Національний транспортний університет Міністерство освіти і науки України

Національний транспортний університет Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

## ЦИНКА АНАТОЛІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 627.15

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

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

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Архітектура та будівництво

## Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ А.О. Цинка

Науковий керівник – Славінська Олена Сергіївна доктор технічних наук, професор

Ідентичність усіх примірників дисертації *Засвідчую* Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02

О.Ю. Усиченко

### АНОТАЦІЯ

*Цинка А.О.* Удосконалення методу розрахунку розмивів на заплавах в зоні впливу мостових переходів. – Кваліфікаційна наукова праця 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 дисертаційні роботі представлено нове вирішення **актуального питання** щодо методу прогнозування загального та максимального розмивів на заплавах в зоні впливу мостових переходів, які ґрунтуються на положеннях механіки неоднорідних середовищ.

Розмивні процеси на заплавах суттєво відрізняються від руслових деформацій, що обумовлено не тільки їх геологічною будовою, а також наявністю рослинного покриву. З метою прогнозування процесів, які відбуваються на заплавах під час повеней або паводків в роботі проаналізовано відповідні теоретичні та експериментальні дослідження розподілу швидкісної структури та глибини. Глибини на заплавній ділянці отвору моста після розмиву визначаються за нерозмивною швидкістю для ґрунтів, що складають цю ділянку. Наведений огляд робіт показав, що на сьогодні відсутній єдиний підхід до врахування впливу неоднорідності ґрунту на величину нерозмивної швидкості, що свідчить про складність оцінки критерію граничної стійкості неоднорідної за крупністю суміші які часток, складають заплаву. Представлений аналіз фізичної моделі формування заплавного потоку стосовно розподілу наносів під час повеней, паводків в зоні впливу мостового переходу надалі дозволив отримати аналітичну апроксимацію для визначення величини розмивів на заплаві з урахуванням розподілу швидкості всередині шару рослин.

Задача розрахунку гідродинамічних полів швидкостей та тиску в штучно стиснутих потоках відносяться до теорії мілкої води, оскільки вертикальний розмір (глибина потоку) суттєво менший від горизонтальних розмірів, довжини та ширини. Відповідно до цього запропоновані моделі ґрунтуються на рівнянні

розподілу швидкісної структури та глибини заплавного потоку в наближенні до двовимірних залежностей. Ці рівняння отримані із загальних тривимірних рівнянь гідродинаміки шляхом інтегрування останніх по глибині потоку. В результаті було визначено закон розподілу осередненого гідростатичного тиску по вертикалі. Для випадку усталеного руху з урахуванням оцінки порядку доданків та залежностей для турбулентних напружень, після перетворень, були отримані усталені рівняння двовимірних течій на заплавах з трав'яною рослинністю з урахуванням силових факторів. Силові фактори обумовлюють опір при обтіканні рослинності на заплавних ділянках, опір розмиву дрібнозернистих ґрунтів та опір при обтіканні мостових опор.

Для отримання однозначного розв'язку розглядуваної задачі ДО представлених замкнутих систем вихідних рівнянь додані граничні і початкові умови. Ці умови дозволяють визначити рівень вільної поверхні потоку та зону впливу мостового переходу на різних етапах проходження розрахункового паводка. Запропонований підхід базується на зміні властивостей центральної струмини річкового потоку в зоні штучного впливу мостової споруди. Для реалізації дискретних аналогів основних рівнянь переносу в зонах стиснення та розтікання попередньо визначалися наступні коефіцієнти параметри: трансформації витрати руслового потоку, витрати заплавних потоків, динамічна швидкість на заплавах, коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілу швидкостей на вертикалі, універсальний параметр форми річкового потоку, турбулентного обміну, осереднена мутність коефіцієнт ПО вертикалі, коефіцієнти, які враховують опір елементів рослинності, опір відриву зерна грунту в придонній області, опір при обтіканні мостових опор. За скінченнорізницевими аналогами рівнянь переносу розраховано розподіл швидкостей та глибин в розрахункових створах. За допомогою ітерацій визначено поздовжню швидкість в усталеному заплавному потоці з елементами рослинності, з урахування розподілу намулку та опору при обтіканні мостових опор.

Отримані результати розрахунку розмиву на заплавних ділянках підмостового русла рівнинної річки Сіверський Донець на автомобільній дорозі

Т-05-14 в межах Донецької області. Встановлено, що розвиток загальних руслових деформацій в руслі та на заплавах відбувається на ділянці довжиною від 1195 м до 2144 м. Отримано розподіл глибини річкового потоку, яка в створі мостового переходу за ходом повені збільшується від 0,58 м до 2,17 м. Визначено межі зон стиснення та розтікання за зміною похилу водної поверхні. Зі збільшенням витрати річкового потоку параметри зони стиснення також збільшуються від 246 м до 1382 м, а зони розтікання – зменшуються від 949 м до 762 м. Глибина заплавного потоку після розмиву визначається на основі співвідношень дійсної та нерозмивної швидкостей. При порівнянні з початковими донними відмітками загальний розмив більшої заплави становить 0,96 м, меншої заплави — 1,28 м. Глибина максимального розмиву на більшій заплаві складає 2,75 м, на меншій – 1,91 м, що обумовлено врахуванням впливу опору при обтіканні мостових опор та ступенем стиснення потоку між ними.

Запропоноване науково-обґрунтоване рішення з забезпечення оптимальної взаємодії заплавних потоків з мостовими переходами вносить певний вклад в підвищення надійності їх функціонування за рахунок якості проектних робіт та відповідного зниження будівельно-експлуатаційних витрат.

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

### Список публікацій здобувача

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 мостии*. 2020. Вип. 21. С. 270-281. DOI: <u>https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.270</u>

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: <u>https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.198</u>

## 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. URL: <u>https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/03/IX-Conference-</u>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. URL: <u>https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-Australia.pdf</u>

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. URL: 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.

### ABSTRACT

A. Tsynka Improvement of the method for calculating erosion at the floodplains in the area affected by bridge crossings. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

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.

### Список публікацій здобувача

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: <u>https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208634</u>

### 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 мостии*. 2020. Вип. 21. С. 270-281. DOI: <u>https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.270</u>

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: <u>https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.198</u>

## 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. URL: <u>https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/03/IX-Conference-23-24-Florence-Italy.pdf</u>

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. URL:<u>https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-Australia.pdf</u>

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. : HTY, 2020. С. 143. URL: <u>http://vstup.ntu.edu.ua/konf-76.pdf</u>

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.

