

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

На правах рукопису

БАШКЕВИЧ ІРИНА ВАСИЛІВНА

УДК 627.15

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

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Ткачук Сергій Григорович
доктор технічних наук, професор

Київ – 2015

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ	11
1.1 Загальні відомості про деформації підмостових русел	11
1.2 Теоретичні положення розвитку методів розрахунку загальних розмивів під мостами на автомобільних дорогах	14
1.3 Гідролого-морфометричні методи розрахунку руслових деформацій	19
1.4 Гідромеханічні методи розрахунку загальних руслових деформацій	24
1.5 Висновки по розділу 1	37
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАГАЛЬНОГО РОЗМИВУ ПІД МОСТОВИМИ ПЕРЕХОДАМИ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ	38
2.1 Рівняння деформації (балансу наносів) підмостових русел на автомобільних дорогах	38
2.2 Обґрунтування формули транспортуючої спроможності руслового потoku	41
2.3 Рівняння нерозривності та руху водного потоку	56
2.4 Обґрунтування рівняння характеристики трансформації руслової витрати під мостами на автомобільних дорогах	65
2.5 Дослідження впливу трансформації руслової витрати на величину загального розмиву	77
2.6 Висновки по розділу 2	91
РОЗДІЛ 3 АНАЛІТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАЛИШКОВОГО РОЗМИВУ ПІДМОСТОВИХ РУСЕЛ	92
3.1 Сутність залишкового розмиву	92
3.2 Математична модель залишкового розмиву та метод її реалізації	93

3.3 Обґрунтування початкових умов для недеформованого дна в зоні впливу мостових переходів	101
3.4. Обґрунтування початкових умов для реалізації математичної моделі	104
3.5 Висновки по розділу 3	111
РОЗДІЛ 4 ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА БАГАТОРІЧНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАГАЛЬНИХ РУСЛОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ В ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ	113
4.1 Отримання критеріального рівняння для залишкового розмиву	113
4.2 Методика багаторічного прогнозування загальних руслових деформацій	118
4.3 Дослідження впливу залишкового розмиву на величину максимального розмиву	125
4.4 Оцінка адекватності запропонованої моделі	130
4.5 Висновки по розділу 4	138
ВИСНОВКИ	139
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	141
ДОДАТОК А ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ЗАЛИШКОВОГО РОЗМИВУ В ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ	153
ДОДАТОК Б ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ	155
ДОДАТОК В АКТИ ТА ДОВІДКИ ВПРОВАДЖЕННЯ	158
ДОДАТОК Г АВТОРСЬКІ СВДОЦТВА	163

ВСТУП

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 [1]. 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 водо небезпечністю 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.

В процесі будівництва автомобільних доріг проектування мостових переходів тісно пов'язано з прогнозуванням руслових деформацій в зоні будівництва майбутніх споруд. Тому надійність та довговічність мостових переходів залежить від того, наскільки достовірно математична модель руслового процесу відбиває його фактичний перебіг. В результаті гідравлічних розрахунків і прогнозу розвитку загальних руслових

деформацій, виникаючих внаслідок стиснення водного потоку насипами підходів, визначаються генеральні розміри.

Проблема вдосконалення конструкцій мостових переходів є досить актуальною, має технічний і соціально-економічний аспект. Для України характерний ріст числа природних катастроф, особливо в останні роки. Підтвердженням актуальності теми служить аналіз руйнувань мостів при проходженні високих повеней, коли основною причиною аварії є утворення деформацій русла, які можуть досягати критичних розмірів, підмиви руслових опор і перевищення розрахункових гідродинамічних характеристик річкового потоку над проектними. Негативні наслідки повеней і паводків проявляються на 27 % території України (165 тис. кв. км), де проживає майже третина населення. Найбільшої шкоди від цього стихійного лиха зазнають гірській та передгірські райони Карпат, Полісся, придунайські та придніпровські землі, Донбас. Катастрофічний паводок, який стався у 2008 р. в шести західних областях України, призвів до пошкодження 122,7 км доріг, руйнації 39 мостів, аварійного стані 71 автомобільного мосту [2].

Мостовим переходам загрожують підтоплення високими водами, хвильобій, льодохід, корчехід, поздовжній потік з верхньої сторони насипу підходів, природні руслові деформації, загальний розмив від стиснення потоку підходами, місцевий розмив у передніх граней опор і оголовків регуляційних споруджень.

Мостові переходи на автомобільних дорогах повинні задовольняти цілому ряду вимог і насамперед повинні забезпечувати безперешкодний пропуск транспортних потоків, бути стійкими протягом усього терміну служби, тобто протистояти руйнуючій дії паводків і бути стійкими при руслових деформаціях, адже стійкість всієї конструкції залежить від стійкості фундаменту і опор.

В разі надійного прогнозування розрахункового рівня розмиву, фундаменти та опори моста можуть служити в 3 – 4 рази довше, ніж прогонові будови. Тому з метою скорочення експлуатаційних витрат на

ремонти та реконструкцію необхідно приділяти належну уваги визначенню можливої найбільшої глибини загального розмиву біля руслових опор.

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 отвору моста 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 та дозволяє сформулювати тему як: «Модель залишкового розмиву при проектування мостових переходів на автомобільних дорогах».

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 проведено 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'єктом дослідження – руслові процеси на мостових переходах.

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

Методи дослідження. В рамках дисертаційної роботи застосовувалися методи математичного моделювання, теорії ймовірності і математичної статистики (визначення рівня розрахункового одновідсоткового паводку на основі багаторічних рядів спостережень), класичні аналітичні методи розв'язання диференціальних рівнянь з частинними похідними.

Наукова новизна:

- *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 «Укрдїпродор» (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, розв’язання математичної моделі залишкового розмиву, складання алгоритмів розрахунків, проведення математичних експериментів і аналіз їх результатів.

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).

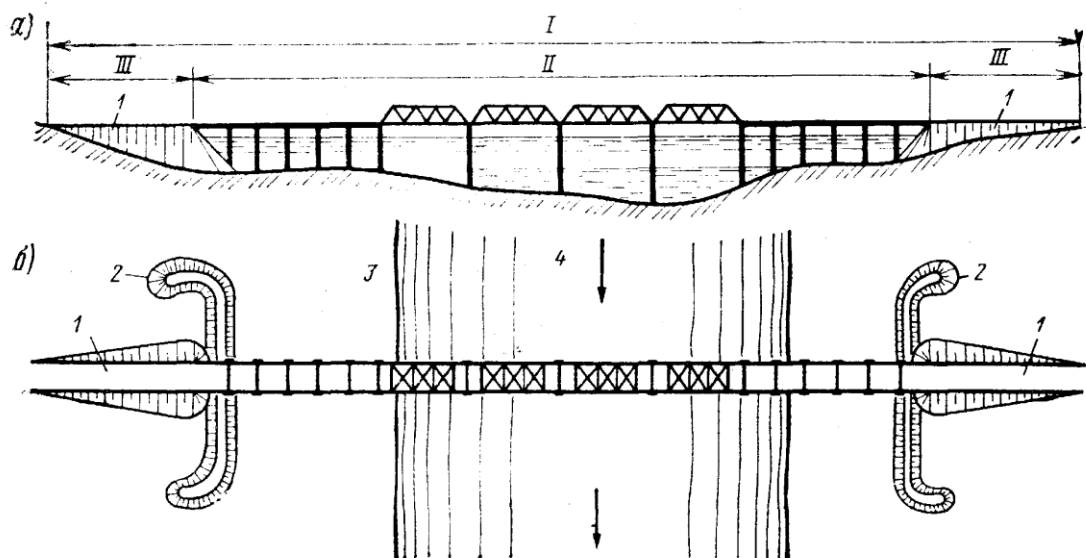
Публікації. У процесі виконання дисертаційної роботи теоретичні та практичні положення надруковані у наукових фахових виданнях, збірниках наукових праць та в тезах доповідей на конференціях. Всього 13 публікацій – із них 9 одноосібних. У фахових виданнях України – 8 статей, у закордонних виданнях – 1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

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ

1.1 Загальні відомості про деформації підмостових русел

Автомобільні дороги перетинають чисельні річки, періодичні водотоки та водосховища. Для подолання кожної водної перешкоди та забезпечення пропуску транспортних потоків будують комплекс транспортних споруд, який називають мостовим переходом (рисунок 1.1).



I – мостовий перехід; II – міст; III – підходи до мосту; 1- насип підходів; 2 – струмененапрямні дамби; 3 – заплави ріки; 4 – русло ріки

Рисунок 1.1 – Схема мостового переходу

а) поперечний переріз мостового переходу; б) план мостового переходу

На території України налічується близько 67 000 водотоків, з яких біля 90 мають довжину більшу за 100 км. Крім того, щільність гідрографічної сітки зменшується з півночі на південь, а найбільша її щільність

спостерігається в Карпатах (більше 1 км/кв. км). Тому, розвиток дорожнього будівництва буде тісно пов'язаний зі зведенням багатьох мостових переходів через річки різної крупності і з різною гідроморфологією.

Мостовий перехід являється складовою частиною автомобільної дороги, тому при його проектуванні необхідно враховувати основну вимогу – найкраще обслуговування перевезень на автомобільній дорозі. Для досягнення цієї мети, необхідно забезпечити безперервний рух транспорту по дорозі. Тому споруди мостового переходу повинні бути запроектовані і побудовані таким чином, щоб залишатись стійкими і виконувати свої функції при будь-яких умовах, які можуть виникнути за довготривалий термін їх служби.

Проектний строк служби – період, протягом якого споруда (конструкція або елемент) при належному утриманні може виконувати передбачені проектом функції.

Довговічність – здатність елемента або споруди в цілому зберігати протягом певного часу роботоспроможний стан при встановленій системі технічного обслуговування. Довговічність визначається в роках.

Надійність – здатність моста виконувати задані функції в певних умовах експлуатації, зберігаючи протягом встановленого часу нормативні експлуатаційні показники. Надійність визначається ймовірністю того, що не буде досягнуто жодного з розрахункових граничних станів.

Стійкість – здатність конструкції або її елементів зберігати певну початкову форму пружної рівноваги, відповідаючи на малі збільшення статичного навантаження малими приростами деформацій.

Споруди мостових переходів відносяться до числа капітальних, термін експлуатації яких вираховується десятиріччями. Протягом цього довготривалого періоду умови, в яких працюють мостові переходи, можуть суттєво змінюватися. Це пояснюється, з однієї сторони, непостійністю річкового стоку, а з другої – неминучими русловими деформаціями. Руслові деформації властиві усім річкам. Крім того, після будівництва мостового

переходу, який стискає водний потік, біля нього розвиваються розмиви, які в більшості випадків значно небезпечніше, ніж природні руслові переформування.

Стиснення водного потоку – це процес, який відбувається в результаті будівництва мостового переходу і який призводить до розмивів тим більших, чим більше стиснення водного потоку.

Загальний розмив – це процес, який відбувається по всій ширині руслі в результаті впливу мостового переходу.

Залишковий розмив – це величина загального розмиву, яка утворилась на момент звільнення заплав від води і є початковими умовами для наступного паводку.

Підпір перед мостом – місцева зміна побутового рівня води в річці внаслідок стиснення потоку водопропускними спорудами.

Квазірівномірний рух – це рух води у відкритих руслах, який задовольняє трьом умовам: 1) на призматичних ділянках русла ухил вільної поверхні дорівнює ухилу дна, і внаслідок цього, не змінюється з висотою рівня води; 2) швидкості течії змінюються за довжиною русла тільки і точно в тій мірі, в якій змінюються витрати води; 3) має місце особливий вид зв'язку між поперечними розмірами русла і витратою води.

Неусталений рух води – рух рідини, за якого гідравлічні характеристики потоку змінюються в часі і по довжині.

В зв'язку з тим, що мостові переходи на автомобільних дорогах зазнають суттєвого впливу водного середовища, що досить часто обумовлюється деформаціями і руйнуваннями, доцільно ввести певні терміни та визначення, які враховують специфічні умови роботи мостових переходів.

Ймовірність перевищення – числова характеристика можливості того, що випадкова подія відбудеться в умовах, які можуть бути відтворені необмежену кількість разів. Ймовірність є основним поняттям розділу математики, що називається теорія ймовірностей.

Квазілінійні рівняння – це рівняння, які є лінійними відносно похідних, але не лінійні відносно коефіцієнтів при похідних.

Похил – це відношення перевищення до закладання.

Похил річки – відношення падіння річки (чи окремої її ділянки) до довжини річки (чи ділянки річки). Виражають ухил зазвичай у метрах на кілометр (м/км), рідше у проміле (‰) чи відсотках (%).

Параметр центральної струмини – це відстань від початку зони стиснення до точки, де ширина центральної струмини лінійно збігає до нуля.

Характеристика трансформації руслової витрати – відношення трансформованої руслової витрати в розрахунковому створі в даний момент часу до природної руслової витрати в той же момент часу (коефіцієнт стиснення потоку в плані).

1.2 Теоретичні положення розвитку методів розрахунку загальних розмивів під мостами на автомобільних дорогах

Автомобільна дорога є невід’ємною складовою транспортної інфраструктури і давно стала вагомою частиною людського існування. Сотні тисяч кілометрів удосконалених нових і реконструйованих стали експлуатуватися за останні десятиріччя. Вагомою і найдорожчою частиною кожної автомобільної дороги є транспортні споруди, основними з яких це мостові переходи.

Наука о проектуванні мостових переходів народилася на стику багатьох наукових дисциплін: математики, теорії моделювання, вишукування і проектування мостів і автомобільних доріг, гідрології, гідравліки і теорії руслових процесів. Вона відноситься до складної області людських знань і потребує від спеціаліста найширшого наукового погляду і великого практичного досвіду.

Під проектуванням мостових переходів розуміють перш за все гідрологічну і гідравлічну частину проекту, основною метою якої є визначення генеральних розмірів всіх споруд мостових переходів і умов їх експлуатації в майбутньому. Наслідки помилок на цьому етапі проектування вже не зможуть бути компенсовані, навіть при самому новітньому і раціональному проектуванні опор мостів і прогонових будов.

Методи проектування мостових переходів змінювалися по мірі розвитку науки і техніки, і зокрема, засобів автоматизації і обчислювальної техніки, які радикальним чином вплинули на удосконалення методів і розрахункових схем, що використовуються при проектуванні.

Так, відомим інженером шляхів сполучення М.А. Белелюбським, при будівництві залізничного мосту через річку Волгу у м. Сизрані, був сформульований і успішно застосований на практиці принцип розрахунку розмивів під мостами. Пропозиція М.А. Белелюбського зводилося до того, що розмив під мостом сходить нанівець, як тільки середні швидкості течії під мостом V_m , які зменшуються в ході розмиву, знижуються до побутової в руслі $V_m = V_{pn}$ (вперше ця думка була оприлюднена в [3]). В якості розрахунку ним була рекомендована наступна залежність для визначення отвору мосту:

$$L_m = \frac{Q}{\mu \cdot V_{pn} \cdot (h_{pn} + x)}, \quad (1.1)$$

де Q – загальна розрахункова витрата води;

μ – коефіцієнт стиснення потоку опорами;

V_{pn} і h_{pn} – середня побутова швидкість і середня побутова глибина у руслі розрахунковому рівні;

x – середній змив ґрунту у підмостовому просторі.

Зазначений метод М.А. Белелюбського знайшов широке застосування на практиці в проектуванні мостових переходів на автомобільних дорогах.

Водночас, в процесі його застосування з'ясувалося, що більш зручними є розрахунки за робочою площею до розмиву:

$$\omega = \frac{Q}{P \cdot V_{pn} \cdot \mu}, \quad (1.2)$$

де P – коефіцієнт загального розмиву, який дорівнює відношенню площі живого перерізу під мостом після розмиву до побутового.

Згодом такий спосіб розрахунку руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів прийняли називати постулатом М.А. Белелюбського (надалі постулат).

Каншин А.А. [4], використовуючи принцип М.А. Белелюбського і зробивши алгебраїчні перетворення в (1.2), розробив залежність, яка дала можливість звільнитися від визначення величини витрати і швидкості:

$$\omega = \frac{1}{P \cdot \mu} \cdot (\omega_p + k_1 \cdot \omega_1 + k_2 \cdot \omega_2), \quad (1.3)$$

де ω_p – площа руслової частини перерізу потоку, яка обчислюється для прийнятого рівня;

ω_1, ω_2 – відповідно площі живих перерізів на заплавах при том же рівні води;
 k_1, k_2 – відношення швидкісних характеристик заплавних потоків до швидкісної характеристики руслового потоку.

Каншин А.А. [4] розробив відносно простий метод розрахунку отвору мосту, який не потребував обов'язкового проведення гідрометричних робіт на водотоках. Метод А.А. Каншина, який він назвав методом «гідравлічних еквівалентів», дозволяє на основі використання рівняння рівномірного руху води визначити необхідну довжину мосту по заданим розмивав без вимірювання швидкості і витрати потоку. Таким чином, інженери-проектувальники довгий час могли розраховувати мостові переходи і через

річки, які були не вивчені в гідрологічному режимі. Також, Каншин А.А. наніс значний удар по якості проведення гідрометричних робіт при вишукуванні на етапі проектування мостових переходів.

Постулат М. А. Белелюбського знайшов відображення і в інших методах розрахунку руслових деформацій, наприклад, «метод побутових морфологічних характеристик» М.Ф. Срібного [5], який у залежність Каншина А.А. ввів значення коефіцієнтів шорсткості для русел і заплав.

Оскільки при стисненні потоку спорудами мостового переходу відбувається збільшення швидкості і на заплаві, і у руслі, при розрахунку глибини розмиву у багатьох роботах вчених гідравліків був запропонований метод «пропорційних епюр» в [6 – 8], відповідно до якого швидкість у русловій і заплавної частинах отвору мосту збільшується однаково у певну кількість разів.

Постулат М.А. Белелюбського займає значне місце в теорії вітчизняного та світового проектування мостових переходів. При цьому, віддаючи належне сформульованому принципу, резонно вказати на той факт, що його застосування доречно не у всіх випадках, що зустрічаються в проектній практиці. У зв'язку з цим О.В. Андрєєвим [9] були сформульовані висновки про застосування постулату М.А. Белелюбського. Полягають вони в наступному:

- запропонований М.А. Белелюбським спосіб розрахунку ґрунтувався на досвіді проектування і будівництва мостових переходів з отворами L_m близьким до побутової ширині русла B_{rp} , проте надалі він також поширився і на мостові перерізи, які охоплювали не тільки русло, а й частину заплави;

- у випадку, введення єдиної розрахункової швидкості для всього підмостового перерізу механічно об'єднує генетично несхожі руслової і заплавної ділянки (різні глибини і коефіцієнти шорсткості в руслі і на заплавної ділянках підмостового перерізу). На заплаві розмиви є наслідком перевищення нерозмивних швидкостей для зв'язних ґрунтів заплавної намулу $V_{пм}$, а в руслі – наслідком порушення поздовжнього балансу наносів;

- розрахункова швидкість після розмиву, як правило, буде відрізнятися від побутової в руслі у всіх випадках штучного уширення русла на рівнинних річках або стиснення підходами на блукаючих;

- для мостових переходів, що перекривають одну лише руслову частину потоку, постулат дає вірне значення нижньої межі розмиву.

Однак, постулат М.А. Белелюбського виявився першим інженерним рішенням, яке обґрунтовувало отвір моста на основі ясних фізичних принципів руслового процесу. І якщо це рішення розглядати як часткове, відповідне умові $L_m = B_{rp}$, то постулат дозволяє визначити точне значення граничної величини загального розмиву при розрахунковому рівні води.

Згідно [2] методи прогнозування загальних деформацій підмостових русел прийнято умовно поділяти на гідролого-морфометричні і гідромеханічні.

Методи гідролого-морфометричного напрямку базуються на розрахункових залежностях, які розглядають інтегральний ефект взаємодії потоку і поверхні русла, що отримані на підставі натурних спостережень. У рамках цього напрямку була розроблена гідролого-морфологічна теорія руслових процесів [6 – 27], що дозволяє диференціювати задачі розрахунку руслових деформацій за різних типів руслового процесу. Морфометричні методи прогнозування руслових деформацій для різних географічних регіонів висвітлені у роботах [8 – 9, 21, 23, 28 – 29, 42 – 49].

Методи гідромеханічного напрямку [1, 2, 8, 30 – 41, 50 – 69] базуються на розгляді механізму гідромеханічної взаємодії рухомого водного середовища і придонного шару ґрунту, що зводяться до спільного розв’язування системи основних рівнянь динаміки руслових неоднорідних потоків, що складаються з рівнянь руху водного потоку, нерозривності і рівняння балансу твердої фази. Для замикання системи рівнянь зазвичай використовують різні гіпотези, а також певні співвідношення для розрахунку витрати наносів і нерозмивних швидкостей потоку.

1.3 Гідролого-морфометричні методи розрахунку руслових деформацій

Натурні дослідження розподілу швидкостей в підмостовому перерізі ряду мостових переходів показали, що фактичні швидкості під мостами під час проходження піку паводку по розмитому дну в більшості випадків перевищують побутові, а виміряні площі живих перерізів виявляються менші за тих, що були визначені за формулою (1.2).

Ґрунтуючись на результатах проведених випробувань, були визначенні напрямки удосконалення методів та врахування комплексів факторів, які впливають на процеси розвитку загального розмиву та стійкості мостових споруд на автомобільних дорогах.

У своїй роботі А.М. Латишенков [21] вніс пропозицію приймати за величину розрахункової швидкості після розмиву побутову з коефіцієнтом $\phi < 1$. Однак, в глобальному плані проблеми це не вирішувало.

Ліштван Л.Л. у своїх роботах [22 – 24] пропонує розмив підмостового русла розглядати як процес формування нового русла зі збільшеною витратою, що пропускає русло в даних ґрунтових умовах. При цьому вважається, що формування такого русла стабілізується до того часу, коли середня швидкість дорівнюватиме «швидкості динамічної рівноваги», при якій притік наносів буде рівне їх виносу. Глибина води після розмиву $h_{пр}$ на кожній вертикалі під мостом обчислюється за формулою:

$$h_{пр} = \left(\frac{m \cdot h_{др}^{5/3}}{0,68 \cdot d_{ср}^{0,28} \cdot \beta} \right)^{\frac{1}{x+1}}, \quad (1.4)$$

де стала для даного мостового переходу визначається:

$$m = \frac{Q}{H_{\text{др}}^{5/3} \cdot l_{\text{м}} \cdot \mu},$$

де $h_{\text{др}}$ – глибина води до розмиву на вертикалі;

$H_{\text{др}}$ – середня глибина води під мостом;

$l_{\text{м}}$ – отвір мосту;

μ – коефіцієнт стиснення потоку;

$d_{\text{ср}}$ – середній діаметр частинок ґрунту;

β – безрозмірний коефіцієнт, який враховує повторюваність паводку;

x – показник степені, який залежить від середнього діаметра частинок ґрунту.

У [43] для визначення глибини у руслі під мостом рекомендується емпірична формула за допустимими швидкостями руху:

$$h_{\text{нр}} = \left(\frac{S_p \cdot h_{\text{др}}^{5/3}}{a_z \cdot \beta} \right)^y, \quad (1.5)$$

де $h_{\text{др}}$ – глибина води при розрахунковому рівні на даній вертикалі до розмиву;

a_z і y – параметри, які залежать від середнього діаметра частинок незв'язного ґрунту, що визначаються за таблицею в [43];

β – параметр, що залежить від ймовірності перевищення розрахункового паводка P %;

S_p – характеристика стиснення потоку мостом, яка визначається за формулою:

$$S_p = \frac{Q_{p\%}}{L_{\text{раб}} \cdot h_{\text{др}}^{5/3}},$$

де $Q_{p\%}$ – розрахункова витрата;

$h_{\text{др}}$ – середня глибина на довжині $L_{\text{раб}}$ до розмиву.

У тому випадку, коли підмостове русло складається з шарів різних ґрунтів, то розрахунки за формулою (1.4) доречно виконувати послідовним наближенням.

Формула (1.4) заснована на постулованій залежності між середньою швидкістю на вертикалі і розміром алювію на дні русла. Проте, натурі це відповідає не у всіх випадках. Наприклад, середня швидкість не сильно залежить від створюваної наносами зернистої шорсткості в річках з піщаним руслом. Загальноприйнята гідроморфологічна теорія руслового процесу свідчить, що залежно від швидкості потоку річки з піщаним дном самі регулюють свою шорсткість, утворюючи руслові мікро- і мезоформи - структурні скупчення, які забезпечують транспорт завислих наносів. У зв'язку з цим залежність (1.4) не доречно визнавати бездоганною, якщо мова йде про русла з піщаним дном.

Крім надмірних запасів у розрахунках загального розмиву під мостами при використанні «постулату», досвідом експлуатації мостових переходів накопичено безліч прикладів, коли розмиви перевищують передбачені розрахунком значення. Зокрема, можна навести дані про низку руйнувань і серйозних ушкоджень мостових переходів у багатьох передгірних районах Українських Карпат [44], внаслідок паводків 1969-70 рр.. Звернувшись до проектних матеріалів, видно, що робоча площа на цих об'єктах визначалася за формулою (1.2), де коефіцієнт загального розмиву P незмінно приймався рівним одиниці.

На підставі досвіду гідрологічного обґрунтування більш 150 мостових переходів, які проектувалися в Тбіліському філії Союздорпроекту, а також спостережень за роботою побудованих споруджень, І.І. Херхеулідзе [25, 48] була запропонована методика розрахунку розмивів в підмостовому руслі на гірських і передгірних ділянках річок.

Залежності для визначення підпору [2] були запропоновані у роботах [10, 21, 30] та ін. Але в цих методиках вплив факторів, що визначають безпосередньо підпір (вплив ухилу, глибини і швидкості під мостом у

побутових умовах, стиснення потоку опорами тощо), не відображається з достатньою повнотою.

О.В. Андрєєв розробив більш універсальні і теоретично обґрунтовані методики визначення підпору [33, 46, 47]. Отримання розрахункової залежності ґрунтувалось на рівнянні Д. Бернуллі, складене для двох перетинів: перетин, де розвивається повний підпір; перетин, кінцевий для зони розтікання потоку, у якому встановлюються побутові умови. Подальший розвиток і розроблення даного методу наведені у роботах учнів О.В. Андрєєва: Ю.В. Абрамова та В.Ф. Грінича [32 – 34].

Розглянуті вище методи розрахунку загального розмиву підмостових русел фактично є модифікаціями постулату М.А. Белелюбського. Постулат був запропонований на основі досвіду проектування і будівництва мостових переходів з отвором мосту, що близький до побутової ширини русла.

Однак, у підсумку таки з'ясувалося, що шлях створення емпіричних залежностей для розрахунку загальних розмивів на мостових переходах не має майбутнього. З тієї простої причини, що через відсутність загальної теоретичної основи емпіричний напрямок вкрай обмежений в саморозвитку. За фактом, емпіричні формули здатні відобразити тільки стан самого процесу, а пояснити причини і фактори його початку, розвитку і стабілізації не в змозі.

У США до 50-х років XX сторіччя розрахунок загального розмиву визначали на основі припущення, що розмив під мостом може продовжуватися доти, поки середня швидкість не буде дорівнювати нерозмивній швидкості для матеріалу, який оголився. Також у США, Індії, Пакистані, Великобританії глибини розмиву визначали за залежностями, які базувались на режимній теорії. Режимною теорією називають сукупність емпіричних рівнянь, що зв'язують гідравлічні елементи потоків, які протікають у зоні алювіальних відкладень. Ці рівняння справедливі для тих випадків, коли водотік виявляється стійким, у ньому не відбувається ні розмивів берегів і дна, ні відкладення наносів. У США застосовували метод

розрахунку загального розмиву, заснований на теорії сили протягування. Розвиток цієї теорії підкріплено експериментами, проведеними Ларсеном [49, 50]. Ларсен розглядав підмостове русло, як звужене на великій довжині і виходив з умови рівності витрат води і наносів до і після стиснення.

Андрєєвим О.В. запропонований теоретичний метод визначення граничного розмиву (глибини розмиву h_{pm}) у руслі з умови граничного балансу наносів, який відповідає рівності побутового припливу наносів зверху за течією і виносом їх з-під мосту:

$$h_{pm} = h_{pnb} \cdot \left(\frac{B_{pnb}}{B_{pm}} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{Q_{pm}}{Q_{pnb}} \right)^{8/9}, \quad (1.6)$$

де B_{pnb} , B_{pm} , Q_{pnb} , Q_{pm} – відповідно, ширина та витрата у побутовому і підмостовому створі.

Однак на річках з великою шириною розливу і з відносно короткими паводками, а також на річках, що несуть великі наноси, фактичні розмиви можуть значно відрізнятись від граничних, тоді застосування теоретичної залежності (1.6) призводить до зайвих запасів стійкості споруд. При визначенні розмивів під мостом за залежністю (1.6) необхідно знати розрахункову витрату води і її частину, яка проходить у руслі, ширину русла, отвір мосту і дані про ґрунти русла. Очевидно, що зазначених факторів недостатньо, щоб визначити величину розмиву. Процес розмиву протікає у часі. Як правило, короткі зливові паводки і тривалі весняні повені при інших однакових умовах приводять до різних величин розмивів. На величину розмивів впливає також попередній (до проходу розрахункового паводка) розмив підмостового русла. Тому загальний розмив підмостових русел необхідно розраховувати з урахуванням ходу паводку у часі та врахуванні руслових деформацій попередніми паводками.

1.4 Гідромеханічні методи розрахунку загальних руслових деформацій

Новий науково обґрунтований напрямок в теорії загальної розмиву на мостових переходах базується на диференціальному рівнянні деформацій, який описує процес розвитку деформацій. Завдяки своєму фізичному змісту, воно стало іменуватися рівнянням балансів наносів.

Рівняння балансу наносів є фундаментальним у математичній моделі загальних руслових деформацій. З його появою починається розвиток теоретичних основ руслових процесів, облік яких необхідний при використанні річкових долин для будівництва транспортних і гідротехнічних споруджень, прокладання комунікацій і сільськогосподарської діяльності.

Одне з перших пропозицій щодо розрахунку руслових переформувань у б'єфах гідровузлів належить Н.М. Бернадському, який рівняння балансу наносів застосовував для кожної струминки потоку обумовленої по розробленому ним методу [51]. У результаті Н.М. Бернадський приходить до рівняння деформацій русла у вигляді:

$$\frac{\partial Z_d}{\partial t} = k \cdot V^\tau \cdot \left[(\tau - 1) \cdot \frac{1}{R} + \tau \cdot \frac{1}{R_b} \right], \quad (1.7)$$

де Z_d – відмітка дна русла;

V – швидкість течії струминки;

k і τ – коефіцієнти, що обумовлені даними вимірів витрати наносів і швидкості потоку в натурі;

R і R_b – радіуси кривизни струминки відповідно в плані й у вертикальній площині.

Рівняння Н.М. Бернадського хоча й не одержало широкого застосування в проектній практиці, займає особливе положення вже тому, що розглядає деформацію русла в плановій постановці.

Якщо в якості руслоформуючих наносів розглядати лише ті, які транспортуються потоком у завислому стані, то для умов плоскої задачі М.А. Веліканов [52] одержав рівняння деформацій у наступному виді:

$$d \frac{\partial(m \cdot \omega)}{\partial x} + m_0 \cdot \frac{\partial Z}{\partial t} = 0, \quad (1.8)$$

де d – середній діаметр частинок ґрунту;

m – коефіцієнт розривності руху;

ω – швидкість руху частинки ґрунту;

m_0 – пористість донних відкладень;

Z – відмітка дна русла;

x і t – відстань і час.

Рівняння деформацій М.А. Веліканова стало основою для всіх наступних його модифікацій. Однак у своєму початковому вигляді воно виявилось незручним для практичного застосування, оскільки виникла принципова неможливість гідромеханічного визначення величини $(m \cdot \omega)$, внаслідок дискретного переміщення донних наносів, що відбувається у вигляді структурних формувань, що мають свої характерні масштаби. Тому, в своїй роботі І.І. Леві [17] записує рівняння деформацій, вводячи в нього витрату наносів:

$$\gamma' \frac{\partial Z}{\partial t} = - \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (1.9)$$

де γ' – об'ємна вага наносів;

Z – відмітка деформуючого дна;

P – витрата наносів;

x і t – відстань і час.

Використання витрати наносів, як інтегральної характеристики руслового процесу, робить задачу прогнозування руслових деформацій більше коректнішою і у певному змісті інваріантною щодо форми переміщення наносів у річкових руслах.

Кількість наносів, яке може переносити потік за одиницю часу, називають транспортуючою спроможністю потоку. Фактичну кількість наносів, що переносить потік, називають витратою наносів. Витрата наносів характеризує транспортуючу здатність потоку, але в загальному випадку не дорівнює їй. При однакових гідравлічних умовах транспортуюча здатність відповідає граничній витраті наносів, що приймається як допущення у всіх інженерних методах розв'язку рівняння деформацій.

Виведення однорозмірного рівняння деформацій у найбільш загальній постановці одержав К.В. Гришанін [14]. Для складання рівняння балансу наносів (умови збереження твердої фази потоку) передбачається, що переміщення наносів через бічні грані паралелепіпеда з основою $dx \cdot dy$ і висотою h немає (рисунок 1.2).

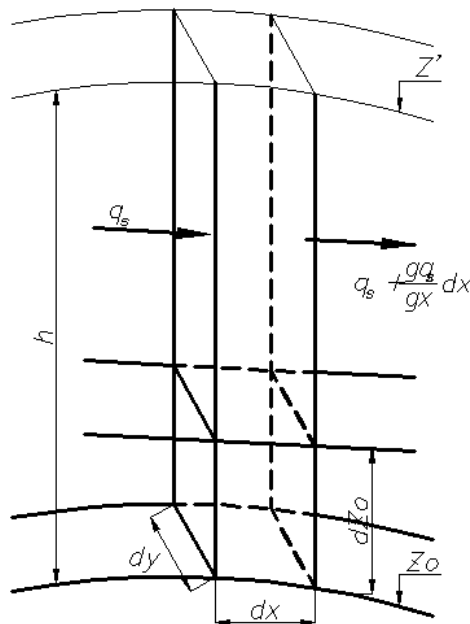


Рисунок 1.2 – Схема розподілу витрати наносів вдовж потоку за К.В. Гришаніним [14]

К.В. Гришанін розуміє витрату наносів як загальну об'ємну витрату донних і зважених наносів у щільному тілі, що більше відповідає змісту задачі прогнозу руслових деформацій, ніж в попередніх роботах [17, 53, 54].

Враховуючи зміну об'єму наносів, що перебувають усередині паралелепіпеда в стані руху за час dt , отримаємо:

$$\frac{\partial g_s}{\partial x} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial Z_o}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot s)}{\partial t} = 0, \quad (1.10)$$

де g_s – елементарна витрата наносів;

ε – коефіцієнт пористості донних відкладень;

$h = Z' - Z_o$ – висота паралелепіпеда;

Z' – відмітка вільної поверхні;

Z_o – відмітка дна;

s – середня по вертикалі об'ємна концентрація наносів;

t – час.

Рівняння (1.10) виражає зв'язок між деформаціями дна і переміщенням наносів у диференціальній формі. При цьому К.В. Гришанін вважає, що для рівнинних рік концентрація зважених наносів, з якої найчастіше доводиться зустрічатися, досить незначна, що дозволяє відкинути останній член у рівнянні (1.10) без втрати точності прогнозування руслових процесів. Тоді рівняння деформацій приймає більше простий вид:

$$\frac{\partial g_s}{\partial x} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial Z_o}{\partial t} = 0. \quad (1.11)$$

У натурних умовах русла ріки мають, як правило, довільні форми живих перерізів і відрізняється звивистістю поздовжньої осі в плані. Рівняння балансів наносів у цьому випадку приймає більше природний вид, записаний у натуральних координатах l , b . Рівняння деформацій К.В. Гришаніна в

одномірній ідеалізації для всього русла, нехтуючи зміною відміток дна, поперечною струминою і поперечним переміщення наносів, записується:

$$\frac{\partial G}{\partial l} + (1 - \varepsilon) \cdot \left(B \frac{\partial Z_o}{\partial t} - h \frac{\partial B}{\partial t} \right) = 0, \quad (1.12)$$

де G – повна витрата наносів у живому перерізі;

h – середня глибина в живому перерізі;

B – ширина русла між урізами.

