cdot b \cdot \Gamma \cdot \beta_m^4 \cdot (\beta_m^{1/n} - 1)}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{5,5}} \right]^{\frac{1}{4 + \frac{1}{n}}}, \quad (8)$$

де  $A_g$  – розмірний коефіцієнт, залежний від крупності наносів;  
 $h_{j-1}$  – глибина в руслі до розмиву.

Дослідження залежності глибини, що відповідає загальному розмиву, від параметра  $n$ , що визначає характеристику трансформації руслової витрати, виконано за допомогою аналітичної формули (8) для мостового переходу через річку Вільшанка. Графічне зображення результатів дослідження показано на рисунку 2.

Аналізуючи дані, які наведені на рисунку 2, можна побачити, що при зміні показника степені  $n$  від  $n = 0,4$  до  $n = 1,3$  графіки, що визначають глибину в розмитому руслі під час проходження паводку, майже накладаються один на одного. Це свідчить про те, що величина загального розмиву на мостових переходах майже не залежить від характеру трансформації руслової витрати. Значення величини загального розмиву зростають зі збільшенням показника степені  $n$  в характеристиці трансформації руслової витрати.

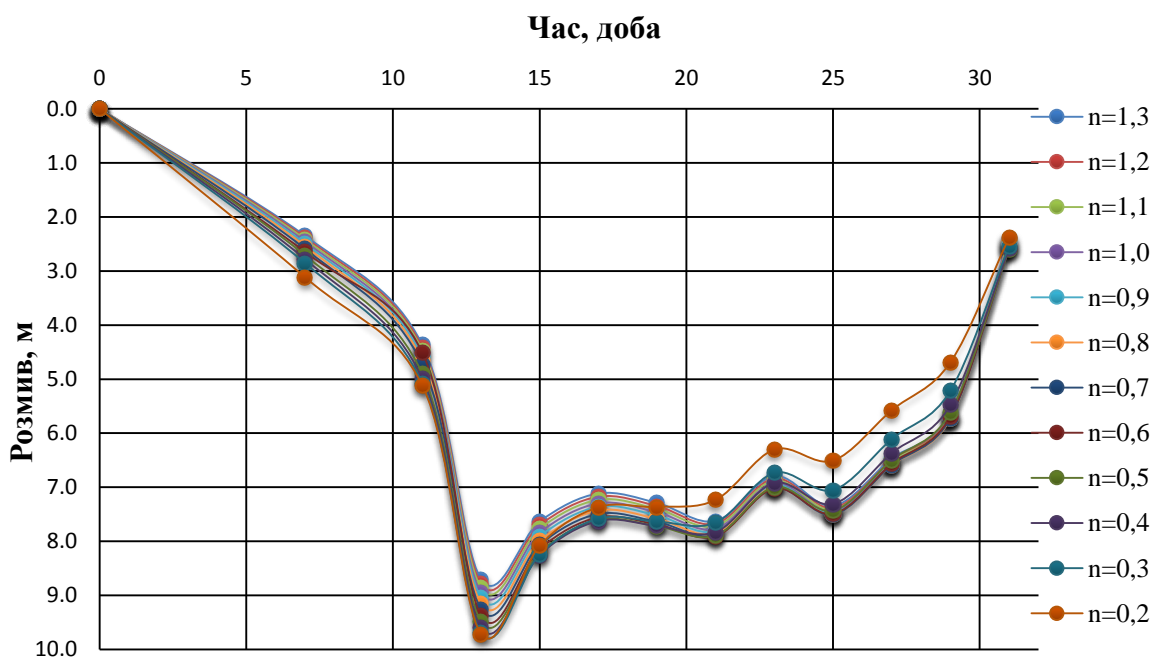


Рисунок 2 – Залежність загального розмиву від характеру характеристики трансформації загальної витрати під час проходження паводку на р. Вільшанка

Коефіцієнт стиснення потоку під мостом  $\beta_m$  на момент звільнення заплав від води практично лінійно зменшується до 1,0. Отримані результати дозволяють здійснити аналітичну реалізацію математичної моделі залишкового розмиву з лінійною характеристикою трансформації руслового потоку в системі багаторічного прогнозування руслових деформацій на мостових переходах.

У третьому розділі представлена аналітична реалізація математичної моделі залишкового розмиву підмостових русел.

Залишковий розмив – це розмив, який залишається після проходження паводку. Крім того, значення залишкового розмиву є вихідними даними для визначення наступного (а значить і максимального) розмиву в системі багаторічного прогнозування руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів. Залишковий розмив відбувається на момент звільнення заплав від води.

