

Міністерство освіти і науки України
Національний транспортний університет

ЦИНКА АНАТОЛІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 627.15

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ РОЗМИВІВ НА ЗАПЛАВАХ В
ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ**

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному транспортному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

Доктор технічних наук, професор
Славінська Олена Сергіївна,
Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, м. Київ
декан факультету транспортного будівництва

Офіційні опоненти:

Доктор технічних наук, професор
Солодкий Сергій Йосипович,
Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України, м. Львів
завідувач кафедри автомобільних доріг та мостів

Кандидат технічних наук, доцент,
Шинкарук Любомир Антонович,
Національний університет водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України,
м. Рівне
завідувач кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки

Захист відбудеться „ 18 ” грудня 2020 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, ауд. 209.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного транспортного університету за адресою: 01103, м. Київ, вул. Михайла Бойчука, 42.

Автореферат розісланий „ 17 ” листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



О.Ю. Усиченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Підтвердженням актуальності досліджень служить аналіз руйнувань мостових переходів, які зазнають найбільшої шкоди від стихійного лиха – високих повеней. Деформації річища, заплавних ділянок, розмиви проміжних опор та стоянів можуть досягати таких критичних розмірів, що стають основною причиною аварій на мостах. Мостовий перехід містить у собі комплекс складних і дорогих споруд, витрати на будівництво та експлуатацію яких залежать від вибору місця переходу, правильного призначення конструкцій та їхніх генеральних розмірів.

У свою чергу, мостові переходи відносяться до такої категорії споруд, які порушують природні форми русла річок та створюють своїми зовнішніми контурами додаткове вихроутворення у водному потоці. Споруди, охоплюючи не тільки русло річки, а й частини заплав, призводять до таких змін поля швидкостей течій, при яких транспортуюча здатність потоку розподіляється дуже нерівномірно. Після перекриття частини заплав по ширині насипами підходів вода починає притікати до мосту, через стислий перетин річки проходять збільшені витрати води.

На заплавних ділянках відбувається територіальний перерозподіл водних ресурсів, виникає проблема у регулюванні стоку, прогнозуванні пропускної здатності та розвитку деформацій. Фактори, що обумовлюють розвиток розмивів на заплавних ділянках, кардинально відрізняються від відповідних процесів у руслах. Геоморфометрія заплавних ділянок характеризується наявністю значної рослинності, намулків від попередніх повеней та паводків і обумовлює генетичну несхожість з руслами. Заплава представлена у своїй верхній частині рослинним ґрунтом, під яким в нижній зоні – велика ймовірність присутності піщаних та супіщаних ґрунтів. При виході русла на заплаву рослинність працює за принципом гасника швидкостей та зумовлює додаткову турбулентність в придонній зоні. Швидкості на заплавній ділянці, а отже і потенціальна енергія потоку, будуть значно меншими ніж в руслі через меншу витрату. Заплавний потік, як і русловий, є гетерогенним, насиченим зависсю, яка за рахунок гасіння швидкості потоку осідатиме на дні. Під час паводку швидкість буде наростати, а рослинний ґрунт, як правило, не має достатніх механічних властивостей, щоб опиратися деструктивним процесам. Значний же час протікання паводку зумовлює вирівнювання відміток дна русла та низу заплави. У результаті цієї взаємодії можна спостерігати звуження русла та утворення нових заплав або розширення русла за рахунок розмиву заплави. Для мостових переходів небезпечними є саме ерозійні процеси.

Існуючі методи розрахунку розмивів в зоні впливу мостового переходу в неповній мірі враховують процеси, що протікають на заплавних ділянках. Розмиви на двох характерних частинах отвору мосту відбуваються з різних причин. Неврахування характерних відмінностей роботи заплавного та руслового потоків призводить до викривлення результатів та до неправильної оцінки ситуації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні дослідження теоретичного та прикладного характеру виконані згідно з тематикою науково-дослідних робіт, що виконувались кафедрою транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету та Державного

підприємства «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»: «Удосконалення системи управління станом автомобільних доріг та методів їх оцінки», № РК 0116U002491; «Виконати аналіз та розробити зміну до ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво», № РК 0117U001932; «Виконати аналіз та розробити пропозиції щодо удосконалення моделей оцінювання і прогнозування ресурсу мостів, що знаходяться в експлуатації», № РК 0118U000775; «Виконати аналіз вимог європейських норм на проектування мостів та розробити пропозиції щодо удосконалення вітчизняних будівельних норм на проектування мостів і труб», № РК 0118U000765.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в розробці методу прогнозування деформацій на заплавах в зоні впливу мостового переходу на основі запропонованих математичних моделей зависенесних потоків, з урахуванням наявності елементів рослинності, сил опору розмиву дрібнозернистих ґрунтів, обтікання мостових опор.

Для досягнення мети дисертаційного дослідження були поставлені такі задачі:

- проаналізувати існуючі методи визначення розмивів на заплавах та визначити силові фактори, які враховують опір розмиву дрібнозернистих ґрунтів, опір при обтіканні рослинності на заплавах ділянках та опір при обтіканні мостових опор;
- розробити математичні моделі для зависенесного заплавного потоку з трав'яною рослинністю при дотриманні узгодженості з полем тиску та з урахуванням силових факторів;
- сформулювати початкові та межові умови для реалізації запропонованих математичних моделей заплавного потоку з елементами рослинності;
- розробити метод розрахунку загального та максимального розмивів на заплавах ділянках в зоні впливу мостових переходів;
- на основі отриманого методу розробити методіку прогнозування розмивів на заплавах та провести розрахунок деформацій заплавних ділянках рівнинної річки в зоні впливу мостового переходу.

Об'єкт дослідження – процеси деформацій на заплавах ділянках в зоні впливу мостових переходів.

Предмет дослідження – методи прогнозування деформаційних процесів на заплавах в зоні впливу мостових переходів.

Методи дослідження: використання теорії механіки суцільного середовища та неоднорідних потоків, методи математичного моделювання, методи числового моделювання для обробки результатів експериментальних досліджень та для підтвердження адекватності запропонованих математичних моделей.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше отримано модельні форми рівнянь для зависенесного заплавного потоку з трав'яною рослинністю з врахуванням сили опору розмиву дрібнозернистих ґрунтів на основі загального рівняння переносу теорії неоднорідних потоків;

- вперше отримано модельні форми рівнянь для зависенесного заплавного потоку з врахуванням сили опору мостових опор;
- розроблено метод розрахунку загального розмиву заплавних ділянок на основі запропонованої математичної моделі для зависенесного заплавного потоку з трав'яною рослинністю в зоні впливу мостового переходу;
- розроблено методи розрахунку максимального розмиву в підмостовій частині заплави на основі запропонованої математичної моделі заплавного потоку з врахуванням сили опору мостових опор.

Практичне значення отриманих результатів: полягає в тому, що розроблені методи розрахунку дозволяють: підвищити науково-інженерний рівень розв'язування народногосподарської задачі взаємодії відкритих водних потоків із гідротехнічними об'єктами; більш обґрунтовано призначати необхідні запаси для планових та висотних розмірів споруд мостових переходів, глибини закладання фундаментів опор мостів; підвищити надійність та довговічність споруд мостових переходів; замінити тривалі, ускладнені натурні та експериментальні дослідження ефективним математичним моделюванням; проводити багатофакторні числові експерименти з прогнозуванням розвитку деформацій в річкових потоках у реальному масштабі часу.

Розроблені та впроваджені на галузевому рівні в організаціях, які входять у сферу управління Державного агентства автомобільних доріг України (УКРАВТОДОР), Зміни № 1 до ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво».

На замовлення проектного інституту Укрдіпродор було виконано прогноз деформацій на реальному мостовому переході через р. Сіверський Донець біля с. Брусівка на автомобільній дорозі Т-05-14 Добропілля – Лиман, км 83+575.