## **3MICT**

ВСТУП	13
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ І НАТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОЗМИВІВ НА ЗАПЛАВАХ В ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВИХ	
ПЕРЕХОДІВ	19
1.1 Принципи призначення генеральних розмірів споруд мостових переходів	3 19
1.2 Процес формування заплавного потоку під час паводку в зоні впливу мостового переходу	22
1.3 Теоретичні та експериментальні дослідження руху наносів	29
1.4 Особливості прогнозу деформацій на заплавних ділянках мостових переходів	31
1.4.1 Аналіз основних факторів, які обумовлюють розвиток розмивів на заплавних ділянках мостових переходів	31
1.4.2 Методи визначення нерозмивних швидкостей при розрахунках деформацій на заплавних ділянках	38
Висновки до розділу 1	44
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЗАВИСЕНЕСНОГО ПОТОКУ З ТРАВ'ЯНОЮ РОСЛИННІСТЮ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗПОДІЛУ ГЛИБИН І ШВИДКОСТЕЙ НА ЗАПЛАВІ	46
2.1 Вихідні рівняння для розробки математичної моделі заплавного потоку.	46
2.2 Аналіз складових сил опору в заплавному потоці	56
2.2.1 Сила зчеплення	56
2.2.2 Сила опору рослинності	58
2.3 Гідродинамічний опис процесів, що відбувається на заплавних ділянках с елементами рослинності в наближенні до двовимірної задачі	3 60
2.4 Розробка усталених двовимірних рівнянь для прогнозування розподілу швидкостей та глибин в турбулентних потоках на заплавах з трав'яною рослинністю	71
2.5 Математична модель заплавного потоку з трав'яною рослинністю з	78
уралуванным сили опору при оотканні мостових опор	10 02
висновки до розділу 2	03

РОЗДІЛ З РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗАПЛАВНОГО ПОТОКУ З ТРАВ'ЯНОЮ РОСЛИННІСТЮ85
3.1 Дискретні аналоги рівнянь усталеного потоку на заплавах з трав'яною рослинністю
3.2 Визначення зони впливу мостового переходу в річковому потоці91
3.3 Граничні умови біля стінок дамб, мостових опор, а також меж русла 95
3.4 Удосконалений метод розрахунку деформацій на заплавах в зоні впливу мостового переходу
3.5 Метод розрахунку деформацій на заплавах з урахуванням сили опору при обтіканні мостових опор107
Висновки до розділу 3110
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК РОЗМИВІВ НА ЗАПЛАВАХ В ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ
4.1 Розрахунок положення кривої вільної поверхні річкового потоку та визначення зони впливу мостового переходу112
4.2 Розрахунок деформацій на заплавах в зоні впливу мостового переходу 118
4.3 Розрахунок деформацій на заплавах з урахуванням опору при обтіканні мостових опор132
4.4 Порівняльний аналіз результатів за методом С.Г. Ткачука –
О.В. Андреєва з результатами розрахунку деформацій за запропонованими
методами
Висновки до розділу 4142
ВИСНОВКИ144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 146
ДОДАТОК А РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ З ВИЗНАЧЕННЯ ЗОНИ ВПЛИВУ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ ТА ПАРАМЕТРІВ РІЧКОВОГО ПОТОКУ 160
ДОДАТОК Б ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ 167
ДОДАТОК В СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІІ 173

#### ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. 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 наявності піщаних та супіщаних ґрунтів. При виході русла на заплаву рослинність 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, виконувались кафедрою ЩО будівництва управління майном Національного транспортного та університету підприємства транспортного та Державного «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 І. Проектування. Частина ІІ. 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», № PK 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 поставленні такі задачі:

 проаналізувати існуючі методи визначення розмивів на заплавах та визначити силові фактори, які враховують опір розмиву дрібнозернистих ґрунтів, опір при обтіканні рослинності на заплавних 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 заплавних ділянках в зоні впливу мостових переходів;

 на основі отриманого методу розробити методику прогнозування розмивів на заплавах та провести розрахунок деформацій заплавних ділянках рівнинної річки в зоні впливу мостового переходу.

**Об'єкт дослідження** – процеси деформацій на заплавних 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 багатофакторні моделюванням; проводити числові експерименти 3 прогнозуванням розвитку деформацій в річкових потоках у реальному масштабі часу.

Розроблена та впроваджена на галузевому рівні в організаціях, які входять у сферу управління Державного агентства автомобільних доріг України (Укравтодор), Зміна № 1 до ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина II. Будівництво». На замовлення проектного інституту ДП "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 навчальнометодичних 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: фізично обґрунтованих підтверджується застосуванням (на основі експериментальних даних) математичних моделей, коректною постановкою математичним межових VMOB, чітким 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.); ІХ 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.

# РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ І НАТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОЗМИВІВ НА ЗАПЛАВАХ В ЗОНІ ВПЛИВУ

## МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ

# 1.1 Принципи призначення генеральних розмірів споруд мостових переходів

Мостовий перехід, як один з найважливіших складових дорожньотранспортного галузі, містить у собі комплекс складних і дорогих споруд, витрати на будівництво та експлуатацію яких залежать від вибору місця переходу, правильного призначення конструкцій, їхніх генеральних розмірів, таких як: ширина отвору, відмітка низу прогонових будов і верху насипів підходів, глибина закладання фундаментів биків і стоянів, розмірів і розташування регуляційних споруд. При цьому повинна враховуватися основна вимога до мостового переходу, як до транспортної споруди – найкраще обслуговування перевезень [1, 2].

У свою чергу, мостові переходи відносяться до такої категорії споруд, які порушують природні форми русла, створюють своїми зовнішніми контурами додаткове вихроутворення, втрати енергії і таке поле швидкостей, при якому транспортуюча здатність потоку розподіляється дуже нерівномірно, що призводить до утворення значних розмивів, намивів. Ці обставини висувають актуальну, практичну проблему – розгляд процесу впливу споруд на потік, на відповідний розподіл у ньому швидкостей і на формування річкового русла, які, в остаточному підсумку, і визначають стійкість, надійність і довговічність зведених споруд.