Згідно з ДБН В.2.3-22:2009 “Мости та труби. Основні вимоги проектування” загальний розмив під мостом можна обчислити за залежністю Ткачука С.Г.:

$$h_j = h_{j-1} \cdot \left[ 0,5 + \sqrt{0,25 + \frac{20 \cdot A_g \cdot \Gamma \cdot \beta_m^4 \cdot (\beta_m - 1)}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h_{j-1}^5}} \right]^{\frac{1}{5}}, \quad (9)$$

де  $h_{j-1}$  – глибина в руслі до розмиву, яка в кожний момент часу дорівнює різниці між рівнем високої води (РВВ) і відміткою дна;

$\Gamma = \int (Q_{pn})^4 dt$  – інтегральна функція гідрографа природної руслової витрати.

Проблема залишкового розмиву полягає в обґрунтуванні його критеріїв, тобто у визначенні коефіцієнта стиснення  $\beta_m$  і довжини зони стиснення  $l_c$  на момент звільнення заплав від води.

Математична модель залишкового розмиву (10) складається з диференціального рівняння балансу наносів, формули трансформуючої спроможності руслоформуючих наносів, рівняння витрати потоку і його лінеаризованої характеристики трансформації:

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial l} - B_p \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \\ G = A \cdot Q \cdot Fr^{1,5} \\ Q = h \cdot B_p \cdot V \\ \beta_p = 1 + k \cdot l \end{cases}, \quad (10)$$

де  $\beta_p$  – коефіцієнт трансформації руслової витрати в зоні стиснення, що змінюється за течією майже лінійно, від 1 в створі, де починається стиснення, до  $\beta_{pm}$  під мостом;  $k$  – коефіцієнт пропорційності, який обчислюється за формулою:

$$k = \frac{\beta_m - 1}{l_c}. \quad (11)$$

Розв'язок диференціального рівняння I порядку з частинними похідними для глибини залишкового розмиву має вид:

$$h_j = h_{j-1} \cdot \left[ 1 + \frac{12 \cdot k \cdot A_g \cdot \Gamma \cdot \beta_m^3}{B_p^4 \cdot h^{5.5}} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (12)$$

Залежність (12) є неявною і справедлива тільки для визначення залишкового розмиву, а максимальний розмив необхідно розраховувати за залежністю (9). Щоб отримати єдине рішення, відповідне умовам задачі, треба задати початкові умови. Тоді задача прогнозування руслових переформувань і деформацій зводиться до задачі Коші, в якій початковими умовами є поздовжній профіль дна русла. Можливі дві розрахункові схеми для початкових умов. Перша розрахункова схема приймається тоді, коли перший паводок проходить по пласкому (не zdeформованому) дну. Друга розрахункова схема – коли для першого паводку неможливо прийняти дно пласким.

Якщо перший паводок проходить по пласкому дну, то початкові умови задаються природним поздовжнім профілем, який після осереднення відміток дна в зоні впливу мостового переходу в першому наближенні можна апроксимувати площиною, тобто вважати, що

$$h = h_{pn}, \quad (13)$$

де  $h_{pn}$  – середня природна глибина в руслі. Якщо розрахункова повінь проходить першою по такому пласкому дну, то руслові деформації за багаторічний період будуть щонайменші і відповідатимуть верхній границі розмиву.

Друга розрахункова схема – коли дно приймається вже zdeформованим (розмитим) повинню (паводком), що пройшла раніше. За цих умов поздовжній профіль дна русла згідно ДБНВ.2.3-22:2009 “Мости та труби. Основні вимоги проектування” описується залежністю (9), в якій значення всіх величин відповідають моменту звільнення заплав від води. Іншими словами, початковими умовами для кожного наступного паводку стає поздовжній профіль розмитого дна після попереднього паводку. В (9) характеристика трансформації руслової витрати не є лінійною і визначається залежністю (4) зі степеню -1. Згідно досліджень, які наводились у другому розділі, характеристика трансформації руслової витрати для залишкового розмиву може прийматися лінійною. Тоді для визначення залишкового розмиву можна користуватися і залежністю (12).

Якщо неможливо прийняти дно пласким, тобто є вирви або пасма, то

поздовжній профіль апроксимується за допомогою кубічного сплайну. Застосування кубічного сплайну обумовлено тим, що є поліномом третьої степені, який має точку перегину і забезпечує його добрі інтерполяційні можливості. Кубічні сплайни мають безперервні похідні до другого порядку на всьому відрізку апроксимації. Така гладкість зазвичай виявляється достатньою для більшості завдань. Невисока степінь полінома спрощує обчислення і зменшує обчислювальну похибку.