Якщо деформації берегів незначні або повністю відсутні, то $\partial B / \partial t = 0$.

Тоді рівняння (1.12) спрощується і приймає вигляд:

$$\frac{\partial G}{\partial l} + (1 - \varepsilon) \cdot B \frac{\partial Z_o}{\partial t} = 0. \quad (1.13)$$

Руйнування берегів найбільш інтенсивно відбувається при руслоформуючих витратах і різко слабшає після затоплення заплав, коли відповідно, і розвивається загальний розмив на мостових переходах. Тому нехтування величиною $\partial B / \partial t$ у прогнозах загального розмиву можна вважати цілком виправданим.

Через те, що витрата наносів G повністю визначається гідравлічними характеристиками течії, то інтегрування рівнянь деформацій (1.12) і (1.13) помітно спростяться, якщо в них геодезичну відмітку дна русла Z замінити гідравлічною характеристикою потоку h – середньої по перерізу глибиною води в руслі. В такому виді рівняння балансу наносів одержав О.В. Андрєєв, розглядаючи процес загального розмиву під мостом, рисунок 2.1. Детальне виведення рівняння балансу наносів О.В. Андрєєва представлено у п.2.1, оскільки воно є домінантним для визначення руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів.

Зіставляючи розрахункові схеми на рисунках 1.2 і 2.1, можна зауважити, що О.В. Андрєєв і К.В. Гришанін керувалися тими самими фізичними принципами при виведенні рівняння балансів наносів. Тому структура запропонованих ними рівнянь фактично ідентична. Однак, внаслідок використання різних величин як позначення шуканої функції (відмітка дна русла у К.В. Гришаніна і глибина руслового потоку у О.В. Андрєєва) рівняння балансу наносів О.В. Андрєєва в загальному виді має вигляд формули (2.2), яка наведена у другому розділі даної роботи.

Порівняння аналогічних формул (1.13) з (2.2) свідчить, що заміна шуканої функції супроводжується зміною знака перед другим доданком у лівій частині рівняння балансу наносів. Ця обставина пояснюється тим, що відмітки дна відраховується у додатному напрямку осі Z , а глибина – у напрямку протилежному додатному.

Крім того, у рівнянні К.В. Гришаніна (1.13) перед другим доданком стоїть множник $(1 - \epsilon)$, що враховує пористість алювіальних відкладень. Відсутність його в рівнянні (2.2) зовсім не означає, що О.В. Андрєєв зневажає цією характеристикою донних наносів. О.В. Андрєєв використовував формулу витрати наносів І.І. Леві [20] у математичній моделі загальних руслових деформацій на мостових переходах для визначення коефіцієнта A , що характеризує фізичні властивості донних відкладень, який залежить від пористості ґрунтів русла.

Завершуючи обґрунтування рівняння деформацій (балансу наносів), варто підкреслити його фізичний зміст, що складається у відображенні одного з основних законів природи – закону збереження матерії. У цьому випадку цей закон перетворюється в умову, що гарантує збереження твердої фази потоку. Отже, в основу математичної моделі загального розмиву закладається принцип, який має фундаментальне значення і є одним з факторів, що забезпечують їй фізичну несуперечність.

Необхідність врахування нестационарності руслових деформацій стала очевидною після виявлення численних факторів, коли величина загального

розмиву виявлялася істотно меншою його нижньої границі. Ця обставина пов'язана з тим, що нижня границя загального розмиву визначається для постійного розрахункового рівня води, що дорівнює максимальному за весь період паводка або повінню. У дійсності рівні води й відповідні їм витрати змінюються в ході паводка відповідно до водомірного графіка і гідрографа. Протягом більшого часу вони істотно менше максимальних і тільки дуже нетривалий час рівні піковим. Внаслідок цього і руслові деформації в природних умовах, як правило, спостерігаються меншими величини нижньої границі. Крім того, врахування неусталеного характеру паводка дозволяє встановити динаміку розвитку загального розмиву, пік якого завжди відстає від піка паводка, що є однією зі специфічних властивостей нестационарних процесів.

Для того щоб виключити невиправдані запаси, русловий процес варто розглядати його розвиток як у просторі, так і в часі. Тому, О.В. Андрєєв [31] розробив загальну методику розрахунку загального розмиву з урахуванням неусталеного характеру паводка стосовно до мостових переходів, яка одержала додатковий розвиток у роботах МАДІ, Союздорпроекта, Гіпротрансмоста [9, 55, 56] і КАДІ [57, 58].

Розв'язок рівняння балансу наносів у кінцевих різницях сполучено з величезною кількістю обчислювальних операцій у зв'язку із чим широким використанням методики О.В.Андрєєва стало можливим лише з появою електронної обчислювальної техніки. Для ЕОМ у Союздорпроекті були розроблені програми розрахунку руслових деформацій на мостових переходах: «Гідрам – 1» [56] і «Гідрам – 2» [59], а потім Гіпротрансмост розробив «Гідрам – 3» [55, 63]. Це були перші програми, які мали широке розповсюдження в практиці проектування мостових переходів. У їх основі лежить розв'язок рівняння балансу наносів у кінцевих різницях [35], що для величини загальних руслових деформацій приймає вид:

$$\Delta h = \frac{G_2 - G_1}{B_p \cdot \Delta l} \cdot \Delta t. \quad (1.14)$$

де Δh – середня зміна відмітки дна;

G_1, G_2 – витрати наносів відповідно для початкового і кінцевого створів розрахункової ділянки;

Δl – довжина розрахункової ділянки;

Δt – інтервал часу.

При цьому транспортуюча здатність потоку визначається по формулі витрати наносів І.І. Леві [20]. Деформації вільної поверхні з розрахунку виключалися. Границі транзитного потоку в зоні стиснення приймалися обкресленими по кругових кривих з кутом розвороту 45° , що може мати місце тільки в окремих часткових випадках. Одночасно з розрахунком руслових деформацій розраховуються криві вільної поверхні по довжині зони впливу мостових переходів і, таким чином, враховується взаємний вплив у ході паводка розмиву на підпір і підпору на розмив.

Доречно порушити питання про необхідність врахування петлеутворень кривих ухилу, швидкості і витрати, які намагаються врахувати в [55] для кожного окремого паводку. За оцінкою К.В. Гришаніна [13], що підтверджується натурними дослідженнями Н.Ю. Барішнікова [60], частка інерційного члена $\frac{\alpha}{g} \frac{\partial Q}{\partial t}$ в рівнянні руху неусталеного потоку на рівнинних ріках занадто мала, менш 5% ухилу вільної поверхні руслового потоку, що перебуває в межах точності гідрометричних вимірів. Якщо, незважаючи на це, такий розрахунок все-таки виконується, то при цьому необхідний розв'язок двох диференціальних рівнянь Сен-Венана для неусталеного потоку: руху і нерозривності.

Крім того, в зоні впливу мостових переходів побутові характеристики петлеутворених кривих ухилів, швидкостей і витрат істотно спотворюються ефектами від руху руслового потоку зі змінною витратою уздовж шляху,

деформацією вільної поверхні, заплавного регулювання й взаємодії руслового й заплавного потоків, так званого «кінематичного ефекту» [61, 62]. Вплив перерахованих факторів на трансформацію кривих ухилів, швидкостей і витрат врахувати, хоча б на якісному рівні, у цей час не представляється можливим, а із практичної точки зору і не потрібен. Тому цілком припустимо, не роблячи помітної помилки й не вносячи в методику зайвої невизначеності, здійснити прогноз загальних руслових деформацій по однозначних гідрометричних кривих ухилів, швидкості і витрат.

Внаслідок допущених Г.А. Федотовим принципових помилок у визначенні основних гідравлічних параметрів, ставить під сумнів надійність і вірогідність кінцевих результаті при розрахунку деформацій дна русла за вище вказаними програмами.

У числі відомих пропозицій по використанню різницевих схем для розрахунку руслових деформацій за кордоном можна назвати роботи М.де Вріса [40, 41], Дж. Кунге і Н. Пердро [71], Чанга і Хілла [72], Чена і Саймонса [73], Верде [39].

У роботах [24, 74, 75] на основі результатів чисельних експериментів пропонуються емпіричні коефіцієнти, які враховують нестационарність руслових деформацій і корегують у такий спосіб граничні значення загального розмиву. Очевидно, що надійність такого спрощеного розрахунку ще нижче, ніж використання існуючих програм.

Подальший розвиток методу розрахунку І.І. Леві лягли в основу роботи Ш.Ш. Сакла [77], в якій враховуються деформації русла не тільки по глибині, але й у плані.

Багато спільного з розглянутими аналітичними розв'язками рівняння деформації мають методи В.А. Скрильникова [78], Ліо Конг Дао [79], Тіней [80], Комура й Саймона [36], Аксой [81]. Відмінності стосуються, головним чином, рекомендацій з визначення транспортуючої здатності потоку (ЛіоКонгДао, Тіней, Аксой), способів врахування неоднорідності ґрунту (Комура й Саймон) і пропуску наносів у нижній б'єф (В.А. Скрильников).

А.Б.Векслер і В.М.Доненберг [76] звертають увагу на помилковість заміни $\partial G / \partial l$ при виведенні рівняння деформації русла повним диференціалом dG , що почато в роботах Аксоє і В.А.Скрильникова. Крім того, аналогічну помилку Аксоє допускає відносно відміток дна. Наслідком цього є необґрунтована поява в рівнянні балансу наносів додаткових членів $\partial G / \partial t$ і $\partial Z / \partial l$, порівнянних з іншими членами рівняння й тим самим неминучі перекручування, що вносять відхилення у результати розрахунків.

Розглянуті чисельні й аналітичні методи прогнозу загальних руслових деформацій із практичної точки зору мають загальний недолік. Форма їхньої подачі (графо - аналітичні побудови або чисельні алгоритми) незручні для інженера, якого в цьому випадку не можна назвати просто користувачем. Для творчого розв'язку прикладних задач істотну перевагу мають алгебраїчні вирази, отримані в результаті аналізу адекватної математичної моделі.

В [45] Щодро О.Є. запропоновано і досліджено математичну модель для ефективного та швидкого розрахунку кінематичних характеристик турбулентного потоку у відкритих спокійних водних потоках.

Савенко В.Я. запропонував розрахунок руслових деформацій, що складається з двох етапів: розв'язування нестационарної планової задачі відривних течій та розрахунок деформацій русла на основі отриманих даних про динамічну структуру потоку [38]. А згодом Славінська О.С. в своїх роботах [82 – 88] розробила теорію та методи прогнозування загальних та місцевих розмивів в зоні впливу мостових переходів, які ґрунтуються на положеннях механіки неоднорідних середовищ. На підставі загального рівняння переносу неоднорідного потоку запропонувала систему рівнянь, яка описує динаміку основної зависеної товщі відкритого потоку. Крім того, для обчислення питомої витрати донних наносів повинні бути відомі характеристики окремої частинки. Виходячи з визначення руху донної частинки і діючих на неї сил тяжіння, опору і підйомної сили отримані диференціальні рівняння її руху. Інтегрування цих рівнянь з урахуванням початкових умов дозволило отримати розрахункові залежності для

обчислення характеристики частинки у процесі стрибка – довжини і висоти сальтації частинки, а також швидкості донної частинки залежно від двох обраних безрозмірних параметрів донних наносів. Для обчислення об'ємної концентрації у товщі шару донних наносів, у результаті обробленні експериментальних і натурних даних із вивчення транспортування донних наносів [89] встановлено, що товщина шару донних наносів для всіх потоків дорівнює висоті сальтації частинки, мінімальне значення якої дорівнює двом діаметрам.

В [90] запропонували методику прогнозування розвитку загальних руслових деформацій біля струмененапрямних дамб мостових переходів та рекомендації по усуненню цих деформацій. Запропонована методика враховує такі фактори, як наявність пасмової структури донного рельєфу дна, залежність параметрів дифузії по глибині потоку. Розрахунок загальних руслових деформацій проводиться на основі розв'язку двовимірного рівняння балансу наносів з урахуванням поділу їх транспортування на донні і зважені, спираючись на складну гідродинамічну структуру річного потоку. Питому витрату донних наносів розраховують на основі середньозваженого діаметру відкладень, характеристик макроформ русла водостоку і параметру стійкості частки, а питому витрату зважених наносів – на основі відлікової концентрації донних наносів та параметру зважування.

Однак, запропоновані методики та математичні моделі не зв'язані з багаторічним прогнозуванням загального розмиву, яке на сьогодні вимагає законодавчо-нормативна база.

С.Г. Ткачук [91] вперше зробив аналітичну реалізацію математичної моделі для визначення загальних руслових деформацій при стисненні річок в плані гідротехнічними і транспортними спорудами. Наприклад, для мостових переходів через річки з переважно донними руслоформуєчими наносами математична модель складається з диференціального рівняння балансу наносів, формули трансформуючої спроможності руслоформуєчих наносів, рівняння витрати потоку і його характеристики трансформації:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial G}{\partial l} - B_p \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \\ G = A \cdot Q_p \cdot Fr^{1,5} \\ Q_p = \int_0^B V \cdot h \cdot db \\ \beta_p = \left(1 - \frac{l}{R}\right)^{-1} \end{array} \right., \quad (1.15)$$

де G і Q – витрати наносів і води;

h і B_p – глибина і ширина русла;

V – швидкість руслового потоку;

A – коефіцієнт, що враховує фізичні властивості наносів;

β_p – коефіцієнт руслової трансформації;

l – відстань від початку стиснення;

R – параметр центральної струмини.

Щоб отримати єдиний розв'язок, що відповідає умовам задачі треба задати початкові умови. Тоді задача прогнозу руслових переформувань і деформацій зводиться до задачі Коші, в якій початковими умовами є поздовжній профіль дна русла.

Подальший розвиток існуючої математичної моделі загального розмиву в зоні впливу мостового переходу (1.15) знайшов відображення в роботах наукової школи проф. Ткачука С.Г. [92]. Таким чином основна залежність для визначення руслових переформувань за багаторічний період має такий вигляд:

$$h = h_{(3A/L)} \left[0,5 + \sqrt{0,25 + \frac{m \cdot (m+1) \cdot A \cdot \Gamma_{(3A/L)} \cdot \beta_{P(3A/L)}^{(m+1)}}{R_{(3A/L)} \cdot B_p^m \cdot h_{(3A/L)}^{(m+1)}}} \right]^{\frac{1}{m+1}}, \quad (1.16)$$

де $h_{(ЗАЛ)}$ – залишкова глибина, для кожного створу зони стиснення і під мостом в кожний момент паводку обчислюється як різниця між рівнем води РВВ і залишковою відміткою дна від попереднього паводку;

m – показник степені, який за результатами лабораторних і натурних досліджень різних авторів змінюються в дуже вузькому діапазоні;

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

В основі залежності (1.16) лежить властивість квазілінійних рівнянь, яка полягає в тому, що задавши початкові умови характеристиками його розв'язок набуває того ж виду, але з іншими параметрами. В системі багаторічного прогнозування величини загального розмиву необхідно змодельовати найнесприятливіші серії повеней, які можуть проходити в руслі. Але необхідно враховувати, що перша повіднь може проходити по ще нездеформованому (пласкому) дну, тобто:

$$h_{(ЗАЛ)} = h_{pn}.$$

Друга і наступна повіднь проходить по дну, що був здеформований попередньою повідню. Тоді для визначення величини загального розмиву необхідно у залежність (1.16) визначати залишкову глибину $h_{(ЗАЛ)}$, яка обчислюється як різниця між рівнем води РВВ і залишковою відміткою дна від попереднього паводку. Для перших повеней в змодельованій серії повеней визначається залишковий розмив, тобто деформації в руслі, які відбуваються в момент сходження води з заплав у русло. Для останньої – максимальний розмив, що може бути у руслі.

Математична модель (1.15) і залежність (1.16) не враховує деяких особливостей при визначенні залишкового розмиву. Зокрема на момент залишкового розмиву може скорочуватися довжина зони стиснення та коефіцієнт стиснення потоку під мостом через зменшення ширини розливу.

1.5 Висновки по розділу 1

1. Аналіз існуючих методів прогнозування руслових деформацій в зоні впливу мотових переходів на автомобільних дорогах показав, що на теперішній час не існує науково обґрунтованої методики визначення основних гідравлічних показників, що відповідають залишковому розмиву.

2. При розробленні методів гідролого-морфометричного напрямку застосовувалися залежності, які були отримані на підставі натурних спостережень. Через відсутність загальної теоретичної основи, отримані залежності відображають тільки стан самого процесу, але не враховують причини і фактори його початку, розвитку і стабілізації процесу загального розмиву.

3. Розглянуті методи гідромеханічного напрямку прогнозу загальних руслових деформацій із практичної точки зору мають певний недолік. Запропоновані залежності незручні для проведення інженерних розрахунків при проектуванні мостових переходів. Для творчого розв'язку прикладних задач істотну перевагу мають алгебраїчні вирази, отримані в результаті аналізу адекватної математичної моделі.

4. Запропонований метод для багаторічного прогнозування величини загального розмиву не відображає можливе скорочення довжини зони стиснення та коефіцієнта стиснення потоку під мостом на момент звільнення заплав від води.

5. Виникає необхідність в розробленні математичної моделі прогнозування величини загального розмиву русла в зоні впливу мостових переходів на автомобільних дорогах за багаторічний період, яка б враховувала залишковий розмив.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАГАЛЬНОГО РОЗМИВУ ПІД МОСТОВИМИ ПЕРЕХОДАМИ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ

На автомобільних дорогах будівництво мостових переходів в більшості випадків влаштовують зі стисненням річок насипами до підходів мостів. Під час високих вод насипі мостів зазвичай перекривають більшу частину ширини розливу ріки, а отвір мосту складає меншу частину. Стиснення потоку насипами викликає його суттєве переформування в порівнянні з побутовими умовами. Деформації річного потоку внаслідок стиснення мостовим переходом залежать від гідравлічних параметрів ріки в нестиснутому стані і від степені стиснення потоку гідротехнічною спорудою. Всі ці фактори необхідно враховувати в математичній моделі руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів на автомобільних дорогах.

2.1 Рівняння деформації (балансу наносів) підмостових русел на автомобільних дорогах

Для всіх математичних моделей руслових деформацій домінантним рівнянням є рівняння балансу наносів [1]. З фізичної точки зору воно являє фундаментальний закон збереження речовини, який в руслових прогнозах втілюється в закон збереження загальної кількості наносів. Першим для розрахунку загальних руслових деформацій в умовах стиснення водного потоку мостовими переходами був О.В. Андрєєв [33], який виводить рівняння балансу таким чином.

Природній швидкості води в руслі відповідає певна транспортуюча спроможність потоку [93]. Із збільшенням швидкості течії в руслі під мостом,

внаслідок стиснення ріки підходами, витрата наносів під мостом збільшується. Тому виникає порушення балансу між кількістю принесених до мосту наносів зверху за течією та виносом наносів з-під мосту потоком, що має підвищену швидкість.

Посилений виніс наносів з-під мосту означає щосекундне захоплення потоком, протікаючи з підвищеною швидкістю, деякої кількості ґрунту, що складає дно русла на стисненій ділянці ріки. Через початковий створ на елементарну ділянку руслового потоку довжиною dl поступають руслоформуючі наноси в кількості G за кожен одиницю часу. Витрата наносів може бути змінною як за часом, так і по довжині потоку, тобто $G = f(l, t)$ через другий, кінцевий, створ цієї ділянки в ту ж саму мить виходить змінена витрата наносів, яка відрізняється від G на величину приросту витрати наносів по довжині потоку, див. рисунок 2.1.

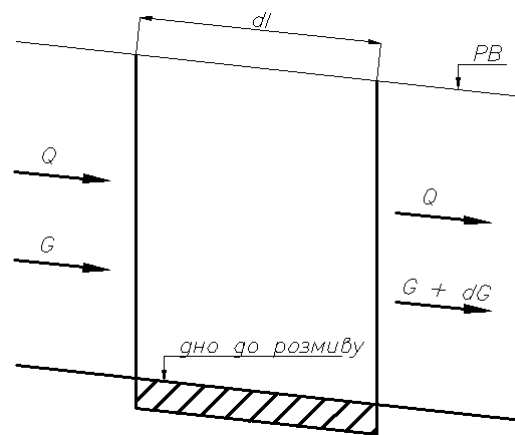


Рисунок 2.1 – Схема загального розмиву [93]

Приріст витрати руслоформуючих наносів може утворитися при збереженні ширини русла тільки за рахунок розмиву його дна:

$$G + dG = G + \frac{\partial G}{\partial l} \cdot dl.$$

При цьому можна записати рівність: надходження наносів + розмив = виносу наносів, тобто:

$$G \cdot dt + dW = (G + dG) \cdot dt.$$

За елементарний відрізок часу dt приріст об'єму потоку dW у зв'язку з розмивом дна буде дорівнювати перевищенню об'єму виносу наносів через другий створ над надходженням наносів через перший створ:

$$dW = dG \cdot dt = \frac{\partial G}{\partial l} \cdot dl \cdot dt.$$

Приріст об'єму потоку на ділянці сталої довжини можна визначити через збільшення площі його поперечного перерізу, яка може змінюватися як за часом, так і по довжині потоку, тобто $\omega = f(l, t)$. Тому:

$$dW = \frac{\partial \omega}{\partial t} \cdot dl \cdot dt.$$

Порівнюючи два останніх вирази, отримаємо рівняння балансу наносів (деформацій):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial l}. \quad (2.1)$$

Для русел з нерозмивними берегами рівняння (2.1) можна записати в розгорнутому вигляді [93]:

$$\frac{\partial G}{\partial l} - B_p \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0, \quad (2.2)$$

де B_p – ширина русла,

яке надає йому зручності в аналітичних перетвореннях, і тому набуло поширеного застосування в практиці інженерних прогнозів руслових деформацій. Незважаючи на те, що при його виведенні використано приклад стиснення ріки мостовим переходом, воно має загальний характер. Рівняння балансу наносів (2.2) придатне як для визначення руслових переформувань в природних умов, так і прогнозів деформацій дна при будь-якому стисненні ріки гідротехнічними чи транспортними спорудами. Але при цьому треба мати на увазі два застереження:

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

Якщо друге застереження не справджується, то рівняння балансу наносів треба записати з правою частиною, що не дорівнює нулю, тобто:

$$\frac{\partial G}{\partial l} + B \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = g_{sb}, \quad (2.3)$$

де g_{sb} – бічна питома витрата наносів, або кількість наносів, яка щосекунди надходить до русла через одиницю його довжини [93].

Практичні задачі з використанням рівняння (2.3) останнім часом набули актуальності, пов'язаної з прогнозами замулення малих річок і розроблення заходів, які б завадили поширенню цього шкідливого явища. Але розв'язання таких задач виходить за рамки цього дослідження.

2.2 Обґрунтування формули транспортуючої спроможності руслового потоку

Річки – один з найбільш складних і досконалих об'єктів природи, функція якого полягає в зосередженні і транспортуванні води і наносів по

земній поверхні. Від водотоків води в каналах і трубах річкові потоки відрізняються тим, що самі визначають швидкість течії, а також форму і розміри поперечного перерізу русла для того, щоб, залишаючись стійкими, виправдати своє головне призначення – виконувати роль транспортної системи для води і наносів. Головна особливість річок – їх чудова здатність до саморегуляції, яка, на думку К.В. Гришаніна, є найбільш досконалою з усіх систем неорганічного світу [94].

Наноси формуються з продуктів ерозії ґрунтів, що складають басейн ріки, і періодично заносяться в її русло повеннями і паводками. В залежності від крупності та швидкості потоку, в руслі ці частинки можуть рухатись або в завислому, або в донному режимі (волочінням, стрибками, скупчуючись в пасма). При цьому склад і крупність донних наносів регулюється самою рікою завдяки більшому чи меншому заповненню дрібними частинками шпаринок основного кістяка донних відкладень.

Річки, що досягли статистично стабільного стану швидкості і глибини, знаходяться у цілком визначеній відповідності з крупністю ґрунтів річища. Але цей ґрунт майже ніколи не буває однорідним в природних умовах, тому в разі зміни швидкості течії змінюється і концентрація транспортуючих наносів, та їх гранулометричний склад – потік самостійно відбірає транспортовані фракції. В результаті на тих ділянках, де склад наносів приблизно однаковий, а на рівнинних річках довжина таких ділянок може вимірюватись сотнями кілометрів, витрата руслових наносів має лише опосередкований зв'язок з їх крупністю. Поєднання даної обставини з наявністю пасмового рельєфу дна і циклічністю його переформувань дозволяють очікувати досить незначного ефекту відмостки. Принаймні, для піщаного діапазону крупності наносів [94].

В залежності від режиму, кількості і складу наносів, що до нього потрапляють, природний потік має здатність змінювати транспортуючу спроможність в досить широких межах шляхом самочинної зміни

морфологічної будови русла і заплав, в тому числі за рахунок форми свого поперечного перерізу – його розлогості або зосередження [94].

Регулювання річкою своєї транспортуючої спроможності пов'язане з її здатністю керувати швидкістю потоку завдяки створенню відповідного гідравлічного опору, який крім зернистої шорсткості формує також вторинну систему опору – рифелі, пасми, боковики та осередки. У піщаному річищі це дозволяє збільшити опір руху води від 2 до 7 разів. Якщо замало і цього, ріка використовує крупномірільні засоби гасіння енергії, а саме – збільшення довжини русла (меандрування), поділ його на рукави та створення інших перепон для руху води в самому руслі (острови та осередки).

Механізм створення потоком вторинної системи опору (руслових форм) набуває чітких рис крупномірільних когерентних структур, виявлених у русловому потоці. Результати лабораторних досліджень показують, що в гідравлічному лотку з піщаним і гладким дном через деякий час після пуску води поверхня дна деформується та набуває барханного виду. Цей факт беззастережно свідчить, що початок руслових переформовувань спричиняється русловою турбулентністю. При взаємодії з підрусловим потоком пульсації донної швидкості і гідродинамічного тиску спочатку зрушують окремі зернятка ґрунту. Згодом під дією збуреного ними потоку утворені на дні нерівності збільшуються, а наноси скупчуються у руслові форми. Останні модулюють крупномірільні вихорові структури, які вже визначають розміри донних пасм. Тривання цього процесу відбувається доти, поки величина руслових форм і характеристики турбулентного потоку не досягнуть взаємної відповідності, узгодженою з транспортуючою спроможністю [94].

Але така узгодженість є принципово недосяжною в природних умовах, де руслові деформації відбуваються набагато повільніше, ніж зміни гідравлічних параметрів потоку. Внаслідок цього даний стан русла не є відбитком даного стану потоку, бо в ньому завжди зберігаються сліди його попередніх станів. Завдяки тому, що в перехідних режимах зв'язки між

елементами потоку і русла, як правило, мають гістерезисний характер, взаємодія потоку і русла стає ніби тремтячою.

Перешкодою до фізичного моделювання руслових процесів є їх сильна захисна саморегуляція. Лабораторні умови зовсім інші в порівнянні з натурними, і коли модельний потік до них пристосовується, то створює зовсім інші руслові форми, ніж ті, що властиві йому в природних умовах.

Сучасна гідроморфологічна теорія руслового процесу виходить з того, що транспортування донних піщаних і піщано-гравелистих наносів відбувається не окремими крупинками, а їх скупченнями – русловими мікроформами (рифелями) і мезоформами (пасмами, боковиками, осередками) [93]. Пересування окремих алювіальних частинок по напірній поверхні руслових мезоформ відбувається волочінням або сальтуючи по ним, або ж вони скупчуються в рухливіші за мезоформи рифелі. Коли досягається пікова висота пасм $h_{\text{пс}}$, вони скочуються в підвалля мезоформ і в переважній більшості покриваються іншими піщинками, після чого врешті-решт опиняються надовго похованими під тілом пасм [11]. Поховані частинки алювію знов отримують можливість рухатись, забезпечуючи в такий спосіб транспортування донних наносів, тільки після переміщення пасм на відстань, що дорівнює їх довжині.

Швидкість є рушійним чинником транспортуючої спроможності руслового потоку. Для руху окремих крупинок наносів істотне значення мають також турбулентні пульсації швидкості і тиску. В той же час, вони виявляються занадто слабкими, щоб зрушити пасмові скупчення наносів [12, 95 – 98]. Тому прийнято вважати, що пересування руслових мезоформ відбувається, головним чином, під дією середньої швидкості руслового потоку.

З огляду на гідроморфологічну теорію руслового процесу, накопичені дані лабораторних і натурних досліджень, видається можливість отримати теоретичну формулу транспортуючої спроможності для донних наносів на засадах розмірного аналізу і π -теореми.

Питома на одиницю ширини русла транспортуюча спроможність, яка є витратою донних наносів, що відповідає гідравлічним параметрам руслового потоку в цьому створі і на даний момент часу, згідно рівнянню нерозривності становить:

$$g_s = \Delta_s \cdot C_{nc}, \quad (2.4)$$

де g_s – питома на одиницю ширини русла транспортуюча спроможність;

Δ_s – середня висота пасм;

C_{nc} – швидкість пересування донних пасм.

У переліку чинників, від яких залежить швидкість пересування донних пасм C_{nc} , чітко окреслюються дві групи: ті, що характеризують фізичні властивості води і наносів, і ті, що обумовлюють їх рух.

До першої групи належать: ρ – густина води; ρ_s – густина наносів; ϵ – безрозмірний коефіцієнт пористості наносів; d – крупність наносів; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості; w – гідравлічна крупність наносів.

З огляду на транспортування донних наносів цілісними скупченнями, крупністю окремих частинок d та їх гідравлічною крупністю w можна знехтувати. На це звертається увага також у роботі [99], коли визначають неможливість уточнення зв'язку $C_{nc} / V = f(Fr)$ ввівши до нього середній діаметр донних частинок (де Fr – число Фруда, параметр кінетичності потоку).

Через завжди інтенсивну турбулентність руслових потоків, молекулярна в'язкість води, що відтворюється її кінематичним коефіцієнтом ν , теж може бути вилучена з подальшого аналізу без щонайменшої шкоди для теорії.

Решта чинників першої групи складається в безрозмірний комплекс:

$$\pi_{\rho\varepsilon} = \frac{\rho \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_s - \rho}, \quad (2.5)$$

від якого швидкість пересування пасм з переконливою очевидністю залежить прямо пропорційно. Величина $1 - \varepsilon$ визначає об'єм кістяка тіла пасм. Чим більше пор в руслових наносах, тим менше в них твердих частинок. Отже, при даній швидкості пересування цілісної мезоформи, із збільшенням її пористості швидкість переміщення лише твердого матеріалу зменшується. Знаменник формули (2.5) враховує підймальну силу Архімеда, що діє на тверді крупинки наносів. Для піщаних та гравелистих наносів при $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_s = 2650 \text{ кг/м}^3$ і $1 - \varepsilon = 0,62$, матимемо $\pi_{\rho\varepsilon} = 0,38$ – практично сталу величину.

Другу групу чинників, від яких безпосередньо залежить швидкість пересування руслових скупчень наносів $C_{\text{пс}}$, складають: V – середня швидкість руслового потоку; u_* – динамічна швидкість; h – середня глибина потоку; C – коефіцієнт Шезі; g – прискорення вільного падіння; $II_{\text{кн}}$ – безрозмірний параметр кінетичності або число Фруда (Fr). Цей перелік всебічно охоплює комплекс фізичних величин, які, в той чи інший спосіб, впливають на швидкість руху донних пасм.

Середня швидкість потоку V є головним рушійним агентом для руслових мезоформ. При $V = 0$ будь-які руслові переформування припиняються. Динамічна швидкість $u_* = (\tau / \rho)^{0,5}$ – визначає напруження зсуву в придонному шарі руслового потоку і для рівномірних (квазірівномірних) потоків дорівнює [93]:

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot j},$$

де j – гідравлічний похил.

Глибина h справляє гідростатичний тиск на дно, утруднюючи пересування пасм. Коефіцієнт Шезі C враховує гідроморфологічні

особливості ріки, а прискорення вільного падіння становить питому (віднесену до одиниці масу потоку) силу, що уможлиблює плин води. Параметр кінетичності $\Pi_{\text{кн}} = V^2 / gh$ визначає енергетичний стан потоку і на відміну від числа Фруда, де в знаменнику замість глибини потоку Фруд поставив довжину корпусу судна, має чіткий фізичний зміст, який виражає відношення подвоєної питомої кінетичної енергії до питомої потенціальної енергії потоку.

Таким чином, швидкість пересування донних пасм являє собою функцію від перелічених вище величин:

$$C_{\text{пс}} = f(V, u_*, h, g, C, \Pi_{\text{кн}}), \quad (2.6)$$

або в неявному вигляді:

$$F(C_{\text{пс}}, V, u_*, h, g, C, \Pi_{\text{кн}}) = 0. \quad (2.7)$$

Розмірності аргументів неявної функції, крім безрозмірного параметра кінетичності, складаються з двох основних: лінійної розмірності $[L]$ і часової розмірності $[T]$. Тому у відповідності з π -теоремою, вибравши серед цих розмірних величин якісь дві, наприклад, h і g , розмірності решти з них N_i можна виразити через ці дві базові, піднесених до необхідних степенем, тобто [93]:

$$[N_i] = [h]^x \cdot [g]^y.$$

Діленням кожної величини N_i на $h^x \cdot g^y$ знаходяться безрозмірні π -комплекси:

$$\frac{N_i}{h^x \cdot g^y} = L^0 \cdot T^0. \quad (2.8)$$

Завдяки цьому на дві величини зменшується кількість аргументів неявної залежності (2.7), а між утвореними в такий спосіб безрозмірними комплексами виявляється прямо пропорційна залежність, що і дає можливість віднайти формулу швидкості пересування донних пасм.

Щоб визначити показники степені x та y треба у залежність (2.8) підставити розмірності величин N_i та h і g , окремо зібрати показники степені при розмірностях $[L]$ і $[T]$ прирівняти їх до нуля. Отже, для середньої швидкості потоку матимемо:

$$[L][T]^{-1}[L]^{-x}[L]^{-y}[T]^{2y} = 0.$$

Підсумовуючи показники степені при лінійний розмірності $[L]$ та часовій розмірності $[T]$ і прирівнюючи їх до нуля, отримуємо два рівняння:

$$1 - x - y = 0,$$

$$-1 + 2y = 0,$$

звідки знаходимо $x = 0,5$; $y = 0,5$. Таким чином, безрозмірний π -комплекс для середньої швидкості потоку становить [93]:

$$\pi_v = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}},$$

що з фізичної точки зору є відношенням швидкості потоку до швидкості руху малих збурень, причиною яких в русловому потоці можуть бути донні пасма.