Основою для правильного призначення необхідних розмірів споруд мостового переходу, що залежать від умов їхньої роботи (для різних варіантів перетинань водотоку), є прогнози можливого притоку води до мосту і

неминучих руслових деформацій. Дійсно, чим більше стиснення річкового потоку, тим більшими стають руслові деформації, і, як наслідок, збільшується глибина заглиблення опор, що разом з цим може призвести навіть до зміни їх конструкції. Із зменшенням отвору мостового переходу збільшується повний підпір перед мостом, який спонукає до підвищення насипів підходів та прогонових будов. За умов напруженої роботи переходу, при великих стисненнях ріки, треба передбачати певні види регуляційних споруд. Таким чином, ширина отвору є домінантною характеристикою мостових переходів.

Ширина підмостового поперечного перерізу потоку у загальному випадку може бути розділена на дві характерні частини: русло, по якому, окрім води, рухаються руслоформуючі наноси, і заплавна ділянка (або ділянки), по якій у побутовому стані наноси не рухаються.

Загальний розмив річкового потоку формується в зоні впливу мостового переходу, яка за протяжністю складається із двох зон – стиснення та розтікання. Зона стиснення – зона верхнього б'єфу мостового переходу, де відбувається збільшення руслової витрати за течією річки та, відповідно, зближення ліній току течії річки, вона обмежується створом початку стиснення та створом мостового переходу. Зона розтікання – зона нижнього б'єфу мостового переходу, де відбувається зменшення руслової витрати та, відповідно, збільшення витрати на заплавах за течією річки, вона обмежується створом мостового переходу та створом повного розтікання, де відновлюється природний режим річки [3].

Після перекриття частини ширини заплав незатоплюваними насипами підходів, вода почне притікати до мосту, через стислий переріз річки проходитимуть збільшені витрати води [4].

Збільшення витрат води супроводжується зростанням швидкостей течії, що призводить до посиленого виносу частинок ґрунту, тобто до розмиву принаймні на одній з ділянок отвору мосту – у руслі або на заплаві, а у ряді випадків – на обох ділянках. Розмиви на двох характерних частинах отвору моста відбуваються з різних причин [5]. На рівнинних річках, що несуть значну кількість наносів, глибини у руслі після розмиву визначаються по рівнянню балансу приносу-виносу наносів, а на заплавній ділянці отвору моста – за нерозмивною швидкістю для ґрунтів, що складають цю ділянку. Якщо рух наносів розвинений дуже слабо, то ним практично можна нехтувати. На рівнинних річках із слабо розвиненим руслом, що практично не несуть наносів, глибини, як на заплавній ділянці отвору мосту, так і у руслі, розраховуються за нерозмивною швидкістю, яка допускається для часток ґрунту, що відмощують русло в процесі розмиву.

При стиснені річки підходами до мосту, транспортуюча здатність потоку під мостом стає більшою за відповідну побутовому режиму, що призводить до обов'язкового розмиву русла у порівнянні з його положенням, яке встановилося до моменту проходу паводку. Очевидно, розмив припиниться тоді, коли транспортуюча здатність потоку, що знижується по мірі розмиву, впаде до побутової; при цьому витрати наносів, принесених потоком до моста і що виносяться з-під моста вниз за течією, порівняються і причина загального розмиву русла зникне.

На заплавних ділянках ґрунтові частинки у побутових умовах нерухомі, оскільки фактична побутова швидкість течії води по заплаві менша за розмивну. Розмив на цій ділянці розпочнеться тільки за умови, якщо швидкість потоку перевищить нерозмивну для часток наносів.

При розмиві глибина, а отже, і площа поперечного перерізу потоку зростатимуть, і швидкість течії зменшиться. Розмив припиниться після того, як швидкість течії, що знижується по мірі розмиву, дорівнюватиме нерозмивній, і рух частинок ґрунту не відбуватиметься. У разі невеликого стиснення потоку спорудами мостового переходу, швидкість течії на заплавній ділянці отвору мосту зростатиме також повільно і може не перевищувати нерозмивну; у цих випадках розмив заплавної ділянки відбуватися не буде.

# **1.2** Процес формування заплавного потоку під час паводку в зоні впливу мостового переходу

Заплава – це піднесена над меженним рівнем води у річці частина дна долини, покрита рослинністю та затоплювана повінню або паводком [6, 7]. Висота заплав залежить від висоти повені. Оскільки висота повеней змінюється з року в рік, то найбільш високі ділянки заплави затоплюються раз у десять або у сто років. Внаслідок цього не завжди легко знайти межу між заплавою та надзаплавною терасою. Велика роль у формуванні заплави, фацій, що її складають, та алювіальних відкладень належить боковій ерозії річок. Остання в значній мірі обумовлена первинною звивистістю річок.

В роботі [8], на основі результатів натурних та лабораторних досліджень представлено тривимірну модель річки з зонами вигинів, злиття та поділу потоку. Модель запропонована з метою прогнозування зміни конфігурації русла та заплави, а також транспорту річкових наносів. З метою прогнозування розмивних процесів в зоні мостового переходу в роботі [9] змодельована швидкісна структура річкового потоку на вигині. Дослідження ґрунтуються на одновимірній та двовимірній моделях русла за методом скінченних елементів, але визначення величин деформацій на заплавних ділянках не запропоновано. Вплив конфігурації річкових потоків, форм поперечних перерізів рісел та заплав на швидкісну структуру, зміну глибин досліджено на основі числових експериментів в роботі [10].

Фактична швидкість течії води на заплаві менше від руслової та, відповідно, і за розмивну. Ґрунтові частинки переважно знаходяться в нерухомому стані. Розмив на цій ділянці розпочнеться тільки за умови, якщо швидкість потоку перевищить нерозмивну для частинок наносів. Особливості рельєфу заплав та переходу річкового потоку на заплаву, розмиви берегів, умови формування заплавного потоку проаналізовані в роботі [11]. Великі заплави мають множинні і складні рельєфні утворення, рівень поверхні яких змінюється на різних масштабах. В западинах, під час повені, формуються заплавні потоки та створюються заболочені ділянки. В роботі [11] проаналізовано зони взаємодії річкового та заплавного потоку, особливості зміни рельєфу заплави через ерозію та осідання намулку на певних ділянках. Але не розглянуто питання щодо впливу гідротехнічних споруд або забудов на зміни рельєфних утворень заплав особливо під час проходження повені або паводку.