Розрахункова залежність для визначення залишкових глибин з використанням кубічного сплайну, вираженого через похили, в довільному створі у межах зони впливу мостового переходу:

$$h(l_i) = \left[ 1 + \frac{12 \cdot k \cdot A_g \cdot \Gamma \cdot \beta_m^3}{B_p^4 \cdot h^{5,5}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot [h_i + \lambda \cdot \Lambda \cdot [m_i + \Lambda \cdot (B_s + \Lambda \cdot A_s)]] \quad (14)$$

Коефіцієнти, що визначаються за лінійною залежністю:

$$A_s = -2 \cdot \frac{h_{i+1} - h_i}{\lambda} + m_{i+1} + m_i, \quad (15)$$

$$B_s = -A_s + \frac{h_{i+1} - h_i}{\lambda} - m_i,$$

де  $h_i$  – це глибина до розмиву у вузловій точці, де визначається залишковий розмив;  $h_{i+1}$  – це глибина до розмиву у наступній вузловій точці, де визначається залишковий розмив.

Похили визначаються за залежностями:

$$m_i = \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2 \cdot \lambda}, \quad m_o = \frac{4 \cdot h_1 - h_2 - 3 \cdot h_o}{2 \cdot \lambda}, \quad m_N = \frac{3 \cdot h_N - h_{N-2} - 4 \cdot h_{N-1}}{2 \cdot \lambda}, \quad (16)$$

де  $\Lambda = \frac{l - l_i}{\lambda}$ , при  $i = 1, 2, \dots, N - 1, ,$

де  $m_i$  – похил в довільній точці поздовжнього профілю;

$m_0$  – похил в початковій точці апроксимуючого поздовжнього профілю;

$m_N$  – похил в останній точці поздовжнього профілю;

$\lambda$  – крок, на який розбивається довжина стиснення;

$l_i$  – це відстань від початку зони стиснення до вузлової точки.

У четвертому розділі наводиться інженерна методика багаторічного прогнозування руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів. На початку виводиться критеріальне рівняння залишкового розмиву. Увага до залишкового

розмиву виникла з появою в будівельних нормах рекомендацій щодо прогнозування загального розмиву за багаторічний період.

З коефіцієнтом стиснення  $\beta_m$  пов'язана довжина зони стиснення  $l_c$  і протяжність загалом всієї зони впливу мостового переходу  $l_{з.в.}$ . Використовуючи формулу Ткачука С.Г. для загальної довжини зони впливу мостового переходу, можна отримати залежність між коефіцієнтом стиснення та довжиною зони стиснення:

$$\frac{l_c \cdot I_0}{\xi \cdot h_{р.з}} = \frac{\left( \frac{\beta_m^2}{2 \cdot \beta_m - 1} \right)^{0.3} - 1}{\beta_m - 1}, \quad (17)$$

де  $I_0$  – поздовжній похил вільної поверхні потоку;

$h_{р.з}$  – глибина русла в брівках під мостом;

$\xi = l_c / l_{з.в.}$  – відносна довжина зони стиснення;

$l_c$  – довжина зони стиснення;

$l_{з.в.}$  – загальна довжина зони впливу мостового переходу.

На момент залишкового розмиву залежність (17) набуває сенсу критеріальної, бо визначає критерії його реалізації. Права частина цієї залежності є функція тільки коефіцієнта стиснення  $F(\beta_m)$ , величина якої легко обчислюється, або знаходиться з графіку рисунку 3.

Для обчислення лівої частини залежності (17) треба задатись довжиною зони стиснення  $l_c$  та її відносною величиною  $\xi$ . Решта величин, що входять до лівої частини  $I_0$  та  $h_{р.з.}$ , становлять вихідну інформацію. З огляду на обставини формування залишкового розмиву, найменшою довжиною стиснення може бути тільки довжина верхових струмененапрямних дамб  $l_c = l_{в.д.}$ . На мостових переходах без струмененапрямних дамб, що свідчить про малопотужні заплави і малі стиснення потоку, залишковими розмивами можна знехтувати.