Піднесений до квадрату цей π_V -комплекс набуває змісту параметра кінетичності:

$$\pi_{\Pi_{\text{ки}}} = \frac{V^2}{g \cdot h}.$$

Оскільки розмірності швидкості пересування руслових мезоформ і динамічної швидкості такі, як і розмірність середньої швидкості потоку, то безрозмірні π -комплекси за їх участю будуть відповідно такі:

$$\pi_{C_{\text{nc}}} = \frac{C_{\text{nc}}}{\sqrt{g \cdot h}},$$

$$\pi_{u_*} = \frac{u_*}{\sqrt{g \cdot h}}.$$

Дотримуючись такої ж процедури для визначення безрозмірного π_C -комплекса для коефіцієнта Шезі та враховуючи, що його розмірність становить $[C] = [L]^{0,5}[T]^{-1}$, отримаємо:

$$\pi_C = \frac{C}{\sqrt{g}}.$$

Тепер з врахуванням $\pi_{\rho\epsilon}$ неявну функцію (2.7) можна записати так:

$$F(\pi_{\rho\epsilon}, \pi_V, \pi_{C_{\text{nc}}}, \pi_{u_*}, \pi_C, \pi_{\Pi_{\text{ки}}}) = 0,$$

або в явному вигляді:

$$\frac{C_{nc}}{\sqrt{gh}} = 0,38 \cdot \frac{V}{\sqrt{gh}} \cdot \frac{u_*}{\sqrt{gh}} \cdot \frac{C}{\sqrt{g}} \cdot \frac{V^2}{\sqrt{gh}}. \quad (2.9)$$

Помноживши обидві частини (2.9) на швидкість руху малих збурень $(g \cdot h)^{0,5}$ і взявши до уваги формулу (2.5), матимемо швидкість пересування донних пасм [93]:

$$C_{nc} = 0,38 \cdot \frac{V^4}{(g \cdot h)^{3/2}}. \quad (2.10)$$

Питома витрата донних наносів g_s дорівнює добутку швидкості руху пасм C_{nc} на середню висоту пасм h_{nc} , яка знаходиться в прямій залежності від глибини потоку, про що вже йшла мова раніше. Тому:

$$h_{nc} = A \cdot h,$$

де A – коефіцієнт, який враховує повноту профілю пасм і співвідношення між висотою пасм та глибиною потоку. Зважаючи на цю обставину, формула питомої на одиницю ширини русла витрати донних наносів при пасмовій формі їх руху буде такою:

$$g_s = A \cdot h \cdot \frac{V^4}{(g \cdot h)^{3/2}}, \quad (2.11)$$

В формулі (2.11) коефіцієнт A за емпіричними даними Б.Ф. Сніщенко і З.Д. Копаліані [99] для піщаного алювію дорівнює 0,011. Транспортуюча спроможність всього руслового потоку визначається за залежністю:

$$G = A_g \cdot B_p \cdot \frac{V^4}{h^{0,5}}, \quad (2.12)$$

де $A_g = A / g^{3/2}$ або $A_g = 0,011 / g^{3/2}$ – для піщаного алювію;

B_p – ширина русла.

Формулу транспортуючої спроможності для всього руслового потоку (2.12) можна записати в енергетичній формі:

$$G = A \cdot Q_p \cdot Fr^{1,5}, \quad (2.13)$$

де Q_p – руслова витрата;

$Fr = V^2 / g \cdot h_{\text{сер}}$ – число Фруда;

$h_{\text{сер}}$ – середня глибина потоку.

Численні лабораторні та натурні дослідження багатьох інших авторів мають практично однаковий результат. За їх даними узагальнююча структура транспортуючої спроможності потоку має вид:

$$G = A \cdot \frac{V^m \cdot B_p}{h_k} \cdot \left(1 - \frac{V_o}{V}\right), \quad (2.14)$$

де $A = f(d)$ – функція крупності наносів;

V_o – початкова швидкість потоку при зрушенні наносів;

m та k – показники степені, які за результатами лабораторних і натурних досліджень різних авторів змінюються в дуже вузькому діапазоні (див. табл. 2.1., [32]).

Таблиця 2.1 – Показники степеня m та k різних авторів

п/п	Автори	Показник степеня m	Показник степеня k
1	2	3	4
Донні			
1	ЦНДІБ	4,00	0,00
2	Гончаров В.М.	4,00	0,50
3	Гончаров В.М.	4,00	0,40

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
4	Гончаров В.М.	4,33	0,45
5	Леві І.І.	4,00	0,25
6	Шамов Г.І.	4,00	0,75
7	Студеничников Б.І.	4,00	-0,25
Завислі			
8	Леві І.І.	4,00	0,00
9	Веліканов М.О.	4,00	0,00
10	Єгізаров І.В.	4,00	0,00
11	Гостунський О.М.	4,00	0,50
Донні + завислі			
12	Лаурсен Е. (дрібні наноси)	5,25	0,87
13	Лаурсен Е. (середні наноси)	4,00	0,67
14	Лаурсен Е. (крупні наноси)	3,25	0,54
Середнє без (7)		4,05	0,38
Округлені		4,00	0,40

В той же час функція крупності наносів A у різних авторів може відрізнятися в декілька разів. Пояснення таких розбіжностей криється в принциповій невідтворюваності природного руслового процесу в лабораторних умовах, на що звертає увагу К.В. Гришанин [13]. Причина неадекватності гідравлічного моделювання руслових потоків полягає у високому рівні їх саморегулюючої спроможності. В залежності від витрат води і наносів кожна річка сама виробляє розміри живого перерізу і тип руслового процесу. Умови формування русла в гідравлічному лотку або на русловому майданчику зовсім інші, ніж в річках. Згідно з мірилом моделі повинні моделюватися і фізичні властивості наносів – проблема, яка не має однозначного рішення. Таким чином, результати гідравлічного моделювання руслових процесів навряд чи можна безоглядно переносити на природні об'єкти.

Варто звернути увагу на доцільність множника $1 - V_0/V$, який є у формулі (2.14) [1]. Він відсутній у формулах транспортуючої спроможності донних наносів (2.11 – 2.13). Однією з цілей введення множника $1 - V_0/V$ є визначення моменту, з якого починається рух наносів. Натомість загальний

розмив на мостових переходах починається з моменту затоплення заплав і закінчується їх звільненням від води. При рівнях вищих за відмітки заплав середня швидкість в руслі V завжди перевищує нерозмивну V_o . Тому впродовж тривалості загального розмиву заздалегідь відомо, що $(1 - V_o/V) < 1$, і врахування початкової швидкості зрушення втрачає сенс. Крім того, при $V < V_o$ формула (2.14) дає від'ємне значення транспортуючої спроможності [1].

Сучасна концепція пасмового транспортування русло формуючих донних наносів взагалі робить зайвим поняття початкової швидкості руху наносів. Якщо мова йде про окремі частинки, рух яких можна помітити в лабораторії і практично неможливо в природних умовах, то не вони обумовлюють транспортуючу спроможність. Якщо ж це стосується донних пасм, то їх рух настільки повільний, що заміри початкової швидкості стає неможливим. З наведених міркувань виразом $1 - V_o/V$ можна знехтувати. Можлива при цьому похибка іде в запас транспортуючої спроможності потоку.

Наноси, що рухаються в завислому стані не є руслоформуючими і здебільшого проносяться транзитом, але все таки перебирають на себе якусь частину транспортуючої спроможності. При необхідності врахування двох режимів транспортування наносів – донного і завислого, в (2.14) функція крупності наносів може бути обчислена за емпіричною формулою І.І. Леві [20]:

$$A = \left[\frac{0,2 \cdot h^{0,25}}{g \cdot w} + \frac{2}{g^{1,5} \cdot d^{0,25}} \right] \cdot \frac{1+r}{\gamma},$$

де w – гідравлічна крупність наносів;

γ – об'ємна вага наносів (здебільшого 2650 кг/м^3);

r – коефіцієнт порізності наносів (в середньому $0,65$);

Також транспортуючу спроможність наносів для донного і завислого стану можна визначити і за формулою В.М. Гончарова [1].

З огляду на перевагу у формулі (2.14) показника степені $m = 4$ над $k = 0,5$ її можна спростити звівши до виразу [1]:

$$G = A_g \cdot B_p \cdot V^4, \quad (2.15)$$

в якій функція A_g може визначатися наближено по таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення A_g в залежності від ґрунту русла

Ґрунт	Різнovid ґрунту	Крупність наносів d , мм	Значення коефіцієнта A_g , $1/g^{3/2}$
Пісок	Дрібний	0,05-0,25	$18 \cdot 10^{-4} - 7,2 \cdot 10^{-4}$
	Середній	0,25-1,00	$7,2 \cdot 10^{-4} - 3,4 \cdot 10^{-4}$
	Крупний	1,00-2,50	$3,4 \cdot 10^{-4} - 2,6 \cdot 10^{-4}$
Ґравій	Дрібний	2,50-5,00	$2,6 \cdot 10^{-4} - 2,0 \cdot 10^{-4}$

Слід зауважити, що похибка у величині A_g слабо реагує на результати багаторічного прогнозування загального розмиву [100]. В аналітичній реалізації математичної моделі ця величина має показник степені 0,1. Тому навіть стовідсоткова помилка в значенні A_g відобразиться в загальному розмиву похибкою всього 7%.

В роботі [101] отримана теоретична залежність витрати руслових наносів за умови донного режиму їх транспортування:

$$g_s = \frac{9660}{C^{4,5} \cdot g^{1,5}} \cdot \frac{V^4}{h^{0,5}}, \quad (2.16)$$

де чітко простежується пряма залежність витрати донних наносів від швидкості в четвертій степені і обернена залежність від квадратичного

кореня глибини, що експериментально було доведено багатьма дослідниками.

Б.Ф. Сніщенко і З.Д. Копаліані на підставі численних лабораторних і натурних досліджень пропонують для питомої витрати донних наносів таку емпіричну залежність:

$$g_s = 0,011 \cdot \Delta_s \cdot V \cdot Fr^{2,9}, \quad (2.17)$$

де середню висоту пасм Δ_s приймати $(0,18 - 0,20) \cdot h$. При коефіцієнті Шезі $C = 30$ значення витрати донних наносів за формулами (2.16) і (2.17) співпадають, що не є несподіваним, тому що дані натурних досліджень для отримання емпіричної формули (2.17) напевно добувалися на рівнинних річках з таким поширенням для них коефіцієнтом Шезі.

Цілковитий збіг відносних питомих витрат за емпіричною (2.17) і теоретичною (2.16) формулами свідчить про їх безумовну достовірність, принаймні, для річок з коефіцієнтом Шезі $C = 30$, або близьких до нього. На річках з іншими гідро морфологічними умовами емпірична формула (2.17) може давати результати відмінні від фактичних, тому що не враховує вплив на транспортуючу спроможність змінності коефіцієнта Шезі.

Повна відповідність витрат донних наносів за формулами (2.16) і (2.17) при $C = 30$ констатує рівність добутоків швидкості їх пересування і середньої висоти їх рухливого шару, що відбито у формулі (2.4). Але множники цих формул зовсім різні. Теоретична швидкість руху наносів C_{nc} виявляється на порядок більшою, ніж знайдена емпірично Б.Ф. Сніщенко і З.Д. Копаліані. Це може означати тільки те, що теоретично обґрунтована швидкість C_{nc} є швидкістю руху руслових мікроформ (рифелів), а Б.Ф. Сніщенко і З.Д. Копаліані фіксували швидкість пересування руслових мезоформ, що в натурних умовах зробити значно простіше. Внаслідок цього і висота пасм за теорією [102] виявляється значно меншою за висоту руслових мезоформ, що цілком об'єктивно, бо теоретична формула витрати донних наносів

виводилась з передумовою про рівномірних рух потоку, який, наближено може бути можливим за наявності рифелів і, навряд чи, може вважатися рівномірним в руслах з донними пасмами, висота яких може становити п'яту частину глибини. Але, з огляду, на малу крутизну напірного укосу донних пасм умовно можна прийняти рух потоку в межах їх довжини рівномірним чи, більш точно, квазірівномірним.

Формули (2.12 – 2.14) встановлюють залежність між середньою швидкістю потоку V і його транспортуючою спроможністю G – величинами, які за своєю фізичною сутністю є динамічними. Отже, в математичній моделі загального розмиву ці формули входять як динамічні рівняння для твердої фази потоку.

2.3 Рівняння нерозривності та руху водного потоку

Математична модель неусталеного плавно змінного руху складається з двох диференціальних рівнянь Сен-Венана (нерозривності та динамічного) і початкових умов.

Загалом при плавномінімному русі середня швидкість V і витрата потоку Q у всіх живих перерізах неусталеного потоку повинні мати частинні похідні, що не дорівнюють нулю, по часовій змінній [93]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0; \quad \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0.$$

При безнапірному неусталеному русі відбувається не тільки зміна витрати води Q , але змінюється також площа живого перерізу потоку ω . Причому Q і ω залежать від часу t і відстані l , тобто $Q = f(t, l)$ і $\omega = f(t, l)$. Звідси і середня швидкість V течії також залежить від t і l .

Неусталених рух у відкритих руслах зустрічається досить часто, і в переважній більшості випадків при спорудженні об'єктів транспортного та гідротехнічного призначення його особливості необхідно враховувати. Наприклад, в сучасних методах визначення генеральних розмірів мостових переходів закладені як вихідні дані графіки зміни в часі рівнів води $H = f(t)$ (водомірний графік) та витрати (гідрограф) $Q = f(t)$.

Для отримання рівняння нерозривності, яке відтворює фундаментальний закон збереження матерії, розглянемо повздовжній переріз тіла рідини (див. рисунок 2.2).

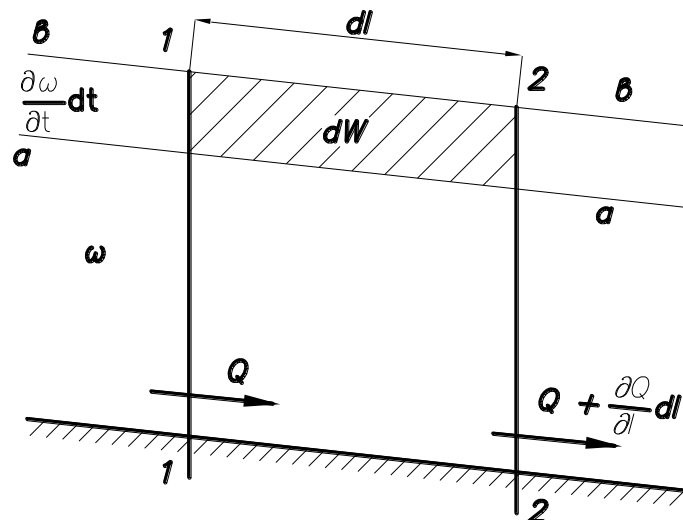


Рисунок 2.2 – Схема розподілу витрати води вздовж потоку [93]

В момент часу t вільна поверхня займає положення $a-a$, а в момент часу $t + dt$ – положення $b-b$. Розглянемо два нерухомі перерізи 1-1 і 2-2 з нескінченно малою відстанню між ними dl . Елементарний об'єм рідини dW , який міститься у відсіку між перерізами 1-1 і 2-2 і двома положеннями вільної поверхні $a-a$ і $b-b$, можна визначити як різницю об'ємів води, що надійшла за час dt з витратою Q через переріз 1-1 і втекла з витратою $Q + \frac{\partial Q}{\partial l}dl$ з цього відсіку через переріз 2-2 за той самий час:

$$dW = Q \cdot dt - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial l} \right) \cdot dt = -\frac{\partial Q}{\partial l} \cdot dl \cdot dt. \quad (2.16)$$

Елементарний об'єм dW можна виразити також як добуток приросту площі живого перерізу ω за час dt на відстані dl [93]:

$$dW = \left(\frac{\partial \omega}{\partial t} \cdot dt \right) \cdot dl. \quad (2.17)$$

Нехтуючи стисливістю води безнапірних потоків, вирази (2.16) і (2.17) можна прирівняти і після ділення їх на $dl dt$ отримуємо рівняння нерозривності для неусталеного руху води у відкритих руслах:

$$\frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0. \quad (2.18)$$

Динамічне рівняння неусталеного плавно змінного руху потоку можна отримати на основі диференціального рівняння нерівномірного плавнозмінного руху в енергетичній формі, яке було отримано В.І. Чарномським (для призматичних і непризматичних русел):

$$\frac{d\mathcal{E}}{dl} = i_0 - i_l, \quad (2.19)$$

де $\mathcal{E}$ – питома енергія перерізу;

i_0 – поздовжній похил дна русла;

$i_l = dh_l / dl$ – похил тертя, який, при нехтуванні втратами енергії в місцевих опорах, дорівнює гідравлічному J .

Помноживши обидві частини (2.19) на dl , матимемо вираз:

$$d\mathcal{E} = i_0 \cdot dl - J \cdot dl,$$

який свідчить, що зміна питомої енергії перерізу $d\mathcal{E}$ на відстані dl дорівнює різниці між питомою роботою сили тяжіння $i_0 \cdot dl$ і питомою роботою сил опору $J \cdot dl$. Для рівномірного потоку ці питомі роботи дорівнюють одна одній, а питома енергія перерізу при цьому не змінюється по довжині. Поняття питомості для енергії та робіт означає, що вони віднесені до одиниці ваги рідини.

В умовах неусталеного руху гідравлічні характеристики потоку змінюються не тільки по довжині, але й в часі. Через це в неусталеному потоці виникає сила інерції, питома робота якої на відстані dl становить:

$$\frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \cdot dl.$$

Таким чином, зміна питомої енергії перерізу при неусталеному русі у відкритих руслах дорівнює:

$$d\mathcal{E} = i_0 \cdot dl - J \cdot dl - \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \cdot dl. \quad (2.20)$$

Поділивши обидві частини рівняння (2.20) на dl і взявши частинну похідну $\partial\mathcal{E} / \partial l$, матимемо динамічне рівняння Сен-Венана:

$$\frac{\partial h}{\partial l} + \frac{\alpha}{g} \cdot V \cdot \frac{\partial V}{\partial l} = i_0 - J - \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t}.$$

або в традиційному вигляді:

$$i_0 - \frac{\partial h}{\partial l} = \frac{\alpha}{g} \cdot V \cdot \frac{\partial V}{\partial l} + \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{Q^2}{K^2}. \quad (2.21)$$

де $Q^2/K^2 = J$ – гідравлічний похил, який в такий спосіб допускається визначати лише при слабкій не стаціонарності, що обмежується величиною параметра не стаціонарності [93]:

$$\Pi_{н.с.} = \frac{h}{V} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} < 0,5.$$

Для річок і каналів в природних умовах така нерівність завжди витримується.

Коефіцієнти α і α_0 в рівнянні (2.21) з'являються через нерівномірність розподілу швидкостей по живому перерізу. Загалом їх значення ≥ 1 , а вирази для їх обчислення мають такий вигляд:

$$\alpha = \frac{1}{V^3 \cdot \omega} \int_{\omega} u^3 \cdot d\omega,$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{V^2 \cdot \omega} \int_{\omega} u^2 \cdot d\omega,$$

де u – місцева швидкість в зазначеній точці перерізу.

У розрахунках нерівномірного усталеного руху води здебільшого приймають коефіцієнт Коріоліса $\alpha = 1,1$ – характерне значення для каналів. У більшості випадків розрахунку неусталеного руху води $\alpha \approx 1$, тобто нехтують його відхиленням від одиниці. Для беззалпавних русел це не призводить до великих помилок, тому що набагато більші помилки пов'язані з неповнотою і неточністю вихідних даних. У випадках річок із заплавами складної будови нерівномірність розподілу швидкостей по перерізу може бути дуже велика і

значення α можуть перевищувати 1,5 і навіть 2. Це ж стосується і коефіцієнта Буссинеска α_0 , але його величина менше відрізняється від одиниці [93].

Диференціальні рівняння (2.18) і (2.21) прийнято називати рівняннями Сен-Венана, хоча насправді ним було отримано лише динамічне рівняння системи. Крім того, він не врахував нерівномірність розподілу швидкостей по живому перерізу, тому в його динамічному рівнянні відсутні коефіцієнти α і α_0 . Але заслуга Сен-Венана в започаткованій теорії неусталеного руху безперечна, до того ж він показав приклад її практичного застосування, розв'язавши ці рівняння для прямокутного каналу із сталим похилом дна при відсутності сил опору. Загального розв'язку цих рівнянь не отримано досі. Всі існуючі методи зводяться врешті-решт до числових алгоритмів.

В руслі на мостових переходах формується потік зі змінною витратою вздовж шляху, через потрапляння (в зоні стиснення) до русла води і звільнення русла від неї в зоні розтікання. Тому з моменту виходу води на заплави рівняння нерозривності треба записувати з правою частиною, що не дорівнює нулю:

$$\frac{\partial Q}{\partial l} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = q(l). \quad (2.22)$$

Порівнюючи порядок величин рівняння (2.22) показує, що для річок, принаймні рівнинного типу, похідна $\partial \omega / \partial l$ має порядок $10^{-4} - 10^{-5}$, а порядок величини $\partial Q / \partial l$ в зоні стиснення мостових переходів становить $10^{-1} - 10^0$, тобто в сотні, і навіть тисячі, разів більший. З огляду на це, в рівнянні (2.22) похідною $\partial \omega / \partial t$ можна знехтувати і в новій редакції воно набуває змісту характеристики трансформації руслової витрати:

$$\frac{\partial Q}{\partial l} = q(l),$$

яке після інтегрування буде таким:

$$\beta_p = 1 + \frac{\int q(l)}{Q_{pn}}.$$

Відтворити аналітичною залежністю функцію в принципі неможливо через складний іррегулярний процес водообміну між руслом і заплавами навіть в природних умовах, не кажучи вже про його примусовий характер на мостових переходах. Тому характеристика трансформації руслової витрати виводиться, використовуючи для цього динамічне рівняння з системи Сен-Венана (2.21), яке можна переписати так:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dl} = i_0 - i_f - \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t}. \quad (2.23)$$

Похідна $d\mathcal{E}/dl$, похил дна і тертя мають однаковий порядок $10^{-4} - 10^{-5}$, а порядок інерційного члена $\frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t}$ на річках в паводковий період становить $\approx 10^{-8}$. Тому, нехтуючи інерційним членом, останнє рівняння перетворюється в рівняння нерівномірного плавно змінного руху в енергетичній формі (2.19).

Варто зазначити, що принаймні на рівнинних річках навіть в повінь чи паводок прояви неусталеного руху води стають помітними лише протягом значного часового періоду, тобто відбуваються дуже повільно. Завдяки неістотності локальних прискорень в руслових розрахунках можна знехтувати членами, що залежать від часу. Тим більше така дія виправдана у прогнозах руслових деформацій, які відбуваються ще повільніше, ніж зміна гідравлічних характеристик неусталеного потоку. На цій підставі рівняння Сен-Венана можуть бути спрощені таким чином [103]:

$$I_0 - \frac{dh}{dl} = \frac{\alpha}{2 \cdot g} \cdot \frac{\partial V^2}{\partial l} + I_f, \quad (2.24)$$

$$Q = \text{const}. \quad (2.25)$$

Для приклада наводиться оцінка міри неусталеності руху руслового потоку р. Стир біля с. Рафалівка, Рівненської області під час розрахункової повені. На ділянці довжиною 1 км середня ширина русла дорівнює $B_p = 70$ м, середня відмітка дна $Z_d = 70$ м, а його поздовжній похил $-I_o = 0,00024$. При наближенні до піку повені рівень води за добу піднявся з позначки 161,30 до позначки 161,27. Тобто, збільшення глибини в руслі становить 0,42 м. Руслова витрата за цей же час збільшилась відповідно з 264 до 300 м³/с при середній добовій величині – 282 м³/с [1].

Згідно рівнянню нерозривності, маємо в кінцевих різницях:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta l} = - \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{0,42 \cdot 70}{86400} = -3,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Або середня за добу відмінність витрати води в перерізах, віддалених один від одного на 1 км, становить 0,12% від середньої добової витрати води.

Оцінюючи порядок величин, які входять до динамічного рівняння, слід зауважити, що в природних умовах похил тертя і похил дна мають однаковий порядок величин. В даному випадку він становить 10^{-4} . Зміна швидкості потоку на відстані 1 км, завдяки неусталеності руху, дорівнює:

$$\frac{\Delta V}{\Delta l} = \frac{1}{l} \frac{\Delta Q}{\Delta l} = -1,25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/с}.$$

Тоді порядок величини доданку $\frac{\alpha}{g} \cdot \frac{\partial V^2}{\partial l} = \frac{\alpha}{g} \cdot V \cdot \frac{\Delta V}{\Delta l}$ становить 10^{-7} . Ще менший порядок має інерційний член:

$$\frac{\alpha}{2g} \cdot \frac{\partial V}{\partial l} + \frac{\alpha_o}{g} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = 10^{-8}.$$

Таким чином, головні фактори руху води в руслі – похил дна і тертя – на три, чотири порядки перевищують фактори впливу на рух потоку його неусталеності, що доводить правомірність нехтування ними.

Динамічне рівняння (2.24) залишається ще досить складним для використання його в аналітичних прогнозах руслових деформацій навіть на річках без стиснення їх мостовими переходами. Тому, з метою отримання інженерних рішень у вигляді аналітичних залежностей, здебільшого виходять з концепції квазірівномірного руху води у відкритих руслах. З огляду на це замість динамічного рівняння (2.24) в математичну модель природних руслових переформовувань вводиться основне рівняння рівномірного руху, яке з деяким наближенням описує квазірівномірні потоки в природних руслах:

$$I_o = I_p = I_f, \quad (2.26)$$

де I_p – похил вільної поверхні потоку.

Стосовно рівняння нерозривності, яке відтворює умову сталості витрати води, треба зробити наступні зауваження. Умову $Q = const$ слід розглядати як дотримання кожної миті в кожному живому перерізі залежності:

$$Q = \int_0^B V \cdot h \cdot db, \quad (2.27)$$

Взявши інтеграл по всій ширині русла B в (2.27), отримаємо:

$$Q = B \cdot h \cdot V.$$

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

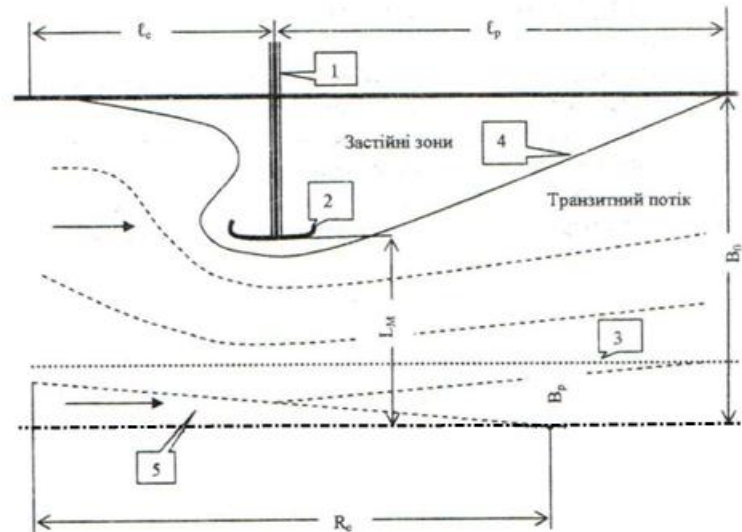
При стисненні річок мостовими переходами величина загального розмиву формується гідравлічними та русловими чинниками, що діють в зоні стиснення, яка простягається вверх по річці. Найвпливовішими з них є характеристика трансформації руслової витрати.

2.4 Обґрунтування рівняння характеристики трансформації руслової витрати під мостами на автомобільних дорогах

Мостові переходи на автомобільних дорогах під час паводку (повені) спотворюють природний режим річок. На рівнинних річках підходи до мосту розташовують на заплавах і перекривають їх повністю або частково. Перепиняючи природну течію води по заплавам, вони спричиняють зміну її структури, що супроводжується, по-перше, викривленням в плані ліній струму, і, по-друге, перетіканням деякої частини заплавної води до русла в зоні, що знаходиться вище створу мостового переходу [93].

Найбільшого викривлення зазнають периферійні лінії струму, найменшого – центральні. Гранична лінія току ділить потік на дві різні за формою руху частини: транзитну і застійну із слабо вираженою завихоріністю, яка має вигляд в плані криволінійного трикутника, або складніші обриси при наявності струмененапрямних дамб, рисунок 2.3.

Планові деформації ліній струму супроводжуються формуванням руслового потоку із змінною витратою вздовж шляху. Зважаючи на те, що у верхньому б'єфі лінії струму згущуються, а руслова витрата збільшується за течією ріки, ця зона називається зоною стиснення. Вона обмежується створом мостового переходу і створом початку стиснення, який розташований на відстані l_c від мосту.



l_c – довжина зони стиснення; l_p – довжина зони розтікання; B_0 – ширина розливу ріки; B_p – ширина русла; 1 – підходи; 2 – струмененапрямні дамби; 3 – брівки русла; 4 – гранична лінія струму; 5 – центральна струмина

Рисунок 2.3 – План течії на мостовому переході при симетричному стисненні [94]

Величину трансформації руслової витрати прийнято визначати коефіцієнтом трансформації:

$$\beta_p = \frac{Q_p}{Q_{pn}}, \quad (2.28)$$

де Q_p – трансформована руслова витрата в розрахунковому створі на даний момент часу;

Q_{pn} – природна руслова витрата в той же самий момент часу.

За аналогією вводиться поняття коефіцієнту трансформації заплавної витрати у транзитній частині потоку:

$$\beta_z = \frac{Q_z}{Q_{zn}}, \quad (2.29)$$

де Q_3 – витрата заплав в транзитній частині потоку;

$Q_{зп}$ – природна витрата заплав.

За мостом спостерігається зворотний процес – звільнення руслового потоку від заплавної води. Від відбувається в зоні розтікання, яка спостерігається від мосту до створу повного розтікання, де відновлюється природний режим водотоку. Довжина зони розтікання дорівнює величині l_p . Сума довжин зон стиснення і розтікання визначає довжину зони впливу мостового переходу стосовно формування загального розмиву:

$$l_s = l_c + l_p. \quad (2.30)$$

Рівняння (2.19) – одновимірне, в якому єдиною незалежною змінною є відстань. Тому в рівнянні нерівномірно руху в призматичних руслах зі змінною витратою вздовж потоку [93] передбачається, що потрапляння чи відокремлення води в руслі відбувається під кутом рівним або близьким до нуля. Для річок, коли паводкова вода виходить на заплави, таке припущення виявляється цілком прийнятним, особливо, якщо розглядати не все русла, а тільки його центральну струмину, ширина якої змінюється лінійно. Обриси бічних границь центральної струмини повністю визначаються початковою її шириною b_0 в створі, де починається стиснення, і параметром R , що являє собою відстань на якій ширина центральної струмини збігає до нуля (див. рисунок 2.4).

Ширина центрального відсіку b_0 не змінюється по довжині і дорівнює величині, яка забезпечує переніс 20 – 25 % загальної витрати ріки. На ріках з двома симетричними заплавами він розташований посередині русла, а на ділянках річок з однією заплавою центральний відсік прилягає до беззаплавного берега. Коли руслова витрата $Q_{рп}$ не перевищує четверту чи п'яту частину загальної витрати ріки Q , ширина центрального відсіку приймається рівною ширині русла, $b_0 = B_p$. При наявності на заплавах

підходів, які стискають потік, витрата центрального відсіку Q_0 змінюється вздовж течії згідно з характером трансформації руслової витрати [104].

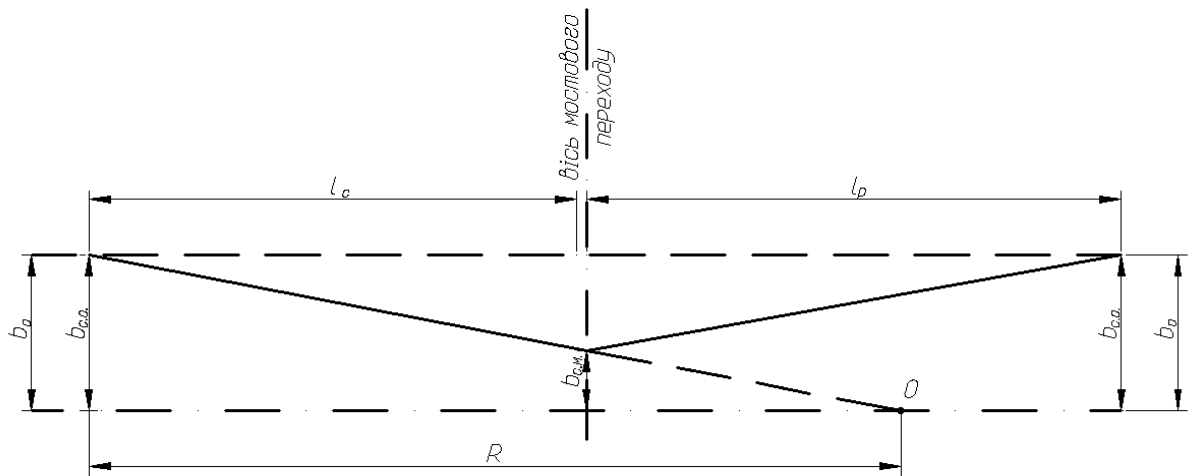


Рисунок 2.4 – Центральні відсік та струмина

Поняття центрального відсіку методологічно пов'язується з поняттям центральної струмини, яка повністю міститься всередині нього. В природних умовах бічні границі центральної струмини і центрального відсіку співпадають. Але при стисненні ріки ширина центральної струмини b_c зменшується в зоні стиснення від величини b_0 до найменшого значення b_m в створі споруди, а в зоні розтікання, навпаки, збільшується від величини b_m до природного значення b_0 . Натомість витрата центральної струмини Q_0 залишається сталою вздовж течії змінюючись лише в часі.

Найважливішою властивістю центральної струмини є лінійний закон зміни її ширини.

Властивості центральної струмини для аналітичного відтворення профілю водної поверхні на мостових переходах вперше використав Ю.В. Абрамов [34]. Аналізуючи плани течій отримані в лабораторних і натурних умовах, він дійшов висновку про можливість лінійної апроксимації границь центральної струмини, якщо витрата останньої не перевищує четвертої чи п'ятої частини загальної витрати потоку. Саме тому природна

витрата в центральному відсіку і витрата центральної струмینی визначаються в межах $(0,2 \dots 0,25) \cdot Q$.

Обриси границь центральної струмینی в зоні стиснення цілком визначаються початковою шириною b_0 і параметром R , що являє собою відстань на якій ширина центральної струмینی збігає до точки.

Розгляд елементарних частин руслового потоку, таких як центральний відсік і центральна струмина, дозволяє нехтувати втратами енергії на подолання місцевих опорів спричинених розтіканням потоку в нижньому б'єфі. Як свідчать дослідження Л.Г.Соловйової [105], центральна струмина не задіяна в турбулентному обміні з вирвними зонами, що дозволяє в зоні розтікання вважати розширення струмینی плавним.

Ключовим моментом в отриманні диференціального рівняння трансформації руслової витрати є визнання факту конгруентності профілів водної поверхні центрального відсіку і центральної струмینی. Дійсно, якщо зважити на те, що вони мають спільну поздовжню вісь, то і криві вільної поверхні у них повинні бути тотожні [34].

Отримання аналітичного виразу характеристики трансформації ґрунтується на спільному розв'язанні двох диференціальних рівнянь плавно змінного, усталеного, нерівномірного руху води у відкритих руслах: із сталою витратою і змінною шириною вздовж потоку та змінною за течією витратою але сталою шириною [94]. Перше з цих рівнянь застосовується для центральної струмینی, ширина якої змінюється за лінійним законом, друге – для центрального відсіку із сталою шириною, що співпадає з шириною центральної струмینی на початку зони стиснення і в кінці зони розтікання. Зважаючи на ці обставини, можна стверджувати рівність лівих частин рівнянь, які в цьому разі набувають вигляду [1]:

для центрального відсіку

$$\frac{dh}{dl} = \frac{I_0 - I_f + \frac{(2-\eta) \cdot Q_0}{g \cdot \omega_0^2} \cdot \frac{dQ_0}{dl}}{1 - Fr}, \quad (2.31)$$

для центральної струмини

$$\frac{dh}{dl} = \frac{I_0 - I_f + \frac{Q_c^2 \cdot h}{g \cdot \omega_c^3} \cdot \frac{b_0}{R}}{1 - Fr}. \quad (2.32)$$

В загальному випадку $\omega = f(h, b)$, тому:

$$\frac{d\omega}{dl} = h \cdot \frac{\partial b}{\partial l} + b \cdot \frac{\partial h}{\partial l}. \quad (2.33)$$

Але враховуючи, що зміна площі живого перерізу потоку в непризматичних руслах, зокрема центральної струмини, в більшій мірі залежить від похідної $\partial b / \partial l$, Ю.В. Абрамов [34] вважає за можливе знехтувати другим доданком у виразі (2.33). Потім, враховуючи лінійність зміни ширини центральної струмини, похідна $\partial b / \partial l$ замінюється очевидним відношенням b_0 / R , що і враховується в рівнянні (2.32).