Результати дисертаційної роботи були використані в навчально-методичних комплексах дисциплін „Транспортні споруди на дорогах”, для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП „Автомобільні дороги, дороги та вулиці населених пунктів” та „Розвідування і проектування мостових переходів і тунельних пересічень”, для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП „Мости та транспортні тунелі”, при формуванні програм лекційних занять та в дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, які виносяться на захист, отримано автором самостійно. У спільних публікаціях здобувачем: [1, 2] запропоновано математичну модель для зависенесного заплавного потоку з трав'яною рослинністю при дотриманні узгодженості з полем тиску; [3] – проведено аналіз причини виникнення деформацій на заплавних ділянках та методи визначення нерозмивних швидкостей; [4] – встановлений кількісний критерій для мостів, що перебувають у п'ятому (непрацездатному) стані, який дозволяє на основі даних обліку в АЕСУМ швидко визначити доцільність капітального ремонту або реконструкції моста замість його закриття і заміни новим; [5] – представлено розрахунок зони впливу мостового переходу на р. Сіверський Донець на автомобільній дорозі Т-05-14 в межах Донецької області; [6] – запропонована двовимірна математична модель заплавного потоку, яка

дозволяє визначити розподіл середніх швидкостей та глибин з дотриманням узгодженості з полем тиску та з урахуванням особливостей досліджуваної області з опорами на заплавних ділянках в створі мостового переходу; [7] – проведено аналіз розмивних процесів на заплавах з урахування їх геоморфології; [8] – проаналізовано принципи призначення генеральних розмірів споруд мостових переходів; [9] – представлено метод розрахунку розмивів на заплавах, який враховує наявність зависі та суттєвий вплив опору від елементів рослинності на динаміку заплавного потоку; [10] – наведено метод прогнозування деформацій на заплавах з урахуванням обтікання мостових опор; [11] – проаналізовано перспективи впровадження контрактів Fidic в дорожнє господарство України.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в роботі результатів: підтверджується застосуванням фізично обґрунтованих (на основі експериментальних даних) математичних моделей, коректною постановкою межових умов, чітким математичним описом числових алгоритмів, співставленням числових розрахунків з результатами теоретичних та експериментальних досліджень інших авторів, апробацією результатів роботи на різних рівнях.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: щорічній 76 науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів Національного транспортного університету (2020 р.); IX Міжнародній науково-практичній конференції “Actual aspects of development in the context of globalization”, 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія; XI Міжнародна науково-практична конференція “Theoretical foundations of modern science and practice”, 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія; Міжнародній науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво», 28-29 травня 2020 р., м. Одеса, Україна.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 11 наукових праць, у тому числі: 5 у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (1 стаття у виданні, яке включене до наукометричної бази Scopus); 1 стаття у зарубіжних періодичних наукових виданнях; 3 у збірниках праць за матеріалами наукових конференцій; 1 стаття додатково відображає наукові результати дисертації (у періодичному фаховому виданні, що входить до переліку МОН України).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 149 найменувань та три додатки. Основний текст викладений на 135 сторінках. Текст ілюструється 22 рисунками і містить 7 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано доцільність та актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення. У вступі також розкривається особистий внесок автора, питання апробації результатів, публікації, загальний обсяг і структура роботи.

У першому розділі проаналізовано загальні принципи призначення генеральних розмірів споруд мостових переходів, процес формування заплавного потоку під час паводку в зоні їх впливу, основні факторів, які обумовлюють розвиток розмивів на заплавах, та методи визначення нерозмивних швидкостей. Для вирішення цієї задачі у вітчизняній і закордонній літературі запропонований цілий ряд методів, які розрізняються методологічним підходом, повнотою врахування різних факторів, що визначають інтенсивність розвитку деформацій на заплавах. Методи прогнозування деформацій на заплавах для різних географічних регіонів висвітлені в роботах Г.В. Желєзнякова, В.Н. Гончарова, Г.І. Шамова, А.М. Мухамедова, Б.І. Студеничникова, Г.І. Трофимова, І.І. Леві, К.В. Гришаніна, П.В. Єгізарова, В.Ф. Толмази, М.Б. Баришнікова та ін.

Геоморфометрія заплавних ділянок характеризується наявністю значної рослинності, намулів від попередніх повнів та паводків і обумовлює генетичну несхожість з руслами. Процес виходу річки на заплаву можна поділити на два періоди: період виходу руслового потоку на заплаву, період одночасної роботи руслового та заплавного потоків. В заплавному потоці можна виділити три процеси, що формують поле мутності твердої фази: донащення, транспортування та осідання.

Для заплав не запропоновано математичних моделей, які дозволяють враховувати розглянуті особливості цих ділянок, особливо стосовно розподілу рослинності та намулу. Існуючі моделі дають можливість визначити розподіл середньої по вертикалі швидкості над шаром рослинності однорідних потоків з урахуванням коефіцієнта гідравлічної шорсткості, що в кінцевому результаті не дозволяє отримати реальний розподіл швидкісної структури та деформацій.

Глибини на заплавній ділянці отвору мосту після розмиву визначаються за нерозмивною швидкістю для ґрунтів, що складають цю ділянку. Наведений огляд робіт показує, що на сьогодні відсутній єдиний підхід до врахування впливу неоднорідності ґрунту на величину нерозмивної швидкості, це свідчить про складність оцінки критерію граничної стійкості неоднорідної за крупністю суміші часток, які складають заплаву.

Представлений аналіз фізичної моделі формування заплавного потоку стосовно розподілу наносів під час повеней та паводків в зоні впливу мостового переходу є підґрунтям для отримання аналітичної апроксимації з визначення величини розмивів на заплаві з урахуванням розподілу швидкості всередині шару рослин.

У другому розділі розроблено математичну модель зависеного потоку з трав'яною рослинністю для прогнозування розподілу глибин і швидкостей на заплаві. Основою для розроблення математичної моделі руху заплавного потоку в зоні впливу мостового переходу є рівняння динаміки реальної рідини в „напруженнях”, або рівняння Нав'є-Стокса та рівняння Рейнольдса. Для отримання рівнянь осередненого турбулентного руху Рейнольдсом запропонований прийом заміни актуальних швидкостей V_i та тиску p на осереднені $\bar{V}_i$, $\bar{p}$ та пульсаційні V'_i , p'_i . Ці рівняння відрізняються від рівняння Нав'є-Стокса наявністю додаткового тензора турбулентних або рейнольдсових напружень $\overline{V_i V_j}$. Для практичних цілей і

зручності роботи рівняння Рейнольдса доцільно представити в скалярній розгорнутій формі через проекції на осі декартових координат з урахуванням вищенаведеного зі знехтуванням в'язких напружень $\frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j}$:

$$\frac{\partial \bar{V}_1}{\partial t} + \frac{\partial \bar{V}_1^2}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{V}_1 \bar{V}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{V}_1 \bar{V}_3}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho_{LS}} \frac{\partial p}{\partial x_1} - \frac{\partial \bar{V}_1^2}{\partial x_1} - \frac{\partial \bar{V}_1 \bar{V}_2'}{\partial x_2} - \frac{\partial \bar{V}_1 \bar{V}_3'}{\partial x_3} - \bar{f}_{P1}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{V}_2}{\partial t} + \frac{\partial \bar{V}_2 \bar{V}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{V}_2^2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{V}_2 \bar{V}_3}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho_{LS}} \frac{\partial p}{\partial x_2} - \frac{\partial \bar{V}_2 \bar{V}_1'}{\partial x_1} - \frac{\partial \bar{V}_2^2}{\partial x_2} - \frac{\partial \bar{V}_2 \bar{V}_3'}{\partial x_3} - \bar{f}_{P2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{V}_3}{\partial t} + \frac{\partial \bar{V}_3 \bar{V}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{V}_3 \bar{V}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{V}_3^2}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho_{LS}} \frac{\partial p}{\partial x_3} - \frac{\partial \bar{V}_3 \bar{V}_1'}{\partial x_1} - \frac{\partial \bar{V}_3 \bar{V}_2'}{\partial x_2} - \frac{\partial \bar{V}_3^2}{\partial x_3} - g - \bar{f}_{Ch} - \bar{f}_{P3}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{V}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{V}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{V}_3}{\partial x_3} = 0. \quad (4)$$

де x_i ($i = 1, 2, 3$) – координати; $\bar{\rho}_{LS}$ – густина води, кг/м^3 ; f_{Ch} – сила зчеплення або сила опору відриву зерна ґрунту; f_{Pi} – сила опору рослинності; g – проекція об'ємної сили на вісь x_3 .