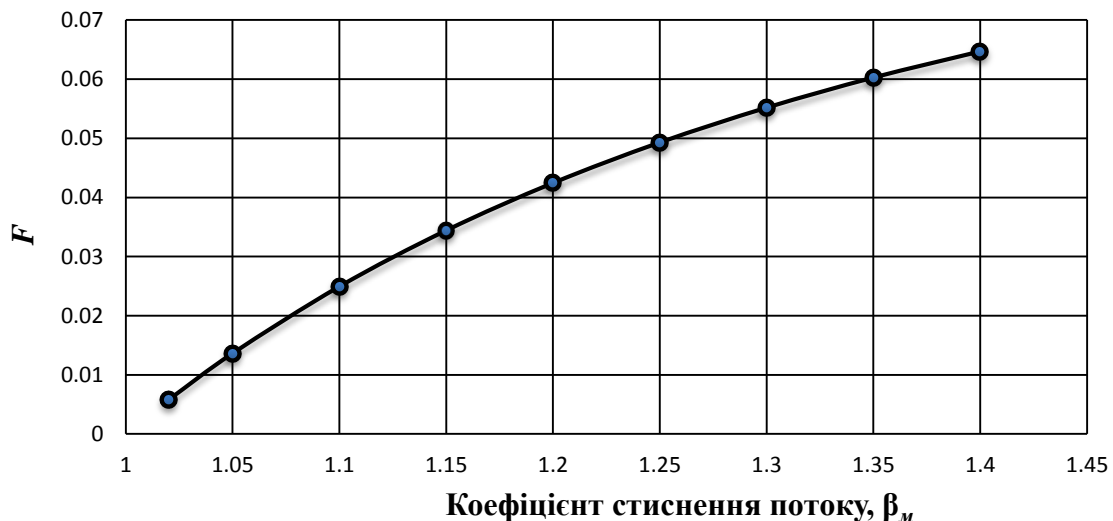


Рисунок 3 – Графік функції  $F(\beta_m)$

Графік залежності для відносної довжини зони стиснення від числа Фруда показано на рисунку 4, використовуючи формулу Ткачука С.Г.:

$$\xi = 1 - 0,5 \cdot Fr \cdot \frac{\beta_m^2 - 1}{\left( \frac{\beta_m^2}{2 \cdot \beta_m - 1} \right)^{0,3} - 1}, \quad (18)$$

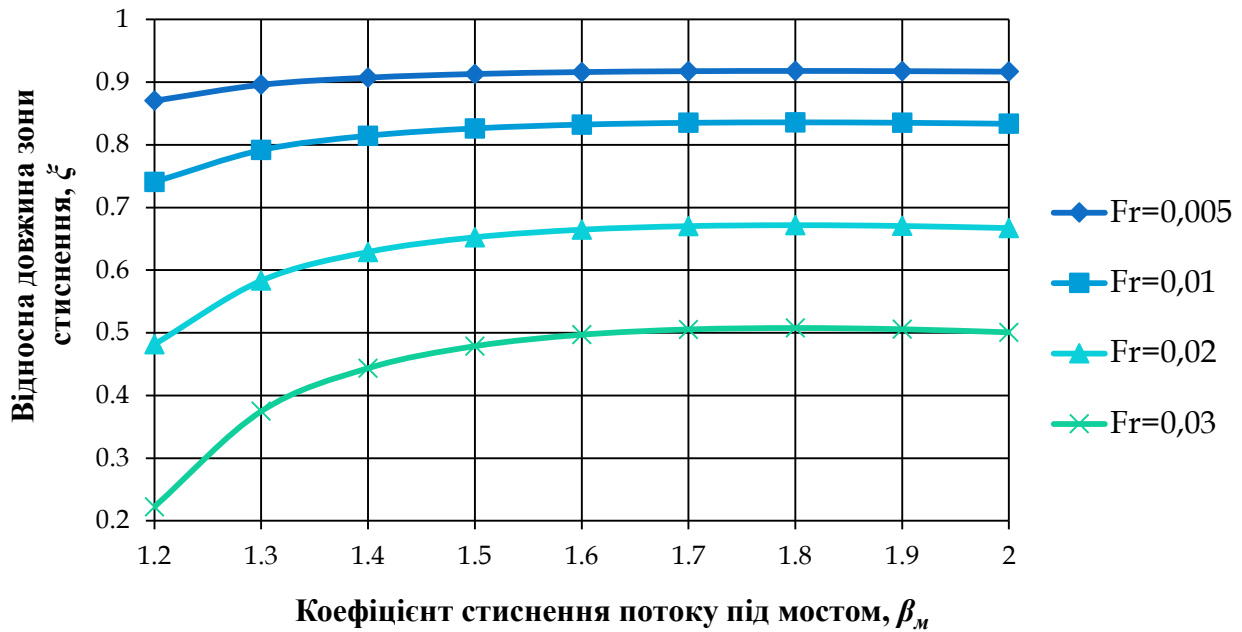


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта стиснення потоку під мостом  $\beta_m$  від відносної довжини зони стиснення  $\xi$