Отже, якщо ліві частини рівнянь (2.31) і (2.32) рівні, то повинні бути рівними і їх праві частини. Виходячи з того, що центральна струмина повністю розміщена в об'ємі центрального відсіку, похили дна I_0 і тертя I_f , а також число Фруда (параметр кінетичності) можна скоротити як подібні члени, отримаємо вираз:

$$\frac{(2-\eta) \cdot Q_0}{\omega_0^2} \cdot \frac{dQ_0}{dl} = \frac{Q_c^2 \cdot h}{\omega_c^3} \cdot \frac{b_0}{R}. \quad (2.34)$$

Замінюючи площі живих перерізів їх значеннями: $\omega_0 = b_0 \cdot h$; $\omega_c = b_c \cdot h$ та після деяких перетворень отримаємо:

$$\frac{Q^2}{R} \cdot \left(\frac{b_0}{b_c} \right)^3 \cdot dl = (2 - \eta) \cdot Q_0 \cdot dQ_0. \quad (2.35)$$

Величина η являє собою відношення проекцій швидкостей приєднаних чи відокремлених об'ємів води на вісь руху до швидкості руслового потоку. Очевидно ця величина не є сталою, а змінюється якимсь чином по довжині зони впливу. Аналітичне визначення η практично неможливе, бо заплавам звичайно притаманна значна неоднорідність рельєфу та шорсткості, що призводить до іррегулярного водообміну їх з руслом. Крім того, характер надходження заплавної води в русло залежить від рівня води, який під час повені є змінним. Тому інтегрування рівняння (2.35) виконується для двох граничних випадків, коли $\eta = 0$ і $\eta = 1$. Остаточний висновок щодо придатності кожного з отриманих рішень приймається на основі аналізу їх розбіжностей і порівняння з результатами лабораторних і натурних досліджень.

Отже при $\eta = 0$ отримуємо диференціальне рівняння характеристики трансформації руслової витрати:

$$\frac{Q^2}{R} \cdot \left(\frac{b_0}{b_c} \right)^3 \cdot dl = Q_0 \cdot dQ_0. \quad (2.36)$$

З метою його розв'язання вводиться нова змінна z , яка при розміщенні початку координат в створі початку стиснення визначається в такий спосіб:

в зоні стиснення

$$\frac{b_c}{b_0} = \frac{R - l}{R_c} = 1 - \frac{l}{R_c} = z_c, \quad (2.37)$$

в зоні розтікання

$$\frac{b_c}{b_0} = 1 - \frac{l_c}{R_p} - \frac{l_p}{R_p} - \frac{l}{R_p} = z_p, \quad (2.38)$$

де R_c і R_p – параметри центральної струмини в зонах стиснення і розтікання;

l_c і l_p – протяжності зон стиснення і розтікання;

l – поточна відстань від створу початку стиснення.

Диференціал dz дорівнює:

в зоні стиснення

$$dZ_c = -\frac{dl}{R_c}, \quad (2.39)$$

в зоні розтікання

$$dZ_p = \frac{dl}{R_p}. \quad (2.40)$$

Підставляючи нову змінну z та її диференціали в (2.36) і враховуючи, що в прийнятій системі координат в зоні стиснення диференціали dl і dQ_0 додатні, а в зоні розтікання диференціал dl – додатній, а dQ_0 – від’ємний, будемо мати таке рівняння з відокремленими змінними [93]:

$$Q_c^2 \cdot \frac{dz}{z^3} = -Q_0 \cdot dQ_0. \quad (2.41)$$

Його розв’язком є вираз:

$$\frac{Q_c^2}{z^2} = Q_0^2 + C. \quad (2.42)$$

Стала інтегрування C визначається з умови: $Q_0 = Q_c$ при $z = 1$. Підставляючи в (2.42) значення C і повертаючись до старої змінної, після відповідний перетворень, остаточно матимемо:

в зоні стиснення

$$\beta_0 = \left(1 - \frac{l}{R_c}\right)^{-1}, \quad (2.43)$$

в зоні розтікання

$$\beta_0 = \left(1 - \frac{l_c + l_p - l}{R_p}\right)^{-1}. \quad (2.44)$$

де $\beta_0 = Q_0 / Q_c$ – коефіцієнт трансформації витрати в центральному відсіку;
 Q_0 – змінна за течією витрата води в центральному відсіку;
 Q_c – природна витрата води в центральному відсіку, що дорівнює витраті центральної струмини.

Результати лабораторних досліджень крупномірильної моделі мостового переходу С.Г. Ткачука [106], виконані на початку 80-х років минулого століття на русловому майданчику науково-дослідного інституту УкрНДГіМ показують (рисунок 2.5), що експериментальні точки добре узгоджуються з теоретичною кривою (2.43), але при дуже малих коефіцієнтах стиснення (нижня частина графіка), що властиво для залишкового розмиву, нічого певного щодо виду характеристики трансформації сказати важко.

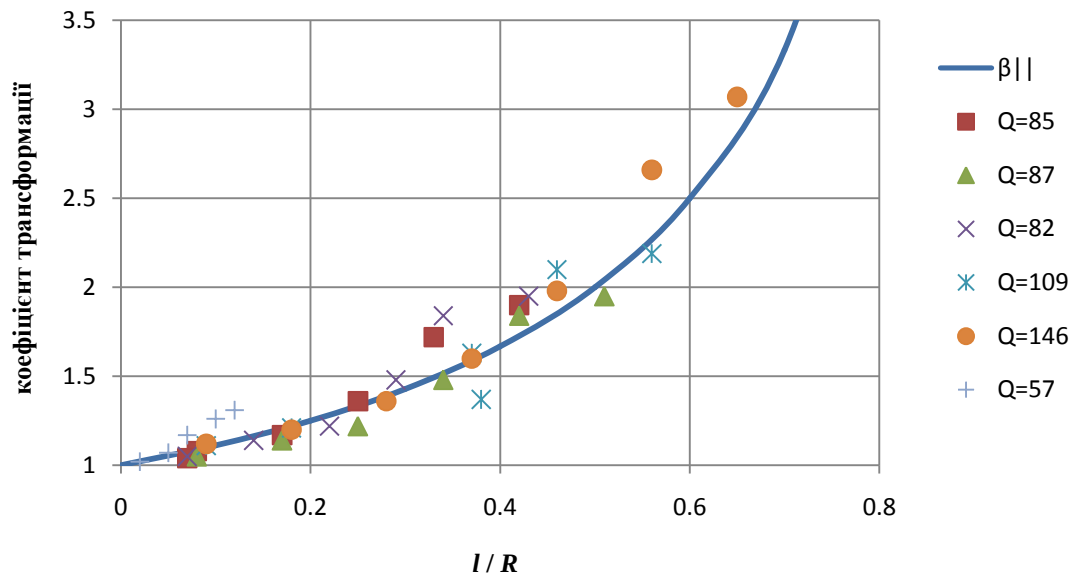


Рисунок 2.5 – Результати експериментальних досліджень трансформації руслової витрати

Здебільшого, особливо на малих та середніх річках, ширина центрального відсіку співставна з середньою шириною русла. Тому застосування залежностей (2.43), (2.44) можна поширити на все русло в цілому. Якщо ж відмінність між шириною центрального відсіку і шириною русла є значною, то і в цьому разі, як свідчать лабораторні дослідження С.Г. Ткачука (рисунок 2.6), різниця між коефіцієнтами трансформації витрати в центральному відсіку β_0 і русла загалом β_p майже не помітна, що дає підстави вважати:

$$\beta_0 = \beta_p. \quad (2.45)$$

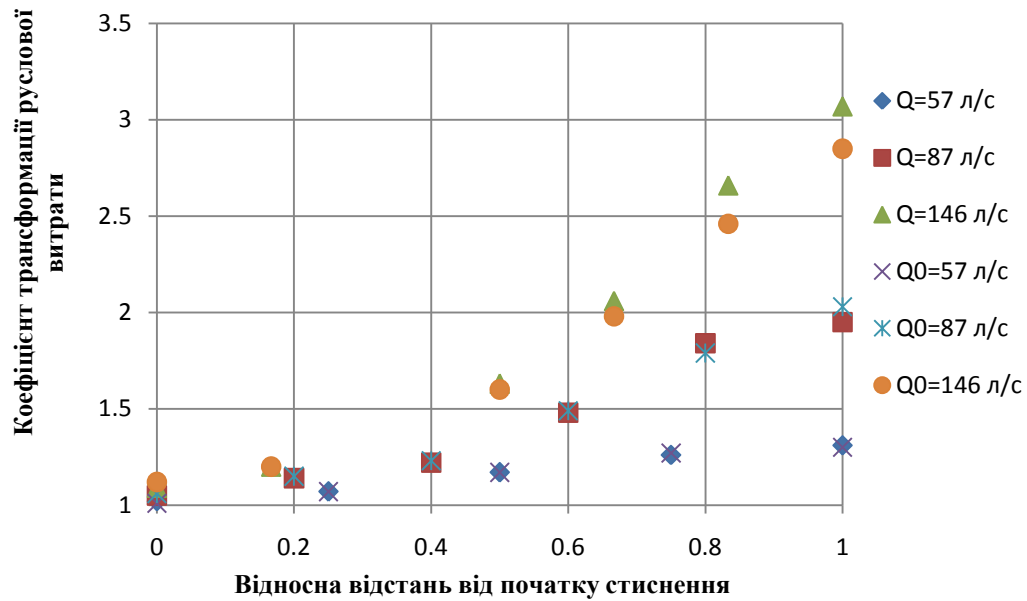


Рисунок 2.6 – Співвідношення між коефіцієнтами руслової витрати в руслі та його центральному відсіку – точки Q позначають русло; Q_0 – центральний відсік

Щоб визначити коефіцієнт трансформації руслової витрати під мостом β_{pm} , треба в залежності (2.43) величині l надати значення довжини зони стиснення l_c , тобто записати:

$$\beta_{pm} = \left(1 - \frac{l_c}{R_c} \right)^{-1}. \quad (2.46)$$

Звідси виходить формула для визначення параметру центральної струмини:

$$R_c = \frac{l_c \cdot \beta_{pm}}{\beta_{pm} - 1}. \quad (2.47)$$

Враховуючи зауваження О.В. Андрєєва [33], що під мостом в процесі розмиву значення β_{pm} наближаються до величини загального стиснення потоку β_m , остання формула набуває виду:

$$R_c = \frac{l_c \cdot \beta_m}{\beta_m - 1}. \quad (2.48)$$

де β_m – коефіцієнт загального стиснення потоку під мостом, який становить:

$$\beta_m = \frac{Q}{Q_{pn} + q_{zn} \cdot (L_0 - B_p)}. \quad (2.49)$$

де Q – загальна витрата ріки;

Q_{pn} – природна руслова витрата;

q_{zn} – природна питома витрата заплав;

L_0 – ширина отвору.

Величина коефіцієнту загального стиснення потоку під мостом β_m дещо перевищує величину коефіцієнта трансформації руслової витрати β_{pm} . Але зважаючи на непевність вихідної гідрологічної інформації, заміна в мостовому створі β_{pm} на β_m , тільки сприяє підвищенню розрахункової надійності прогнозу руслових деформацій.

Залишковий розмив на мостових переходах спостерігається в момент звільнення заплав від води. Він супроводжується істотним зменшенням довжини зони стиснення l_c і величини коефіцієнта трансформації під мостом (2.49). Таким чином, на підставі отриманих нових наукових результатів можна очікувати, що, послуговуючись характеристикою трансформації руслової витрати (2.43), розрахунки залишкового розмиву дають занижені величини розмиву. Розроблення методики аналітичного визначення залишкового розмиву за новою характеристикою трансформації руслової

витрати є нагальною проблемою в системі багаторічного прогнозування загального розмиву на мостових переходах

2.5 Дослідження впливу трансформації руслової витрати на величину загального розмиву

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 моста. Загальний розмив під мостом залежить як від абсолютної величини коефіцієнта трансформації руслової витрати, так і від характеру його зміни в границях зони стиску. Тому варто встановити зв'язок між величиною загального розмиву під мостом і різними характеристиками трансформації руслової витрати.

З цією метою формула для визначення характеристики трансформації руслової витрати (2.43) записується з узагальненим показником степеня [33]:

$$\beta = \frac{1}{\left(1 - \frac{l}{R}\right)^n}, \quad (2.50)$$

де l – відстань від початку стиснення;

R – параметр центральної струмини, який визначається за формулою (2.48).

Якщо врахувати (2.48) в (2.50), матимемо:

$$\beta = \frac{1}{\left(1 - \frac{l}{l_c} \cdot b\right)^n}, \quad (2.51)$$

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 ступеня різні значення від 0,1 до 1,3 одержимо різні характеристики трансформації руслової витрати, які наведені на рисунку 2.7.

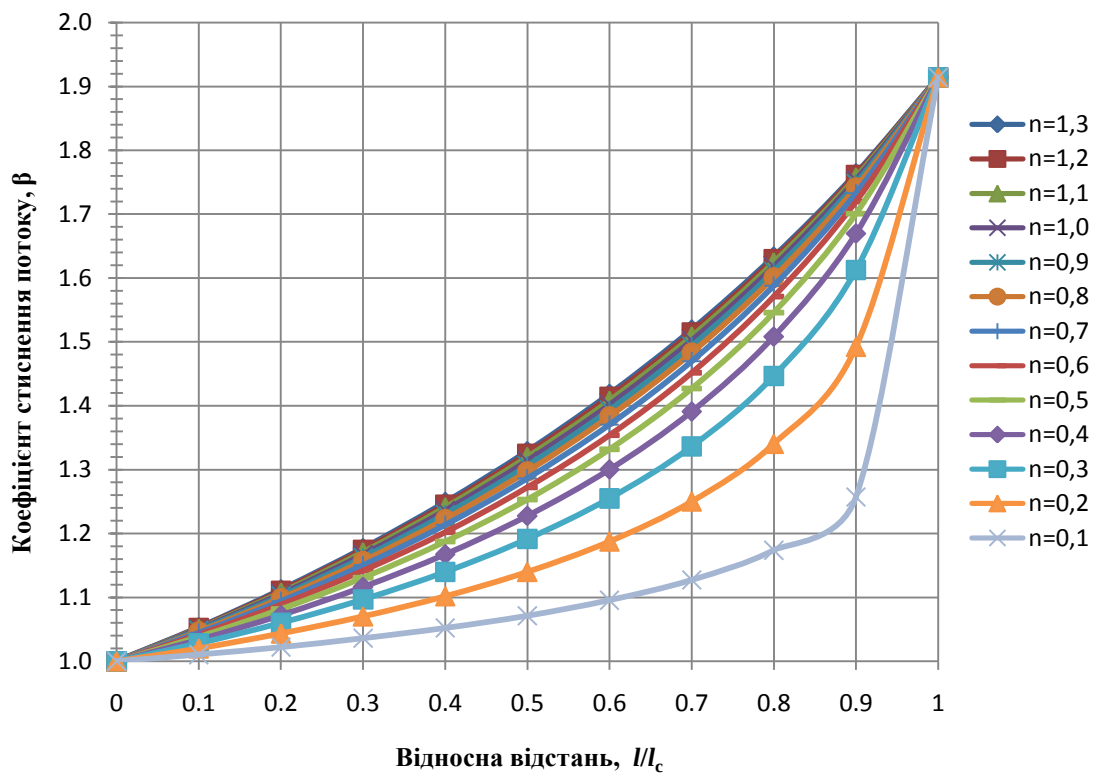


Рисунок 2.7 – Узагальнені характеристики трансформації руслової витрати

Якщо збільшити зону, яка відповідає залишковому розмиву, отримаємо рисунок 2.8.

Аналізуючи дані, які наведені на рисунку 2.8 видно, що при невеликому стисненні, тобто в момент залишкового розмиву, характеристика трансформації руслової витрати змінюється практично за лінійним законом.

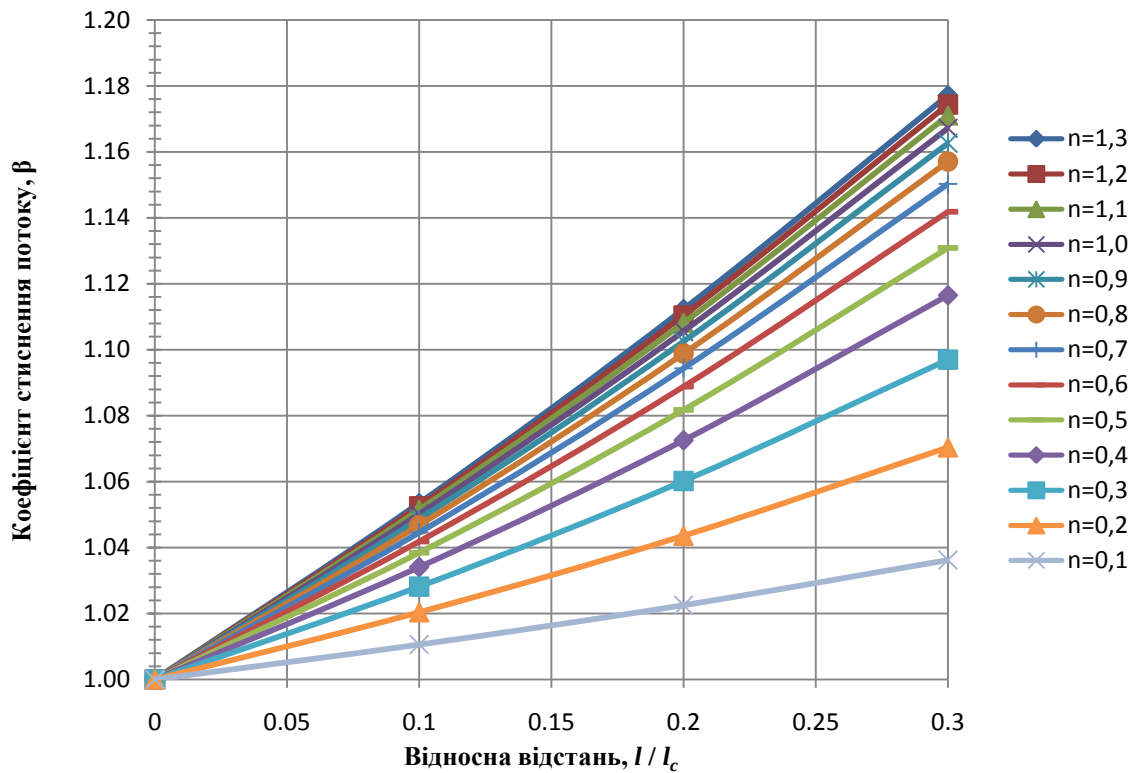


Рисунок 2.8 – Коефіцієнт стиснення потоку на початку зони стиснення

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

Математична модель для рішення поставленого завдання має вигляд [94] і складається з диференціального рівняння балансу наносів, транспортуючої спроможності потоку, рівняння витрати потоку, характеристики трансформації руслової витрати з узагальненим показником степені [107]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial G}{\partial l} - B_p \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \\ G = A \cdot Q_p \cdot Fr^{1,5} \\ Q_p = \int_0^B V \cdot h \cdot db \\ \beta_p = \left(1 - \frac{l}{l_c} \right)^{-n} \end{array} \right. , \quad (2.52)$$

де G і Q – витрати наносів і води;

h і B_p – глибина і ширина русла;

V – швидкість руслового потоку;

A – коефіцієнт, що враховують фізичні властивості наносів;

β_p – коефіцієнт трансформації руслової витрати в зоні стиснення;

l – відстань від початку стиснення;

l_c – коефіцієнт стиснення потоку під мостом.

Найпростішою розрахунковою схемою буде така, коли перша в серії повідень проходить по нерозмитому (пласкому) дну. В цьому випадку початкові умови мають вид: $h = h_{pn}$.

Перехід від змінної l до змінної β здійснюється за правилом:

$$\frac{\partial G}{\partial l} = \frac{\partial G}{\partial \beta} \cdot \frac{d\beta}{dl}. \quad (2.53)$$

Похідна $\frac{d\beta}{dl}$ буде такою:

$$\frac{d\beta}{dl} = - \frac{n}{\left(1 - \frac{l}{l_c} \cdot b \right)^{n+1}} \cdot \left(- \frac{b}{l_c} \right). \quad (2.54)$$

Якщо показник ступені $n+1$ помножити і поділити на n , то вираз похідної буде:

$$\frac{d\beta}{dl} = \frac{n \cdot b}{l_c} \cdot \beta^{1+\frac{1}{n}}. \quad (2.55)$$

З врахуванням отриманої похідної $\frac{d\beta}{dl}$ похідна $\frac{\partial G}{\partial l}$ записується таким чином:

$$\frac{\partial G}{\partial l} = \frac{n \cdot b}{l_c} \cdot \beta^{1+\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{4\beta^3}{B_p^3 \cdot h^{4,5}} - \frac{3\beta^4}{B_p^3 \cdot h^{4,5}} \frac{dB_p}{d\beta} - \frac{4\beta^4}{B_p^3 \cdot h^{5,5}} \frac{dh}{d\beta} \right) \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4. \quad (2.56)$$

Після підстановки рівняння балансу наносів матимемо квазілінійне рівняння загального розмиву:

$$\begin{aligned} & \frac{4 \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4 \cdot n \cdot b \cdot \beta^{5+\frac{1}{n}}}{l_c \cdot B_p^3 \cdot h^{5,5}} \cdot \frac{dh}{d\beta} + B_p \frac{dh}{dl} = \\ & = \frac{4 \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4 \cdot n \cdot b \cdot \beta^{4+\frac{1}{n}}}{l_c \cdot B_p^3 \cdot h^{4,5}} - \frac{3 \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4 \cdot n \cdot b \cdot \beta^{5+\frac{1}{n}}}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{4,5}} \cdot \frac{dB_p}{d\beta}. \end{aligned} \quad (2.57)$$

В теорії диференціальних рівнянь з частинними похідними доводиться, що квазілінійному рівнянню з двома незалежними змінними відповідає система з двох звичайних диференціальних рівнянь, яка в симетричній формі набуває виду:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\frac{d\beta}{4 \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4 \cdot n \cdot b \cdot \beta^{5+\frac{1}{n}}}}{l_c \cdot B_p^3 \cdot h^{5,5}} = \frac{dt}{B_p} = \\
 & = \frac{dh}{\frac{4 \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4 \cdot n \cdot b \cdot \beta^{4+\frac{1}{n}}}{l_c \cdot B_p^3 \cdot h^{4,5}} - \frac{3 \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4 \cdot n \cdot b \cdot \beta^{5+\frac{1}{n}}}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{4,5}}}
 \end{aligned} \quad (2.58)$$

Складові елементи системи (2.58) являють собою відношення диференціалів незалежних змінних до коефіцієнтів при відповідних похідних розшукуваної функції. Для складання двох звичайних рівнянь треба згуртувати їх попарно в будь-якому порядку. Таких неповторюючих самих себе комбінацій може бути тільки три. Наприклад, перше з другим, перше з третім і третє з другим. З метою отримання загального рішення квазілінійного рівняння нема потреби розв'язувати їх всі три. Досить розв'язати будь-які два. Вибір цих рівнянь залежить від складності їх рішення і пов'язані з цим ускладнень, що виникають при врахуванні початкових умов.

Перше звичайне диференціальне рівняння утворюється внаслідок комбінації крайніх членів системи (2.58):

$$\begin{aligned}
 & \frac{4 \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4 \cdot n \cdot b \cdot \beta^{5+\frac{1}{n}}}{l_c \cdot B_p^3 \cdot h^{5,5}} \cdot dh = \\
 & = \frac{4 \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4 \cdot n \cdot b \cdot \beta^{4+\frac{1}{n}}}{l_c \cdot B_p^3 \cdot h^{4,5}} \cdot d\beta - \frac{3 \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4 \cdot n \cdot b \cdot \beta^{5+\frac{1}{n}}}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^4} \cdot \frac{dB}{d\beta} \cdot d\beta
 \end{aligned} \quad (2.59)$$

Після зведення подібних членів, рівняння (2.59) набувають виду звичайного з відокремленими змінними:

$$\frac{dh}{h} = \frac{d\beta}{\beta} - \frac{3}{4} \frac{dB_p}{B_p}. \quad (2.60)$$

Проінтегрувавши ліву і праву частити, отримується його загальне рішення:

$$B_p^{3/4} \cdot \frac{h}{\beta} = \psi_1. \quad (2.61)$$

Друге рівняння доцільно утворити, поєднавши перший і другий члени системи (2.58):

$$\frac{4 \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4 \cdot n \cdot b \cdot \beta^{5+\frac{1}{n}}}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{5,5}} \cdot dt = d\beta. \quad (2.62)$$

Проінтегрувавши ліву і праву частину рівняння:

$$\frac{4 \cdot A_g \cdot n \cdot b}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{5,5}} \cdot \int Q_{pn}^4 dt = \int \frac{d\beta}{\beta^{5+\frac{1}{n}}}, \quad (2.63)$$

розв'язок якого становить:

$$\frac{4 \cdot A_g \cdot n \cdot b \cdot \Gamma}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{5,5}} + \frac{1}{(4 + \frac{1}{n}) \cdot \beta^{4+\frac{1}{n}}} = \psi_2, \quad (2.64)$$

де $\Gamma = \int Q_{pn}^4 dt$ – інтегральна функція гідрографу. У виразах (2.61) і (2.64) ψ_1 та ψ_2 – сталі інтегрування.

На відмінну від звичайних диференціальних рівнянь, для яких загальне рішення повністю визначається невідомою сталою величиною, загальне рішення диференціальних рівнянь з частинними похідними являє собою

невизначену функцію Φ від інтегралів (2.61) і (2.64). Таким чином, загальне рішення квазілінійного рівняння (2.58) становить:

$$\Phi \left(B_p^{\frac{3}{4}} \frac{h}{\beta}, \frac{4 \cdot A_g \cdot n \cdot b \cdot \Gamma}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{5,5}} + \frac{1}{(4 + \frac{1}{n}) \cdot \beta^{4 + \frac{1}{n}}} \right) = 0.$$

Вид функції Φ визначається шляхом врахування початкових умов, тобто розв'язання задачі Коші.

Для здобуття частинного рішення, треба інтеграли (2.61) і (2.64) записати стосовно початкового моменту $t_0 = 0$. Тобто всім членам явно залежним від часу t надати значення, які вони повинні мати в початковий момент. Такою величиною є тільки природна руслова витрата води Q_{pn} . Тому в початковий момент розвитку руслових деформацій інтегральна функція гідрографу $\Gamma = \int Q_{pn}^m dt = 0$. Інтеграл (2.61) залишається без змін, а інтеграл (2.64) позбувається другої складової:

$$B_p^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{h}{\beta} = \overline{\psi_1}, \quad (2.65)$$

$$\frac{1}{(4 + \frac{1}{n}) \cdot \beta^{4 + \frac{1}{n}}} = \overline{\psi_2} \quad (2.66)$$

Визначивши з останніх виразів функцію h та аргумент β , матимемо їх явні залежності від інтегралів $\overline{\psi_1}$ та $\overline{\psi_2}$:

$$h = \frac{1}{B_p^{\frac{3}{4}}} \cdot \overline{\psi_1} \cdot \beta, \quad (2.67)$$

$$\beta = \left[\frac{1}{\left(4 + \frac{1}{n}\right) \cdot \bar{\psi}_2} \right]^{\frac{1}{4 + \frac{1}{n}}} . \quad (2.68)$$

Тепер, якщо підставити у (2.67) початкові умови $h = h_{pn}$, отримаємо

$$h_{pn} = \frac{1}{B_p^{\frac{3}{4}}} \cdot \bar{\psi}_1 \cdot \left[\frac{1}{\left(4 + \frac{1}{n}\right) \cdot \bar{\psi}_2} \right]^{\frac{1}{4 + \frac{1}{n}}} . \quad (2.69)$$

Підставимо (2.53) і (2.54) у вираз (2.56), отримаємо:

$$h_{pn} = \frac{h}{\beta} \cdot \left[\frac{1}{\frac{1}{\beta^{4 + \frac{1}{n}}} + \frac{4 \cdot \left(4 + \frac{1}{n}\right) \cdot A \cdot b \cdot \Gamma}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{5,5}}} \right]^{\frac{1}{4 + \frac{1}{n}}} . \quad (2.57)$$

Виконавши звичайні алгебраїчні перетворення, отримуємо:

$$h = h_{pn} \cdot \beta \cdot \left[\frac{1}{\beta^{4 + \frac{1}{n}}} + \frac{4 \cdot \left(4 + \frac{1}{n}\right) \cdot A_g \cdot b \cdot \Gamma}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{5,5}} \right]^{\frac{1}{4 + \frac{1}{n}}} .$$

Тоді основна розрахункова залежність набуває такого виду:

$$h = h_{pn} \cdot \left[1 + \frac{4 \cdot (4 + \frac{1}{n}) \cdot A_g \cdot b \cdot \Gamma \cdot \beta^{4+\frac{1}{n}}}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{5,5}} \right]^{\frac{1}{4+\frac{1}{n}}} . \quad (2.58)$$

Якщо треба визначити глибину загального розмиву тільки під мостом, одержуємо таку залежність:

$$h = h_{pn} \cdot \left[1 + \frac{4 \cdot (4 + \frac{1}{n}) \cdot A_g \cdot b \cdot \Gamma \cdot \beta_m^4 \cdot (\beta_m^{1/n} - 1)}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h^{5,5}} \right]^{\frac{1}{4+\frac{1}{n}}} . \quad (2.59)$$

Дослідження залежності глибини, що відповідає загальному розмиву, від параметра n , що визначає характеристику трансформації руслової витрати, виконано за допомогою аналітичної формули (2.59) для мостового переходу через річку Вільшанка [108 – 110].

Загальний опис р. Вільшанка. Річка Вільшанка бере початок поблизу села Моринці Звенигородського р-ну Черкаської області на висоті 230 м над рівнем моря. Спершу тече на південний схід, у середній течії круто повертає на північ, від міста Городище тече на північний схід. Впадає до Дніпра неподалік від села Лозівок на висоті 76 м над рівнем моря. Довжина річки від гирла 100 км. Площа водозбірного басейну 1260 км². Середній похил річки 0,9 м/км. Долина трапецієподібна. Річка протікає в лісостеповій зоні. Заплава у нижній течії заболочена. Річище звивисте, завширшки 20 – 25 м. Глибина змінюється від 2 до 3 років. Живлення змішане. Замерзає наприкінці листопада, скресає у березні. Використовується на водопостачання, зрошення.

Вихідними даними до гідравлічного розрахунку були: морфологічні характеристики р. Вільшанка (таблиця 2.3), ряди спостережень (рисунок 2.9), криві витрат (рисунок 2.10), водомірні графіки (рисунок 2.11). Для

визначення глибини в розмитому руслі (2.59), були побудовані гідрограф руслової та загальної витрати 1% забезпеченості (рисунок 2.12) та інтегральна функція гідрографа 1% забезпеченості (рисунок 2.13). Графічне зображення результатів дослідження показане на (рисунок 2.14).

Таблиця 2.3 – Морфологічні характеристики р. Вільшанка

Ширина розливу ріки, м	B	149
Середня ширина русла, м	B_p	60
Природна відмітка дна, м	Z_d	76,75
Середня відмітка заплав, м	Z_z	82
Коефіцієнт, залежний від крупності наносів	A_g	0,000681
Поздовжній похил дна	I	0,00033