Поверхня заплави сформована в попередні періоди. Беручи це до уваги, дослідників цікавить пропускна здатність зарослих ділянок заплав. Вивчення зміни морфологічних процесів, конфігурації звивистого русла річки в умовах зарослих заплав під час повені на основі двовимірної моделі наведено в роботі [12]. Та слід зазначити, що запропоновані рішення мають в більшості емпіричний характер, а у рівняннях руху потоку визначається узагальнений член, що враховує гідравлічний опір поверхні заплави.

Створення цифрової моделі річки з урахуванням топографічних та морфометричних змін дозволило авторам роботи [13] отримати штучний ландшафт річкової системи. Запропоновані морфодинамичні та стохастичні підходи засновані на узагальненні природних кількісних закономірностей змін ландшафту та не дозволяють визначати величини розмивних деформацій руслової і заплавної частин отвору мосту.

Згідно наведених в [14] результатів лабораторних досліджень з рухомим шаром рослинності, швидкість розвитку деформацій, формування заплавного потоку та рельєфу самих заплав обумовлені розподілом, ростом та походженням рослинності. Відсутність рослинності сприяє формуванню потоку з найменшою звивистістю, річкова рослинність уповільнює розвиток деформацій на заплавах та сприяє поглибленню русла. Рослинність різнорідного походження на одній заплаві сприяє осіданню намулку та розвитку деформацій на другій, збільшує звивистість русла, створює умови для розвитку нових заплав та островів.

Дослідження шорсткості на заплавних ділянках в залежності від типу та параметрів рослинності проводилося в роботі [15]. Порівняння повітряних та

водних умов показало, що шорсткість значно зменшується на затоплених ділянках, що обумовлено їх гідравлічними умовами, видаленням рослинності та розвитком деформацій на заплавах.

Вплив заплавної рослинності на річкові форми в плані та транспортуючу здатність заплавного потоку було досліджено в роботі [16] за допомогою 2D морфодинамічної моделі з підмоделями для стійкості до потоку та розподілу рослин. Складові опору потоку поділені на опір ґрунту та опір рослинності. Вплив типу, конфігурації та щільності заплавної рослинності на транспортування та осідання річкової зависі, розвиток деформацій на заплавах наведено в роботі [17].

Запропоновані підходи [14-17] щодо дослідження процесів формування заплавних потоків відповідають їх природному стану, а не в штучно стиснутому. Будь-яка аналітична апроксимація для визначення величин як загальних, так і місцевих розмивів на заплаві, з урахуванням розподілу швидкості всередині шару рослин, а саме в зоні впливу мостових переходів, у сучасній науковій літературі поки що не виявлена. Це пов'язано зі складністю моделювання деформаційних процесів на заплавах та відсутністю однозначного розв'язку основних рівнянь гідродинаміки.

Грунтовний аналіз процесів, що відбуваються в руслі та на заплавних ділянках річок, наведено в роботі [18]: розглянуто руслоформуючі фактори та транспорт наносів. Проблемою неоднорідності гідравлічних опорів по живому перерізу річкового потоку в теоретичній і експериментальній постановці займався Г.В. Железняков. В його роботах [19, 20] було доведено, що на сполученнях фрагментів русла і заплави, з різними відносними шорсткостями дна, губиться частина енергії потоку, що в цілому призводить до зменшення пропускної здатності русла до 30 %. Зменшення швидкостей на одній ділянці русла (з меншими гідравлічними опорами) не компенсується збільшенням швидкостей на суміжній ділянці заплави з великими опорами. Це явище одержало назву "кінематичний ефект потоку" (к.е.п.). Г.В. Железняковим шляхом перетворення системи диференціальних рівнянь та нерозривності була отримана залежність:

$$\int_{0}^{B-B_{\kappa e}} \alpha_{B} v \frac{\partial v}{\partial l} db + \int_{0}^{B_{\kappa e}} \alpha_{B} B_{\kappa e} \frac{\partial v_{\kappa e}}{\partial l} db + \int_{0}^{B} \alpha' v \frac{\partial v}{\partial l} db + g \int_{0}^{B} \frac{\partial h}{\partial l} db = gIB - \int_{0}^{B-B_{\kappa e}} \frac{v^{2}}{C^{2}h} db - \int_{0}^{B_{\kappa e}} \frac{v_{\kappa e}}{C^{2}_{\kappa e}h} db,$$

$$(1.1)$$

$$\int_{0}^{B} \frac{\partial h}{\partial l} db + \int_{0}^{B-B_{\kappa e}} v \frac{\partial h}{\partial l} db + \int_{0}^{B} h \frac{\partial v}{\partial l} db = 0,$$

де  $B_{\kappa e}$  – частина ширин потоку, на якій спостерігається кінематичний ефект;  $\alpha_{B}, \alpha'$  – коефіцієнти Коріоліса та Буссінеска для вертикалі;

*l*, *b* – елементи довжини та ширини потоку:

*v* – середня на вертикалі швидкість потоку;

ке – індекс, що означає те, що розрахунок даного параметра виконується з урахуванням кінематичного ефекту.

Запропонований Железняковим підхід враховує велику кількість факторів, але водночає вимагає суттєвого доопрацювання, зокрема щодо визначення ширини потоку, коефіцієнта Шезі в залежності від рослинності тощо.

В роботі [21] представлена модель руху стебел рослинності під дією потоку, ґрунтуючись на принципах роботи балки з защемленим кінцем під дією розподіленого навантаження.

Для систематизації складного та різноманітного процесу взаємодії руслового та заплавного потоку в роботі [22] наведено його типизацію. Для першого типу характерні паралельні динамічні (внаслідок цього – геометричні) осі руслового та заплавного потоків. Другий тип – змішаний, де відбувається як і паралельно-струменевий рух, так і зменшення водного потоку на заплаві та збільшення витрат у руслі, що можливе за рахунок розходження осей потоків. Третій тип – характеризується також паралельними динамічними осями двох потоків та їх сходженням, що обумовлює збільшення витрати на заплаві. Четвертий тип взаємодії відповідає меандруючим потокам, коли відбувається перетин динамічних осей. Найбільш складний випадок, що відноситься до п'ятого типу, це взаємодія русла з двосторонньою заплавою зі змінною шириною та глибиною.

В зоні впливу мостових переходів відбувається територіальний перерозподіл водних ресурсів, виникає проблема у регулюванні стоку, прогнозуванні перевідкладень наносів і пропускної здатності заплав [23]. Процес виходу руслового потоку на заплаву можна поділити на два періоди.