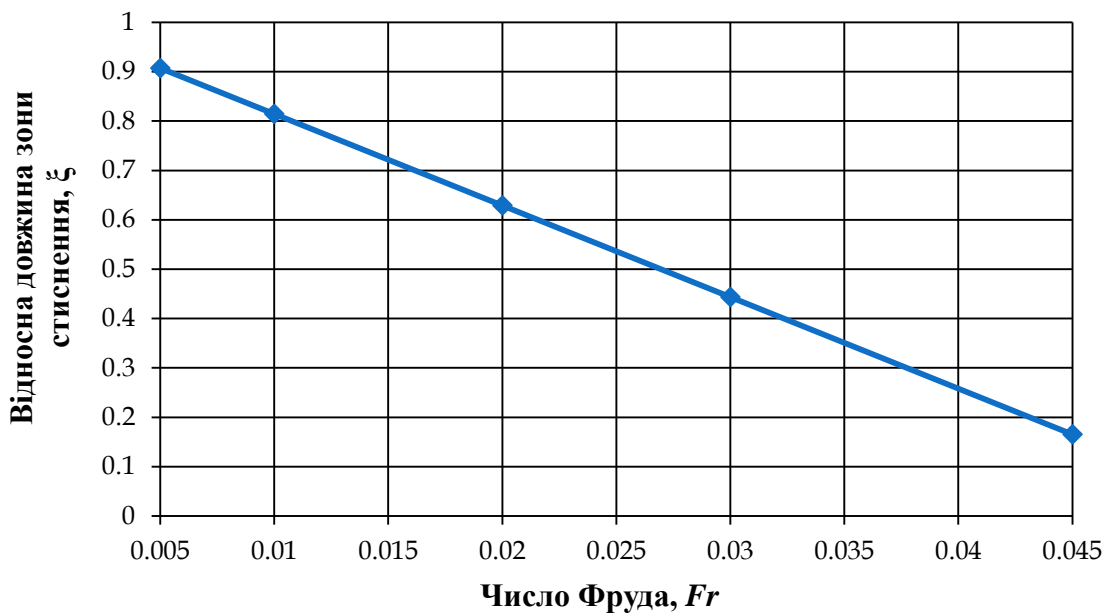


Рисунок 5 – Залежність відносної довжини зони стиснення  $\xi$  від числа  $Fr$

Для визначення  $\xi$  при різних числах  $Fr$  наводиться графік їх залежності при значенні  $\beta_m = 1,4$ , рисунок 5.

Для розв'язання критеріального рівняння залишкового розмиву (17) треба підставити замість  $l_c$  довжину верхових струмененапрямних дамб і в залежності від числа  $Fr$  знайти відносну довжину зони стиснення  $\xi$ . Тоді по графіку (див. рисунок 4) або безпосередньо з рівняння (17) знаходиться коефіцієнт стиснення потоку під мостом на момент залишкового розмиву. Далі, користуючись формулами (12) та (8), визначається розрахункова величина залишкового розмиву.

Можна зауважити, що при розрахунку величини залишкового розмиву за залежностями (8) та (12) різниця між ними складає від 15,18% до 10,08%.

Алгоритм багаторічного прогнозування руслових деформацій наводиться у вигляді структурно-логічної схеми (рисунок 6).



Рисунок 6 – Структурно-логічна схема багаторічного прогнозування руслових деформацій

Результати дослідження впливу залишкового розмиву на величину загального розмиву показані на рисунку 7.