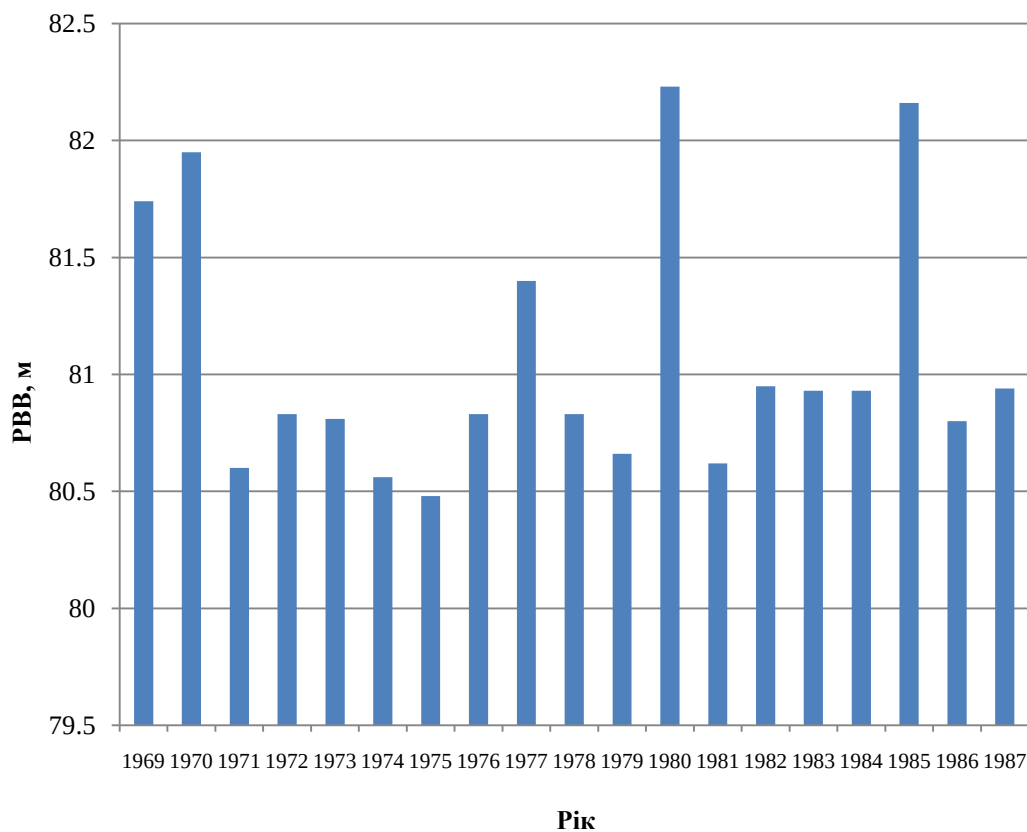


Рисунок 2.9 – Ряди спостереження на р. Вільшанка

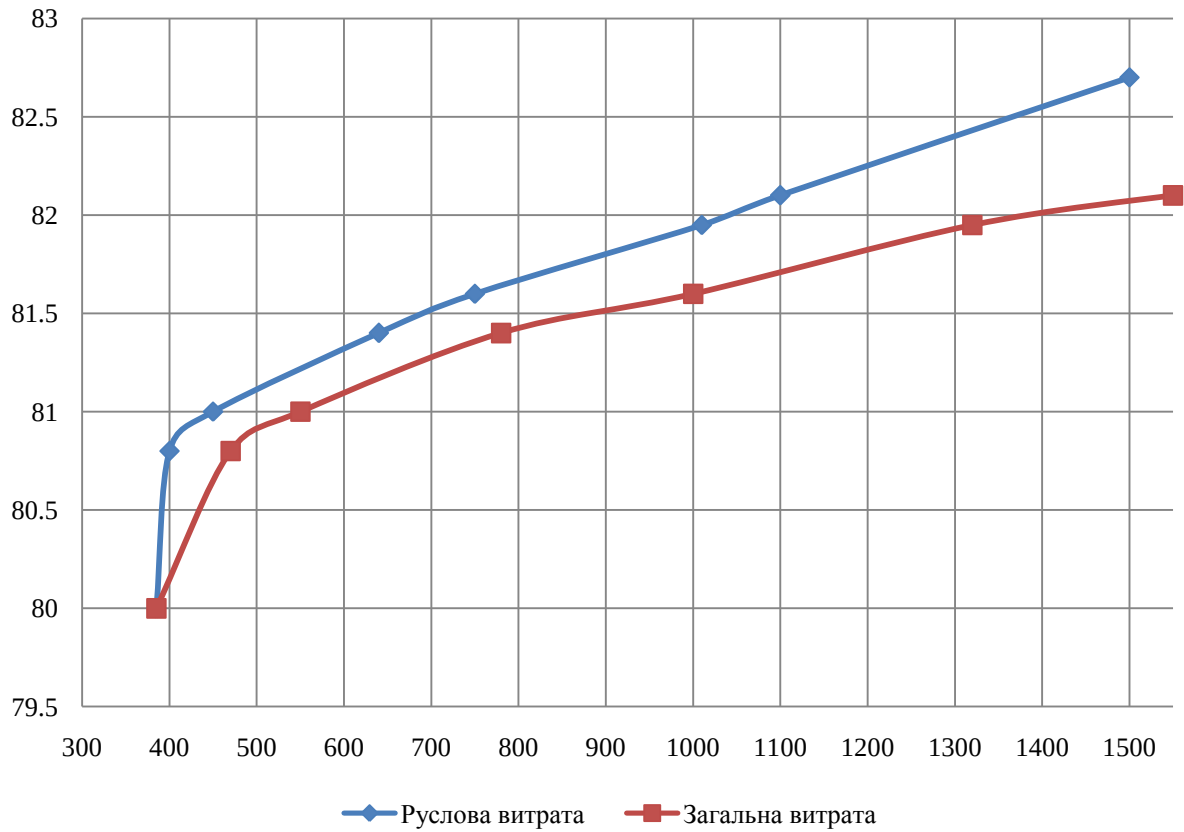


Рисунок 2.10 – Криві витрат р. Вільшанка

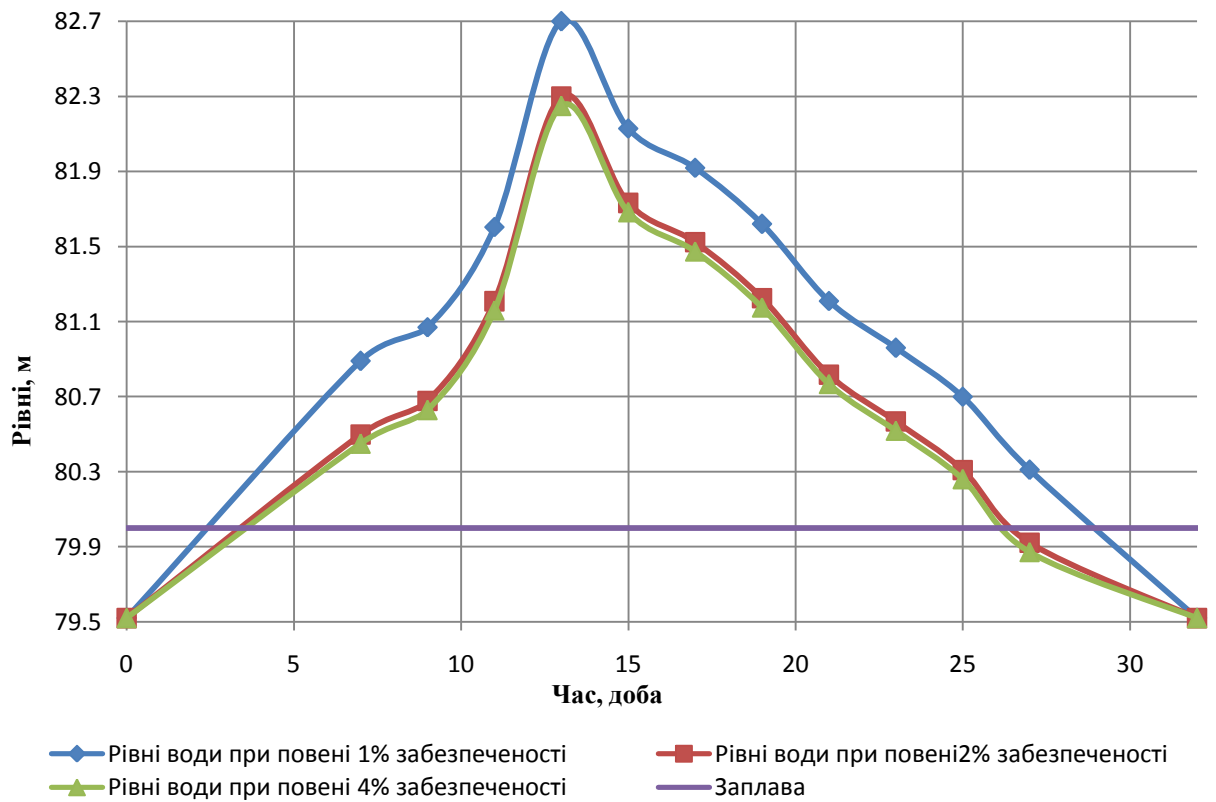


Рисунок 2.11 – Водомірні графіки р. Вільшанка

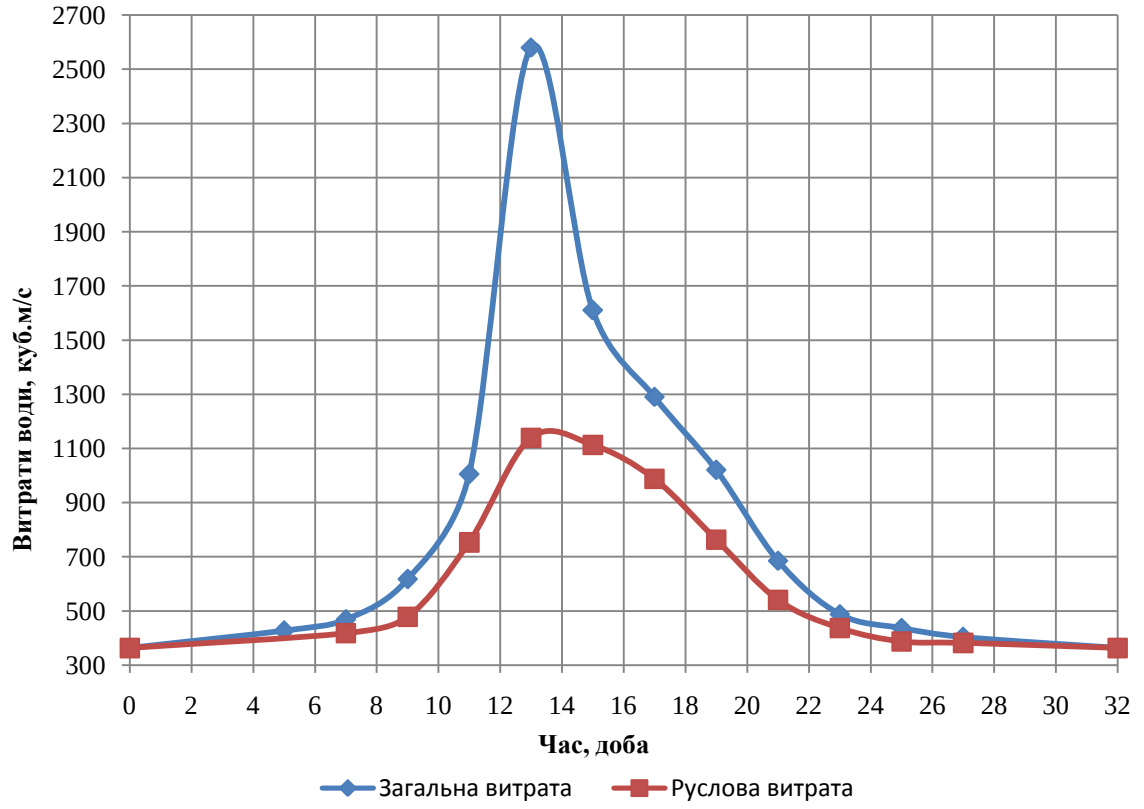


Рисунок 2.12 – Гідрограф загальної та руслової витрати 1% забезпеченості

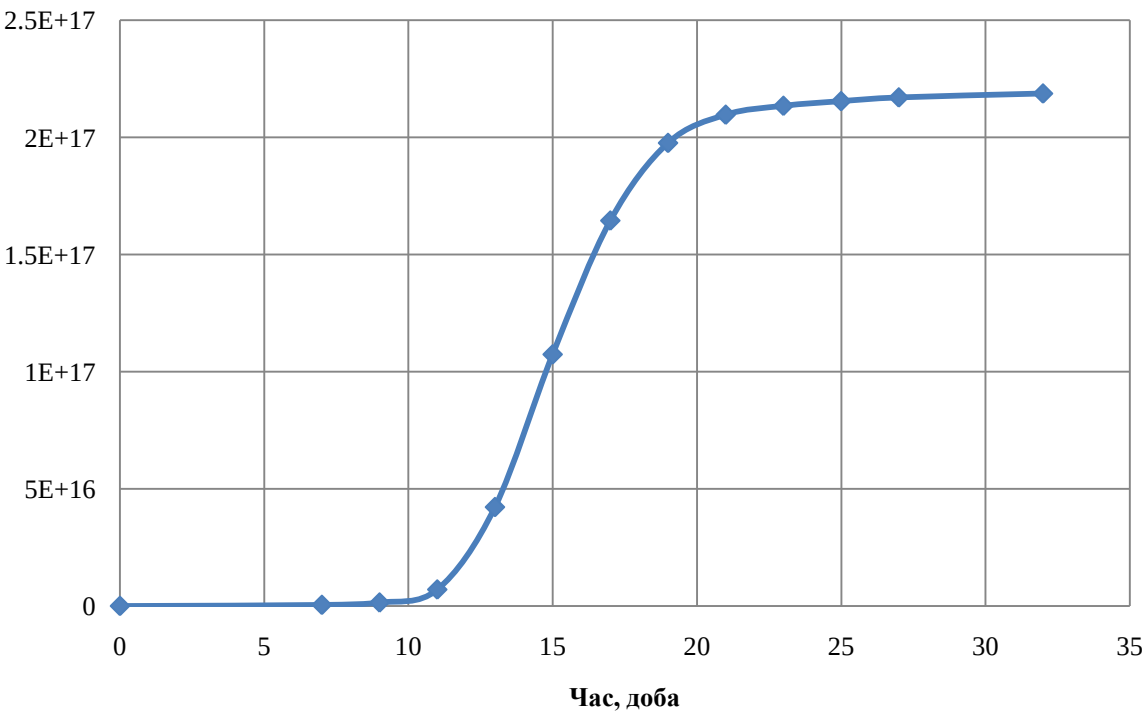


Рисунок 2.13 – Інтегральна функція гідрографа 1% забезпеченості

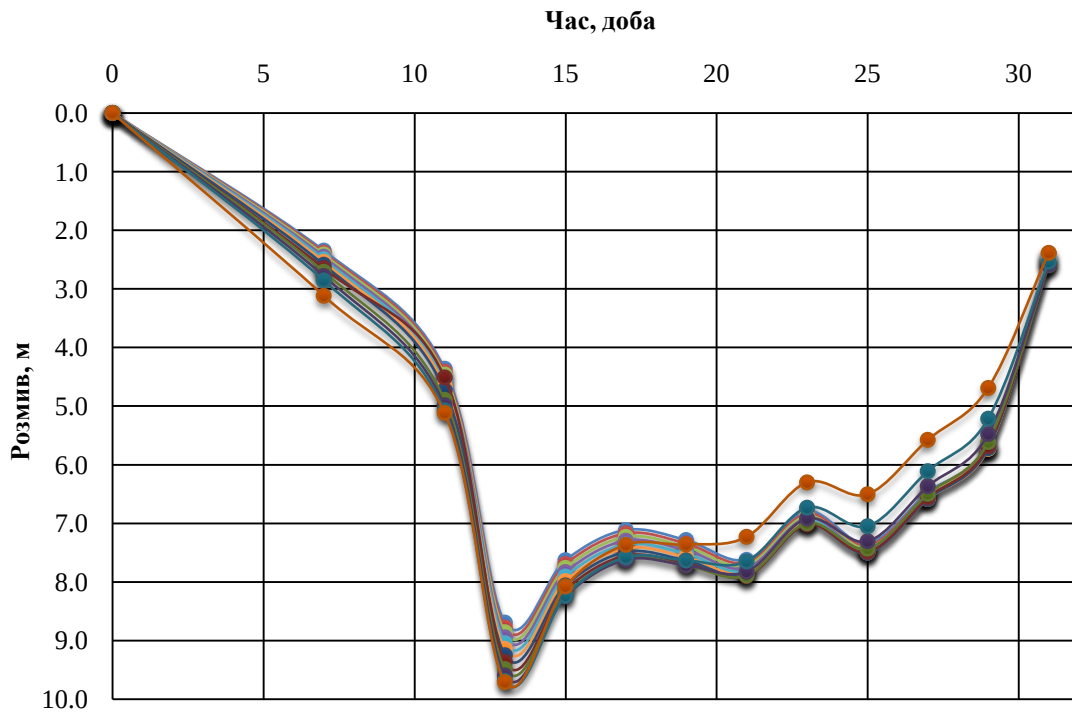


Рисунок 2.14 – Залежність загального розмиву від характеру трансформації загальної витрати під час проходження паводку

Аналізуючи дані, які наведені на рисунку 2.14, можна побачити, що при зміні показника степеня n від $n = 0,4$ до $n = 1,3$ графіки, що показують глибину в розмитому руслі під час проходження паводку, майже накладаються один на одного. Це свідчить про те, що величина загального розмиву на мостових переходах не залежить від характеру трансформації руслової витрати. Значення величини загального розмиву зростають зі збільшенням показника степеня n в характеристиці трансформації руслової витрати.

Коефіцієнт стиснення потоку під мостом β_m при залишковому розмиві практично лінійно зменшується до 1,0 на початку зони стиснення.

Характеристика руслової витрати з показником степеня $n = 0,1$ виходить за межі теоретичної області існування коефіцієнтів n і в подальшому може бути виключена із аналізу.

Отримані результати дозволяють здійснити аналітичну реалізацію математичної моделі залишкового розмиву з лінійною характеристикою

трансформації руслового потоку в системі багаторічного прогнозу руслових деформацій на мостових переходах.

2.6 Висновки по розділу 2

1. Руслові деформації в зоні впливу мостових переходів і переформування дна в побутових умовах описуються системою, що складається із двох пар рівнянь нерозривності і руху, відповідно для води й наносів. Це мінімальна кількість, яка задовольняє коректній постановці задач, але залежно від її конкретного змісту вони можуть приймати різний вид.

2. Для математичної моделі руслових деформацій домінантним рівнянням є диференціальне рівняння балансу наносів. З фізичної точки зору воно являє фундаментальний закон збереження речовини, який в руслових прогнозах втілюється в закон збереження загальної кількості наносів.

3. Четверте рівняння, яке входить до математичної моделі, повинно бути характеристикою трансформації руслової витрати.

4. Коефіцієнт стиснення потоку під мостом β_m при залишковому розмиві практично лінійно зменшується до 1,0 на початку зони стиснення.

5. Характеристика руслової витрати з показником степеня $n = 0,1$ виходить за межі теоретичної області існування коефіцієнтів n і в подальшому може бути виключена із аналізу.

6. Значення величини загального розмиву зростають зі збільшенням показника степеня n в характеристиці трансформації руслової витрати.

7. При зміні показника степеня n від $n = 0,4$ до $n = 1,3$ графіки, що показують глибину в розмитому руслі під час проходження паводку, майже накладаються один на одного. Це свідчить про те, що величина загального розмиву на мостових переходах не залежить від характеру трансформації руслової витрати.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАЛИШКОВОГО РОЗМИВУ ПІДМОСТОВИХ РУСЕЛ

3.1 Сутність залишкового розмиву

Залишковий розмив – це розмив, який залишається після проходження паводку. Крім того, значення залишкового розмиву є вихідними даними при визначенні максимального розмиву в системі багаторічного прогнозування руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів. Залишковий розмив відбувається в момент звільнення заплав від води.

Єдині нормативні документи, які діють на території України [111] регламентують прогнозування загальних руслових деформацій за багаторічний період. Найменша серія паводків, яка застосовується при моделюванні руслових деформацій в зоні впливу мостового переходу, складається з 3 паводків [112]. Таким чином, пропускаючи кожний наступний паводок, необхідно знати величину загального розмиву, який залишився після проходження попереднього паводку.

В системі довгострокових прогнозів руслових деформацій на мостових переходах набуває особливо великого значення визначення залишкових розмивів. Варто зауважити, що на момент залишкового розмиву істотно скорочується довжина зони стиснення через зменшення ширини розмиву та найголовніше те, що в момент звільнення заплав від води зменшується коефіцієнт стиснення потоку під мостом.

Зазвичай для визначення руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів і переформування дна в побутових умовах використовується математична модель, яка складається з двох пар рівнянь нерозривності й руху, відповідно для води й наносів. Чотири рівняння – це мінімальна

кількість, що задовольняє коректній постановці задачі, але залежно від її конкретного змісту вони можуть приймати різний вид.

В даному дослідженні, математична модель залишкового розмиву буде складатися з диференціального рівняння балансу наносів, формули трансформуючої спроможності руслоформуючих наносів, рівняння витрати потоку і його характеристики трансформації (3.1).

3.2 Математична модель залишкового розмиву та метод її реалізації

Річкові русла характеризуються переважаючим поздовжнім розміром. Довжина русла набагато перевищує його ширину і глибину. Тому є всі підстави вважати річки лінійними елементами ландшафту. В зв'язку з цим при виконанні руслових розрахунків і прогнозів можна виходити з умов одновимірної задачі. Тобто для усталених процесів єдиною незалежною змінною виступає відстань l , а неусталені процеси підпорядковуються двом незалежним змінним: відстані l і часу t . При цьому швидкість руслового потоку осереднюється по живому перерізу, а глибина – по його ширині. Таке осереднення дещо спотворює дійсний стан потоку, але зумовлена цим похибка не перевищує помилки від невизначеності вихідних даних, які завдяки випадковій природі руслових процесів, принципово заперечують точне їх визначення [103].

Випадковість (стохастичність) є чи не головною відмінністю процесів, що відбуваються в природних руслах. Якщо штучні русла мають правильні геометричні обриси – сталі за довжиною, або змінні в певній закономірності, – то поперечні перерізи природних русел відзначаються довільною формою, що змінюється за течією іррегулярно. Річкова мережа, берегові лінії та поверхня дна окремих річок набувають дробової (фрактальної) розмірності. До того ж гідрологічний режим природних водотоків теж значною мірою залежить від стихійності кліматично-гідрологічних чинників. Ні за яких умов

з певністю неможливо передбачити, яка повинь буде на даній річці наступного року і надто через п'ять чи десять років. Не підлягають точному визначенню не тільки водомірний графік і гідрограф повені, а навіть і пікові значення рівня і витрати води. Тому в інженерних розрахунках завжди застосовують помірковані осереднення морфометричних і гідравлічних параметрів, а вихідні гідрологічні дані визначають із прийнятою вірогідністю.

Виходячи з того, що провідні чинники руслового процесу мають стохастичні властивості, які не можна обчислити точно, а можна тільки прогнозувати, то і весь перебіг руслового процесу підлягає тільки прогнозуванню, з тією чи іншою мірою вірогідності.

Руслові потоки в річках характеризуються двофазністю і містять в собі рідку (водний потік) та тверду (наноси) фази. Через це найпростіша математична модель загального розмиву повинна складатися щонайменше з чотирьох рівнянь і початковий умов, тому що одновимірний рух кожної фази вимагає для свого аналітичного описання мінімум двох рівнянь – нерозривності і динамічного [93].

Як вже розглядалося у 2 розділі, домінантним в математичній моделі загального розмиву є диференціальне рівняння балансу наносів, яке є рівнянням нерозривності для твердої фази руслового потоку і виражає фундаментальний закон збереження речовини. В якості динамічного рівняння руху наносів застосовується залежність транспортуючої спроможності потоку.

Для рідкої фази потоку рівняння нерозривності відтворюється умовою сталості витрати в кожному створі зони впливу мостового переходу. Динамічне рівняння водного потоку отримується з огляду на рух води в руслі зі змінною витратою вздовж шляху, і являє собою аналітичну залежність характеристики трансформації руслового потоку.

Таким чином, математична модель залишкового розмиву (3.1) складається з диференціального рівняння балансу наносів, формули

трансформуючої спроможності руслоформуєчих наносів, рівняння витрати потоку та лінеаризованої характеристики трансформації руслової витрати:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial G}{\partial l} - B_p \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \\ G = A \cdot Q_p \cdot Fr^{1,5} \\ Q_p = \int_0^B V \cdot h \cdot db \\ \beta_p = 1 + k \cdot l \end{array} \right. , \quad (3.1)$$

де G і Q_p – витрати наносів і води;

h і B_p – глибина і ширина русла;

V – швидкість руслового потоку;

A – коефіцієнт, що враховують фізичні властивості наносів;

β_p – коефіцієнт трансформації руслової витрати в зоні стиснення змінюється за течією майже лінійно, від 1 в створі де починається стиснення до β_{pm} під мостом;

l – відстань від початку стиснення;

k – коефіцієнт пропорційності, який обчислюється за формулою:

$$k = \frac{\beta_{pm} - 1}{l_c} , \quad (3.2)$$

де l_c – довжина зони стиснення.

Кожне рівняння математичної моделі (3.1) розглядається і виводиться окремо у розділі 2.

Використовуючи рівняння нерозривності для водного потоку і коефіцієнт трансформації руслової витрати, динамічне рівняння руху наносів перетвориться наступним чином:

$$G = \frac{A \cdot Q_{pn}^4 \cdot \beta_p^4}{B_p^4 \cdot h^{4,5}}, \quad (3.3)$$

де Q_{pn} – природна витрата води в руслі, яка змінюється тільки з часом відповідно гідрографу і залишається сталою по довжині.

Для визначення градієнта витрати наносів виконується заміна під знаком похідної незалежної змінної l на зміну β_p , по якій і виконується диференціювання. З урахуванням однозначного зв'язку між величинами β_p та l , можна записати:

$$\frac{\partial G}{\partial l} = k \cdot \frac{\partial G}{\partial \beta_p}.$$

Взяв похідну $\frac{\partial G}{\partial l}$, отримаємо вираз градієнта витрати наносів:

$$\frac{\partial G}{\partial l} = \frac{4 \cdot k \cdot A \cdot Q_{pn}^4 \cdot \beta_p^3}{B_p^3 \cdot h^{4,5}} - \frac{4 \cdot k \cdot A \cdot Q_{pn}^4 \cdot \beta_p^4}{B_p^3 \cdot h^{5,5}} \cdot \frac{\partial h}{\partial \beta_p}. \quad (3.4)$$

Після підстановки (3.4) в рівняння балансу наносів і ділення всіх членів на B_p , останнє перетворюється в квазілінійне рівняння загальний руслових деформацій:

$$\frac{4 \cdot k \cdot A \cdot Q_{pn}^4 \cdot \beta_p^4}{B_p^4 \cdot h^{5,5}} \cdot \frac{\partial h}{\partial \beta_p} + \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{4 \cdot k \cdot A \cdot Q_{pn}^4 \cdot \beta_p^3}{B_p^4 \cdot h^{4,5}}. \quad (3.5)$$

Це диференціальне рівняння з частинними похідними називається квазілінійним тому, що воно є лінійним відносно похідних, але коефіцієнти при похідних містять розшукувану функцію h .

В теорії диференціальних рівнянь з частинними похідними доводиться, що квазілінійному рівнянню з двома незалежними змінними відповідає система з двох звичайних диференціальних рівнянь, яка в симетричній формі набуває виду:

$$\frac{\frac{d\beta_p}{4 \cdot k \cdot A \cdot Q_g^4 \cdot \beta_p^4}}{B_p^4 \cdot h^{5,5}} = dt = \frac{\frac{dh}{4 \cdot k \cdot A \cdot Q_{pn}^4 \cdot \beta_p^3}}{B_p^4 \cdot h^{4,5}}, \quad (3.6)$$

Складові елементи системи (3.6) являють собою відношення диференціалів незалежних змінних до коефіцієнтів при відповідних похідних розшукуваної функції. Для складання двох звичайних рівнянь треба згуртувати їх попарно в будь-якому порядку. Таких неповторюючих самих себе комбінацій може бути тільки три. Наприклад, перше з другим, перше з третім і третє з другим. З метою отримання загального рішення квазілінійного рівняння нема потреби розв'язувати їх всі три. Досить розв'язати будь-які два. Вибір цих рівнянь залежить від складності їх рішення і пов'язані з цим ускладнення, що виникають при врахуванні початкових умов.

Перше звичайне диференціальне рівняння утворюється внаслідок комбінації крайніх членів системи (3.6), яке після скорочення подібних членів зводиться до типу з роздільними змінними:

$$\frac{d\beta_p}{\beta_p} = \frac{dh}{h}.$$

Його рішення буде:

$$\frac{\beta_p}{h} = \psi_1, \quad (3.7)$$

де ψ_1 – стала інтегрування.

Друге звичайне диференціальне рівняння утворюється внаслідок комбінації першого і другого рівняння системи (3.6), яке після розділення змінних приймає вигляд:

$$\frac{d\beta_p}{\beta_p^4} = \frac{4 \cdot k \cdot A_g \cdot Q_{pn}^4}{B_p^4 \cdot h^{5,5}} \cdot dt. \quad (3.8)$$

Інтегрування рівняння (3.8) також не викликає труднощів і його розв'язок записується наступним чином:

$$\frac{1}{3 \cdot \beta_p^3} + \frac{4 \cdot k \cdot A_g \cdot \Gamma}{B_p^4 \cdot h^{5,5}} = \psi_2, \quad (3.9)$$

де ψ_2 – стала інтегрування;

$\Gamma = \int Q_{pn}^4 dt$ – інтегральна функція гідрографу.

На відмінну від звичайних диференціальних рівнянь, для яких загальне рішення повністю визначається невідомою сталою величиною, загальне рішення диференціальних рівнянь з частинними похідними являє собою невизначену функцію Φ від інтегралів (3.7) і (3.9). Таким чином, загальне рішення квазілінійного рівняння (3.6) становить:

$$\Phi \left(\frac{\beta_p}{h}; \frac{1}{3 \cdot \beta_p^3} + \frac{4 \cdot k \cdot A \cdot \Gamma}{B_p^4 \cdot h^{5,5}} \right) = 0. \quad (3.10)$$

З незліченної кількості рішень, що описують функцією Φ , треба знайти єдине, котре задовольняє початковим умовам, тобто вирішити задачу Коші.

Для здобуття частинного рішення, треба інтеграл (3.7) і (3.9) записати стосовно початкового моменту $t_0 = 0$. Тобто всім членам явно залежним від часу t надати значення, які вони повинні мати в початковий момент. Такою величиною є тільки природна руслова витрата води Q_{pn} . Тому в початковий момент розвитку руслових деформацій інтегральна функція гідрографу $\Gamma = \int Q_{pn}^4 dt = 0$. Інтеграл (3.7) залишається без змін, а інтеграл (3.9) позбувається другої складової. В результаті будемо мати:

$$\frac{\beta_p}{h} = \bar{\psi}_1, \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{3 \cdot \beta_p^3} = \bar{\psi}_2, \quad (3.12)$$

де $\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2$ – значення інтегралів в початковий момент часу.

Отримані залежності необхідно записати в явній залежності відносно шуканої функції h та незалежної змінної β_p :

$$\beta_p = \left(3 \cdot \bar{\psi}_1 \right)^{1/3}, \quad (3.13)$$

$$h = \bar{\psi}_1 \cdot \left(3 \cdot \bar{\psi}_2 \right)^{1/3}. \quad (3.14)$$

Верхня границі загального розмиву відповідають умови, при яких розрахунковий паводок проходить по нерозмитому (пласкому) дну. Тому початкові умови в цьому випадку формуються наступним чином: $h = h_{pn}$, де h_{pn} – побутова глибина в руслі, яка залежить тільки від часу і приймає значення згідно водомірного графіку паводку. В зв'язку з цим, рішення задачі Коші приймає вигляд:

$$\bar{\psi}_1^{-1} \cdot (3 \cdot \bar{\psi}_2)^{1/3} = h_{pn}, \quad (3.15)$$

яке після заміни інтегралів $\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2$ їх загальними розв'язками (3.7) і (3.9) виражається залежністю:

$$\frac{h}{\beta_p \cdot \left[\frac{1}{3 \cdot \beta_p^3} + \frac{3 \cdot 4 \cdot k \cdot A \cdot \Gamma}{B_p^4 \cdot h^{5,5}} \right]^{1/3}} = h_{pn}. \quad (3.16)$$

В результаті звичайних перетворень приходимо до кінцевого виразу глибини верхньої границі загального розмиву:

$$h = h_{pn} \cdot \left[1 + \frac{12 \cdot k \cdot A_g \cdot \Gamma \cdot \beta_p^3}{B_p^4 \cdot h^{5,5}} \right]^{1/3}. \quad (3.17)$$

Оскільки, на території України, русла переважно складаються з піщаного алювію, то за емпіричними даними Б.Ф. Сніщенко і З.Д. Копаліані [99], в залежність (3.17) необхідно підставляти $A_g = 0,011 / g^{3/2}$, або вибирати з табл. 2.2. Залежність (3.17) є неявною і справедлива лише для визначення залишкового розмиву, тобто в момент звільнення заплав від води.

Математична модель залишкового розмиву (3.1) та її аналітична реалізація (3.17) має певні обмеження при використанні:

- берега русла повинні бути стійкими до розмиву;
- руслові наноси приймаються однорідними;
- інерційні члени, характерні для неусталених рухів, незначні і ними можна знехтувати;
- довжина зони стиснення при залишковому розмиві приймається рівною поздовжній проекції струмененапрямної дамби;
- ширина русла набагато більша довжини зони впливу мостового переходу. Тому задача розглядається в одномірній ідеалізації;
- за відсутності натурної серії паводків приймається модель, яка запропонована Л.Г. Бегамом і В.Ш. Ципіним [113].

Крім того математична модель залишкового розмиву (3.1) та її аналітична реалізація (3.17) не враховує конфігурацію русла в плані, криволінійні ділянки русла та наявність поперечної циркуляції.

3.3 Обґрунтування початкових умов для недеформованого дна в зоні впливу мостових переходів

Найважливіша задача проектування мостових переходів полягає в обґрунтуванні їх генеральних розмірів, таких як: ширина отвору, відмітка низу прогінних будівель і верху насипів підходів, заглиблення фундаментів биків і стоянів, розмірів та розташування регуляційних споруд. Провідною у цьому переліку проектних характеристик мостових переходів є ширина отвору, яка власне і визначає довжину мосту. Здебільшого головним чинником для обґрунтування величини отвору визначається величиною розмиву.

В системі багаторічного прогнозування величини загального розмиву математична модель руслових деформацій повинна складатися як мінімум з чотирьох залежностей.

Щоб отримати єдине рішення, відповідне умовам задачі треба задати початкові умови. Тоді задача прогнозу руслових переформувань і деформацій зводиться до задачі Коші, в якій початковими умовами є поздовжній профіль дна русла [114].

Можливі дві розрахункові схеми для початкових умов. Перша розрахункова схема приймається тоді, коли перший паводок проходить по пласкому дну. Друга розрахункова схема – коли для першого паводку неможливо прийняти дно пласким. Розглянемо обидва випадки.

Перша розрахункова схема приймається, коли перший паводок проходить по пласкому дну. В цьому випадку 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 :

$$h = h_{pn}, \quad (3.18)$$

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

Друга розрахункова схема – коли дно приймається вже zdeформоване (розмите) повинню, що пройшла раніше. За цих умов поздовжній профіль дна русла описується залежністю [111, 115]:

$$h = h_{зал} \cdot \left[0,5 + \sqrt{0,25 + \frac{20 \cdot A_g \cdot \Gamma \cdot \beta_m^4 \cdot (\beta_m - 1)}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h_{зал}^5}} \right]^{1/5}, \quad (3.19)$$

де $h_{зал}$ – залишкова глибина в руслі під мостом від попередньої повені;

A_g – функція фізико-механічних властивостей наносів;

β_m – коефіцієнт стиснення потоку під мостом;

B_p – ширина русла;

l_c – довжина зони стиснення;

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

Для другої і наступних паводків початкові умови задаються залежністю (3.19), 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 (3.19) характеристика трансформації руслової витрати не є лінійною. Згідно досліджень п.2.5, п. 3.2, характеристика трансформації руслової витрати для залишкового розмиву може прийматися лінійною. Тоді для визначення залишкового розмиву можна користуватися і залежністю (3.17).

Коли неможливо прийняти дно плоским, тобто є вирви або пасма, то поздовжній профіль можна апроксимувати за допомогою кубічного сплайну, який в останній час набув значного поширення в різних галузях науки і техніки. Застосування кубічного сплайну обумовлено тим, що поліном третього ступеня є простою кривою, що має точку перегину, яка забезпечує його добрі інтерполяційні можливості.

Кубічні сплайни мають на всьому відрізку апроксимації безперервні похідні до другого порядку. Така гладкість зазвичай виявляється достатньою для більшості завдань. Невисока степінь полінома спрощує обчислення і зменшує обчислювальну похибку. В якості початкових умов кубічних сплайн може бути двох видів: кубічний сплайн в похилах і кубічний сплайн через моменти.

3.4. Обґрунтування початкових умов для реалізації математичної моделі

Розглянемо найбільш відомий й поширений інтерполяційний сплайн порядку 3 дефекту 1. Ці сплайни порівняно недавно почали широко вживатися в обчислювальній математиці. З їх допомогою можна легко провести криву через задані точки (x_i, y_i) . Можна показати, що сплайн – це група сполучених кубічних багаточленів, в місцях сполучення яких перша та друга похідні безперервні. Такі функції звуться кубічними сплайнами. Для їх побудови необхідно задати коефіцієнти, які однозначно визначають поліном у проміжку між двома точками.

Формула для інтерполяційного многочлена Ерміта [116]:

$$H_3(x) = y_o + (x - x_o) \cdot y_o' + (x - x_o)^2 \cdot \left(\frac{y_1 - y_o}{(x_1 - x_o)^2} - \frac{y_o'}{x_1 - x_o} \right) + (x - x_o)^2 \cdot (x - x_1) \cdot \left(\frac{y_1' - y_o'}{(x_1 - x_o)^2} - \frac{2 \cdot (y_1 - y_o)}{(x_1 - x_o)^3} \right), \quad (3.20)$$

з двома вузлами кратності 2, що виражає інтерполяційний кубічний многочлен на відрізку $[x_i; x_{i+1}]$ через значення функції y_i і її похідних m_i в граничних точках відрізка. Отримаємо вираз кубічного сплайна на кожному частковому відрізку через похили:

$$S_3(x) = y_i + (x - x_i)m_i + \frac{(x - x_i)^2}{h_i} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - m_i \right) - \frac{(x - x_i)^2}{h_i} (x_{i+1} - x) \cdot \left(m_{i+1} + m_i - 2 \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \right), \quad x \in [x_i; x_{i+1}] \quad (i = 0, 1, \dots, N-1). \quad (3.21)$$

Після згрупування коефіцієнтів при невідомих значеннях похилів, можна отримати представлення сплайна в іншій формі:

$$S_3(x) = \frac{(x_{i+1} - x)^2 \cdot (x - x_i)}{h_i^2} m_i - \frac{(x - x_i)^2 \cdot (x_{i+1} - x)}{h_i^2} m_{i+1} + \\ + \frac{(x_{i+1} - x)^2 \cdot (2(x - x_i) + h_i)}{h_i^3} y_i + \frac{(x - x_i)^2 \cdot (2(x_{i+1} - x) + h_i)}{h_i^3} y_{i+1}. \quad (3.22)$$

З формули (3.21) можна знайти вираз для другої похідної кубічного сплайна:

$$S_3''(x) = \frac{2}{h_i} \cdot \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - m_i \right) - \left(\frac{2(x_{i+1} - x)}{h_i^2} - \frac{4(x - x_i)}{h_i^2} \right) \cdot \left(m_i + m_{i-1} - 2 \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} \right) = \\ = (y_{i+1} - y_i) \cdot \frac{6 - 12 \cdot t}{h_i^2} + m_i \cdot \frac{(-4 + 6 \cdot t)}{h_i} + m_{i+1} \cdot \frac{(-2 + 6 \cdot t)}{h_i}, \quad (3.23)$$

$$\text{де } t = \frac{x - x_i}{h_i}, \quad x \in [x_i; x_{i+1}] \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N-1).$$

Враховуючи в (3.23) $x = x_i$, можна обчислити праву односторонню похідну другого порядку у вузлі x_i :

$$S_3''(x_i + 0) = -\frac{4 \cdot m_i}{h_i} - \frac{2 \cdot m_{i+1}}{h_i} + 6 \cdot \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}^2}.$$

Замінивши в (3.23) індекс i на $i-1$, можна обчислити ліву односторонню похідну другого порядку у вузлі x_i :

$$S_3''(x_i - 0) = \frac{2 \cdot m_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{4 \cdot m_i}{h_{i-1}} - 6 \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{h_{i-1}^2}.$$

З умови безперервності другої похідної кубічного сплайна у вузлах x_i вважаємо:

$$S_3''(x_i - 0) = S_3''(x_i + 0), \quad (i = 1, 2, \dots, N-1),$$

що еквівалентно системі лінійних алгебраїчних рівнянь відносно нахилів:

$$\beta_i \cdot m_{i-1} + 2 \cdot m_i + \alpha_i \cdot m_{i+1} = c_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N-1), \quad (3.24)$$

де

$$\alpha_i = \frac{h_{i-1}}{h_i + h_{i-1}}, \quad \beta_i = \frac{h_i}{h_i + h_{i-1}} = 1 - \alpha_i, \quad c_i = 3 \cdot \left(\alpha_i \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} + \beta_i \frac{y_i - y_{i-1}}{h_{i-1}} \right).$$

До рівняння (3.24) необхідно додати ті два рівняння, яких не вистачає відповідно до заданих граничних умов типу:

$$1) m_0 = f'(a), m_N = f'(b); \quad (3.25)$$

$$2) \begin{aligned} 2 \cdot m_0 + m_1 &= 3 \cdot \frac{y_1 - y_0}{h_0} - \frac{h_0}{2} \cdot f''(a), \\ m_{N-1} + 2 \cdot m_N &= 3 \cdot \frac{y_N - y_{N-1}}{h_{N-1}} + \frac{h_{N-1}}{2} \cdot f''(b); \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} 3) \quad 2 \cdot m_1 + \alpha_1 \cdot m_2 + \beta_1 \cdot m_N &= c_1, \\ \alpha_N \cdot m_1 + \beta_N \cdot m_{N-1} + 2 \cdot m_N &= c_N, \end{aligned} \quad (3.27)$$

де з умови періодичності

$$y_0 = y_N, y_1 = y_{N+1}, m_0 = m_N, m_1 = m_{N+1}, h_N = h_0,$$

в системі рівнянь (3.24) можна вважати $i = 1, 2, \dots, N-1$;

$$4) \left(1 + \frac{h_0}{h_1}\right) \cdot m_1 + \frac{h_0}{h_1} \cdot m_2 = \frac{1}{3} \cdot c_1 + 2 \cdot \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{y_2 - y_1}{h_1}, \quad (3.28)$$

$$\frac{h_{N-1}}{h_{N-2}} \cdot m_{N-2} + \left(1 + \frac{h_{N-1}}{h_{N-2}}\right) \cdot m_{N-1} = \frac{1}{3} \cdot c_{N-1} + 2 \cdot \frac{h_{N-1}}{h_{N-2}} \cdot \frac{y_{N-1} - y_{N-2}}{h_{N-2}},$$

Для граничних умов всіх типів система алгебраїчних рівнянь (3.24), доповнена відповідно рівняннями (3.25) – (3.28), має матрицю з домінуючою діагоналлю, тому існує єдине рішення, яке може бути отримане методом прогонки.