Перший період характеризується зменшенням швидкості за рахунок к.е.п. [19, 20] під впливом рослинного покриву, що суттєво переформовує швидкісне поле (рис.1.1, а).

Другий період одночасної роботи руслового та заплавного потоків (рис.1.1, б) обумовлений їх взаємодією за рахунок постійного обміну енергією між собою. Заплавний потік має меншу швидкість ніж у руслі за рахунок впливу рослинності та конфігурації рельєфу дна. Таким чином він пригальмує русловий потік, який в свою чергу живить заплавний.



б)

Рисунок 1.1 – Схема процесу виходу річки на заплаву

Практично всі заплави мають рослинний покрив, але у їх формуванні переважна роль належить зваженим наносам. Під час повеней та паводків зважені наноси осідають у вигляді намулку, який за багаторічний період пошарово наростає. У результаті підвищення рівня води в руслі або при руйнуванні русловим потоком берегового заплавного уступу в зоні впливу мостового переходу наноси, що з часом осіли на заплаві, повертаються назад у русло. Рух зависі за рахунок обміну між руслом і заплавою, відповідне формування поля мутності на заплавному потоці можна поділити на три фази: донасичення, транспортування, осідання (рис. 1.2).

Донасичення заплавного потоку зависсю (рис.1.2, а) здійснюється на ділянці переходу русла на заплаву, а також за рахунок підняття з дна частинок твердої фази. За експериментальними даними, наведеними в [24], дрібні зважені частки переміщуються у потоці майже у повній відповідності з його кінематичними особливостями, траєкторії їх руху у більшості випадків мають складну хвилеподібну форму. Далі відбувається транспортування зависі (рис 1.2, б) у заплавному потоці. Спираючись на результати експериментальних досліджень, представлених у роботах [18, 20, 24], розглянемо вплив рослинного покриву на водний потік на заплаві.



Рисунок 1.2 – Процеси, що формують концентрацію твердої фази в потоці: а – донасичення; б – транспортування; в – осідання

Стебла рослинності так само, як і частинки твердої фази, виступають в ролі перешкод та викликають сили гідродинамічного опору. Ці сили суттєво пригальмовують потік.

За рахунок обтікання перешкод, в ролі яких виступають стебла рослинності, формуються додаткові завихрення та відбувається турбулізація в потоці.

Наявність локальних тонких та високих перешкод рослин унеможливлює цілісну роботу потоку, та розділяє його на нескінченну кількість локальних потоків, що мають властивість періодично з'єднуватись та знову розділятись. Це обумовлює обмеження масштабу турбулентності в рослинному просторі.

Згідно з [21] дію сили опору  $F_P$  на площу поперечного перетину стебла можна представити як розподілене навантаження  $q_{H}$ , що прикладене до балки з жорстко защемленим кінцем. Механічні деформації структури рослинного покриву під дією потоку ускладнюють гідродинамічні процеси, що відбуваються на заплавних потоках.

Нахил стеблини за потоком впливає на поле швидкостей та характер її обтікання. Наявність рослинності суттєво знижує швидкість потоку, яка наближається до швидкості розмиву  $V = V_p$ . При цьому процеси відриву в цілому призупиняються, або ж кількість частинок піднятих з дна може відповідати кількості частинок, що осіли. Процеси розмиву повністю компенсуються процесами осідання, але відсоток зависі в потоці не зменшується.

У період спаду піку повені або паводку, коли швидкість заплавного потоку суттєво зменшується і досягає  $V < V_p$ , домінують процеси осідання частинок (рис. 2.2 в) над процесами підняття.

Коли ж насип підходу перекриває частково заплаву в отвір мосту проходить вся витрата, що суттєво збільшує швидкості як і в самому руслі, так і на заплавних ділянках в зоні впливу мостового переходу. Відбувається активний обмін водних потоків русла та заплави, при цьому розвиваються загальні і місцеві розмиви. На рівнинних річках, що несуть значну кількість наносів, глибини у руслі після розмиву визначаються по рівнянню балансу приносу-виносу наносів, а на заплавній ділянці отвору моста – за нерозмивною швидкістю для ґрунтів, що складають цю ділянку.

Відповідно, обмін наносами між заплавою і руслом не завжди може бути урівноваженим, і тоді починаються розвиватися незворотні деформації, які будуть тривати поки система русло – заплава не перейдуть у стан динамічної рівноваги. Більшість крупних частинок випадають безпосередньо в місцях їх надходження на заплаву та іноді переходять у пасмову форму руху. Дрібні ж частинки переносяться у глиб заплави. Переважна маса донних наносів виявляється похованою під товщею намулку, дрібних фракцій, які були занесені на заплаву у паводок в зваженому стані. В тих місцях, де під час повені виникають місцеві значні швидкості течії, на поверхні заплав виявляються крупні фракції у вигляді окремих невеликих скупчень.

## 1.3 Теоретичні та експериментальні дослідження руху наносів

Розділення річкового, зокрема заплавного потоку на зони в залежності від режиму транспорту наносів, їх відкладання на заплавних ділянках, представлено в роботі [25]. Прогнозування транспорту наносів з метою ліквідації наслідків проходження повенів та паводків в зонах вигинів річкового потоку наведено в роботі [26]. Дослідження в згаданих роботах представлені для природних зон, без урахування наявності штучних споруд та відповідного впливу штучного стиснення на швидкісну структуру річкового потоку.

У роботі [27] представлено результати експериментальних досліджень транспорту наносів в лабораторному руслі, наведені порівняння з розрахунками на основі теоретичних моделей переносу річкового потоку. В роботі не представлені дослідження в зонах штучного стиснення відкритих русел, процеси що в них відбуваються суттєво відрізняються від стану природних потоків.

Експериментальні дослідження у роботах [24, 28] дозволили чітко визначити два види руху крупних частинок у потоці, а саме: ковзання частинок по дну і стрибкоподібний рух. При малих швидкостях частинки ковзають по дну, іноді обертаючись навколо вертикальної осі. Швидкість обертання збільшується із збільшенням швидкості потоку, частинки рухаються нерівномірно, ривками, то прискорюючись, то уповільнюючи свій рух, а то і зупиняючись. При збільшенні швидкості частинки починають перекочуватися, обертаючись при цьому навколо горизонтальної осі. Такий рух характерний і на заплавних ділянках, де рослинний покрив обмежує сальтацію придонних наносів. Це стає можливим тільки при досягненні критичної швидкості розмиву *V<sub>к</sub>*.