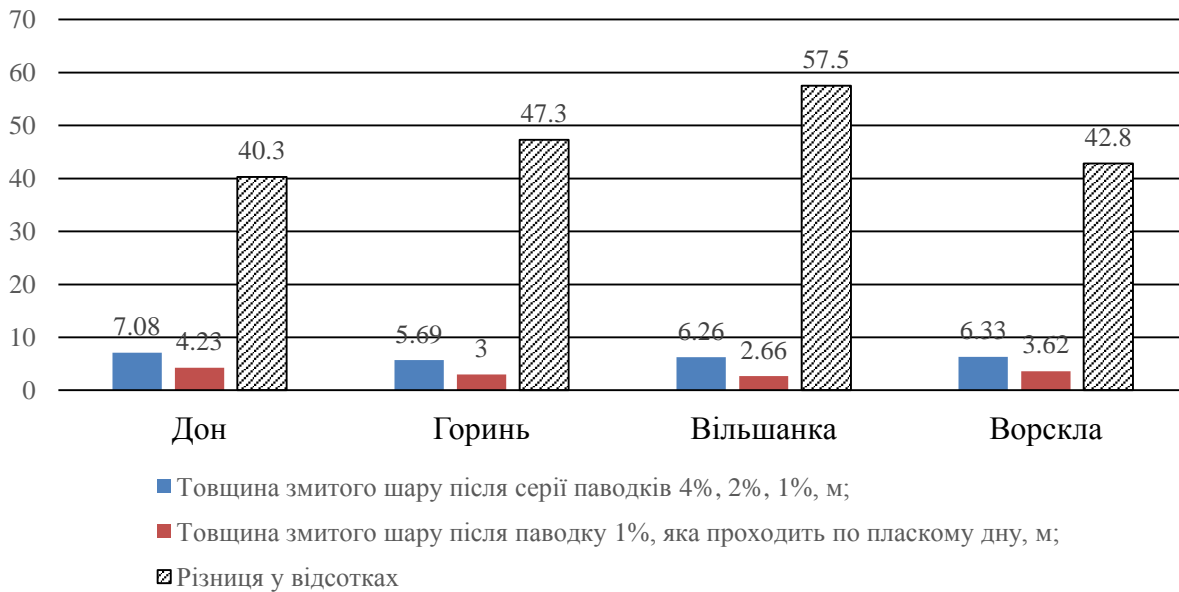


Рисунок 7 – Результати дослідження впливу залишкового розмиву на величину максимального багаторічного прогнозування загального розмиву

Аналізуючи дані, які наведені на рисунку 7, можна зробити висновок, що для визначення найменшої відмітки, яка може бути в руслі, необхідно обов'язково застосовувати багаторічне прогнозування максимального розмиву, пропускаючи серію паводків. В такому разі можна отримати найневигодніший випадок роботи мостового переходу. Проте, варто зазначити, що можна і не враховувати багаторічне прогнозування максимального розмиву, а одразу пропустити по нерозмитому дну розрахункову повінь. В такому випадку, товщина змитого шару в руслі буде на 10-40 % меншою, в залежності від гідроморфологічних характеристик річки.

Для оцінки адекватності отриманої моделі залишкового розмиву за залежністю (12) і максимального розмиву за залежністю (8) було обрано мостовий перехід через р. Ворскла, що знаходиться неподалік міста Полтава. Міст розташовано на 343 км автомобільній дорозі міжнародного значення М-03 Київ – Харків – Ростов-на-Дону. Вихідні дані для розрахунку були взяті з офіційного звіту про натурні проміри глибин загального розмиву під час вишукування в розрахунковому створі моста через р. Ворскла ДП «Укрдїпродор» (архівний номер 463). Результати досліджень наведені на рисунку 8.

Аналізуючи дані, які наведені на рисунку 8, можна отримати такі значення: площа русла до побудови мостового переходу складала –  $\omega_1 = 318,69 \text{ м}^2$ , середня глибина в руслі –  $h_1 = 3,35 \text{ м}$ ; промір глибин після 30-ти років експлуатації мостового переходу:  $\omega_2 = 438,31 \text{ м}^2$ , середня глибина в руслі –  $h_2 = 4,61 \text{ м}$ ; за допомогою математичного моделювання, після проходження паводку 4 %:  $\omega_3 = 478,04 \text{ м}^2$ , середня глибина в руслі –  $h_3 = 5,03 \text{ м}$ . Різниця між глибиною з натурних даних і глибиною, яка була отримана в результаті математичного моделювання, складає 8,3 %. Таким чином, можна зробити висновок, що математична модель є адекватною.



Рисунок 8 – Порівняння отриманих результатів математичного моделювання з натурними даними

## ВИСНОВКИ

В результаті теоретичних досліджень вперше вирішено науково-практичну задачу розроблення і аналітичної реалізації моделі визначення залишкового розмиву русла в системі багаторічного прогнозування руслових деформацій при проектуванні мостових переходів на автомобільних дорогах.

Основними результатами дисертаційної роботи є:

1. Аналіз існуючих моделей багаторічного прогнозування руслових деформацій показав, що на теперішній час не існує науково обґрунтованого алгоритму визначення основних гідравлічних показників, що відповідають залишковому розмиву.

2. Розроблено математичну модель для визначення залишкового розмиву русла в зоні впливу мостового переходу, яка складається з чотирьох залежностей, що описують закони руху та збереження двох фаз потоку. Вперше в математичній моделі застосовується лінійна характеристика трансформації руслової витрати.

Для перевірки адекватності моделі залишкового розмиву та її аналітичної реалізації було зроблено порівняння розрахункових і натурних спостережень залишкового розмиву. Отримані результати свідчать про їх задовільну збіжність (різниця складає 8,3 %), а отже і про адекватність запропонованої моделі.

3. Вперше отримано критеріальне рівняння залишкового розмиву русла, яке дозволяє визначити взаємозалежні коефіцієнт стиснення потоку під мостом та довжину зони стиснення, що відповідають моменту звільнення заплав від води.