Наведена система рівнянь турбулентного руху, які описують гідродинамічне поле швидкостей, тиску у водостоках, є незамкненою, тому числова реалізація її дискретних аналогів пов'язана з великими труднощами. Для розв'язування прикладних задач гідродинаміки доцільно використовувати наближені математичні моделі течій, в яких враховують тільки головні, визначальні фактори.

Сила зчеплення – це один із факторів, від якого залежить підвищення опору розмиву дрібнозернистих ґрунтів (діаметром менше 0,10 – 0,15 мм), відкладених, як правило, на заплавах ділянках рівнинних річок. Згідно проведених досліджень у роботах Ц. Е. Мірцхулаві, силу опору відриву множини часток можна визначити за залежністю:

$$\bar{f}_{Ch} = \frac{k_{Cp} C_{ch} \cdot \bar{S} g}{C_{\phi 1} D}, \quad (5)$$

де k_{Cp} – межа втомленості розриву зв'язних ґрунтів; C_{ch} – зчеплення ґрунту у стані повного водонасичення, кг/м^2 ; $\bar{S}$ – розподіл зважених наносів по вертикалі або мутність потоку, формула для визначення наведена далі; $C_{\phi 1}$ – перший коефіцієнт форми частки наносів, дорівнює відношенню об'єму частки до діаметра рівновеликого шару у третьому ступені; D – діаметр часток наносів, м.

Поверхня заплавної частини переважно покрита рослинністю, різною за густотою та розмірами заростів, що впливає на пропускну здатність заплави. Сила опору рослинності визначається за залежністю:

$$\overline{f_{pi}} = \frac{C_X s_p}{2\overline{V}} \left(\overline{V^2 V_i} + \overline{V_j V_j V_i'} \right), \quad (6)$$

де $V = \sqrt{\sum_{i=1 \div 3} \overline{V_i^2}}$ – актуальна швидкість; C_X – коефіцієнт опору рослинності;

s_p – загальна міделева площа, яка розподілена у об'ємі шару, визначається за залежністю:

$$s_p = \frac{D_{cm} \Delta z_{cm.}}{\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3}, \quad (7)$$

де D_{cm} – діаметр стебла рослини, що обтікається, $D_{cm} = 7 \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta z_{cm.}$ – частина стебла рослини, що обтікається, за висотою, м.

Задачі розрахунку гідродинамічних полів швидкостей та тиску в проривних та штучно стиснутих потоках відносяться до задач теорії мілкої води, оскільки вертикальний розмір (глибина потоку) суттєво менша від горизонтальних розмірів, довжини та ширини. Це дозволяє розглядувати розподіл середніх за глибиною швидкостей у двовимірній постановці.

Наведемо рівняння розподілу швидкісної структури та глибини заплавного потоку в наближенні до двовимірних. Ці рівняння отримаємо із загальних тривимірних рівнянь гідродинаміки (1) – (4) шляхом інтегрування останніх по вертикалі від відмітки дна z_o до вільної поверхні H , тобто по глибині потоку $h = H - z_o$. Середнє за глибиною значення будь-якої змінної функції – характеристики потоку $\Phi(x_1, x_2, x_3, t)$ позначимо ламаними дужками:

$$\langle \Phi \rangle = \frac{1}{h} \int_{z_o}^H \Phi dx_3. \quad (8)$$

Інтегруючи рівняння (3), у результаті отримано закон розподілу осередненого гідростатичного тиску по вертикалі, який використаний при інтегруванні рівнянь (1) та (2). При $\overline{V} \approx \overline{V_1}$ або $\frac{\overline{V_1}}{\overline{V}} \approx 1$ розподіл тиску в потоці запишеться у вигляді:

$$\overline{p} = \overline{p_H} + \overline{\rho_{LS}} g (H - x_3) - \overline{\rho_{LS}} \overline{V_3^2} - \frac{C_X s_p}{2} \overline{\rho_{LS}} \langle \overline{V_1 V_3'} \rangle (H - x_3) - \frac{k_{cp} C_{ch} \cdot \langle \overline{S} \rangle g}{C_{\Phi 1} D} (H - x_3). \quad (9)$$

Залежність для визначення осередненої мутності $\langle \overline{S} \rangle$ визначається на основі добутку:

$$\langle \overline{S} \rangle = F S_0, \quad (10)$$

де F – фактор, який враховує параметр зважування часток наносів; S_o – відлікова концентрація донних наносів.

Приймаючи $\bar{p}_H = \text{const}$, тобто виключаючи із розгляду бароклинні течії, підставивши значення $\bar{p}$ із рівняння (9) та $\bar{f}_{P1}$, $\bar{f}_{P2}$ із (10) у рівняння (1) та (2) у поздовжньому і поперечному напрямках, отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}_1}{\partial t} + \frac{\partial \bar{V}_1^2}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{V}_1 \bar{V}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{V}_1 \bar{V}_3}{\partial x_3} = & -g \frac{\partial h}{\partial x_1} - \frac{C_x s_p}{2} \frac{\partial}{\partial x_1} h \langle \bar{V}_1 \bar{V}_3' \rangle - \frac{k_{cp} C_{ch} \cdot g}{C_{\phi 1} D \rho_{LS}} \frac{\partial}{\partial x_1} h \langle \bar{S} \rangle - \\ & - \frac{\partial}{\partial x_1} (\bar{V}_1^2 - \bar{V}_3^2) - \frac{\partial \bar{V}_1 \bar{V}_2'}{\partial x_2} - \frac{\partial \bar{V}_1 \bar{V}_3'}{\partial x_3} - \frac{C_x s_p}{2} \left(\bar{V}_1^2 + \bar{V}_1^2 + \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \bar{V}_2 \bar{V}_1' + \frac{\bar{V}_3}{\bar{V}_1} \bar{V}_3 \bar{V}_1' \right). \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}_2}{\partial t} + \frac{\partial \bar{V}_2 \bar{V}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{V}_2^2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{V}_2 \bar{V}_3}{\partial x_3} = & -g \frac{\partial h}{\partial x_2} - \frac{C_x s_p}{2} \frac{\partial}{\partial x_2} h \langle \bar{V}_1 \bar{V}_3' \rangle - \frac{k_{cp} C_{ch} \cdot g}{C_{\phi 1} D \rho_{LS}} \frac{\partial}{\partial x_2} h \langle \bar{S} \rangle - \\ & - \frac{\partial \bar{V}_2 \bar{V}_1'}{\partial x_1} - \frac{\partial}{\partial x_2} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_3^2) - \frac{\partial \bar{V}_2 \bar{V}_3'}{\partial x_3} - \frac{C_x s_p}{2} \left(\bar{V}_1 \bar{V}_2 + \bar{V}_1 \bar{V}_2' + \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \bar{V}_2^2 + \frac{\bar{V}_3}{\bar{V}_1} \bar{V}_3 \bar{V}_2' \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Помножимо рівняння (11) і (12) на dx_3 та виконаємо інтегрування за глибиною та оцінимо порядок доданків.

Перед інтегруванням нелінійних доданків рівнянь виду $\frac{\partial \bar{V}_i^2}{\partial x_i} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \bar{V}_i \bar{V}_j; i, j = 1, 2 \right)$, які виражають інерційні сили, обумовлені конвективним прискоренням, необхідно врахувати, що в реальному потоці спостерігається нерівномірність розподілу швидкостей по вертикалі та в результаті інтегрування за глибиною потоку в доданках з'являються коефіцієнти, що враховують цю нерівномірність. Для отримання значень та фізичного змісту вказаних коефіцієнтів представимо локальну швидкість V_i у вигляді:

$$\bar{V}_i = U_i + u_i, \quad (13)$$

де $u_i = \bar{V}_i - U_i \neq 0$ – відхилення локальної швидкості $\bar{V}_i$ від осередненої за глибиною U_i .

Причому величина u_i повинна тотожно відповідати умові:

$$\langle u_i \rangle = \frac{1}{h} \int_{z_0}^H u_i dx_3 = 0. \quad (14)$$

З урахуванням умови (14) вводиться коефіцієнт, який визначає нерівномірність розподілу швидкостей на вертикалі та приймає значення більше

одиниці, тобто $\alpha_h > 1$ дорівнює $\alpha_h = 1 + \frac{\int_{z_0}^H u_i^2 dx_3}{U_i^2 h}$.