Дослідження водного режиму, визначення концентрації зважених наносів в умовах екстремальних кліматичних явищ, які суттєво відобразилися на гідрологічному стані річкової системи, представлені в роботі [29]. Але це не дозволяє в повній мірі розкрити механізм деформацій, як в руслах, так і на заплавах, та, відповідно, провести більш об'єктивну кількісну оцінку ступеня впливу на цей процес різних факторів.

Деформації річкових мікроформ, мезоформ та макроформ відображають всю повноту твердого стоку, але у формуванні заплав переважна роль належить зваженим наносам.

Під час повеней на затоплених заплавах зважені наноси осідають у вигляді шаруватого намулку, багаторічне наростання якого утворює основну заплавну фацію. Наноси, що з часом осіли тут, повертаються назад у річку у результаті підвищення рівня води або руйнування річкою берегового заплавного уступу при планових переміщеннях русла. Обмін наносами між заплавою і руслом може бути урівноваженим, і тоді всі деформації повинні розглядатися як зворотні, і вся система русло — заплава знаходиться у стані динамічної рівноваги. Проте провести на заплаві межу між зворотними і незворотними деформаціями важче, ніж у руслі. У сильно розвинених заплавах період повного обміну наносами між заплавою і руслом виявляється за тривалістю сумірним із строками, протягом яких можуть істотно змінюватися природні чинники, що визначають русловий процес. Тоді на заплаві можуть виявлятися елементи, не відповідні сучасному режиму річки. Такі елементи розглядаються як успадковані. Іноді вся заплава є успадкованою, і лише частина її зберігає активність.

Дослідженню руху наносів присвячено велика кількість робіт, переважно теоретичних. При побудові теорій руху зважених наносів, як правило,

вводиться цілий ряд припущень, головне з яких, – заміна дискретної сукупності рухомих частинок деяким фіктивним суцільним середовищем змінної густини.

В порівнянні з донними, більш дрібні зважені частки переміщуються у потоці майже у повній відповідності з його кінематичними особливостями. Розвиток теорії руху зависенесних потоків стосовно руслових процесів пов'язаний з іменами В.М. Маккавеєва [30], Х. Рауза [31], М.А. Веліканова [32–34], Франкля [35], Баренблатта [36 – 38] та інших. Велику бібліографію експериментальних і теоретичних досліджень руху неоднофазних середовищ можна знайти у роботах [39–44].

Зважені частинки мають, як правило, малий розмір, що дозволяє використовувати при їх вивченні достатньо строгі методи механіки багатофазних середовищ і гідродинаміки при великих числах Рейнольдса [45 – 56].

За експериментальними даними, наведеними у роботі [24, 28, 57], траєкторії руху зважених часток у більшості випадків мають складну хвилеподібну форму.

Останнім часом інтенсивно розвивається напрямок механіки багатокомпонентних середовищ, пов'язаний з розглядом рівнянь для функцій розподілу частинок за швидкостями і переходом від цих рівнянь до динамічних [59 – 66]. Результати цих досліджень переважно використовуються у газових потоках і майже не застосовуються у фізиці руслових процесів.

# 1.4 Особливості прогнозу деформацій на заплавних ділянках мостових переходів

## 1.4.1 Аналіз основних факторів, які обумовлюють розвиток розмивів на заплавних ділянках мостових переходів

При проектуванні на заплаві споруд мостових переходів та відповідному територіальному перерозподілі водних ресурсів, виникає проблема у

регулюванні стоку, прогнозуванні перевідкладень наносів і пропускної здатності заплав.

Трав'янистий покрив добре захищає ложе й укоси каналів від розмиву, дозволяє підвищити нерозмивні швидкості у каналі, може слугувати дешевим кріпленням укосів гідротехнічних споруд. На поверхні заплав також виявляються крупні фракції у вигляді окремих невеликих скупчень в тих місцях, де під час повені виникають місцеві значні швидкості течії. Але переважна маса донних наносів виявляється похованою під товщею намулку, дрібних фракцій, які були занесені на заплаву у паводок у зваженому стані. Цей намулок слід розглядати, як одну з форм акумуляції зважених наносів, які з часом знов прийдуть у рух в результаті підмиву заплавного уступу при планових переміщеннях русла. Проте період стану спокою цих відкладень такий великий, що може виявитися сумірним із строками, характерними для природних незворотних деформацій.

Переважно дослідників цікавить лише пропускна здатність зарослих ділянок заплав, тому запропоновані рішення мають в більшості емпіричний характер. Беручи до уваги, що заплавний потік залежить від підстилаючої поверхні, сформованої у попередні періоди, як правило у рівняннях руху потоку визначається член, що враховує гідравлічний опір підстиляючої поверхні заплави. Опір каналу із трав'янистим покривом розглядався у роботах [68 – 74], де приводяться різні розрахункові моделі.

У роботі [74] запропонований метод визначення гідравлічної шорсткості заплави, покритою рослинністю, з урахуванням зміни висоти рослин під дією річкового потоку. Відношення величин характерних розмірів перешкод, обумовлених рослинністю заплавного потоку прийнято за узагальнений параметр рослинності. Як характерний розмір рослинності, прийнято затоплений водою об'єм рослинності, що розташована у зоні обмеженої площини. За характерний розмір заплавного потоку прийнято, відповідно, об'єм паралелепіпеда з основою, яка визначається за розмірами обраної площини, і висотою, що дорівнює глибині потоку на заплаві. Під впливом набігаючого потоку чагарникова і трав'яна рослинність згинається, тобто відбуваються пружні деформації поперечного вигину. Ці особливості протікання потоків з рослинністю розглянуто в роботі [69]. Для кожної рослини відлічувався кут її нахилу від вертикального положення стебла у похилому й вертикальному положеннях. Таким чином, за узагальнений параметр стосовно до чагарникової, лугової й болотної рослинності, що згинається, автор [69] вважає, що повинна прийматися неповна висота рослини, з урахуванням нахилу її під дією потоку, що набігає.