Розроблено залежності для апроксимації поздовжнього профілю русла перед мостовим переходом з використанням кубічного сплайну в похилах для

залишкового розмиву русла.

4. Доведено, що при визначенні залишкового розмиву, використовуючи залежність для характеристики руслової трансформації, яка міститься в ДБН В.2.3-22:2009 “Мости та труби. Основні вимоги проектування”, в порівнянні з лінеаризованою, розбіжність в результатах обчислень складає 10-15 % у бік зменшення в системі багаторічного прогнозування руслових деформацій.

Доведено, що нехтування залишковим розмивом призводить до зменшення величини загального розмиву на 40%, в залежності від гідроморфологічних характеристик річок, що впливає на призначення генеральних розмірів мостових переходів – довжини мосту, розрахункового розмиву, мінімальної відмітки підходів.

5. Розроблено інженерну методику визначення залишкового розмиву в системі багаторічного прогнозування руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів на автомобільних дорогах.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у виданнях іноземних держав:

1. Башкевич И.В. Определение остаточного размыва в системе многолетнего прогноза русловых деформаций при проектировании мостовых переходов / И.В. Башкевич // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2013. – № 4. – С. 53–58.

### Статті у наукових фахових виданнях:

2. Башкевич І.В. Гідравлічні параметри потоку на мостових переходах при залишкових розмивах / І.В. Башкевич, С.Г. Ткачук // Гідравліка і гідротехніка. – 2008. – № 62. – С. 20–25.

*Особистий внесок* – аналіз існуючих методів розрахунку гідравлічних параметрів для залишкового розмиву.

3. Башкевич І.В. Види початкових умов для багаторічного прогнозування загального розмиву на мостових переходах / І.В. Башкевич, С.Г. Ткачук // Вісник Національного транспортного університету. – 2008. – № 17. – С. 57–62.

*Особистий внесок* – обґрунтування можливих початкових умов для русел в зоні впливу мостових переходів.

4. Башкевич І.В. Визначення руслової витрати в момент залишкового розмиву на мостових переходах / І.В. Башкевич, С.Г. Ткачук // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2009. – № 76. – С. 24–32.

*Особистий внесок* – аналіз даних експериментального дослідження для визначення характеристики руслової витрати.

5. Башкевич І.В. Застосування лінійної характеристики трансформації руслової витрати при визначенні залишкового розмиву / І.В. Башкевич // Гідравліка і гідротехніка. – 2010. – № 64. – С. 81–85.

6. Башкевич І.В. Вплив характеристики трансформації руслової витрати на максимальну та залишкову величину загального розмиву / І.В. Башкевич // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені

академіка В. Лазаряна. – 2010. – № 33. – С. 23–28.

7. Башкевич І.В. Застосування кубічного сплайну вираженого через похили в якості початкових умов при проектуванні мостових переходів / І.В. Башкевич // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2011.– № 22. – С. 572–578.

8. Башкевич І.В. Критеріальне рівняння залишкового розмиву / І.В. Башкевич, С.Г. Ткачук // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2013. – № 87. – С. 100–103.

*Особистий внесок* – запропоновано метод визначення довжини зони стиснення та коефіцієнт стиснення потоку, в момент звільнення заплав від води.

9. Башкевич І.В. Метаматична модель та її аналітична реалізація при визначенні залишкового розмиву / І.В. Башкевич // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика : Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2014. – № 6. – С. 10–14.

#### **Опубліковані праці апробаційного характеру:**

10. Башкевич І.В. Розробка математичної моделі для прогнозування залишкового розмиву / І.В. Башкевич // Матеріали LXVI наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2010. – С. 133.

11. Башкевич І.В. Удосконалення методики прогнозування залишкового розмиву / І.В. Башкевич // Матеріали LXVI наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2011. – С. 113.

12. Башкевич І.В. Обґрунтування математичної моделі для прогнозування залишкового розмиву / І.В. Башкевич // Матеріали LXIX наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2013. – С. 156.

13. Башкевич І.В. Визначення залишкового розмиву в зоні впливу мостових переходів / І.В. Башкевич // Штучні споруди транспорту: тези доповідей науково-технічної конференції молодих вчених, магістрантів та студентів «Науково-технічних прогрес на транспорті» за ред. В.І. Соломки; Дніпроп. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – С. 21.

#### **АНОТАЦІЯ**

Башкевич І.В. Модель залишкового розмиву в зоні впливу мостових переходів на автомобільних дорогах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми. – Національний транспортний університет МОН України, Київ, 2015.