3.4.1 Глобальний спосіб задання поздовжнього профілю кубічним сплайном через моменти

Глобальний спосіб задання поздовжнього профілю кубічним сплайном через моменти [117].

Зважаючи на неперервність і лінійність другої похідної функції $S(x)$ на кожному проміжку сітки $[x_i; x_{i+1}]$, ($i = 1, 2, \dots, n$) можна записати при $x_{i-1} \leq x \leq x_i$:

$$S(x)'' = m_{i-1} \cdot \frac{x_i - x}{h_i} + m_i \cdot \frac{x - x_{i-1}}{h_i}, \quad (3.29)$$

де $h_i = x_i - x_{i+1}$, $m_k = S(x_k)''$. Проінтегрувавши двічі обидві частини рівності (3.29), можна отримати:

$$S(x) = m_{i-1} \cdot \frac{(x_i - x)^3}{6 \cdot h_i} + m_i \cdot \frac{(x - x_{i-1})^3}{6 \cdot h_i} + A_i \cdot \frac{x_i - x}{h_i} + B_i \cdot \frac{x - x_{i-1}}{h_i}, \quad (3.30)$$

де A_i і B_i – деякі константи інтегрування. Вони обчислюються з умови $S(x_{i-1}) = f_{i-1}, S(x) = f_i$. Якщо підставити $x = x_i$ і $x = x_{i-1}$ в (3.30), то

$$m_i \cdot \frac{h_i^2}{6} + B_i = f_i,$$

$$m_{i-1} \cdot \frac{h_i^2}{6} + B_i = f_{i-1},$$

Остаточно виходить, що

$$S(x) = m_{i-1} \cdot \frac{(x_i - x)^3}{6 \cdot h_i} + m_i \cdot \frac{(x - x_{i-1})^3}{6 \cdot h_i} + \left(f_{i-1} - \frac{m_{i-1} \cdot h_i^2}{6} \right) \cdot \frac{x_i - x}{h_i} + \left(f_i - \frac{m_i \cdot h_i^2}{6} \right) \cdot \frac{x - x_{i-1}}{h_i}, \quad (3.31)$$

$$S'(x) = -m_{i-1} \cdot \frac{(x_i - x)^2}{2 \cdot h_i} + m_i \cdot \frac{(x - x_{i-1})^2}{2 \cdot h_i} + \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i} - \frac{m_i - m_{i-1}}{6} \cdot h_i, \quad (3.32)$$

З умови неперервності $S'(x)$ в точках $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ отримаємо $n-1$ рівнянь

$$\frac{h_i}{6} \cdot m_{i-1} + \frac{h_i + h_{i+1}}{3} \cdot m_i + \frac{h_{i+1}}{6} \cdot m_{i+1} = \frac{f_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i}, \quad (3.33)$$

Для того щоб визначити невідомі $m_1, m_2, \dots, m_{n-1}$, необхідно визначити алгебраїчну систему рівнянь. Зробивши деякі позначення, можна записати рівність (3.33) у вигляді зручному для програмування:

$$h = h_i + l \cdot \Lambda + h_i \cdot \Delta - M_{i+1} \cdot (\Lambda - \Lambda^3) - M_i \cdot (\Delta - \Delta^3), \quad (3.34)$$

де h_i, h_{i+1} – природні глибини русла в початковий момент руслових деформацій у вузлових точках сплайну i та $i+1$;

M_i, M_{i+1} – моменти сплайну у вузлових точках;

$$\Delta = 1 - \Lambda; \quad \Lambda = \frac{l - l_i}{\lambda_i};$$

λ – відстань між вузовими точками поздовжнього профілю дна русла.

Для користування залежністю (3.34), необхідно розв'язувати квадратну матриця для визначення моментів сплайнів у вузлових точках, які залежать від другої похідної. Інколи, це займає багато часу і є незручним для інженера. Тому, для спрощення процесу визначення невідомих, застосовують кубічний сплайн в похилах.

3.4.2 Локальний спосіб задання поздовжнього профілю кубічним сплайном в похилах

Локальний спосіб задання поздовжнього профілю кубічним сплайном в похилах [118].

Для обчислення значень сплайна $S_3(x)$ в точці $x \in [a; b]$ при відомих значення похилів ($m_i = 0, 1, \dots, N$), можна скористатися формулою (3.21), перетвореною до вигляду, зручного для обчислень:

$$S_3(t) = y_i + (x - x_i) \cdot (m_i + t \cdot (B + A \cdot t)). \quad (3.35)$$

Застосувавши теоретичні засади кубічного сплайна (3.35) на мостові переходи, отримаємо основну залежності для розрахунку величини залишкового розмиву:

$$h(l_i) = \left[1 + \frac{12 \cdot k \cdot A_g \cdot \Gamma \cdot \beta^3}{B_p^4 \cdot h^{5,5}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot [h_i + \lambda \cdot \Lambda \cdot [m_i + \Lambda \cdot (B_s + \Lambda \cdot A_s)]] \quad (3.36)$$

Коефіцієнти, які входять до рівняння (3.36) обчислюються за формулами

$$A_s = -2 \cdot \frac{h_{i+1} - h_i}{\lambda} + m_{i+1} + m_i, \quad (3.37)$$

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

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:

$$m_i = \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2 \cdot \lambda}, \quad m_o = \frac{4 \cdot h_1 - h_2 - 3 \cdot h_o}{2 \cdot \lambda}, \quad m_N = \frac{3 \cdot h_N - h_{N-2} - 4 \cdot h_{N-1}}{2 \cdot \lambda}, \quad (3.38)$$

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

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;
 λ – крок, на який розбивається довжина стиснення;
 l_i – це відстань від початку зони стиснення до вузлової точки.

Сплайни володіють гарними апроксимативними властивостями. Інтерполяційні сплайни в ряді задач забезпечують мінімально можливу похибку наближення на даному класі функцій серед всіх многочленів фіксованого ступеня.

Обираючи з двох способів апроксимації поздовжнього профілю дна русла, доцільніше застосовувати кубічний сплайн в похилах (3.35). Оскільки, при застосуванні кубічного сплайну через моменти (3.29), необхідно вирішувати складну систему алгебраїчних рівнянь для пошуку моментів сплайну. Крім того, не завжди є повна вихідна інформація для прогнозування руслових переформувань, що значно ускладнює обчислювальний процес. Спосіб задання кубічного сплайну в похилах в системі багаторічного прогнозування величини загального розмиву дає можливість вирішенню багатьох задач, які виникають в процесі проектування різних гідротехнічних споруд.

3.5 Висновки по розділу 3

1. В системі довгострокових прогнозів руслових деформацій на мостових переходах набуває великого значення визначення залишкових розмивів.

2. Математична модель залишкового розмиву складається з диференціального рівняння балансу наносів, формули трансформуючої спроможності руслоформуючих наносів, рівняння витрати потоку і його характеристики трансформації.

3. Щоб отримати єдине рішення, відповідне умовам задачі треба задати початкові умови. Тоді задача прогнозу руслових перетворень і деформацій зводиться до задачі Коші, в якій початковими умовами є поздовжній профіль дна русла.

4. Можливі дві розрахункові схеми для початкових умов. Перша розрахункова схема приймається тоді, коли перший паводок проходить по пласкому дну. Друга розрахункова схема – коли для першого паводку неможливо прийняти дно пласким.

5. За неможливістю прийняття дна пласким, тобто є вирви або пасма, то поздовжній профіль можна апроксимувати за допомогою кубічного сплайну.

6. Обираючи з двох способів апроксимації поздовжнього профілю дна русла, доцільніше застосовувати кубічний сплайн в похилах.

РОЗДІЛ 4

ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА БАГАТОРІЧНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАГАЛЬНИХ РУСЛОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ В ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ

4.1 Отримання критеріального рівняння для залишкового розмиву

Процес загального розмиву в зоні впливу мостових переходів на автомобільних дорогах починається з виходом паводкового потоку на заплави і досягає свого максимуму не на піку, а на спаді паводку. Коли річка знову входить в брівки русла, відмітки дна під мостом зазвичай не відновлюються і залишаються меншими за природні. Різниця між цими відмітками являє собою залишковий розмив, який тим більший, чим більша висота паводку і коефіцієнт стиснення потоку під мостом при розрахунковому рівні високої води (РРВВ) [119].

Увага до залишкового розмиву виникла з появою в будівельних нормах [111] зобов'язання щодо прогнозування загального розмиву за багаторічний період. В цьому разі, пропускаючи кожний черговий паводок, треба знати величину загальних руслових деформацій, залишених попередніми паводками.

За явною залежністю Ткачука С.Г. [1, 111] можна обчислити загальний розмив під мостом і в будь-якому створі зони впливу мостового переходу $l_{3,в}$ при рівнях води вище середньої відмітки заплав:

$$h_j = h_{j-1} \cdot \left[0,5 + \sqrt{0,25 + \frac{20 \cdot A_g \cdot \Gamma \cdot \beta_m^4 \cdot (\beta_m - 1)}{l_c \cdot B_p^4 \cdot h_{j-1}^5}} \right]^{1/5}, \quad (4.1)$$

де h_{j-1} – залишкова глибина в руслі, яка для першого паводку дорівнює природній глибині в брівках русла h_{pn} , а для наступних паводків обчислюється за наведеною вище формулою (4.1);

A_g – коефіцієнт залежний від крупності наносів;

B_p – ширина русла;

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

β_m – коефіцієнт стиснення потоку під мостом;

l_c – довжина зони стиснення.

Проблема залишкового розмиву полягає в обґрунтуванні його критеріїв, тобто у визначенні коефіцієнта стиснення β_m і довжини зони стиснення l_c на момент звільнення заплав від води, коли $\beta_m = 1$, а $l_c = 0$. Але при таких критеріях залишкового розмиву формула (4.1) стає невизначеною. Тому для здійснення довгострокового прогнозування загального розмиву значення цих величин повинні бути щонайменшими, але більшими за граничні, які виводяться з таких міркувань.

Коефіцієнт стиснення потоку під мостом обмежується точністю вимірювання витрати води гідрометричним методом, яка становить 2 – 3% . Отже значення коефіцієнта стиснення потоку під мостом не може бути меншим $\beta_m \geq 1,02$ [120].

З коефіцієнтом стиснення β_m пов'язана довжина зони стиснення l_c і протяжність загалом всієї зони впливу мостового переходу $l_{3.в}$. Теоретична залежність між цими величинами така [1]:

$$\frac{l_c \cdot I_0}{\xi \cdot h_{p.3}} = \frac{\left(\frac{\beta_m^2}{2 \cdot \beta_m - 1} \right)^{0,3} - 1}{\beta_m - 1}, \quad (4.2)$$

де I_0 – поздовжній похил вільної поверхні потоку;

$h_{p.3}$ – глибина русла в брівках;

$\xi = l_c / l_{3.в}$ – відносна довжина зони стиснення.

На момент залишкового розмиву залежність (4.2) 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 по графіку, рисунок 4.1.

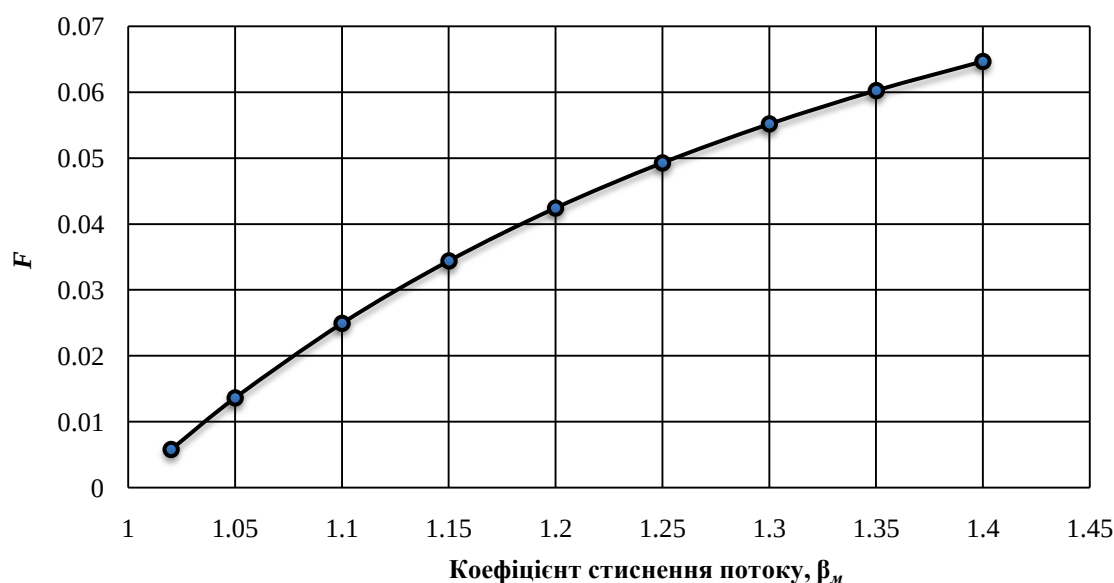


Рисунок 4.1 – Графік функції $F(\beta_m)$

Для обчислення лівої частини залежності (4.2) треба задатись довжиною зони стиснення l_c та її відносною величиною ξ . Решта величин, що входять до лівої частини I_0 та $h_{p,z}$, становлять вихідну інформацію.

З огляду на обставини формування залишкового розмиву, найменшою довжиною стиснення може бути тільки довжина верхніх 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.

Значення відносної довжини зони стиснення ξ , посилаючись на натурні спостереження М.В.Михайлова [121] становлять 0,33, тобто $l_{з.в} = 3 \cdot l_c$. Наші теоретичні дослідження показали, що величина ξ при значеннях $\beta_m \geq 1,4$ практично не залежать від коефіцієнта стиснення, але виявляє чітку залежність від числа Фруда Fr (параметра кінетичності), рисунок 4.2.

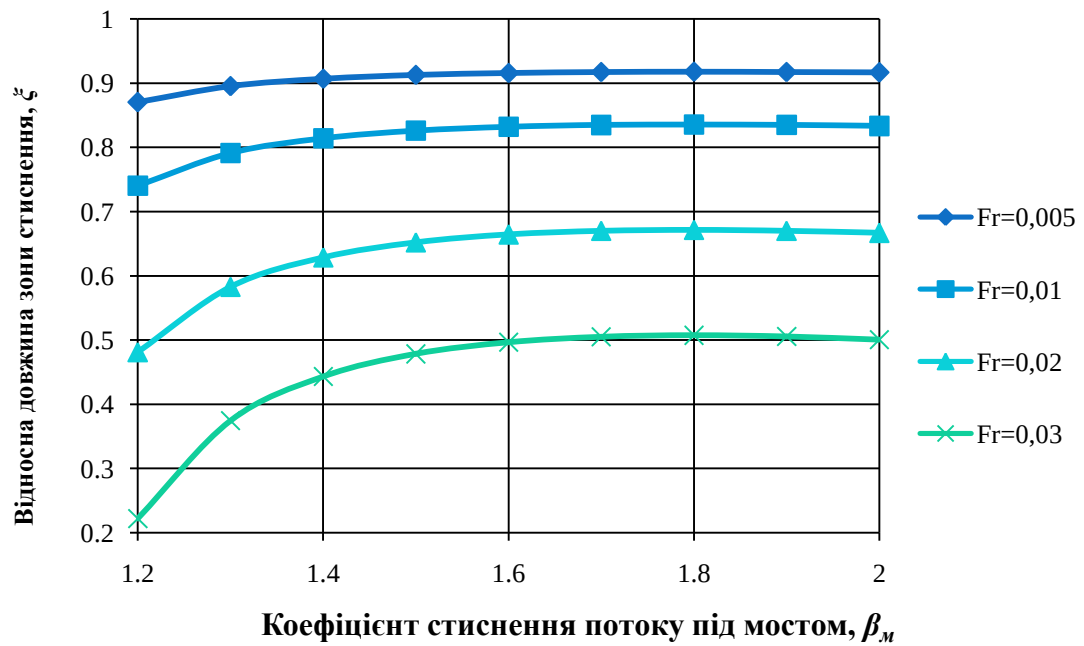


Рисунок 4.2 – Залежність ξ від β_m та Fr

Із зменшенням $\beta_m < 1,4$ відносна довжина зони стиснення ξ стрімко зменшується і навіть стає від'ємною, що безумовно суперечить природі протікання потоку на мостовому переході. Причина такого явища криється в динамічній не лінійності, яку неможливо врахувати методами одновимірної гідравліки.

При значеннях $\beta_m \geq 1,6$ значення відносної довжини зони стиснення практично не змінюються. Тому для визначення ξ при різних числах Fr наводиться графік їх залежності при сталому значенні $\beta_m = 1,4$, рисунок 4.3.

Знайдене значення відносної довжини зони стиснення ξ для залишкового розмиву при різних числах Fr , використовуючи рисунок 4.3, буде трохи завищене, що піде в запас стійкості мостового переходу.

Апроксимація графіку, що показ на рисунку 4.3 виразиться емпіричною залежністю

$$\xi = 1 - 18,5 \cdot Fr. \quad (4.3)$$

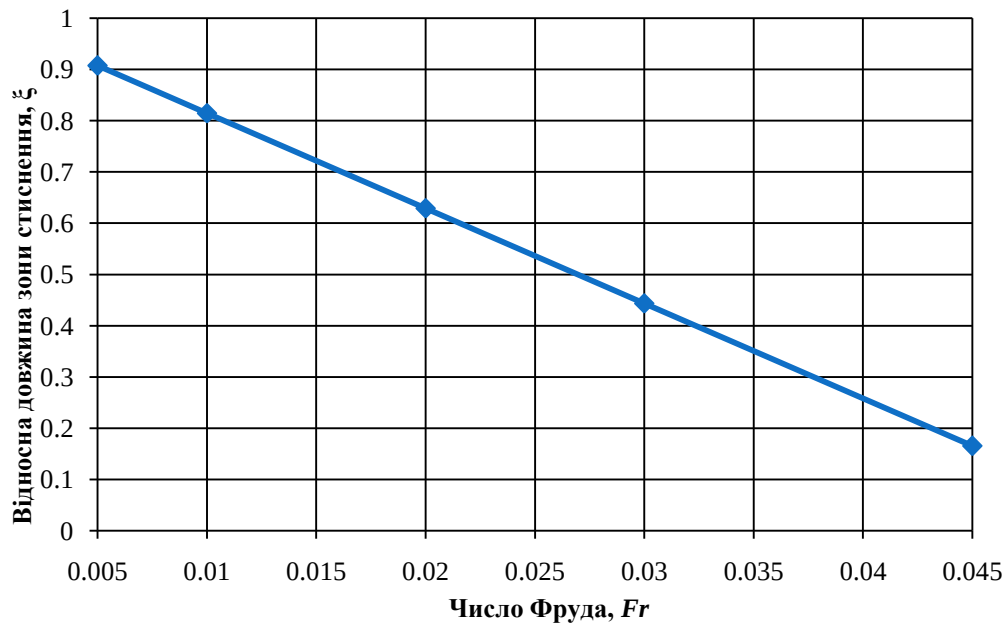


Рисунок 4. 3 – Залежність відносної довжини зони стиснення ξ від Fr

Розв'язання критеріального рівняння залишкового розмиву (4.2) пропонується здійснювати в такий спосіб. Починати треба з обчислення лівої частини рівняння. Для цього, при відомих I_0 та $h_{p.з.}$, необхідно підставити замість l_c довжину верхових струмененапрямних дамб і в залежності від числа Fr знайти відносну довжину зони стиснення ξ . Тоді по графіку (див. рисунок 4.1), або безпосередньо з рівняння (4.2) знаходиться коефіцієнт стиснення потоку під мостом на момент залишкового розмиву. Далі, користуючись формулою (4.1), визначається розрахункова величина залишкового розмиву.

Похибка, що виникає при обчисленні коефіцієнта стиснення потоку під мостом для залишкового розмиву безпосередньо з рівняння (4.2) або визначаючи графічно з рисунків 4.3 та 4.1, складає приблизно 5 %. Така точність є цілком задовільною для подальших розрахунків, обираючи будь-який з способів (залежність (4.2) або з рисунків 4.3 та 4.1) визначення коефіцієнта стиснення потоку під мостом для залишкового розмиву.

4.2 Методика багаторічного прогнозування загальних руслових деформацій

В разі надійного прогнозування розрахункового рівня розмиву, який може бути реалізованим за весь термін експлуатації мостового переходу, фундаменти та опори моста можуть служити в 3 – 4 рази довше ніж прогонові будови. Тому з метою скорочення експлуатаційних витрат на ремонти та реконструкцію необхідно приділяти належну увагу визначенню можливої найбільшої глибини загального розмиву, який разом з місцевим розмивом біля руслових опор відтворює РРР [1].

Верхня границя загального розмиву досягається, коли розрахунковий паводок нормативної ймовірності перевищення проходить одразу після зведення мостового переходу по ще не розмитому дну. Така ситуація не є найнесприятливішою і тому не може розглядатися при визначенні РРР. Розрахункова глибина вирви загального розмиву під мостом не може бути менше його верхньої границі і більше нижньої границі (граничного розмиву). Очевидно найбільша глибина загального розмиву за багаторічний період утворюється тоді, коли розрахунковий паводок пройде останнім в серії паводків за якийсь багатоводний період і дно русла буде zdeформовано попереднім паводком. Але ніхто не може сказати, яка послідовність повеней буде в дійсності. Розрахунковій повені можуть передувати менш і навіть значно менші, а їх розподіл по роках був і залишається таємницею природи. Але незважаючи на такі непевні обставини, інженер повинен прийняти рішення стосовно генерального параметру мостового переходу – ширини отвору.

Саме тому українські Державні будівельні норми [111] рекомендують у випадках значного стиснення ріки підходами до мосту, при наявності руслових кар'єрів тощо здійснювати прогнози загального розмиву по серії паводків.

В ідеалі для довгострокового прогнозування загального розмиву бажано мати гідрологічну інформацію про всі паводки, що можуть пройти в майбутньому за весь термін експлуатації мостового переходу. Але отримати таку інформацію в принципі не реально. Сучасні гідрологія і математична статистика не можуть достеменно вказати, якої висоти і в якому році після спорудження моста буде спостерігатися той чи інший паводок на даній ділянці ріки. Тому можливі два способи формування розрахункової серії паводків:

- з матеріалів багаторічних спостережень (декілька десятків років) вибирається характерний для даної ріки повноводний період, в якому послідовність і висота паводків приймається за розрахункові;
- при коротких рядах спостережень, або за їх відсутності вдаються до моделювання розрахункової серії паводків.

За відсутності натурної серії паводків вдаються до її моделювання, користуючись рекомендаціями Л.Г. Бегама і В.Ш. Ципіна [113], визначаємо кількість та порядок паводків:

- якщо коефіцієнт варіації щорічних максимальних рівнів води знаходиться в межах $C_v = 0,60 - 3,20$, то ряд повеней треба пропускати в такому порядку – $4p, 8p, 2p, 4p, p$, де $p = 1\%$ – ймовірність перевищення;
- якщо коефіцієнт варіації $C_v \leq 0,6$, то модельна серія повеней має вид $4p, 2p, p$.

Такі рекомендації з'явилися в результаті дослідження В.Ш. Ципіна і В.Ф. Залеського [112], які ґрунтуються на аналізі 46 натурних рядів тривалістю від 55 до 98 років. Проходження повеней більших за ймовірністю, ніж 4 %, 8 %, 2 %, 4 %, 1 %, практично не впливають на величину загального розмиву.

Ймовірність перевищення p розрахункових максимальних витрат нормується в залежності від типу споруди і народногосподарського значення дороги. Для великих і середніх мостів на автомобільних дорогах прийняті

такі ймовірності перевищення в залежності від технічної категорії дороги [111] і приймаються з таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Ймовірності перевищення розрахункових максимальних витрати в залежності від технічної категорії дороги

Категорія дороги	Ймовірність перевищення, Р %
I – III	1
IV – V	2

Після визначенні кількості та порядку проходження паводків починають прогнозувати руслові деформації в зоні впливу мостового переходу. Загальний метод прогнозування руслових деформацій можна побачити на структурно-логічній схемі, рисунок 4.4.



Рисунок 4.4 – Структурно-логічна схема прогнозування руслових деформацій

Спираючись на досвід проектування мостових переходів, проф. Андреев О.В. [33] вважає, що з точки зору економічної доцільності завжди треба прагнути до якнайменшої ширини отвору L_m . Але при цьому повинні братися до уваги такі обмеження:

- ширина отвору не може бути меншою за ширину русла B_p ;
- коефіцієнт розмиву P не рекомендується допускати більшим за 1,5 для судноплавних річок і більшим ніж 2 – для несудноплавних річок, де $P = h_{p.m.max} / h_{p.n.max}$ – відношення максимальних глибин в руслі після і до розмиву;
- підпір перед мостом і біля підходів не повинен загрожувати затопленням прилеглих поселень, народногосподарських об'єктів тощо;
- швидкості під мостом в повеневий період на судноплавних річках та розрахункові судноплавні рівні (РСР) повинні бути узгоджені з відповідними судноплавними компаніями.

Ширина отвору мосту з деяким запасом визначається за формулою:

$$L_m = B_p \cdot \left[1 + \frac{P^{-1} - \tau}{1 - \tau} (\delta - 1) \right], \quad (4.4)$$

де B_p – ширина русла;

P – коефіцієнт розмиву;

$\tau = Q_{pn} / Q$; $\delta = B / B_p$.

Q і Q_{pn} – загальна і руслова витрати води на піку повені (паводку);

B – ширина розливу ріки (відстань між урізами).

Якщо за формулою (4.4) виявиться, що $L_m < B_p$, то ширину отвору слід приймати рівною ширині русла, тобто проектувати міст найменшої довжини.

Максимальний коефіцієнт стиснення потоку під мостом визначається за формулою:

$$\beta_m = \frac{Q}{Q_{\text{рп}} + q_{\text{зп}} \cdot (L_m - B_p)}, \quad (4.5)$$

де $q_{\text{зп}}$ – питома природна витрата заплав, яка визначається за формулою

$$q_{\text{зп}} = \frac{Q - Q_{\text{рп}}}{B - B_p}. \quad (4.6)$$

Інтегральну функцію гідрографа Γ можна визначити за формулою:

$$\Gamma = 86400 \cdot \int_{t_1}^{t_2} Q_{\text{рп}}^4 dt, \quad (4.7)$$

де t_1 і t_2 – відповідно час в добовому вимірі виходу води на заплаву і звільнення заплав від води. Стала „86400” дорівнює кількості секунд в добі. При наявності природного гідрографа руслової витрати інтегральна функція гідрографа Γ обчислюється будь-яким числовим методом, наприклад, методом трапецій, точність якого цілком прийнятна для подібних розрахунків.

Максимальна довжина зони стиснення на піках паводку та розмиву визначається:

$$l_c = \frac{B - L_m}{1 + \frac{l_{\text{мз}}}{l_{\text{вз}}}}, \quad (4.8)$$

де $l_{\text{мз}}$ і $l_{\text{вз}}$ – ширина меншої та більшої заплав.

Загальний розмив буває двох видів: залишковий та максимальний. Увага до залишкового розмиву виникла з появою в будівельних нормах [111] зобов'язання щодо прогнозування загального розмиву за багаторічний

період. В цьому разі, пропускаючи кожний черговий паводок, треба знати величину загальних руслових деформацій, залишених попередніми паводками.

Основна залежність [122] для визначення залишкового розмиву зазначена у розділі 3 (3.17). Для зручності запишемо її ще раз:

$$h = h_{pn} \cdot \left[1 + \frac{12 \cdot k \cdot A_g \cdot \Gamma \cdot \beta_p^3}{B_p^4 \cdot h^{5,5}} \right]^{1/3}, \quad (4.9)$$

де h_{pn} – середня глибина в брівках руслі до розмиву;

A_g – коефіцієнт, який залежний від фізико-механічних властивостей наносів, береться з таблиці 2.2.

Залежність (4.9) є неявною і справедлива лише для визначення залишкового розмиву, тобто в момент звільнення заплав від води.

Визначення залишкового розмиву показано на структурно-логічній схемі, рисунку 4.5.



Рисунок 4.5 – Структурно-логічна схема методики розрахунку залишкового розмиву

Після розрахунку залишкового розмиву, визначається максимальний розмив у руслі. Основна залежність для визначення максимального розмиву (4.1) наведена у п. 4.1, де $h_j = h_{зал}$ – глибина в руслі для другої і наступних повеней; $h_{зал}$ – залишкова глибина під мостом від попередньої повені, яка визначається за (4.9); β_m – максимальний коефіцієнт стиснення потоку під мостом, визначається (4.5); l_c – максимальна довжина зони стиснення, визначається (4.8); Γ – інтегральна функція гідрографа на момент піку розмиву, визначається (4.7).

Визначення мінімальної відмітки в руслі після серії паводків показано на структурно-логічній схемі, рисунок 4.6.

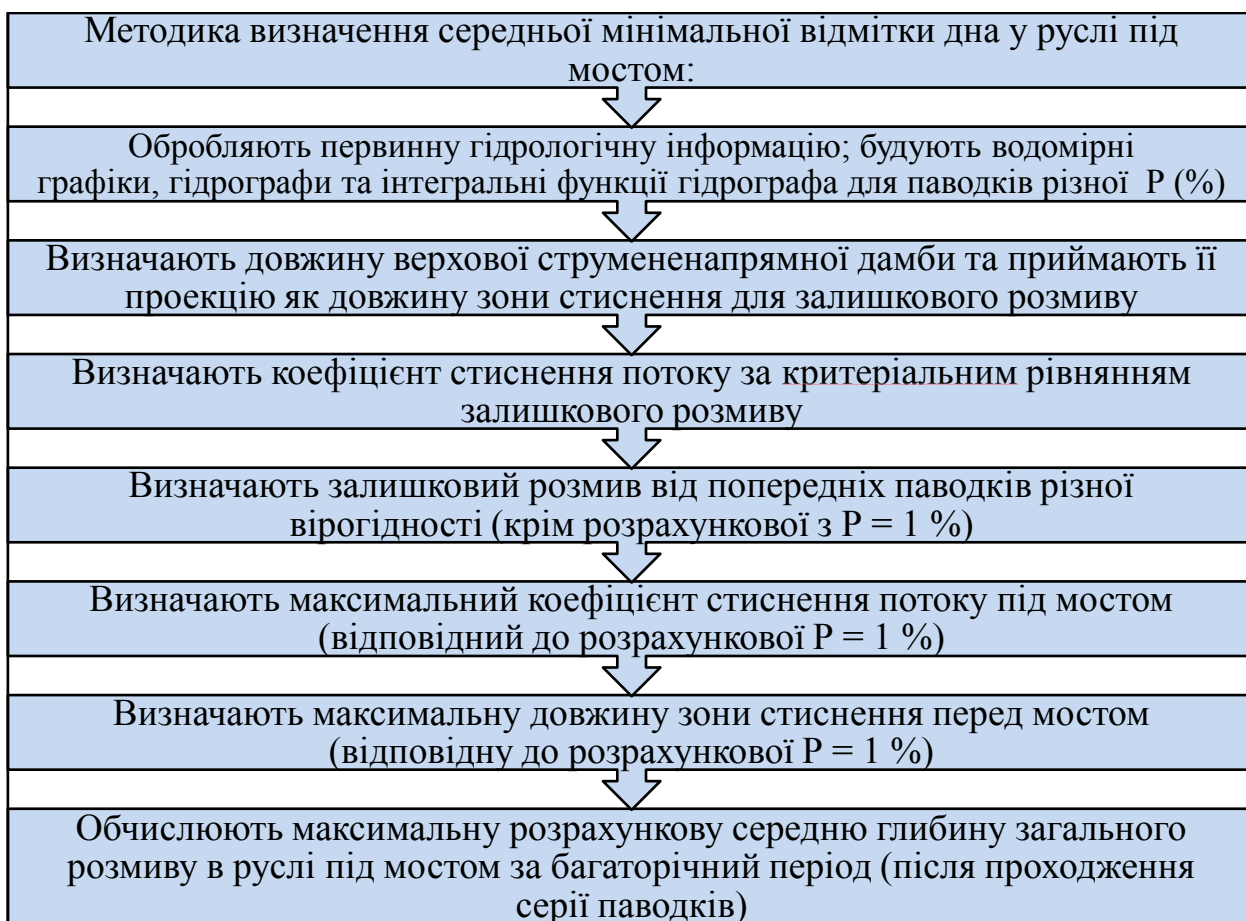


Рисунок 4.6 – Структурно-логічна схема багаторічного прогнозування руслових деформацій

З метою попередження небезпечних руслових деформацій, які можуть спричинити пошкодження або руйнування споруд мостового переходу,

передбачають різного типу регуляційні споруди. Зокрема, для забезпечення протікання потоку під мостом повним живим перерізом, без завихрень і мертвих зон, на заплавах будуються струмененапрямні дамби. Обриси криволінійних струмененапрямних дамб проектується таким чином, щоб забезпечити безвідривне їх обтікання водним потоком. В залежності від максимального значення коефіцієнта стиснення потоку під мостом β_m , що визначається за (4.5) з табл. 4.2 береться відносна сумарна довжина верхових струмененапрямних дамб [33]:

$$\eta = l_v / L_m, \quad (4.10)$$

де l_v – довжина верхової струмененапрямної дамби;

L_m – ширина отвору мостового переходу, що визначається за (4.4).