У [68 – 72] різними методами ураховувалися деформації рослинності, які викликані середнім дотичним напруженням. Істотний вплив також роблять пульсації дотичного напруження. Запропонована у роботі [69] модель ураховує дію усередненої і пульсаційної компонент напружень, приведена ж схема дає можливість тільки у першому наближенні визначити деформації рослинності і їхній вплив на розподіл середньої швидкості, питомих витрат і всіх гідравлічних параметрів потоку. Спектр коливань поверхні визначено через спектр дотичного напруження, відповідно виражений через спектр тиску. У свою чергу, коливання поверхні рослинності вносять додатковий вклад у спектр пульсацій поздовжньої складової швидкості.

Проблема розповсюдження повені на ділянках з деревами, кущами, будівлями розглянута у роботах [72, 73]. На основі сучасних методів моделювання можна виділити один із підходів вирішення цієї проблеми. Задача у вертикальній площині – представлена для широкого каналу приблизно з постійною глибиною. "Звичайний" вертикальний розподіл швидкостей розглядається лише над шаром рослинності, у шарі рослин – профіль досить складний. Ряд експериментальних досліджень наведено у роботах [72–74]. Згідно постановки задачі, у роботах [72, 73] розподіл поздовжньої швидкості по вертикалі визначається з урахуванням рівномірно розподіленої сили, яка діє у шарі рослин. Однак яка-небудь аналітична апроксимація для визначення величин як загальних, так і місцевих розмивів на заплаві з урахуванням розподілу швидкості всередині шару рослин у сучасній науковій літературі поки що не запропонована.

Одночасний вплив таких процесів, як неусталений рух водного середовища та річкових структур; наявність значних областей з вирами; переформування руслових та заплавних форм в процесі деформацій призводить до розвитку загальних та місцевих розмивів у зоні впливу мостових переходів. З метою дослідження руйнівного впливу стихійних повеней, як наслідків зміни клімату, в роботі [75] представлене лабораторне дослідження фізичної моделі – ділянки річкового потоку з мостовим переходом. На основі проведених досліджень зроблено висновок щодо суттєвого впливу мостового переходу за рахунок перекриття заплавного потоку, відповідного переформування та збільшення швидкостей, посилення інтенсивності переносу наносів в руслі, але не розглядаються деформаційні процеси на заплавах. Це пов'язано з проблемою моделювання таких потоків в лабораторних умовах.

Фактори, що обумовлюють розвиток розмивів на заплавних ділянках, кардинально відрізняються від відповідних процесів у руслах [76, 77]. Швидкості на заплавній ділянці, а отже і потенціальна енергія потоку будуть значно меншими ніж в руслі через меншу витрату. На відміну від русла, заплави мають значний рослинний покрив, що представлений, як правило, не річковою рослинністю, а степовою, лісовою та болотяною, що суттєво впливає на загальні швидкості потоку. Рослинність працює за принципом гасника швидкостей та зумовлює додаткову турбулентність в нижній зоні.

Геологічна будова русла і заплави відрізняється. Русло, як правило, представлено донними наносами різної крупнисті, що перебувають в стані постійної міграції (процес розмивання та відкладення). Заплава ж, по-перше, представлена рослинним ґрунтом у верхній своїй частині, по-друге, відсутність тягнених наносів, по-третє, в нижній зоні велика ймовірність наявності піщаних та супіщаних ґрунтів.

Геометрична будова в поперечному профілі, при якій заплава знаходиться вище русла, при значному часі протікання паводку зумовлюватиме вирівнювання відміток дна русла та низу заплаві.

Процес взаємодії заплави з руслом під час паводку має досить складний характер, як було описано у попередньому підрозділі. В результаті цієї взаємодії можна спостерігати як відбувається утворення нових заплав за рахунок звуження русла (відкладення донних наносів, замулення) та в подальшому заростання його рослинністю, так і розширення русла за рахунок розмиву заплави. Для гідротехнічних споруд, зокрема мостових переходів, небезпечними являються саме ерозійні процеси.

Загалом же процес розмиву заплави можна поділити на три періоди.

Початковий період характеризується затопленням заплави водою та відсутністю ерозії. На цьому етапі заплава затоплюється водою, але за рахунок сил тертя, що зумовлені віддаленістю від русла, та впливу рослинності швидкість потоку на цій ділянці буде меншою ніж в руслі. Крім того уповільнюватиметься швидкість у самому руслі. Це явище уповільнення швидкості в руслі при потраплянні потоку на заплаву (к.е.п.) призводить до зменшення її пропускної здатності.

Заплавний потік, як і русловий, є гетерогенним, насиченим зависсю, що за рахунок гасіння швидкості потоку буде осідати на дні. Цей період триватиме порівняно недовго, тому що швидкість буде наростати, а рослинний ґрунт не має достатньо механічних властивостей щоб опиратися деструктивним процесам.

Другий період характерний початком розмивних процесів. Середня швидкість потоку вже достатня для того, щоб розмивати рослинний шар та вимивати рослини. Хоча рослинність продовжуватиме працювати як гасник та зменшуватиме швидкість потоку, ґрунт вимиватиметься і опір зменшуватиметься. Тривалість цього періоду буде залежати від типу рослинності, темпів наростання швидкості та структури самого ґрунту. Третій період характеризуватиметься різким збільшенням середньої швидкості у зв'язку з повним розмивом верхнього шару з рослинністю. Нижні шари опиняться оголеними, розмив буде тривати інтенсивніше, швидкість зростатиме. Кінець цього періоду буде ознаменований злиттям русла з заплавою. Тривалість цього періоду залежить від структури та шарів ґрунтового масиву заплави.

Рослинність суттєво призупиняє розвиток деформацій на заплаві шляхом зменшення середніх швидкостей потоку. Але при наявності досить швидкої течії протягом відчутного проміжку часу рослинний покрив може бути знищений, після чого робота потоку на заплаві фактично відповідатиме роботі руслового потоку, а заплавна ділянка перетворюватиметься на русло. При наявності на цьому місті мостової споруди режим нормальної експлуатації може бути порушений.

При розрахунку деформацій в руслі та на заплаві в зоні впливу мостового переходу важливо встановити не тільки середні глибини, але і максимальні, такі, що достатньо точно визначають необхідну глибину закладання основ опор мосту. Відповідно, при проектуванні мостових переходів найбільший інтерес являє собою величина максимального розмиву, який може відбутися у процесі експлуатації мосту при розрахунковій повені або паводку.