Інтегрування доданків, що містять похідні турбулентних напружень за вертикальною координатою x_3 , дасть наступне:

$$\int_{z_0}^H \frac{\partial \bar{V}_i \bar{V}'_3}{\partial x_3} dx_3 = \int_{z_0}^H d(\bar{V}_i \bar{V}'_3) = (\bar{V}_i \bar{V}'_3)_H - (\bar{V}_i \bar{V}'_3)_{z_0}, \quad (15)$$

тобто різницю дотичних турбулентних напружень, що діють на вільній поверхні $\tau_{iH} = (\bar{V}_i \bar{V}'_3)_H$ та на дні потоку $\tau_{iz_0} = (\bar{V}_i \bar{V}'_3)_{z_0}$.

Після інтегрування рівнянь руху (11) та (12) представимо двовимірні рівняння. При цьому будемо нехтувати доданками вищого порядку мализни порівняно з основними доданками $\frac{V^2 h}{L}$ і $\frac{\tau h}{L}$. Прийmemo:

$$N_p = \frac{C_x s_p}{2}, \quad N_{ch} = \frac{k_{cp} C_{ch} \cdot g}{C_{\phi 1} D \rho_{LS}}. \quad (16)$$

Двовимірні рівняння руху після ділення на h та з врахуванням (16) запишуться у вигляді:

рівняння кількості руху(у напрямку на вісь X_1) –

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_1}{\partial t} + \alpha_h \left[\frac{\partial U_1^2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_1 U_2}{\partial x_2} \right] = & - \left(g + N_p \langle \bar{V}_1 \bar{V}'_3 \rangle - N_{ch} \langle \bar{S} \rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_1} - h \left(N_p \frac{\partial \langle \bar{V}_1 \bar{V}'_3 \rangle}{\partial x_1} + N_{ch} \frac{\partial \langle \bar{S} \rangle}{\partial x_1} \right) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\langle \bar{V}_1^2 \rangle - \langle \bar{V}_3^2 \rangle \right) - \frac{\partial \langle \bar{V}_1 \bar{V}'_2 \rangle}{\partial x_2} - \frac{1}{h} \left[(\bar{V}_1 \bar{V}'_3)_H - (\bar{V}_1 \bar{V}'_3)_{z_0} \right] - N_p \left[\alpha_h U_1^2 + \langle \bar{V}_1^2 \rangle + \frac{U_2}{U_1} \langle \bar{V}_2 \bar{V}'_1 \rangle \right], \end{aligned} \quad (17)$$

рівняння кількості руху(у напрямку на вісь X_2) –

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_2}{\partial t} + \alpha_h \left[\frac{\partial U_1 U_2}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2^2}{\partial x_2} \right] = & - \left(g + N_p \langle \bar{V}_1 \bar{V}'_3 \rangle + N_{ch} \langle \bar{S} \rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_2} - h \left(N_p \frac{\partial \langle \bar{V}_1 \bar{V}'_3 \rangle}{\partial x_2} + N_{ch} \frac{\partial \langle \bar{S} \rangle}{\partial x_2} \right) - \\ & - \frac{\partial \langle \bar{V}_2 \bar{V}'_1 \rangle}{\partial x_1} - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\langle \bar{V}_2^2 \rangle - \langle \bar{V}_3^2 \rangle \right) - \frac{1}{h} \left[(\bar{V}_2 \bar{V}'_3)_H - (\bar{V}_2 \bar{V}'_3)_{z_0} \right] - N_p \left[\alpha_h U_1 U_2 + \langle \bar{V}_1 \bar{V}'_2 \rangle + \frac{U_2}{U_1} \langle \bar{V}_2^2 \rangle \right], \end{aligned} \quad (18)$$

рівняння нерозривності –

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U_1 h}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2 h}{\partial x_2} = 0. \quad (19)$$

Розрахунок ustalених двовимірних течій на заплавах з трав'яною рослинністю проводиться з метою прогнозування розподілу середніх за глибиною швидкостей та глибин по ширині потоку. Рівняння розподілу середніх за глибиною швидкостей та глибин можливо отримати із динамічних двовимірних рівнянь (17) – (19), якщо в останніх прийняти, $U_1 = U$, $U_2 \approx 0$ та використати умову стаціонарності $\frac{\partial}{\partial t} = 0$.

Величини $\langle \overline{V_i V_j'} \rangle$, $\langle V_i'^2 \rangle$ будемо визначати, ґрунтуючись на гіпотезі Буссінеска, та приймаючи турбулентну в'язкість ν_t пропорційною швидкості U :

$$\nu_t = 2\Lambda U, \quad (20)$$

де Λ – коефіцієнт турбулентного обміну, $\Lambda = \frac{h}{2MC}$; C – коефіцієнт Шезі, $C = \frac{Q_{f-p}}{B_{f-p} h_{сер}^{3/2} I_{x_1}^{1/2}}$; M – функція коефіцієнта Шезі, при $10 \leq C \leq 60$ $M = 0,7C + 6$, при $C > 60$ – $M = 48$; Q_{f-p} – витрата заплавного потоку; B_{f-p} – ширина заплавного потоку; $h_{сер}$ – середня глибина заплавного потоку.

Тоді на основі гіпотези Буссінеска з урахуванням формули (20) для двовимірної задачі:

$$-\langle \overline{V_1 V_2'} \rangle = \Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2}, \quad -\langle \overline{V_1 V_3'} \rangle = \Lambda \frac{U^2}{h}, \quad -\langle \overline{V_1'^2} \rangle = 2\Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_1}. \quad (21)$$

Для розрахунку дотичних напружень на дні приймається квадратичний закон тертя з урахуванням $U_1 = U$, $U_2 \approx 0$:

$$(\overline{V_1 V_3'})_{z_0} = \frac{C_f \overline{U^2}}{K_\Phi}, \quad (\overline{V_2 V_3'})_{z_0} = 0. \quad (22)$$

де C_f – емпіричний коефіцієнт тертя, $C_f = \frac{n^2 g}{h^{1/3}}$; n – коефіцієнт шорсткості.

Для русел довільного перетину у вираз розрахунку локального значення сили тертя по дну необхідно вводити поправочний коефіцієнт K_Φ , який враховує форму русла. Значення коефіцієнта K_Φ визначається за залежністю:

$$K_\Phi = \frac{C^2}{x_2 V_{сер}^2} \int_0^{x_2} \frac{U^2}{C_h^2} dx_2, \quad (23)$$

де $V_{сер}$ – середня швидкість, $V_{сер} = Q_{f-p} / B_{f-p}$, C_h – коефіцієнт Шезі по висоті:

$$C_h = \frac{1}{n} h_{cep}^{1/6}. \quad (24)$$

Для прогнозування розподілу глибин і швидкостей, враховуючи залежності для турбулентних напружень (21), після перетворень представимо усталені рівняння двовимірних течій на заплавах з трав'яною рослинністю:

поздовжньої рівноваги потоку –

$$\begin{aligned} [\alpha_h - N_p 2\Lambda] 2U \frac{\partial U}{\partial x_1} = & - \left(g - N_p \Lambda \frac{U^2}{h} + N_{ch} \langle \bar{S} \rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_1} - h \left(-N_p \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right) + N_{ch} \frac{\partial \langle \bar{S} \rangle}{\partial x_1} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2} \right) - \left[\frac{C_f}{h K_\Phi} + N_p \alpha_h \right] U^2, \end{aligned} \quad (25)$$

поперечної рівноваги потоку –

$$\left(g - N_p \Lambda \frac{U^2}{h} + N_{ch} \langle \bar{S} \rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_2} = -h \left(-N_p \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right) + N_{ch} \frac{\partial \langle \bar{S} \rangle}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2} \right) + N_p \Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2}, \quad (26)$$

рівняння нерозривності –

$$\frac{\partial U}{\partial x_1} h = 0. \quad (27)$$

При обтіканні мостової опори виникає місцеве порушення структури основного потоку, врахувати яке можливо через динамічні характеристики потоку, що набігає, та безпосередні розміри споруди, шляхом включення у модельні рівняння (25) та (26) сили опору при обтіканні мостових опор.