Проектування мостових переходів тісно пов'язано з прогнозуванням руслових деформацій в зоні їх впливу. В результаті гідравлічних розрахунків і прогнозування розвитку загальних руслових деформацій, виникаючих внаслідок стиснення водного потоку насипами підходів, визначаються генеральні розміри мостових переходів – довжини мосту, розрахунковий розмив, мінімальна відмітка підходів.

В дисертації розроблено інженерну методику визначення залишкового розмиву в системі прогнозування багаторічних руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів.

В роботі представлена математична модель та її аналітична реалізація для визначення залишкового розмиву з застосуванням лінійної характеристики трансформації руслової витрати. Домінантним для математичної моделі є диференціальне рівняння балансу наносів, яке є рівнянням нерозривності для твердої фази руслового потоку і виражає фундаментальний закон збереження речовини.

Розв'язано критеріальне рівняння залишкового розмиву, яке дає змогу визначити коефіцієнт стиснення потоку під мостом для залишкового розмиву. За довжину зони стиснення пропонується приймати довжину струмененапрямної дамби. Апроксимація поздовжнього профілю в зоні впливу мостових переходів здійснюється кубічним сплайном в похилах.

Для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі і метода її реалізації були зроблені порівняння розрахунків з натурними даними.

**Ключові слова:** автомобільна дорога, мостовий перехід, руслові деформації, багаторічне прогнозування загального розмиву, залишковий розмив, довжина зони стиснення, коефіцієнт стиснення потоку під мостом.

## АННОТАЦІЯ

Башкевич И.В. Модель остаточного размыва в зоне влияния мостовых переходов на автомобильных дорогах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.11 – автомобильные дороги и аэродромы. – Национальный транспортный университет МОН Украины, Киев, 2015.

Проектирование мостовых переходов тесно связано с прогнозированием русловых деформаций в зоне их влияния. В результате гидравлических расчетов и прогнозирования развития общих русловых деформаций, возникающих в результате сжатия водного потока насыпями подходов, определяются генеральные размеры мостовых переходов – длина моста, расчетный размыв, минимальная отметка подходов.

В диссертации разработана инженерная методика определения остаточного размыва в системе прогнозирования многолетних русловых деформаций в зоне влияния мостовых переходов.

В работе представлена математическая модель и ее аналитическая реализация для определения остаточного размыва с применением линейной характеристики трансформации руслового расхода. Доминантным для математической модели

является дифференциальное уравнение баланса наносов, которое представляет собой уравнение неразрывности для твердой фазы руслового потока и выражает фундаментальный закон сохранения вещества.

Разрешено критериальное уравнения остаточного размыва, которое позволяет определить коэффициент сжатия потока под мостом для остаточного размыва. Длину зоны сжатия предлагается принимать по длине струенаправляющей дамбы. Аппроксимация продольного профиля в зоне влияния мостовых переходов выполняется кубическим сплайном в уклонах.

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели и метода ее реализации были сделаны сравнения расчетов с натурными данными.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, мостовой переход, русловые деформации, многолетнее прогнозирование общего размыва, остаточный размыв, длина зоны сжатия, коэффициент сжатия потока под мостом.

### ABSTRACT

Bashkevych I. The residual washout model in the zone of bridges influence on the roads. – Manuscript.

The thesis for a PhD in specialty 05.22.11 – roads and aerodromes. – National transport university, Kyiv, 2015.

The design of bridges are closely related to the prediction of riverbed deformations in the zone of their influence. As a result of hydraulic calculations and forecasting of the development of common riverbed deformations, which caused by compression of the water flow from embankments approaches, the general dimensions of the bridge crossings are determined – the length of the bridge, the calculated washout, the minimum level of approaches.

The author developed the engineering methods of determination of residual washout in the system of long-term riverbed deformations forecasting in the zone of bridges influence.

The work presents a mathematical model and its analytical implementation to determine the residual washout using linear characteristic of the riverbed consumption transformation. A differential equation of the sediment balance is dominant for the mathematical model, and it's the continuity equation for the solid phase riverbed flow which expresses the fundamental law of matter conservation.

The criterion equation of residual washout is solved and it allows us to determine the coefficient of the flow compression under the bridge for the residual washout. The length of guide banks is proposed to adopt as the length of the compression zone. Approximation of the longitudinal profile in the zone of bridges influence is carried out by cubic spline in slopes.

There are comparisons of calculations with the natural data were made to confirm the adequacy of the developed mathematical model and its implementation method.

**Keywords:** road, bridge, riverbed deformations, long-term forecasting of common washout, residual washout, the length of the compression zone, the coefficient of the flow compression under the bridge.