Таблиця 4.2 – відносна сумарна довжина верхових струмененапрямних дамб

Максимальний коефіцієнт стиснення потоку, β_m	1,00 ... 1,20	1,25	1,50	1,75	2,00	2,50
Відносна довжина верхових дамб, η	0,00	0,25	0,33	0,42	0,50	0,60

4.3 Дослідження впливу залишкового розмиву на величину максимального розмиву

Варто застерегти від помилкового ототожнення максимального розмиву і максимальної глибини руслового потоку. В неусталеному потоці пік загального розмиву завжди відстає від піку повені. Тому найбільша

величина розмиву спостерігається на спаді повені, коли рівні води зменшуються відносно розрахункового. Таким чином, максимальна глибина спостерігається на піку повені (розрахунковому рівню води), а максимальний розмив (найменша відмітка дна) досягається після проходження піку повені.

Постає питання, чи варто взагалі враховувати залишковий розмив під яким розуміють zdeформований профіль русла в момент звільнення заплав від води. Можливо його значення настільки мало, що він ніяк не впливає на максимальний розмив. Для цього були зроблені дослідження на чотирьох довільно взятих річках України: р. Дон, р. Горинь, р. Вільшанка, р. Ворскла. В створі з мостовими переходами всі вони є рівнинними річками. Для всіх річок було змодельовані серії з трьох паводків: 4 %, 2 % і 1 % ймовірністю перевищення. Товщина змитого шару визначалася за аналітичними залежностями: при залишкового розмиву (4.9) та максимального розмиву (4.10). Результати дослідження занесені в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати дослідження впливу залишкового розмиву на величину максимального розмиву

№ п/п	Річка / Параметр	Позн.	р. Дон	р. Горинь	р. Вільшанка	р. Ворскла
1	2	3	4	5	6	7
1	Ширина річки	B_p	275	83	60	95
2	Ширина отвору мостового переходу	L_m	430	83	60	225
3	Природна глибина в руслі	h_{pn}	4,15	1,79	4,21	3,35
4	Довжина зони стиснення для залишкового розмиву	l_{cz}	172	220	28	130
5	Довжина зони стиснення для максимального розмиву	l_c	2100	925	63	633

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7
6	Коефіцієнт стиснення потоку під мостом для залишкового розмиву	$\beta_{мз}$	1,108	1,2	1,08	1,2
7	Максимальний коефіцієнт стиснення потоку під мостом	β_m	1,69	1,99	1,21	2,18
8	Товщина змитого шару після серії паводків 4%, 2%, 1% ймовірності перевищення	Δh	7,08	5,69	6,26	6,33
9	Товщина змитого шару після 1% ймовірності перевищення, що проходить по нерозмитому дну	$\Delta h'$	4,23	3,00	2,66	3,62
10	Різниця p.8 та p.9	%	40,3	47,3	57,5	42,38

За результатами даних, що наведені у таблиці 4.3 побудовано рисунок 4.7.

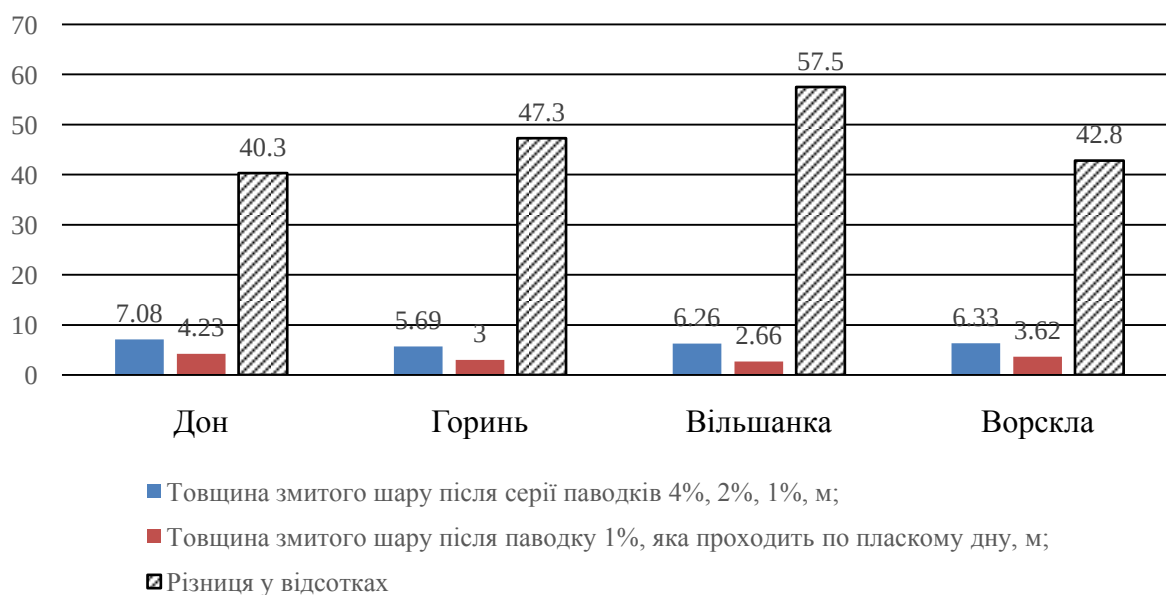


Рисунок 4.7 – Результати дослідження впливу залишкового розмиву на величину максимального багаторічного прогнозування загального розмиву

Аналізуючи дані, які наведені в таблиці 4.3 (рядок 10) та рисунку 4.7, можна зробити висновок: 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 найневигідніший 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.

Також було зроблено порівняння результатів багаторічного прогнозування максимального загального розмиву за ДБН В.2.3-22:2009 “Мости та труби. Основні вимоги проектування” [111] (4.10) і математичним моделюванням використовуючи математичну модель з лінеаризованою характеристикою трансформації руслової витрати (4.9). Результати розрахунку представлені у таблиці 4.5 та на рисунку 4.8.

Таблиця 4.5 – Результати порівняння багаторічного прогнозування максимального загального розмиву за (4.10) та з використанням (4.9)

№ п/п	Річка / Параметр	Позн.	р. Дон	р. Горинь	р. Вільшанка	р. Ворскла
1	2	3	4	5	6	7
1	Ширина річки	B_p	275	83	60	95
2	Ширина отвору мостового переходу	L_m	430	83	60	225
3	Природна глибина в руслі	h_{pn}	4,15	1,79	4,21	3,35
4	Довжина зони стиснення для залишкового розмиву	l_{cz}	172	220	28	130

Продовження таблиці 4.5

1	2	3	4	5	6	7
5	Довжина зони стиснення для максимального розмиву	l_c	2100	925	63	633
6	Коефіцієнт стиснення потоку під мостом для залишкового розмиву	$\beta_{мз}$	1,108	1,2	1,08	1,2
7	Максимальний коефіцієнт стиснення потоку під мостом	β_m	1,69	1,99	1,21	2,18
8	Товщина змитого шару після серії паводків 4%, 2%, 1% за ДБН, м;	Δh	8,02	6,71	6,96	7,24
9	Товщина змитого шару після серії паводків 4%, 2%, 1% з лінеаризованою характеристикою трансформації руслової витрати, м;	$\Delta h'$	7,08	5,69	6,26	6,33
10	Різниця р.8 та р.9	%	11,72	15,18	10,08	12,57

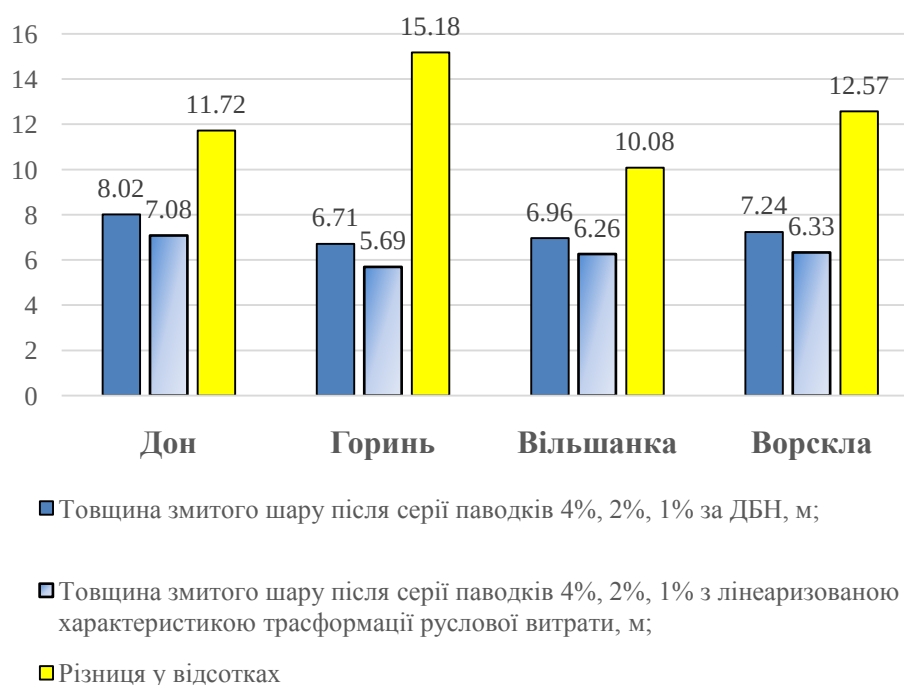


Рисунок 4.8 – Результати порівняння багаторічного прогнозування максимального загального розмиву за (4.10) та (4.9)

Аналізуючи дані, що наведені на рисунку 4.8, використовуючи залежність для характеристики руслової трансформації при визначенні залишкового розмиву, яка міститься в ДБН В.2.3-22:2009 “Мости та труби. Основні вимоги проектування” [111], в порівнянні з лінеаризованою, розбіжність в результатах обчислень складає 10-15 % у бік зменшення в системі багаторічного прогнозування руслових деформацій.

4.4 Оцінка адекватності запропонованої моделі

Проектування інженерних споруд і конструкцій завжди супроводжується певним ризиком. Особливо ця теза є справедливою, коли мова йде про мостові переходи, які не тільки підлягають впливу статичних і динамічних навантажень від власної ваги та рухомого складу, але й протидіють природним чинникам, що мають випадковий, стихійний характер [92].

Не менш важливим чинником ризику є степінь адекватності математичної моделі, що відтворює руслові процеси в зоні впливу мостових переходів. Пряме визначення цієї адекватності полягає в співставленні розрахункових відміток дна з фактичними, що в дійсності зробити дуже важко. Натурних даних про руслові деформації на конкретних мостових переходах практично немає, і пояснюється це двома причинами. По-перше, такі натурні дослідження дуже небезпечні і великі за вартістю. По-друге, їх нема кому робити, адже вони не входять в обов’язки проектних організацій та експлуатаційних служб. Внаслідок потужної саморегулюючої спроможності руслового потоку, лабораторні дослідження на гідравлічних моделях мостових переходів мало перспективні, а перебіг руслових процесів в струмочках і великих річках зовсім інший. Для виконання своєї головної функції, що полягає в транспортуванні води і наносів, ріка пристосовується до конкретних умов, які в повній мірі неможливо відтворити в лабораторії.

Головною ознакою надійності мостових переходів є їх справна робота, і знаходиться вона в прямій залежності від їх генеральних розмірів, а також повної уяви про можливі переформування русла ріки за час нормативного терміну експлуатації. Саме з цієї причини гідравлічне обґрунтування генеральних розмірів мостових переходів посідає значне місце в забезпеченні їх надійності на етапі проектування.

Першочергове значення в комплексі задач гідравлічного обґрунтування мають прогнозування загальних руслових деформацій і регулювання потоку в зоні впливу мостових переходів на автомобільних дорогах.

Питання надійності вихідної гідрологічної інформації висвітлені в роботах Ю.В. Пісарєва, Л.Г. Бегама і В.Ш.Ципіна [113]. Систематичний виклад проблем надійності меліоративних систем, в тому числі і деформацій руслі каналів, міститься в роботі Ц.Є. Мірцхулави. Але застосування запропонованих Ц.Є. Мірцхулавим розробок до переходів через водотоки можливе тільки в частині загальних принципів. Цьому перешкоджають два моменти.

Перший полягає в реальній проблематичності збирання даних про частоту відмов на мостових переходах. Спостерігається різка недостатність таких матеріалів, а отримання репрезентативних даних ускладнюються роботою споруд переходів в різних гідроморфологічних умовах, і причини їх відмов не завжди пов'язані із закладеними інженерами-проектувальниками запасами. Для оцінки надійності об'єктів при невідомому розподілі відмов Ц.Є. Мірцхулава пропонує використання ймовірнісні нерівності, які потребують апріорних знань про максимальні і середні значення прогнозованих величин. На мостових переходах це навряд чи можливо, тому що внаслідок різноманітності зовнішніх чинників, що впливають на її режим, і унікальності внутрішніх механізмів саморегуляції, кожна річка в якійсь мірі неповторна

Другий має більш принциповий характер, бо постулює споруду старіючою, а її відмова відбувається через порушення фізико-механічних

властивостей матеріалів, що її складають. Мостовим переходам все це не властиво, і собливість їх роботи пов'язана з дією змінних і нетривалих в часі навантажень, розрахункова величина яких приймається відповідною піку розрахункової повені чи паводку. Таким чином, умовам роботи мостових переходів в більшій мірі підходить «нестаріюча» модель, де запаси в розмірах споруд залежать від величини пікових, але короткочасних навантажень, а не від календарного часу їх експлуатації.

Зважаючи на стохастичний характер руслового процесу на тлі безлічі випадкових змін в структурі потоку, розмірах і пересуванні наносних формувань, доцільно погодитись з концепцією В.Ш. Ципіна. Для визначення характеристики надійності η_n він використовує нормальний закон розподілу відхилень глибини загального розмиву від її середньостатистичного значення. При цьому характеристика надійності залежить від заданої ймовірності безвідмовної роботи споруди $P\%$ – наприклад, фундаменту руслової опори, і являє собою відношення детермінованої (аналітично визначеної) величини до її границі, яка ще допускає справну роботу споруди.

Характеристика надійності за своєю сутністю додає певний запас до розрахункової глибини загального розмиву, який повинен враховувати несприятливий вплив випадкових відхилень вихідних даних на стійкість руслових опор. В зв'язку з цим, найбільшу за час розрахункової повені глибину загального розмиву, як одну з складових розрахункового рівня розмиву PPP , потрібно помножувати на характеристику надійності для відповідної економічно-обґрунтованої ймовірності справної роботи мостового переходу. На річках з одномодальними гідрографами, де пік спостерігається один раз на рік, ймовірність безвідмовної роботи мостового переходу може бути прийнята $P\% = 99\%$, виходячи з терміну його експлуатації та ймовірності перевищення розрахункових рівня і витрат. На річках Карпатського регіону, де протягом року допускається можливість декількох паводків, ймовірність безвідмовної роботи повинна бути вищою.

Для порівняння результатів розрахунку залишкового за формулою (4.9) і максимального розмиву за формулою (4.10) було обрано мостовий перехід через р. Ворскла, що знаходиться неподалік міста Полтава. Міст розташований на 343 км автомобільній дорозі міжнародного значення М-03 Київ – Харків – Ростов на Дону. План мостового переходу показано на рисунку 4.9. 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 в 1982 р. та закінченого у 2010 році ДП «Укрдіпродор» (архівний номер 463).

Загальні відомості про р. Ворсклу. Довжина річки 464 км, площа водозбору 14700 км². Загальне падіння річки 134,7 м. Довжина річки до мосту 325 км, площа водозбору 11009 км². Річка бере початок з постійно діючих джерел, в 0,5 км північно-західніше с. Великі Маячки, на висоті 190 м над рівнем моря. Впадає вона у р. Дніпро з лівого берега, на 514 км від її гирла, у с.Переволочная, на висоті 55,3 м над рівнем моря. Середній ухил водної поверхні – 0,30 ‰.

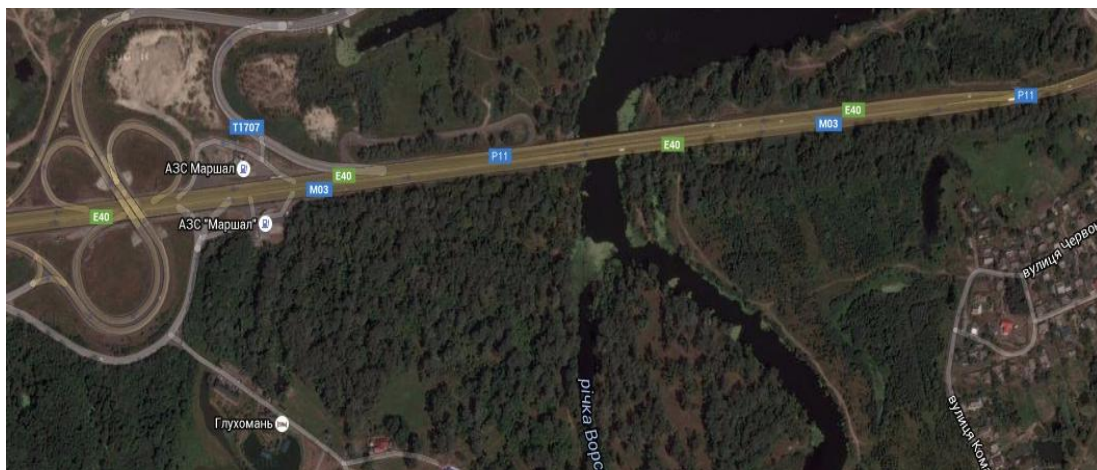


Рисунок 4.9 – План мостового переходу через р. Ворскла

Басейн річки має грушоподібну форму, довжина його 310 км, середня ширина 32 км, найбільша – 100 км. Верхня частина басейну розташована на південно-західних схилах Придніпровської низини. Ґрунти на правобережжі пілуватого-суглинисті, на лівобережжі – пілеватого-важкосуглинисті.

У верхній і нижній частині басейну рослинність степова, у середній – лісостепова. Долина річки у верхній частині річки звивиста, V-подібна, шириною від 0,5 км до 1,3 км (с. Покрівка), з опуклими помірно крутими, сильно розсіченими схилами висотою 30–45 м. Заплава двостороння, місцями лівобережна. Ширина її по довжині річки збільшується від 0,2–0,5 км у верхній частині басейну до 2,5–3,5 км в нижній частині басейну, найбільша – 7 км, найменша – 50 м.

Навесні заплава затоплюється шаром води 0,5 – 1,0 м при звичайному і 1,0 – 3,0 м при виключно високому паводку, тривалість затоплення 1-2 тижня. Ширина річки збільшується вниз за течією річки в середньому від 2-12 до 30-50 м, найбільша – 140 м (гирло), глибина на плесах – 1,5 – 3,5 м, на перекатах – 0,3 – 1,0 м. Переважна швидкість течії 0,1 – 0,4 м/с. Дно до м. Полтава рівне, нижче нерівне, переважно піщане, місцями мулистопіщане. Береги помірно розмивні, круті або обривисті, зрідка пологі висота їх збільшується в середньому від 0,3 – 1,0 м у верхній частині басейну до 3-4 м в нижній, нерідко вони зливаються зі схилами долини.

Весняна повінь починається в середині березня, в окремі роки в кінці лютого або початку квітня. Підйом рівня відбувається інтенсивно (до 2-3,9 м/добу) і в кінці березня - початку квітня спостерігається найвищий рівень весняного водопілля. Висота водопілля від 1,0 – 1,8 м до 3,6 – 3,8 м при звичайному паводку і відповідно від 1,3-2,4 до 6,0 – 7,0 м при виключно високому. Спад менш інтенсивний ніж підйом, триває він до кінця квітня – середині травня. Майже щороку спостерігається кілька дощових паводків заввишки від 0,3 до 1,7 м в звичайні роки і від 1,0 до 2,8 м в багатоводні. Найнижчі зимові рівні спостерігаються в січні.

Вихідними даними були: ряди спостережень найбільших рівнів води; криві витрат (рисунок 4.10); водомірний графік (рисунок 4.11) та гідрограф (рисунок 4.12).

В проекті був морфоствор по осі мостового переходу, на якому містилися глибини промірів дна русла до побудови мостового переходу в

1950-х роках та проміри глибин русла в 1982 р. вже після побудови мостового переходу.

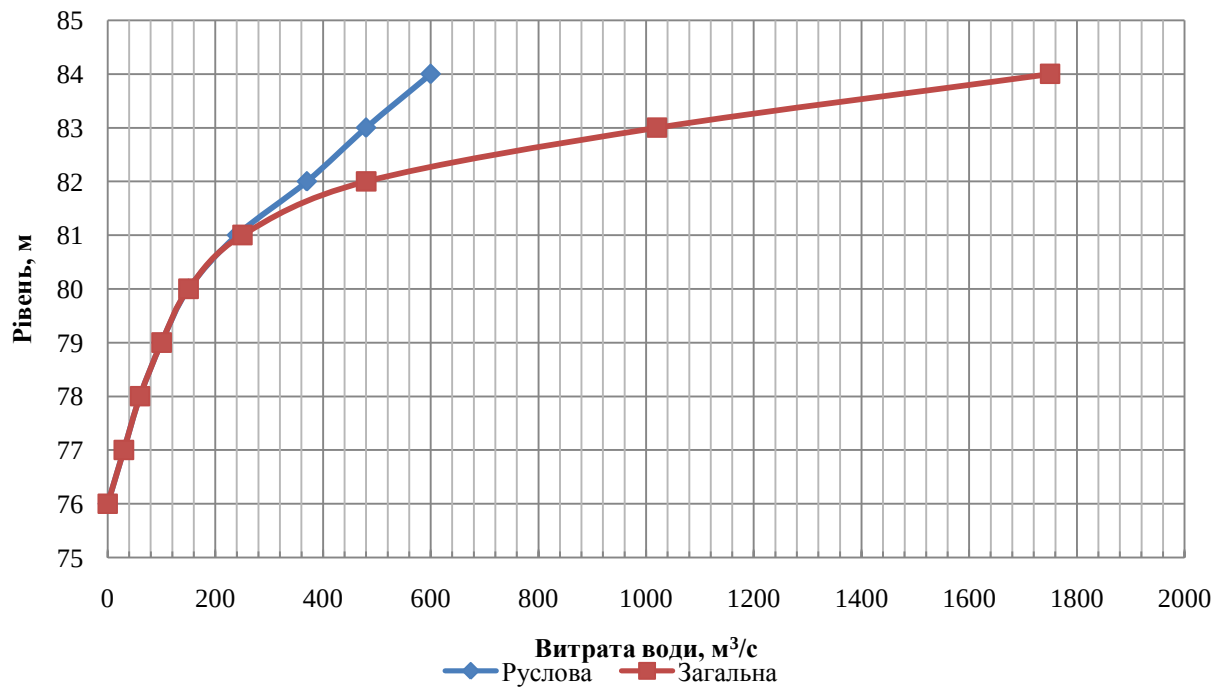


Рисунок 4.10 – Криві витрат р. Ворскла

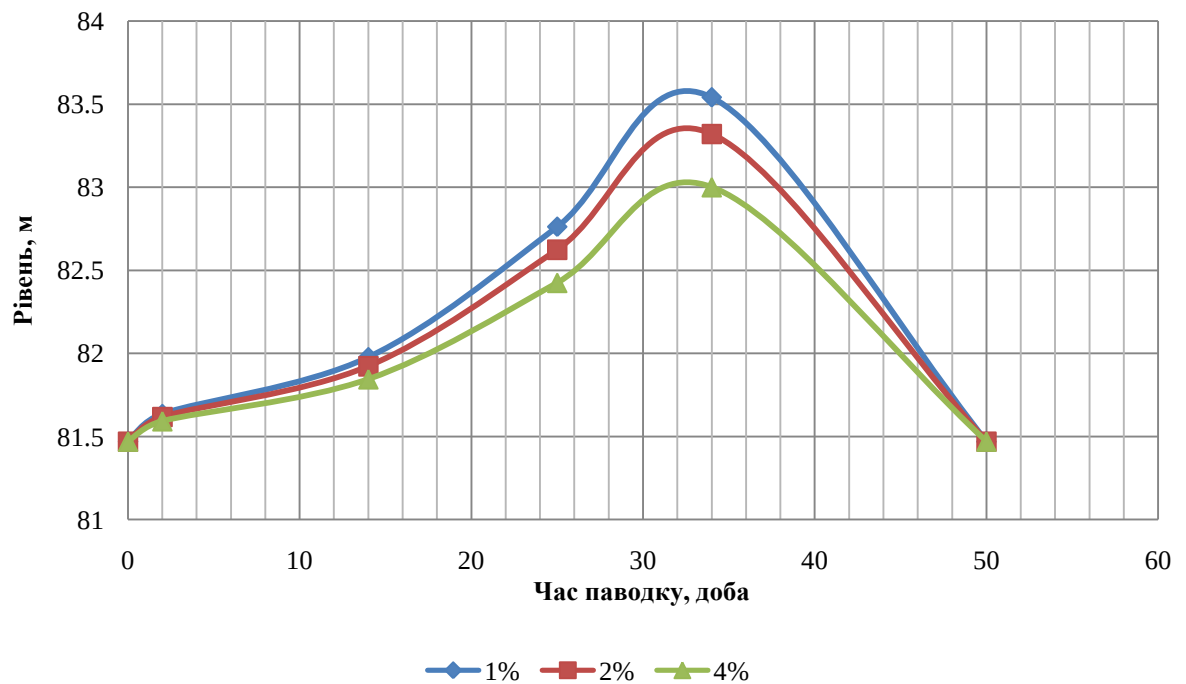


Рисунок 4.11 – Водомірний графік р. Ворскла

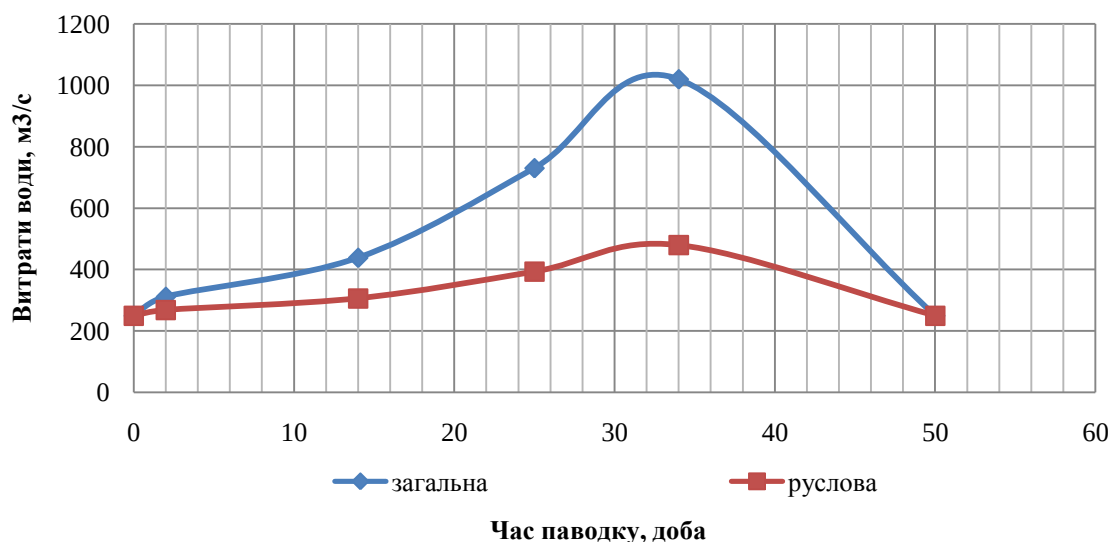


Рисунок 4.12 – Гідрограф 4 % р. Ворскла

Користуючись розробленою математичною моделлю, математичним моделюванням, можна перевірити теоретичні розрахунки з промірами глибин по морфоствору. Обробивши всю необхідну первинну інформацію, вихідні даними для розрахунку товщини змитого шару після проходження паводку 4 % забезпечення, занесені у таблиці 4.6 та 4.7.

Таблиця 4.6 – Вихідні дані для розрахунку залишкового розмиву після проходження паводку 4% забезпеченості на р. Ворскла

№ п/п	Параметр	Познач.	Значення
1	2	3	4
1	Відмітка дна до розмиву по середній глибині, м	Z_0	79,53
2	Відмітка рівня води при визначенні залишкового розмиву, м	$Z_{4\%}$	82,88
3	Середня глибина в руслі, м	h_{pn}	3,35
4	Коефіцієнт фізико-механічних властивостей ґрунтів	A	0,000530
5	Ширина русла, м	B_p	95

Використовуючи залежність (4.9) з лінійною характеристикою трансформацією руслової витрати та програму для визначення залишкового

розмиву (додаток А), визначаємо глибину залишкового розмиву, яка дорівнює $h_{\text{зал}} = 5,03$ м; товщина змитого шару при цьому – $\Delta h = 1,70$ м.

Таблиця 4.7 – Результати розрахунку залишкового розмиву після проходження паводку 4% забезпеченості на р. Ворскла

№ п/п	Параметр	Познач.	Значення
1	Довжина зони стиснення для залишкового розмиву, м	$l_{\text{сз}}$	130
2	Коефіцієнт стиснення потоку під мостом при визначенні залишкового розмиву за критеріальним рівнянням	$\beta_{\text{мз}}$	1,2
3	Інтегральна функція гідрографа при визначенні залишкового розмиву	Γ_3	$7,95 \cdot 10^{16}$
4	Середня глибина в руслі після розмиву, м	$h_{\text{зал}}$	5,03
5	Товщина змитого шару, м	Δh	1,70

Оскільки в записці проекту були проміри за 30 років, можна порівняти площу розмиву після проходження 4% паводку з натурними даними. Коефіцієнт розмиву в руслі тоді буде:

$$P = \frac{h_{\text{зал}}}{h_{\text{рп}}} = \frac{5,03}{3,35} = 1,51;$$

де $h_{\text{зал}}$ – це середня залишкова глибина в руслі, яка змодельована після проходження 4 % паводку;

$h_{\text{рп}}$ – це природна глибина в руслі.

Необхідно знайдені значення глибин розмиву порівняти з натурними замірами глибин. Результати порівнянь представлені на рисунку 4.13.

Аналізуючи дані, які наведені на рисунку 4.13, можна отримати такі дані: площа русла до побудови мостового переходу складала – $\omega_1 = 318,69 \text{ м}^2$, середня глибина в руслі – $h_1 = 3,35$ м; після промір глибин через 30 років експлуатації мостового переходу: $\omega_2 = 438,31 \text{ м}^2$, середня глибина в руслі – $h_2 = 4,61$ 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.

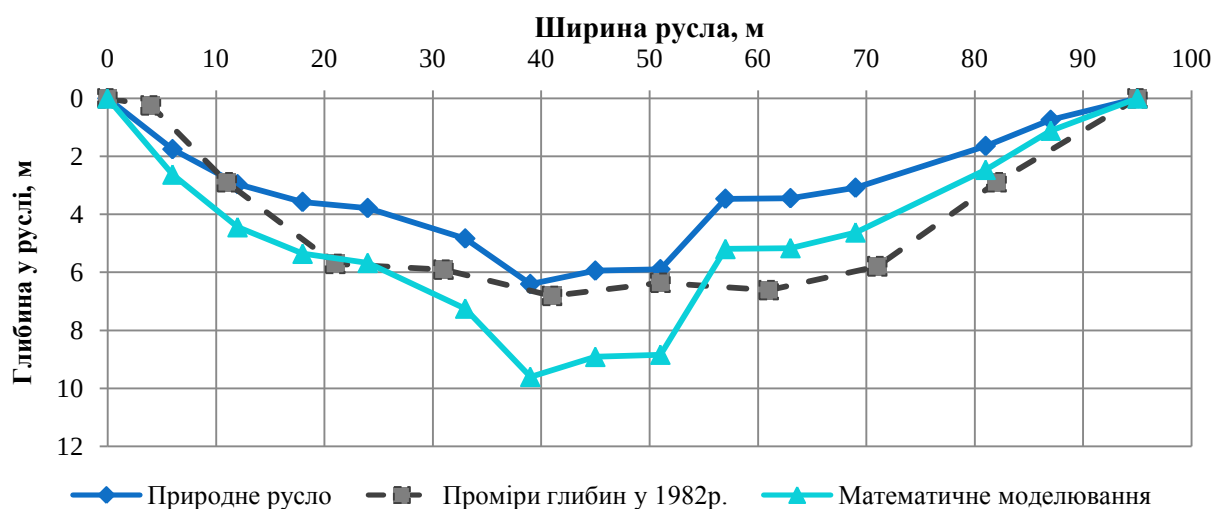


Рисунок 4.13 – Порівняння отриманих результатів математичного моделювання з натурними даними

4.5 Висновки по розділу 4

1. При визначенні коефіцієнта стиснення потоку для залишкового розмиву слід використовувати критеріальне рівняння залишкового розмиву.
2. Довжину зони стиснення для залишкового розмиву рекомендується приймати як проекцію верхової струмененапрямної дамби.
3. Враховувати багаторічне прогнозування руслових деформацій рекомендується при коефіцієнті стиснення потоку більше за 1,1 ($\beta_m > 1,1$).
4. Різниця обчислень при визначенні нижньої границі розмиву з застосуванням кубічного сплайну вираженого через моменти і вираженого через похили по площі розмиву складає до 10%, в залежності від гідроморфологічних особливостей річок.
5. Математичне моделювання найнижчої відмітки дна у руслі відрізняється від натурних спостережень на 8,3 %.

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 методу 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткачук С. Г. Теорія розмивів на мостових переходах / Сергій Григорович Ткачук. – К. : Донецьк: АТЗТ "Видавництво "Донеччина", 2009. – 200 с.
2. Славінська О. С. Теорія та методи прогнозування розмивів в зоні впливу мостових переходів / Олена Сергіївна Славінська. – К. : НТУ, 2014. – 300 с.
3. Белелюбський М. А. Заметки об определение отверстий мостов / М. А. Белелюбський // Журнал Министерства путей сообщений. – 1871. – № 1. – С. 1–3.
4. Каншин А. А. Расчет отверстий больших мостов методом гидравлических эквивалентов / А. А. Каншин // Журнал Министерства путей сообщения. – 1928. – № 1. – С. 5–8.
5. Срібнимй М. Ф. Нормы сопротивления движения естественных водотоков и расчет отверстий мостов по способу морфологических характеристик / М. Ф. Срібний. – М.: Гострансиздат, 1932. – 150 с.
6. Зброжек Ф. Г. Об устройстве мостов на судоходных и славных реках / Ф. Г. Зброжек // В кн: Труды IV съезда русских деятелей по водным путям. – 1998.
7. Попов И. В. Деформации речных русе и гидротехническое строительство гидроого–морфологическая теория руслового процесса и ее применение / И. В. Попов. – Л. : Гидрометеиздат, 1965. – 328 с.
8. Алтунин В. С. Деформации русел каналов / В. С. Алтунин. – М. : Колос, 1972. – 116 с.
9. Андреев О. В. Основы расчета мостовых переходов / О. В. Андреев. – М. : Высшая школа, 1971. – 145 с.
10. Болдаков Е. В. Переходы через водотоки / Е. В. Болдаков. – М. : Транспорт, 1965. – 422 с.

11. Кондратьев Н. Е. Условия непрерывности и дискретности в применении к русловому потоку / Н. Е. Кондратьев. // Метеорология и гидрология. – 1951. – № 12. – С. 24–27.
12. Маккавеев В. М. Турбулентность русловых потоков / В. М. Маккавеев. // Тр. ГГИ. – 1965. – № 124. – С. 40–54.
13. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 312 с.
14. Гришанин К. В. Теория руслового процесса / К. В. Гришанин. – М.: Транспорт, 1972. – 216 с.
15. Караушев А. В. Проблемы динамики естественных водных потоков / А. В. Караушев. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 392 с.
16. Караушев А. В. Теория и методы расчетов речных наносов / А. В. Караушев. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 272 с.
17. Леви И. И. Медленно-изменяющиеся движения жидкости в размываемых руслах с произвольным продольным профилем дна / И. И. Леви // Изв. НИИГ. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1941. – С. 5–25.
18. Леви И. И. О неустановившемся движении воды в размываемых руслах / И. И. Леви // Тр. ЛПИ. – 1948. – № 5. – С. 190–198.
19. Леви И. И. Динамика русловых потоков / И. И. Леви. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 252 с.
20. Леви И. И. Инженерная гидрология / И. И. Леви. – М.: Высшая школа, 1968. – 237 с.
21. Латышенков А. М. Лабораторные исследования размыва подмостовых русел / А. М. Латышенков. – М.: Изд. Водгео, 1948.
22. Лиштван Л. Л. К вопросу о расчетах общего размыва подмостовых русел / Л. Л. Лиштван // Техничко – информационный сб. – Мосгипротранс, 1956. – № 6.
23. Лиштван Л. Л. Некоторые вопросы расчета общего размыва подмостовых русел / Л. Л. Лиштван. // Тр. ВНИИ транс. стр-ва. – 1966. – № 17. – С. 114–122.