Сила опору при обтіканні мостових опор визначається за залежністю:

$$\overline{f_{pier}} = \frac{C_{pier} s_{pier}}{2\bar{V}} \left(\overline{V^2 V_i} + \bar{V}_j \overline{V_j V_i'} \right), \quad (28)$$

де C_{pier} – коефіцієнт опору при обтіканні мостової опори; s_{pier} – міделева площа при обтіканні мостової опори.

У тонкому шарі потоку, певної області навколо опор, висотою $\Delta x_3 \approx h$ та, відповідно, об'ємом $q_{pier} = B_{pier} L_{pier} h$ міделева площа при обтіканні опори складає:

$$s_{pier} = \frac{K_f l_{pier} b_{pier}}{B_{pier} L_{pier} h}, \quad (29)$$

де K_f – коефіцієнти форми опори; $l_{0\ pier}$ – довжина опори, при косому набіганні потоку $l_{pier} = l_{0\ pier} \cos \alpha_{pier}$; $b_{0\ pier}$ – ширина опори, при нормальному набіганні потоку $b_{pier} = b_{0\ pier}$, при косому набіганні потоку $b_{pier} = l_{0\ pier} \sin \alpha_{pier} + b_{0\ pier} \cos \alpha_{pier}$; α_{pier} – кут набігання потоку на мостову опору.

Після перетворень рівняння переносу заплавного потоку матимуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned} & \left[\alpha_h - (N_p + N_{pier}) 2\Lambda \right] 2U \frac{\partial U}{\partial x_1} = - \left(g - (N_p + N_{pier}) \Lambda \frac{U^2}{h} + N_{ch} \langle \bar{S} \rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_1} - \\ & - h \left(- (N_p + N_{pier}) \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right) + N_{ch} \frac{\partial \langle \bar{S} \rangle}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2} \right) - \left[\frac{C_f}{h K_\Phi} + (N_p + N_{pier}) \alpha_h \right] U^2, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & \left(g - (N_p + N_{pier}) \Lambda \frac{U^2}{h} + N_{ch} \langle \bar{S} \rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_2} = - h \left(- (N_p + N_{pier}) \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right) + N_{ch} \frac{\partial \langle \bar{S} \rangle}{\partial x_2} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2} \right) + (N_p + N_{pier}) \Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2}. \end{aligned} \quad (31)$$

Для отримання однозначного розв'язку розглядуваної задачі, а саме визначення глибини потоку на заплаві після розмиву, до представлених замкнутих систем вихідних рівнянь необхідно додати граничні та початкові умови.

У **третьому розділі** представлені початкові та межові умови для реалізації запропонованих математичних моделей заплавного потоку. На границях розрахункової області, у вузлах, сусідніх з твердими поверхнями – дамбами мостового переходу, в якості межових умов використовується залежність для швидкості:

$$U_{i,j} = \frac{U}{\kappa} \ln \left((x_2)_c^+ E \right), \quad (32)$$

де $U_{i,j}$ – динамічна швидкість на заплавах; κ – параметр Кармана; E – коефіцієнт шорсткості; $(x_2)_c^+$ – безрозмірна відстань від стінки, визначається за залежністю:

$$(x_2)_c^+ = \frac{\Delta x_2 U_{i,j}}{\nu}. \quad (33)$$

Безпосередньо на самих твердих поверхнях (стінці дамби, мостової опори), а також для випадку пологих берегів діє умова прилипання, тобто значення швидкості потоку приймається рівним нулю.

Гранична відмітка вільної поверхні H , як для випадку пологих берегів, так і для випадку вертикальних стінок (крутих берегів, мостових опор, дамб), визначається за допомогою лінійної екстраполяції за значеннями відміток вільної поверхні внутрішніх точок розрахункової області:

$$h(x_1, x_2) = 2h(x_1, x_2 - 1) - h(x_1, x_2 - 2). \quad (34)$$

Визначення відміток вільної поверхні потоку на всіх розрахункових поперечниках проводиться в одновірній постановці на основі рівняння усталеного нерівномірного руху у відкритих руслах. Скінченно-різницевий аналог диференціального рівняння, яке описує зміну глибин потоку, має вигляд:

$$h_i - h_{i-1} = J(l_i - l_{i-1}) - JR \left[\left(1 - \frac{l_i}{R}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-1} \right] \pm \frac{Jh_r^{4/3} m^2}{2g} \left[\left(1 - \frac{l_i}{R}\right)^{-2} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-2} \right], \quad (35)$$

де J – поздовжній похил дна; l_i – поздовжня координата розрахункового створу, м; R – параметр центральної струмни; h_r – глибина русла, м; m – зворотна величина до коефіцієнта шорсткості русла n , $m = \frac{1}{n}$; g – прискорення вільного падіння, м/с². Початкові умови: $h = h_0$ при $l = 0$; $h = h_i$ при $l = l_i$.

Запропонована система рівнянь (25) – (27) або (30) – (31), (27) в комплексі з межовими умовами (32) – (35) розв’язується в наступній послідовності:

1. Вводяться вихідні дані для заплавного потоку, за необхідністю їх розрахунок, констант, межових умов. З метою скорочення обсягу вихідної інформації використовуються інтерполяційні поліноми, які дозволяють її скоротити у 2–3 рази.

2. Визначаються параметри розрахункової області, обумовлені зоною впливу мостового переходу. Проводиться розрахунок значень кривої вільної поверхні річкового потоку знизу вверх, починаючи зі створу повного розтікання, де всі гідрравлічні характеристики потоку відомі, або мають природні значення, третій доданок рівняння (35) береться зі знаком «+». При чому $l_{i-1} = 0$ а l_i змінюється від 0 до l_{z_s} в зоні розтікання. Величина параметра центральної струмни в зоні розтікання дорівнює $R = R_{z_s}$. Значенню $l_i = l_{z_s}$ відповідає величина підмостового підпору.

Дійшовши до мостового створу, для продовження розрахунку в зоні стиснення необхідно замінити знак перед третім доданком на «–», надати величині h_{i-1} значення отриманої глибини під мостом, відстань прийняти $l_{i-1} = 0$ та змінити величину параметра центральної струмни в зоні стиснення $R = R_{z_c}$. Значення l_i змінюється від 0 до l_{z_c} величини, що є відстанню від мосту до початку зони стиснення, де утворюється повний підпір під мостом.

Грунтуючись на рівнянні (35), проводять розрахунок похилу вільної поверхні річкового потоку:

$$I_{x_i} = \frac{h_i - h_{i-1}}{l_i - l_{i-1}} = J - \frac{JR}{l_i - l_{i-1}} \left[\left(1 - \frac{l_i}{R}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-1} \right] \pm \frac{Jh_r^{4/3} n^{-2}}{2g(l_i - l_{i-1})} \left[\left(1 - \frac{l_i}{R}\right)^{-2} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-2} \right]. \quad (36)$$

3. Проводять розрахунок на основі уточнених вихідних даних: двовимірних

матриць відміток дна та вільної поверхні річкового потоку. Розраховують розподіл швидкостей та глибин в розрахункових створах на заплавних ділянках за скінченно-різницевиими аналогами рівнянь (25) – (26).

За допомогою ітерацій визначають поздовжню швидкість в усталеному заплавному потоці з елементами рослинності:

$$U_{i+1,j} = U_{i,j} - \frac{\Delta x_1}{[\alpha_h - N_p 2\Lambda] 2U_{i,j}} \left[\left(g - N_p \Lambda_{i,j} \frac{(U^2)_{i,j}}{h_{i,j}} + N_{Ch} \langle \bar{S} \rangle_{i,j} \right) \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x_1} + h_{i,j} \left[-\frac{N_p}{\Delta x_1} \left[\left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i+1,j} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \bar{S} \rangle_{i+1,j} - \langle \bar{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x_1} \right] - \frac{1}{\Delta x_2^2} \left[\Lambda_{i,j} (U^2)_{i,j+1} - (\Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1}) (U^2)_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} (U^2)_{i,j-1} \right] + \right. \\ \left. + \left[\frac{C_f}{h_{i,j} K_\Phi} + \alpha_h N_p \right] (U^2)_{i,j} \right]. \quad (37)$$

Визначають розподіл глибини в поперечних перетинах заплавного потоку:

$$h_{i,j+1} = h_{i,j} - \frac{\Delta x_2}{g - N_p \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j} + N_{Ch} \langle \bar{S} \rangle_{i,j}} \left[h_{i,j} \left[-\frac{N_p}{\Delta x_2} \left[\left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j+1} - \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \bar{S} \rangle_{i,j+1} - \langle \bar{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x_2} \right] + \right. \\ \left. - \frac{1}{2\Delta x_1 \Delta x_2} \left[\Lambda_{i+1,j} ((U^2)_{i+1,j+1} - (U^2)_{i+1,j-1}) - \Lambda_{i,j} ((U^2)_{i,j+1} - (U^2)_{i,j-1}) \right] - N_p \Lambda_{i,j} \frac{(U^2)_{i,j+1} - (U^2)_{i,j}}{\Delta x_2} \right]. \quad (38)$$

Проводять розрахунок межових умов біля струмененапрямних дамб за залежністю (34).

Уточнення глибин після розмиву виконують за співвідношенням:

$$h_{i,j}^{n+1} = \frac{h_{i,j}^n U_{i,j}}{U_{нерозмі,j}}, \quad (39)$$

де $U_{нерозмі,j}$ – нерозмивна швидкість ґрунту.

Виконують перевірку умови нерозривності згідно (27). При перевірці умови нерозривності обчислюють питомі витрати потоку на вертикалях $q_{f-pij} = U_{i,j} \cdot h_{ij}$. Після того обчислюють повну витрату шляхом підсумовування питомих витрат за кожним поперечним перерізом і множення на ширину розрахункової смуги $Q_{f-pi} = \sum_j q_{f-pij} \cdot \Delta B$,

де $\Delta B = x_{2i} - x_{21}$. Обчислюють коефіцієнти $k_i = \frac{Q_{f-pi}}{Q_{f-p0}}$, де Q_{f-p0} – витрата в початковому

створі. Коректуються швидкості $U_{i,j}^{II} = \frac{U_{i,j}^I}{k_i}$ де I, II – номери відповідних

наближень. При розрахунку швидкості коректують не менше ніж два рази. Необхідно проводити перевірку умови нерозривності, обчислюючи питомі витрати

$q_{f-pij} = U_{i,j} \cdot h_{ij}$. Далі знов обчислюють швидкості $U_{i,j}'' = \frac{U_{i,j}^I}{k_i}$. За корегованими швидкостями обчислюють питомі витрати, знов знаходять коефіцієнти, які повинні дорівнювати одиниці. Кінцеву перевірку виконують за дискретним аналогом рівняння (27):

$$(U \cdot h)_{i,j} = \frac{(U \cdot h)_{i+1,j}}{\Delta x_1}. \quad (40)$$

Роблять перерахунок поздовжнього похилу водної поверхні заплави:

$$I_{x_1} = \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x_1}. \quad (41)$$

Далі перераховують в наступному наближенні величини витрат заплавних потоків в зоні стиснення та розтікання; коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілу швидкостей на вертикалі; коефіцієнт турбулентного обміну; коефіцієнт, який враховує опір елементів рослинності на заплаві; осереднена мутність по вертикалі $\langle \bar{S} \rangle$. За допомогою ітерацій визначають поздовжню швидкість в усталеному заплавному потоці з елементами рослинності та розподіл глибини в поперечних перетинах заплавного потоку до виконання умови нерозривності. Матриця відміток поверхні рельєфу дна заплав на розрахунковій області Z_{f-p} та матриця глибин заплавного потоку h_{f-p} оновлюються після кожної сходінки паводку.

Для проведення розрахунку в зоні впливу мостових опор задаються координати місцеположення мостових опор x_1, x_2 , де величини приймаються $\Phi_{i,j} = 0$, відповідно задаються поперечні створи, в яких розрахунок гідродинамічних характеристик проводитиметься за рівняннями переносу з урахуванням сили опори при обтіканні мостових опор X_i ($i = n$). По всім іншим створам визначаються гідродинамічні параметри в межах розрахункової області заплавних ділянок за рівняннями (37) – (39).

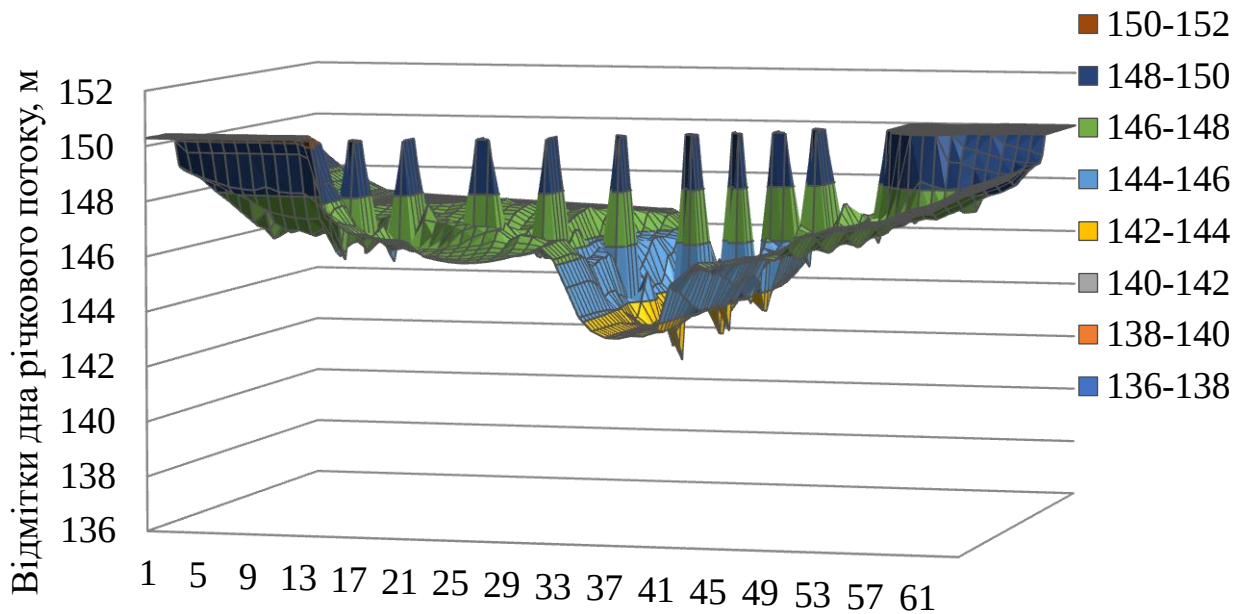
У зазначених поперечних створах обчислюють міделеву площу мостової опори, яка обтікається потоком (29), коефіцієнт, який враховує опір впливу мостових опор на заплавний потік. Розподіл поздовжньої швидкості з урахуванням сили опору від мостових опор та зміну глибини потоку розраховують за дискретними аналогами рівнянь (30) – (31). Перевірка умови нерозривності проводиться згідно рівняння (40).

У четвертому розділі наведено результати розрахунку розмивів на заплавах в зоні впливу мостового переходу.

Розрахунок загального та максимального розмиву проведено на заплавних ділянках підмостового русла на р. Сіверський Донець біля с. Брусівка на автомобільній дорозі Т-05-14 Добропілля – Лиман, км 83+575. Запроектований автодорожній міст перетинає р. Сіверський Донець під кутом 26° , має довжину 297 м. Заплава переважно 2-стороння, чергується по берегах. Щорічно в період весняної повені та дощових паводків заплава затоплюється на глибину від 0,5 м до

3,3 м на 1–2 тижні, на пониженнях вода тримається протягом 1–3 місяців. Розмив русла р. Сіверський Донець зупиняється лише на спаді весняної повені після 6-ої за вихідним гідрографом розрахункової сходинки. За результатами числового експерименту загальний розмив більшої заплави становить $h_p = 0,96$ м, меншої заплави – $h_p = 1,28$ м (рис. 1).

Величина максимального розмиву, з урахуванням впливу опор мостових опор, на більшій заплаві складає $h_p = 2,75$ м, на меншій заплаві - $h_p = 1,91$ м (рис. 2).