24. Лиштван Л. Л. Расчет общего размыва подмостовых русел / А. П. Иванчук, Л. Л. Лиштван // Транспортное строительство. – 1977. – № 3. – С. 46–47.

25. Херхеулидзе И. И. Вопросы гидрологии и гидравлики мостовых переходов / И. И. Херхеулидзе. – Тбилиси, 1958. – 120 с.

26. Кузьмин И. А. Балансовый метод расчета деформаций дна потока / И. А. Кузьмин, К. И. Россинский // В кн.: Труды Гидропроекта. – М.: Госстройиздат, 1964. – № 12. – С. 265–271.

27. Великанов М. А. Русловой процесс / М.А.Великанов. – М.: Физматгиз, 1958. – 395 с.

28. Кабулов В. Н. К вопросу технико-экономического обоснования размеров отверстия мостов / В.Н.Кабулов // В кн.: Гидравлика дорожных водопропускных сооружений. – Гомель, 1973. – С. 90–92.

29. Кондратьев Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Сنيщенко. – Л. : Гидрометеиздат, 1982. – 272 с.

30. Латышенков А. М. Струенаправляющие дамбы / А. М. Латышенков. – М. : Изд. Водгео, 1956. – 196 с.

31. Андреев О. В. Основные принципы расчета отверстий больших мостов / О. В. Андреев. – М. : Автотрансиздат, 1959. – 64 с.

32. Андреев О. В. Вопросы мостовой гидравлики и гидрологии / М. М. Журавлев, О. А. Рассказов, О. В. Андреев. – М.: Транспорт, 1967. – 200 с.

33. Андреев О. В. Проектирование мостовых переходов / О. В. Андреев. – М.: Транспорт, 1980. – 215 с.

34. Абрамов В. Ю. Методика построения кривой свободной поверхности на мостовом переходе: автореф. дис. на соиск учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта" / В. Ю. Абрамов. – Москва, 1974. – 24 с.

35. Федотов Г. А. Расчеты мостовых переходов с применением ЭЦВМ / Г. А. Федотов. – М. : Транспорт, 1977. – 208 с.
36. Komuro S. River-bed degradation below dams / D.B.Simons, S.Komuro // Proc. ASCE. J. Hydr. Div.– 1967. – vol. 93, № HY4. – P. 1–14.
37. Базилевич В. А. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанции и его влияние на русло / В. А. Базилевич, Е. В. Еременко, И. Л. Розовский. – К. : Наукова думка, 1967. – 276 с.
38. Савенко В. Я. Математические модели и методы расчета квазитрехмерных безнапорных потоков: монография / В. Я. Савенко. – К. : Техніка, 1995. – 184 с.
39. Verget, G. Mathematical model of movable bed applied to Isere upstream from Grenoble and movable of the River Durance at Saint Auban Plant, Unsteady Flow in Open Channels, Water Resources Publication Fort Collis / G. Verget. – Colorado, 1975. – P. 861–864.
40. Vries de, M. Solving river problem by hydraulic and mathematical models / M. de Vries // Deft. Hydr. Lab. Publ. – 1969.
41. Vries de, M. River Bed Variations Aggradation and degradation / M. de Vries // Delf Hydraulic Lab. Publ., Delf, The Netherlands. – 1969. – P. 107.
42. Латипов К. Ш. О русловых потоках с переменным расходом вдоль пути / К. Ш. Латипов, М. О. Шаюсупов. – Ташкент, 1979. – 192 с.
43. Наставления по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (НИМП–72). – М. : Транспорт, 1972. – 279 с.
44. Большаков В. А. Причины повреждения мостов в районе Карпат / В. А. Большаков // Автомобильные дороги. – 1972. – № 6. – С. 6–7.
45. Щодро О. Є. Швидкий алгоритм для моделювання течій в турбулентних водних потоках / О. Є. Щодро, Я. В. Ходневич // Гідравліка і гідротехніка: науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2008. – № 62. – С. 25–36.
46. Андреев О. В. Проектирование мостовых переходов с применением ЭЦВМ в 2 ч. Ч2 / О. В. Андреев, Г. А. Федотов. – М.: МАДИ, 1976. – 120 с.

47. Андреев О. В. Расчет русловых деформаций на мостовых переходах / О. В. Андреев. – М.: ЦНИИС, 1957. – 62 с.

48. Херхеулидзе И. И. Графические решения некоторых задач инженерной гидравлики и гидрологии в мостовом и гидротехническом строительстве / И. И. Херхеулидзе. – М. : Автотрансиздат, 1953. – 59 с.

49. Laursen E. M. Discussion of turbulent transfer mechanism and suspended sediment in closed channels / E.M. Laursen. – Am. Assoc. Civ. Eng. Trans., 1952. – P. 117.

50. Laursen E. M. The total sediments load of streams / E. M. Laursen. – NY : ASCE Proc., 1958. – P. 84.

51. Бернадский Н. М. Опыт теории и практики расчета прудов – холодильников / Н. М. Бернадский, Б. В. Проскуряков // Материалы по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1931. – № 5. – С. 128.

52. Великанов М. А. Общее уравнение деформации размываемого русла потоком / М. А. Великанов. // Изв. НИИГ. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1932. – С. 76–78.

53. Факторович М. Э. Развитие аналитического описания процесса русловых трансформаций / М. Э. Факторович. // В кн.: Труды корд. совещаний по гидротехнике. – 1976. – № 36. – С. 114–120.

54. Войнович П. А. Об уравнение размыва / П. А. Войнович, М. А. Деметьев // Изв. ВНИИГ. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1932.

55. Федотов Г. А. Программа гидравлических и русловых расчетов «Гидрам – 3» / Г. А. Федотов // Автомобильные дороги. – 1974. – № 1. – С. 22–24.

56. Федотов Г. А. Методика расчета размывов под мостами / Г. А. Федотов // Автомобильные дороги. – 1986. – № 1. – С. 28–30.

57. Хурсин С. Л. Интегрирование уравнения баланса наносов для отрезка транзитной струи потока / С. Л. Хурсин // Гидравлика и

гидротехника: Респ. межвед. научн.–техн. сб. – К. : Техніка. – 1978. – № 27. – С. 73–76.

58. Хурсин С. Л. Построение конечно – разностной модели двумерного неустановившегося потока в размываемом русле / С. Л. Хурсин // Гидравлика и гидротехника: Респ. межвед. научн.–техн. сб. – К. : Техніка. – 1979. – № 29. – С. 96–100.

59. Сборник программ. Изыскания и проектирования автомобильных дорог и железных дорог. Гидрологические расчеты мосовых переходов // М. : Оргтранстрой. – 1969. – № 6. – С. 5–63, 83–134.

60. Барышников Н. Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм / Н. Б. Барышников. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 280 с.

61. Егиязаров И. В. Транспортирующая способность открытых потоков / И. В. Егиязаров // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. – Энергетика и автоматика. – 1959. – № 5.

62. Железняков Г. В. Теоретические основы гидрометрии / Г. В. Железняков. – Л. : Гидрометеиздат, 1968. – 290 с.

63. Федотов Г. А. Изыскания и проектирование мостовых переходов / Григорий Анафасьевич Федотов. – М. : Издательский центр "Академия", 2005. – 304 с.

64. Ротенбург И. С. Вопросы гидравлического расчета и назначения отверстий мостов на переходах через равнинные реки / И. С. Ротенбург. – Саратов: Изд. Саратовского университета, 1960. – 232 с.

65. Лукашук Л. В. Общий размыв русел на мостовых переходах / Л. В. Лукашук. – М. : Транспорт, 1976. – 120 с.

66. Викулов Л. И. О методике расчета деформации русла с учетом раширения / Л. И. Викулов, И. А. Кузьмин // В кн.: Гидравлика сооружений и динамика речных русел. – М. : Изд. АН СССР. – 1959.

67. Викулова Л. И. Вопросы методики расчета саморазмыва каналов / Л. И. Викулова // Тр. Гидропроекта. – М. : Энергия. – 1964. – № 12. – С. 23–28.

68. Базилевич В. А. Расчет деформации дна и берегов гравийно-галечных русел / В.А.Базилевич // Гидротехническое строительство. – 1976. – № 11. – С. 31–34.

69. Базилевич В. А. Определение расхода взвешенных наносов в песчаных руслах рек / В. В. Козицкий, Н. К. Грибовская, В. А. Базилевич // Гидравлика и гидротехника: Респ. межвед. науч. – техн. сб. – К. : Техника. – 1988. – № 46. – С. 32–38.

70. Методические рекомендации по расчету деформаций русел и выбору защитно-регуляционных мероприятий на реках Украинский Карпат. – Киев, 1989. – 174 с.

71. Cunge J.A. Mobile bed fluvial mathematical models / J. A. Cunge, N. Perdrean // La Houille Blanche. – 1973. – № 7. – P. 561–580.

72. Chang H. H. Minimum stream power for rivers and deltas / J. C. Hill, H. H. Chang // JHYD, ASCE. – № HY12. – P. 103.

73. Chen Y. H. Mathematical modelling of alluvial channels / Y. H. Chen and D. B. Simmons // ASCE, Symposium on Modelling Techniques "Modelling 75". – 1975. – Vol. 1. – С. 3–5.

74. Нгуен Суан Трук. Упрощенный способ расчета верхнего предела общего размыва под мостами / Суан Трук Нгуен. // Автомобильные дороги. – 1973. – № 3. – С. 24.

75. Exner F. M. Uber die Wechselwirkung zwischen / F. M. Exner. – Wasser und Geschiebe in Flusser Sitzenberichte der Academie der Wissenschaften Wien. – 1925. – Н. 3–4.

76. Векслер А. Б. Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций / А. Б. Векслер, В. М. Доненберг. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.

77. Сакла Ш. Ш. Исследование общего размыва русла ниже плотин и упрощенный метод его расчета: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук.: спец. 05.14.09 "Гидравлика и инженерная гидрология" / Ш. Ш. Сакла. – Ташкент, 1964. – 19 с.

78. Скрыльников В. А. Прогноз общего размыва русла в нижнем бьефе низконапорных гидроузлов / В. А. Скрыльников // Тр. САННИИРИ. – 1968. – № 117. – С. 146–159.

79. Лыу Конг Дао. Аналитические и численные решения задачи неустановившегося движения жидкости и наносов в открытых потоках: автореф. дис. на соискание уч. степени докт.техн.наук.: спец. 05.14.09 "Гидравлика и инженерная гидрология" / Лыу Конг Дао. – Москва, 1982. – 41 с.

80. Tinney E. R. The process of channels degradation / E. R. Tinney // Journal of Geophysical Research. – 1961. – vol. 67, № 4. – P. 1475–1480.

81. Aksoy S. River–bed degradation downstream of dams / S. Aksoy // Proc. XIV Congress JACR.– Paris, 1971. – vol. 3. – P. 235–282.

82. Славінська О. С. Теорія та методи прогнозування розмивів в зоні впливу мостових переходів: дис. доктора техн.наук: 05.22.11 Автомобільні шляхи та аеродроми / О. С. Славінська. – К., 2009. – 280 с.

83. Савенко В. Я. Метод розрахунку та прогнозування розвитку загальних руслових деформацій в потоках з пасмовою структурою дна / О. С. Славінська, В. Я. Савенко // Автошляховик України: окремий випуск. Вісник північного наукового центру ТАУ. – ДП "Державтотранс НДІ проект", Укравтодор, 2006.

84. Славінська О. С. Дослідження динаміки турбулентності потоку в зонах розвитку деформацій підмостових русел / О. С. Славінська // Промислова гідравліка і пневматика: всеукраїнський науково–технічний журнал. – Вінниця, ВДАУ, АСПГП. – 2005. – № 4. – С. 30–38.

85. Славінська О. С. Метод прогнозування загальних руслових деформацій в двофазних потоках з пасмовим дном / О. С. Славінська // Дороги і мости: Збірник наукових праць: Т.ІІ. – К. :ДерждорНДІ, 2007. – № 7. – С. 189–198.

86. Славінська О. С. Визначення загальних руслових деформацій під мостовим переходом на основі квазітривимірного методу розрахунку

неоднорідних потоків / О. С. Славінська // Автошляховик України. – "ДП Державтотранс НДІпроект", Укравтодор. – 2008. – № 6. – С. 33–36.

87. Славінська О. С. Дослідження розвитку загальних руслових деформацій в зоні впливу мостового переходу / О. С. Славінська // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – Київ : НТУ, 2008. – № 75. – С. 286–295.

88. Ssaveno V. Ya. Hydrodynamic problem of flow past the structures by open flows / V.Ya. Ssavenko, E.S. Slavinskaya // Flow and Transport Processes in Complex Obstructed Geometries: from cities and vegetative canopies to industrial problems, NATO ASI, Institute of Hydromechanics of NASU. – May 4–5. – Kyiv, Ukraine. – P. 165–167.

89. Van Rijn, L. C. Sediment transport. Pt 2: suspended load transport / Van Rijn L. C. // J. Hydr. Eng. – 1984. – № 110. – P. 1613–1641.

90. Методика прогнозування розвитку загальних руслових деформацій біля струмененапрямних дамб мостових переходів та рекомендацій по усуненню цих деформацій : МРР 218–02070915–410–2004 / розроб. В. Я. Савенко, О. С. Славінська, О. Є. Щодро. – К. : Укравтодор : НТУ, 2004. – 27 с.

91. Ткачук С. Г. Основы аналитического прогноза русловых деформаций при стеснении рек в плане гидротехническими и транспортными сооружениями: дис. доктора тех.наук: 05.22.11 "Автомобільні шляхи та аеродроми" / Сергей Григорьевич Ткачук. – Киев, 1994. – 341 с.

92. Корецький А. С. Багаторінчий прогноз загальних руслових деформацій на мостових переходах: дис. кандидата техн. наук : 05.22.11 "Автомобільні шляхи та аеродроми" / Андрій Сергійович Корецький. – Київ, 2008. – 296 с.

93. Ткачук С. Г. Гідравліка. Гідрологія. Гідрометрія: підручник / С. Г. Ткачук. – Київ : Кафедра, 2013. – 392 с.

94. Ткачук С. Г. Прогнозування руслових деформацій на мостових переходах. Частина 3 і 4. / С. Г. Ткачук. – К. : Редакційно–видавничий відділ НТУ, 2004. – 98 с.

95. Великанов М. А. Динамика русловых потоков / М. А. Великанов. – Л. : Гидрометеиздат, 1955.

96. Клавен А. Б. Кинематическая структура турбулентного потока / А. Б. Клавен // Тр. ГГИ. – 1968. – № 147. – С. 134–157.

97. Гринвальд Д. И. Речная турбулентность / Д. И. Гринвальд, В. И. Никора. – Л. : Гидрометеиздат, 1979. – 312 с.

98. Гришанин К. В. Русловая турбулентность и транспорт наносов / Д. И. Гринвальд, К. В. Гришанин // В кн.: Русловые процессы. – Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда, 1988. – Т. 10, книга 1. – С. 9–20.

99. Сنيщенко Б. Ф. О скорости движения гряд в реках и лабораторных условиях / З. Д. Копалиани, Б. Ф. Снищенко // Труды ГГи. – 1978. – № 252. – С. 20–37.

100. Ткачук С. Г. Теоретическое обоснование формулы расхода речных наносов / С. Г. Ткачук // Гидравлика и гидротехника.: Респ. Межвед. Науч.–техн. Сб. – К. : Техніка. – 1997. – № 58. – С. 45–51.

101. Ткачук С. Г. Витрата незв'язних руслових наносів за умови донного режиму їх транспортування / С. Г. Ткачук // Гідравліка і гідротехніка. – 2012. – № 66. – С. 3–11.

102. Никинит И. К. Сложные турбулентные течения и процессы тепломассопереноса / И. К. Никинит. – К. : Наукова думка, 1980. – 238 с.

103. Ткачук С. Г. Прогнозування руслових деформацій на мостових переходах. Навчальний посібник / С. Г. Ткачук. – Київ, 2001. – 107 с.

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

105. Соловьева Л. Г. Экспериментальные исследования планового расширения потока при наличии водоотводных зон / Л. Г. Соловьева // Изв. ВНИИГ. – 1951. – Т. 46. – С. 33–52.

106. Ткачук С. Г. Экспериментальные исследования изменения руслового расхода в верхнем бьефе мостовых переходов / С. Г. Ткачук // Гидравлика и гидротехника : Респ. Межвед. Науч.–техн. Сб. – К. : Техніка. – 1985. – № 41. – С. 54–57.

107. 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. – Дніпропетровськ, 2010. – № 33. – С. 23–28.

108. Вишневський В. І. Гідрологічні характеристики річок України / О. О. Косовець, В. І. Вишневський. – Київ : Ніка–Центр, 2003. – 324 с.

109. Малі річки України: Довідник / за ред. А. В. Яцика. – К. : Урожай, 1991. – 296 с.

110. Паламарчук М. М. Водний фонд України: Довідниковий посібник / за ред. В. М. Хорєва, К. А. Алієва, Н. Б. Хакочевга. – К. : Ніка–Центр, 2001. – 392 с.

111. Мости та труби. Основні вимоги проектування : ДБН В.1.2-15:2009. – [Чинні від 2010-03-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 367 с. – (Державні будівельні норми України).

112. Цыпин В. Ш. Использование закономерностей ежегодных максимальных расходов воды в инженерной практике / В. Ф. Залесский, В. Ш. Цыпин // Гидротехническое строительство. – 1992. – № 7. – С. 45–47.

113. Бегам Л. Г. Надежность мостовых переходов / В. Ш. Цыпин, Л. Г. Бегам. – М. : Транспорт, 1984. – 253 с.

114. Ткачук С. Г. Види початкових умов для багаторічного прогнозування загального розмиву на мостових переходах / І. В. Башкевич,

С. Г. Ткачук // Вісник Національного транспортного університету. – Київ, 2008. – № 17. – С. 57–62.

115. Корецький А. С. Аналітична методика багаторічного прогнозування загального розмиву на мостових переходах / С. Г. Ткачук, А. С. Корецький // «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». – Київ : НТУ. – 2004. – № 70. – С. 15–21.

116. Барановская Г. Г. Микрокалькуляторы в курсе высшей математики: Практикум. / Г. Г. Барановская, И. Н. Любченко. – К. : Вища школа, 1987. – 288 с.

117. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1977. – 454 с.

118. 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. – Рівне, 2011. – № 22. – С. 572–578.

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

120. Лучшева А. А. Практическая гидрометрия / А. А. Лучшева. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 380 с.

121. Михайлов М. В. Подпор и поперечные уклоны воды в районе мостового перехода / М. В. Михайлов // Бюллетень Союзтранспроекта. – 1940. – № 3, 4.

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

ДОДАТОК А

ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ЗАЛИШКОВОГО РОЗМИВУ В ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ

Комп'ютерна програма дає можливість визначити залишковий розмив під мостом для будь-якого паводку заданої ймовірності перевищення. Крім того, зазначена програма дозволяє побудувати поздовжній профіль дна русла перед мостом для залишкового розмиву з використанням кубічного сплайну в похилах. Однак для цього необхідно виконати попередній розрахунок параметрів, які входять до основної залежності. В основі програми використано залежність (4.9) для розрахунку залишкового розмиву під мостом та залежності (3.36 – 3.38) для побудови поздовжнього профілю дна русла перед мостом для залишкового розмиву.

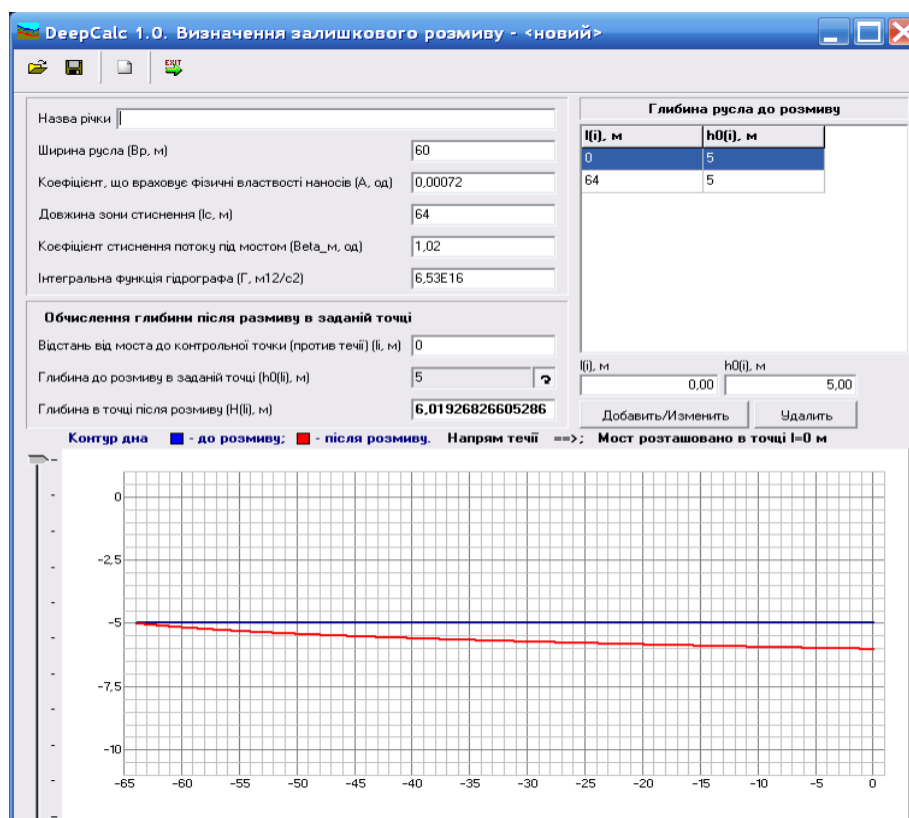


Рисунок А.1 – Комп'ютерна програма визначення залишкового розмиву

Головне вікно програми показано на рисунку А.1. Складається з декількох полів для вводу даних. В якості вхідних даних необхідно з

клавіатури ввести декілька параметрів в лівій частині, починаючи згори: «Назва річки» – потрібно зазначити річку, на якій обчислюється залишковий розмив; «Ширина русла ($B_r, м$)» – потрібно ввести ширину русла в метрах; «Довжина зони стиснення ($l_c, м$)» – необхідно зазначити довжину зони стиснення в метрах, яку визначають заздалегідь; «Коефіцієнт стиснення потоку під мостом ($Beta_m, од$)» – потрібно ввести коефіцієнт стиснення потоку під мостом, який визначають заздалегідь; «Інтегральна функція гідрографа ($\Gamma, м^{1/2}/с^3$)» – потрібно ввести інтегральну функцію гідрографа на момент визначення залишкового розмиву.

Обчислення залишкового розмиву відбувається в підрозділі «Обчислення глибини після розмиву в заданій точці». Для цього у графі «Відстань від моста до контрольної точки (проти течії) ($l_i, м$)» необхідно з клавіатури ввести значення відстані від моста до точки, в якій необхідно визначити залишковий розмив, а в графі «Глибина до розмиву в заданій точці ($h_o(l_i), м$)» ввести значення глибини до розмиву. Процес визначення залишкового розмиву перебігає в автоматичному режимі. Для виконання розрахунків знадобиться певний час, ознакою закінчення розрахунків буде поява в графі «Глибина в точці після розмиву ($H(l_i), м$)» певного значення.

Для побудови поздовжнього профілю русла до розмиву і після розмиву, в правій частині у підрозділі «Глибина русла до розмиву» необхідно з клавіатури ввести вихідні дані користуючись кнопками «Добавить/Изменить» та «Удалить». При цьому вводиться відстань від мостового переходу (проти течії річки) в графі « $l_i, м$ » та глибина до розмиву в графі « $h_o(i), м$ ». Побудова поздовжнього профілю відбувається в автоматичному режимі. Для виконання розрахунків знадобиться певний час, ознакою закінчення розрахунків буде поява в графі «Глибина в точці після розмиву ($H(l_i), м$)» певного значення та побудови в нижній частині програми графіка, який буде складатися з двох ліній: синього кольору – поздовжній профіль дна русла до розмиву; красного кольору – поздовжній профіль русла після розмиву.

ДОДАТОК Б

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахунок виконувався на р. Ворскла. Загальні дані для гідравлічного розрахунку наведені у п. 4.5 (водомірний графік, криві витрат, гідрограф і т.д.).

Оскільки в проекті були ряди спостереження найбільших річних рівнів до побудови мостового переходу, розрахунок витрати заданої ймовірності перевищення виконувався 2 способами: аналітичним і графо-аналітичним. До розрахунку було прийнято найбільші значення.

Визначення ширини отвору мостового переходу здійснюється за залежністю (4.4):

$$L_m = B_p \cdot \left[1 + \frac{P^{-1} - \tau}{1 - \tau} (\delta - 1) \right] = 95 \cdot \left[1 + \frac{1.5^{-1} - 0,394}{1 - 0,394} \cdot (13,97 - 1) \right] = 225 \text{ м},$$

де: $\tau = Q_{rp} / Q = 540 / 1372 = 0,394$;

$\delta = B / B_p = 1327 / 95 = 13,97$;

Q_{rp} і Q – загальна і руслова витрати води для паводку 1 % ймовірності перевищення;

B – ширина розливу ріки (відстань між урізами при паводку 1 % ймовірності перевищення;

B_p – ширини річки.

Максимальний коефіцієнт стиснення потоку під мостом визначається за (4.5):

$$\beta_m = \frac{Q}{Q_{rp} + q_{зп}(L_m - B_p)} = \frac{1372}{540 + 0,675 \cdot (225 - 95)} = 2,18,$$

де $q_{зп}$ - питома природна витрата заплав, яка визначається за (4.6):

$$q_{зп} = \frac{Q - Q_{рп}}{B - B_p} = \frac{1372 - 540}{1327 - 95} = 0,675 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Визначаємо довжину верховий струмененапрямних дамб за залежністю (4.10) та з допомогою таблиці 4.2:

$$l_b = \eta \cdot L_m = 0,577 \cdot 225 = 130 \text{ м}.$$

Знайдену довжину верхової струмененапрямної дамби, а точніше її проекцію, приймаємо як довжину зони стиснення для залишкового розмиву. Користуючись критеріальним рівнянням залишкового розмиву (4.2), визначаємо коефіцієнт стиснення потоку під мостом $\beta_{мз} = 1,2$.

Для визначення максимальної величини загального розмиву пропускаємо серію з 3 паводків: 4 %, 2 % і 1 % ймовірності забезпечення. Для перших двох паводків з серії визначаємо залишковий розмив, а для 1 % – максимальний.

Середня природна глибина у руслі до побудови мостового переходу складала $h_{pn} = 3,35$ м. Користуючись не явною залежністю (4.9) або комп'ютерною програмою (додаток А) і використовуючи залежність для розрахунку k (3.2), визначаємо величину залишкового розмиву у руслі після проходження паводку 4 % ймовірності забезпечення:

$$h_{зал4\%} = h_{pn} \cdot \left[1 + \frac{12 \cdot k \cdot A_g \cdot \Gamma \cdot \beta_p^3}{B_p^4 \cdot h^5} \right]^{1/3} = 3,35 \cdot \left[1 + \frac{12 \cdot 0,00053 \cdot 7,95 \cdot 10^{16} \cdot 1,2^3 \cdot (1,2 - 1)}{95^4 \cdot 130 \cdot 5,03^5} \right]^{1/3} = 5,03 \text{ м},$$

Залишкова відмітка розмитого дна під мостом після першої повені 4 % забезпеченості становить $Z_{зал} = РРВ4\% - h_{зал4\%} = 82,88 - 5,03 = 77,85$ (м), а товщина змитого шару наносів на кінець першої повені дорівнює:

$$\Delta h = Z_{\text{дн}} - Z_{\text{зал}} = 79,53 - 77,85 = 1,70 \text{ (м)}.$$

Аналогічно, визначаємо величину залишкового розмиву для паводку 2% ймовірності забезпечення: $h_{\text{зал}2\%} = 6,53 \text{ м}$; $Z_{\text{зал}2\%} = 76,35 \text{ м}$; $\Delta h = 3,18 \text{ м}$.

При проходженні паводку 1 % ймовірності перевищення, визначаємо максимальну величину загального розмиву. Ця величина досягається на піку розмиву, який відстає від піку паводку на 3-4 доби. Але для цього ще необхідно визначити максимальну довжину зони стиснення за (4.8):

$$l_c = \frac{B - L_m}{1 + \frac{L_{m3}}{l_{63}}} = \frac{1327 - 225}{1 + \frac{524}{708}} = 633 \text{ м},$$

де l_{m3} і l_{63} – довжина меншої і більшої заплави на піку паводку 1 5 ймовірності забезпечення.

Максимальна величина загального розмиву визначається за залежністю (4.1), яка міститься в ДБН В.2.3-22:2009 «Мости та труби. Основні вимоги проектування»:

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

$$7,19 \cdot \left[0,5 + \sqrt{0,25 + \frac{20 \cdot 0,00053 \cdot 1,12 \cdot 10^{17} \cdot 2,18^4 \cdot (2,18 - 1)}{633 \cdot 95^4 \cdot h_{j-1}^5}} \right]^{1/5} = 10,34 \text{ м},$$

Максимальна відмітка розмитого дна під мостом після серії паводків 4 %, 2 %, 1 % ймовірності забезпеченості становить $Z_{\text{зал}} = \text{РРВ}4\% - h_{\text{зал}4\%} = 83,54 - 10,34 = 73,20 \text{ (м)}$, а загальна товщина змитого шару наносів після проходження серії паводків дорівнює:

$$\Delta h = Z_{\text{дн}} - Z_{\text{зал}} = 79,53 - 73,20 = 6,33 \text{ (м)}.$$

ДОДАТОК В
АКТИ ТА ДОВІДКИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ПАТ „КИЇВСОЮЗШЛЯХПРОЕКТ” ПАО „КИЕВСОЮЗДОРПРОЕКТ”

№ 30 від 17.02.2015р.
на № _____ від _____

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Голова Правління

ПАТ «Київсоюзшляхпроект»

І. І. Войтович



А К Т

про встановлення програмного забезпечення для прогнозування
залишкового розмиву в зоні впливу мостових переходів
на автомобільних дорогах

Комісія у складі:

Голова комісії – головний інженер Фаль Андрій Євгенійович

Члени комісії – начальник технічного відділу Рожко Сергій Вікторович.

– головний інженер проектів Ятченко Володимир Васильович

Комісія констатує, що у ПАТ «Київсоюзшляхпроект» встановлено програмне забезпечення «Визначення залишкового розмиву», яке є результатом досліджень дисертаційної роботи І. В. Башкевич. Це програмне забезпечення застосовується для прогнозування багаторічного загального розмиву русел під мостами. Очікується значний соціально-економічний ефект від впровадження вказаної програми в проектування.

Цей акт складено для пред'явлення у спеціалізовану Вчену раду по захисту дисертаційних робіт.

Голова комісії

Члени комісії



А.Є. Фаль

С. В.Рожко

/В. В.Ятченко

ДЕРЖАВНЕ АГЕНСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО –
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ІНСТИТУТ
З ПРОЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ
ДОРОЖНЬОГО ГОСПОДАРСТВА
УКРДІПРОДОР



03680, м. Київ, Повітрофлотський пр-кт, 39/1
тел./факс: (044) 249-84-83
e-mail: okt@diprodor.com

“16” 04 2015 р.

№ 343-09

ДОВІДКА

про впровадження наукових розробок аспіранта
Національного транспортного університету
Башкевич Ірини Василівни

Головні наукові результати дисертаційної роботи Башкевич І.В., полягають у створенні моделей та алгоритмів визначення залишкового розмиву та його основних параметрів в системі багаторічного прогнозування руслових деформацій, що дозволить підвищити надійність прогнозів загального розмиву за весь термін експлуатації мостових переходів на автомобільних дорогах, були впроваджені при проектуванні транспортних споруд в ДП «Укрдіпродор».

Методи досліджень, які застосовуються в роботі відповідають сучасним тенденціям теоретичних досліджень руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів.

Впровадження практичних аспектів дослідження, на основі вдосконалених прогнозів, призведе до суттєвого зменшення пошкодження мостів при високих паводках і повенях.

Довідку складено для подання у спеціалізовану вчену раду по захисту дисертаційних робіт.

Начальник відділу «Будівництво
автотранспортної магістралі
в м. Запоріжжі»



Г.А.Парфесса



ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)

Державне підприємство

«Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»
ДП «ДерждорНДІ»

03113, м. Київ,
проспект Перемоги, 57
код ЄДРПОУ 03450778

тел/факс 456-34-15
e-mail: dornauka@post.com.ua
www.dorndi.org.ua

24.02.2015 № 22.2-16/-164

на № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження наукових розробок аспіранта
Національного транспортного університету Башкевич Ірини Василівни

Результати наукових дослідження Башкевич І.В. впроваджені при обстеженнях та паспортизації мостових переходів на дорогах загального користування у Вінницькій області (договір № 25 від 14 жовтня 2014 р.), Чернігівській області (договір № 12105 від 23 травня 2012 р.), Київській області (договір № 88-13 від 25 червня 2013 р.).

Для розрахунку найнижчої відмітки дна русла після загального розмиву були використані такі дослідження:

- математична модель залишкового розмиву на мостових переходах;
- алгоритм розрахунку величини залишкового розмиву під мостом;
- побудова поздовжнього профілю дна русла до і після розмиву вище створу мостового переходу.

Використання названих результатів дало можливість підвищити надійність інженерних розрахунків шляхом врахування небезпечних для стійкості мостових переходів деформацій дна русла.

Довідку складено для подання у спеціалізовану вчену раду по захисту дисертацій.

Перший заступник директора
з наукової роботи



В.К.Вирожемський

008650

456-26-48
Полюга Р.І.

ДОВІДКА
про впровадження

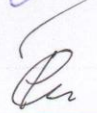
Результати дисертаційної роботи Башкевич І. В. за темою «Модель залишкового розмиву в зоні впливу мостових переходів на автомобільних дорогах» впроваджено в навчальний процес, а саме при викладанні дисципліни «Розвідування і проектування мостових переходів і тунельних пересічень» для студентів за напрямом «Будівництво».

Проректор з навчальної роботи,
професор



 О. К. Гришук

Завідувач кафедри мостів і тунелів,
професор

 С. Г. Ткачук

ДОДАТОК Г
АВТОРСЬКІ СВДОЦТВА

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 58163

Літературний письмовий твір наукового характеру "Критеріальне рівняння залишкового розмиву"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Ткачук Сергій Григорович, Башкевич Ірина Василівна**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Ткачук Сергій Григорович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Башкевич Ірина Василівна, вул. Суворова, 1, м. Київ; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації

20.01.2015

Голова Державної служби
 інтелектуальної
 власності України
А.Г.Жарінова






 УКРАЇНА

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 58161

Літературний письмовий твір наукового характеру "Застосування кубічного сплайну вираженого через похили в якості початкових умов при визначенні залишкового розмиву"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Ткачук Сергій Григорович, Башкевич Ірина Василівна**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Ткачук Сергій Григорович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Башкевич Ірина Василівна, вул. Суворова, 1, м. Київ; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 20.01.2015

Голова Державної служби
 інтелектуальної
 власності України

А.Г.Жарінова





УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 53132

Науковий твір "Визначення залишкового розмиву"
(вид, назва твору)

Автор(и) Ткачук Сергій Григорович, Башкевич Ірина Василівна
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 14.01.2014



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня

M. V. Koviya