Розрахункові кроки по ширині потоку

Рисунок 1 – Відмітки поверхні рельєфу дна заплав після шостої сходинки розрахункового паводку

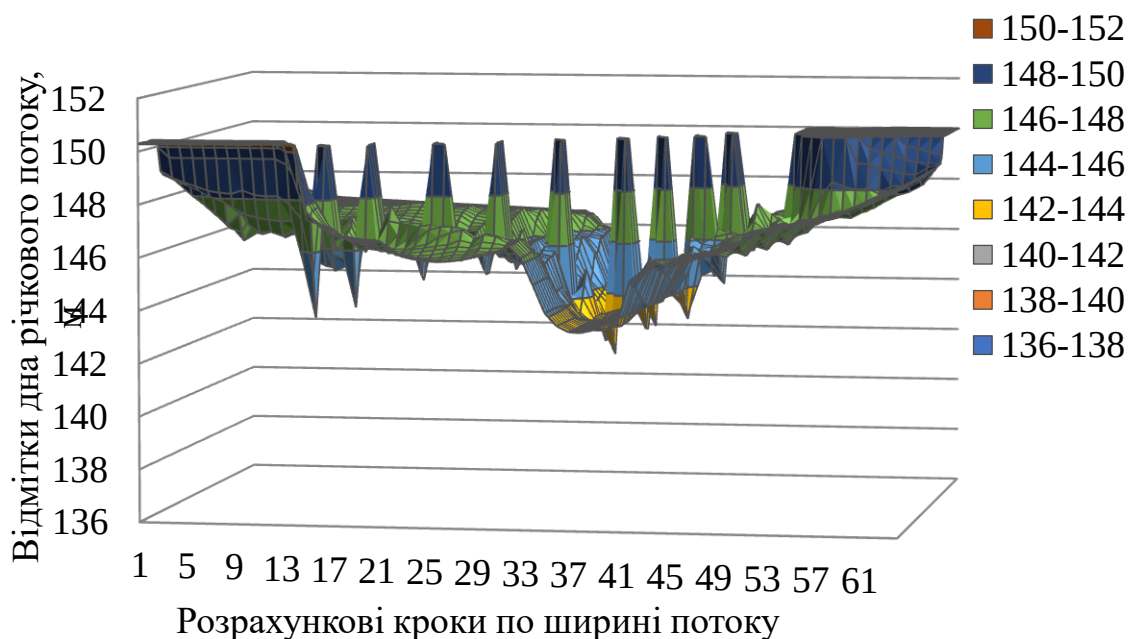


Рисунок 2 – Відмітки поверхні рельєфу дна заплав з урахуванням опору від впливу мостових опор після шостої сходинки розрахункового паводку

Реалізація двовимірної математичної моделі заплавного потоку з урахуванням опору при обтіканні мостових опор (30) – (31), (27) дозволяє за рахунок встановленої величини максимального розмиву отримати відправний показник при призначенні глибини закладання основ опор мосту.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі, що полягає в удосконаленні методу прогнозування деформацій на заплавах в зоні впливу мостового переходу:

1. Детальний аналіз теоретичних та експериментальних досліджень відомих фахівців у галузі відкритих заплавних потоків дозволив запропонувати підхід, згідно якого розподіл поля швидкостей по вертикалі та глибині визначається з урахуванням розподіленої сили, діючої в шарі рослин, та суттєвого впливу опору відриву зерен дрібнозернистого ґрунту. У створі мостового переходу, на заплавних ділянках додатково на опір при обтіканні потоком рослинності накладається опір при обтіканні мостових опор, що в свою чергу впливає на швидкісну структуру потоку та на розмивні процеси. Для складових сил опору при обтіканні рослинності, зчеплення ґрунту та при обтіканні мостових опор отримані відповідні залежності.

2. Геоморфометрія заплавних ділянок характеризується наявністю значної рослинності, намулів від попередніх повеней та паводків і обумовлює генетичну несхожість з руслами. Обтікання потоком рослинності на заплавних ділянках мостових переходів створює специфічні умови переносу як конвективних, так і турбулентних характеристик течії. Для врахування цих умов запропоновано двовимірну математичну модель зависеного потоку з трав'яною рослинністю для прогнозування розподілу глибин та швидкостей на заплаві.

Запропонована математична модель дозволяє отримати розподіл середніх за глибиною швидкостей з дотриманням узгодженості з полем тиску в двовимірній постановці. Це спрощує її реалізацію та відповідає умовам задач теорії мілкої води для штучно стиснутих відкритих потоків.

3. Сформульовані та розраховані початкові і межові умови дають можливість отримати параметри зони впливу мостового переходу та розподіл в першому наближенні глибини і зміну похилу вільної поверхні. Врахування характерних особливостей руху заплавних потоків дозволяє проводити числову реалізацію запропонованих математичних моделей за ітераційними методами розрахунку гідродинамічних характеристик на визначеній за довжиною ділянці річкового потоку з дотриманням умов нерозривності.

4. Запропоновані методи розрахунку загального та максимального розмивів на заплавах ґрунтуються на особливостях протікання відкритих штучно-стиснутих потоків в зоні впливу мостових переходів та в створі мостового переходу. Ці методи дозволяють врахувати суттєвий вплив опору від елементів рослинності, опір відриву зерен ґрунту та від обтікання мостових опор в процесі розмиву на динаміку заплавного потоку. Визначення глибини розмиву заплавної ділянки проводиться на

основі співвідношення дійсної та нерозмивної швидкостей.

5. На основі розробленої методики прогнозування деформацій на заплавах, згідно вихідних даних, які описують в повній відповідності до реальних умов конфігурацію дна та вільної поверхні р. Сіверський Донець, проведено розрахунок розмивів після кожної сходинки розрахункового паводку. Визначені гідродинамічні характеристики заплавних потоків на спаді повені змінюються в достатньо широкому діапазоні. Зокрема встановлено, що зі збільшенням витрати від першої сходинки повені до шостої – параметри зони стиснення р. Сіверський Донець також збільшуються від 246 м до 1382 м, на відміну від зони розтікання, яка за ходом повені, відповідно, зменшується від 949 м до 762 м. Визначено зону впливу мостового переходу, яка змінюється від 1195 м до 2144 м. Встановлено, що на меншій заплаві максимальний розмив перевищує загальний у 1,5 рази, на більшій заплаві – у 2,8 раз, що обумовлено врахуванням як і впливу опору при обтіканні мостових опор, так і ефекту стиснення між опорами та насипами підходів в створі мостового переходу.

Результати наукових досліджень також впроваджені на галузевому рівні в організаціях, які входять у сферу управління Державного агентства автомобільних доріг України (УКРАВТОДОР) у вигляді пропозицій щодо удосконалення моделей оцінювання і прогнозування ресурсу мостів, що знаходяться в експлуатації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Славінська О. С., Цинка А. О. Удосконалений метод розрахунку деформацій на заплавах в зоні впливу мостового переходу *Web of Scholar*, 2020, 5 (47), С. 12-22. doi.org/10.31435/rsglobal_wos/31052020/7089.

2. Slavinska, A. Tsynka, I. Bashkevych. Predicting deformations in the area of impact exerted by a bridge crossing based on the proposed mathematical model of a floodplain flow. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 4/7 (Vol.106). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208634>

Статті у фахових виданнях:

3. Цинка А. О. Методи визначення нерозмивних швидкостей при розрахунках деформацій на заплавних ділянках. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2019. Вип. 105.С. 6-12.

4. Боднар Л. П., Цинка А. О. Дослідження стану мостових переходів на основі аналітичної експертної системи управління мостами. *Дороги і мости*. 2020. Вип. 21. С. 270-281. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.270>

5. Slavinska O., Tsynka A. Determination of the influence area of a bridge crossing in a river stream. *Technology audit and production reserves*. 2020. Vol 4, No 2(54). DOI: 10.15587/2706-5448.2020.210504

6. Славінська О. С., Цинка А. О. Прогнозування деформацій на заплавах з урахуванням опору при обтіканні мостових опор. *Дороги і мости*. 2020. Вип. 22. С. 198-213. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.198>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Славінська О. С., Цинка А. О. Дослідження розмивних процесів на заплавах з урахування їх геоморфології в зоні впливу мостових переходів. *Actual aspects of development in the context of globalization*. IX Міжнародна науково-практична конференція. 23-24 березня 2020 р., Флоренція, Італія. С. 252-254. <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/03/IX-Conference-23-24-Florence-Italy.pdf>

8. Славінська О. С., Цинка А. О. Основні принципи призначення генеральних розмірів споруд мостових переходів. *Theoretical foundations of modern science and practice*. XI Міжнародна науково-практична конференція. 06-07 квітня 2020 р., Мельбурн, Австралія. С. 91-92. <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-Australia.pdf>

9. Славінська О. С., Цинка А. О. Прогнозування розподілу глибин і швидкостей на заплавах зоні впливу мостових переходів. *LXXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету* : тези доповідей. К. : НТУ, 2020. С. 143. <http://vstup.ntu.edu.ua/konf-76.pdf>

10. Славінська О. С., Цинка А. О. Метод прогнозування деформацій на заплавах з урахуванням обтікання мостових опор. *Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Міжнародна науково-технічна конференція. 28-29 травня 2020 р., Одеса, Україна. С. 108-110.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

11. Канін О. П., Харченко А. М., Цинка А. О. Проблеми та перспективи впровадження контрактів *fidic* в дорожнє господарство України. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2018. Вип. 104. С. 6-15.

АНОТАЦІЯ

Цинка А.О. Удосконалення методу розрахунку розмивів на заплавах в зоні впливу мостових переходів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми». (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2020.

У дисертаційній роботі представлено нове вирішення актуального питання щодо методу прогнозування загального та максимального розмивів на заплавах в зоні впливу мостових переходів. Запропоновані математичні моделі ґрунтуються на рівняннях розподілу швидкісної структури та глибини заплавного потоку в наближенні до двовимірних залежностей з урахуванням силових факторів. Силкові фактори обумовлюють опір при обтіканні рослинності, опір розмиву дрібнозернистих ґрунтів та опір при обтіканні мостових опор.

Для отримання однозначного розв'язку розглядуваної задачі до представленої замкнутих систем вихідних рівнянь додані граничні та початкові умови. Ці умови дозволяють визначити зону впливу мостового переходу на різних етапах проходження розрахункового паводку. За скінченно-різницевиими аналогами рівнянь переносу розраховано розподіл швидкостей та глибин для заплавних ділянок підмостового русла рівнинної річки Сіверський Донець.

Ключові слова: зависенесний потік, заплава, зона впливу мосту, мостовий перехід, потік, рослинність, розмив.

АННОТАЦИЯ

Цинка А.О. Усовершенствование метода расчета размывов на поймах в зоне влияния мостовых переходов – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.11 «Автомобильные дороги и аэродромы». (192 – Строительство и гражданская инженерия). – Национальный транспортный университет, Киев, 2020.

В диссертационной работе представлено новое решение актуального вопроса по методу прогнозирования общего и максимального размывов на поймах в зоне влияния мостовых переходов. Предложенные модели основываются на уравнениях распределения скоростной структуры и глубины пойменного потока в приближении к двумерным зависимостям с учетом силовых факторов. Силовые факторы обуславливают сопротивление при обтекании растительности, сопротивление размыву мелкозернистых грунтов и сопротивление при обтекании мостовых опор.

Для получения однозначного решения рассматриваемой задачи представленных замкнутых систем исходных уравнений добавлены начальные и граничные условия. Эти условия позволяют определить зону влияния мостового перехода на разных этапах прохождения расчетного паводка. По конечно-разностным аналогам уравнений переноса рассчитано распределение скоростей и глубин для пойменных участков подмостового русла равнинной реки Северский Донец.

Ключевые слова: взвесенесущий поток, пойма, зона влияния моста, мостовой переход, поток, растительность, размыв.

ABSTRACT

A. Tsynka Improvement of the method for calculating erosion at the floodplains in the area affected by bridge crossings. – As a manuscript.

The dissertation for candidate of technical sciences degree in specialty 05.22.11 «Highways and airfields». (192 – Construction and Civil Engineering). – National transport university, Kyiv, 2020.

The dissertation work presents a new solution to the topical issue concerning the method of forecasting general and maximum erosion at the floodplains in the area of bridge crossings, based on the positions of mechanics of heterogeneous environments.

Eroded processes on the plains are substantially different from riverbed deformations, due not only to their geological structure but also to the presence of vegetation. A large number of experimental and numerical studies on the distribution of the high-speed structure and depth have been carried out in order to predict the blurred processes on the flood plains in the area affected by bridge crossings.

The depths of the floodplain section of the opening of the bridge after smelting are determined by the non-motorized velocity for the soils constituting the section. The review of the work showed that, to date, there is no uniform approach to considering the influence of soil heterogeneity on the non-ozmic velocity, indicating the difficulty of evaluating the criterion of the maximum stability of a heterogeneous particle mixture, that make up the understanding. Presented analysis of the physical model of flood flux formation relative to sediment distribution during floods, flooding in the area affected by the bridge in the future made it possible to obtain an analytical approximation for determining the amount of erosion to the floodplain, taking into account the distribution of velocity within the layer of plants.

The problem of calculating the hydrodynamic fields of velocities and pressure in artificially compressed flows refers to the theory of shallow water since the vertical size (flow depth) is substantially smaller than the horizontal dimensions, such as length and width. In accordance

with this, the proposed model is based on the equation of distribution of velocity structure and the depth of a floodplain flow in approximation to two-dimensional dependences taking into consideration force factors. Force factors determine resistance at flowing around vegetation in floodplain areas and resistance of washout of fine-grained soil.

These equations are derived from the general three-dimensional hydrodynamics equations by integrating the latter along the flow depth. As a result, a law was defined for the vertical distribution of the average hydrostatic pressure. In the case of fixed motion, taking into account the estimation of the order of terms and dependencies for turbulent stresses, after transformation, stable equations of the two-dimensional currents of the grasslands with the vegetation, taking into account the force factors were obtained. Force factors cause resistance to the flow of vegetation in floodplains, to the erosion of fine-grained soils and to the resistance to the flow of bridge supports.

To obtain an unambiguous solution of the considered problem, boundary and initial conditions were added to the presented closed system of original equations. These conditions make it possible to determine the level of a free surface of flow and the zone of influence of a bridge crossing at different stages of the estimated flood. The proposed approach is based on a change in the properties of the central stream of the river in the area of the artificial influence of the bridge structure. In order to implement the discrete analogues of the main transport equations in the compression and vegetation zones, the following parameters have been provisionally determined: transformation coefficients of the expenditure of the channel flow, the flow rate of the flood streams, the dynamic speed of the catchments, coefficient taking into account the uneven distribution of speeds by vertical, the universal parameter of the shape of the river flow, the turbulent exchange coefficient, the mean turbidity vertically, the resistance coefficients of the elements of vegetation, Resistance to the removal of soil grain in the bottom region, resistance to the flow of bridge supports. Based on finite-difference analogs of transfer equations, the distribution of velocities and depths in estimated sections was calculated. By iteration, the longitudinal velocity in a flood flow with vegetation elements was determined, according to the distribution of the mud and the resistance when the bridge supports are rounded.

The results of the calculation of washout on floodplain areas of a sub-bridge watercourse of the lowland river Siversky Donets on the T-05-14 road in the Donetsk region were obtained. It has been established that the development of common channel deformations in the bed and at the floodplains takes place on a stretch from 1,195 m to 2,144 m long. The distribution of river depth is obtained, which increases from 0,58 m to 2.17 m. The boundaries of the areas of compression and growing according to the change in the slope of the water surface are defined. As river flows increase, the parameters of the compression zone also increase from 246 m to 1382 m, and the vegetation zones decrease from 949 m to 762 m. The depth of a flood flow after a washout was determined based on the ratios of actual and flood-free velocities. When compared with the initial bottom marks, the general washout of the larger floodplain is 0.96 m, that of the smaller floodplain – 1.28 m. The maximum washout depth at the higher floodplain is 2.75 m, and at the lower plain is 1.91 m, which is due to the effect of the drag on the fairing of bridge supports and the compression of the flow between them.

The proposed scientifically substantiated solution for ensuring optimum interaction of floodplain flows with bridge crossings makes a certain contribution to improving the reliability of their operation due to the quality of design works and the corresponding reduction of construction and operating costs.

Keywords: suspended flow, floodplain, bridge impact zone, bridge crossing, flow, vegetation, erosion.