Результати лабораторного дослідження розвитку місцевого розмиву на заплавній ділянці моделі річки представлені в роботі [77]. Запропоновано співвідношення для прогнозування максимальної глибини біля мостової опори, яке ґрунтується на таких параметрах, як ширина русла та заплави, число Фруда, розмір часток наносів. В роботі [78] представлено результати числового моделювання річкового потоку з мостовим переходом. На основі двовимірних, за усереднених глибиною, математичних моделей отримано розподіл швидкостей та глибин біля мостових опор з урахуванням стиснення руслового та заплавного потоків. Наведено зміну глибини потоку, розглянуто зони умовного поділу руслового та заплавного потоків, вплив їх конфігурацій на розмивні процеси.
Експериментальні дослідження з розвитку місцевого розмиву біля мостової опори, проведені в умовах, максимально наближених до натурних, представлені в роботі [79]. Проаналізовано час розвитку місцевих розмивів, їх конфігурації, особлива увага приділялася зонам переходу русла на заплаву.

Для визначення величин місцевих зосереджених розмивів біля ряду гідротехнічних транспортних споруд, зокрема струмененапрямних дамб мостових переходів, мостових опор, огороджувальних дамб, руслорегулюючих півзагат тощо, використовується методика [80]. В методиці [80] прийняті концептуальні схеми формування розмивів, які включають найбільш небезпечні сполучення умов і, зокрема, наявність у багатьох випадках донного вихорового вальця, що підсилює інтенсивність вимивання та винесення розмитого ґрунту на один-два порядки. Наведений аналіз досліджень обумовлює нову, актуальну наукову проблему з визначення величини максимального розмиву на заплавних ділянках в отворі мостового переходу з урахуванням особливостей цієї зони.

Дослідження паводкового стоку в зоні мостового переходу розглянуто в роботі [81]. Автори представили результати експериментальних досліджень щодо пропускної здатності річкового потоку безпосередньо в створі мосту, розвитку місцевих розмивів біля мостових опор та параметрів швидкісної структури на заплавних ділянках. Вплив будівництва мосту на гідрологію заплав в межах великих міст проаналізовано в роботі [82]. В рамках представленого дослідження проведена концептуальна оцінка морфологічних змін у річці та її заплави. Дослідження розвитку загального розмиву у нижньому б'єфі гідротехнічних споруд на основі моделювання транспорту наносів та деформаційних процесів у руслі в нерівномірному потоці представлено в роботі [83]. В роботі [84] встановлено залежність відносної глибини розмиву від ступеня стиснення річкового потоку. Але в наведених межових умовах, в [83, 84], не зазначено саме параметри зон впливу гідротехнічної споруди.

Результати натурних досліджень розмивних процесів в підмостових руслах представлено в роботі [85]. Для уникнення аварійного стану мосту

запропоновано способи укріплення та захисту мостових опор. Але в роботі не запропоновано методи прогнозування деформацій в зоні впливу мостового переходу, особливо на заплавних ділянках.

### 1.4.2 Методи визначення нерозмивних швидкостей при розрахунках деформацій на заплавних ділянках

При розрахунку деформацій необхідно враховувати різні причини їхнього виникнення для руслових і заплавних ділянок [86]. Розмив русел відбувається через порушення балансу наносів, розмив заплавних ділянок відбувається при перевищенні нерозмивної швидкості над швидкістю в потоці. Тому глибину потоку на заплаві після розмиву визначають за формулою:

$$h^{n+1} = \frac{h^n \beta_\Pi \left\langle U_{SL} \right\rangle_{i,j}^n}{(1-\lambda) U_{{}_{HPDO3M}}}, \qquad (1.2)$$

де  $\langle U_{SL} \rangle_{i,j}^{n}$  – середні за глибиною (на вертикалі) значення швидкості потоку на часовому шарі *n*,  $\langle U_{SL} \rangle_{i,j}^{n} = \frac{1}{h} \int_{z_0}^{h} (U)_{i,j}^{n} dx_3$ , м/с;

 $\beta_{\Pi}$  – ступінь стиснення заплавного потоку;

*B*<sub>*pier*</sub> – ширина опори, м;

 $\lambda$  – відносна ширина опори,  $\lambda = B_{pier}/l_{np}$ ,  $l_{np}$  – довжина прогону мосту, м.

Дослідження показують, що середня нерозмивна швидкість, яка формується русловим потоком після закінчення розмиву підмостового русла, є функцією наступних величин:

$$U_{_{Hepo3M}} = f(\rho_{_{S}}^{o}, \rho_{_{L}}^{o}, h, D, \varphi, S, T, ..., M).$$
(1.3)

де  $\rho_s^{o}$  – густина частки наносів, що складають русло та заплаву,  $\rho_s^{o} = 2650$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_L^{o}$  – густина води,  $\rho_L^{o} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;

h – глибина потоку, м;

*D* – діаметри частки наносів, м;

*φ* – коефіцієнт, який враховує неоднорідність складу ґрунтів;

 $S = \frac{Q_s}{Q}$  – мутність потоку (відносний вміст наносів у потоці);  $Q_S$  – питома витрата наносів; Q – питома витрата води;

Т – параметр, який характеризує турбулентність потоку;

М-інші величини.

У авторів окремих формул не було єдиного підходу до визначення умов граничної рівноваги часток ґрунту і нерозмивних швидкостей, що їм відповідають. В.С. Кнороз [87] у своїх дослідах за нерозмивну швидкість прийняв середню величину з двох швидкостей, які відповідають першим переміщенням часток і їх масовому руху по всій ширині лотка:

$$\frac{U_{_{Hepo3M}}}{\sqrt{gD}} = 1.3 \lg \frac{14.7h}{D^{0.75}}$$
(1.4)

У формулі (1.5) В.Н. Гончарова нерозмивна швидкість відповідає середній швидкості потоку, при якій частки на дні уже не переміщуються. Для переходу до їх так званої зриваючої швидкості, при якій відбувається вже безперервний відрив окремих часток на дні, він рекомендує коефіцієнт 1,4. Формула В.Н. Гончарова [44, 88, 89]:

$$\frac{U_{_{Hepo3M}}}{\sqrt{gD}} = 0.95 \, \lg \frac{8.8h}{D} \,.$$
(1.5)

Г.І. Шамов [90] за нерозмивну швидкість <sup>U</sup><sub>нерозм</sub> приймає середню швидкість, при якій починається рух наносів. Крім того, він вводить поняття

нижньої граничної швидкості потоку  $u_{\text{H.Г.}} = \frac{U_{\text{нерозм}}}{1,2}$ , при якій припиняється рух наносів, і верхньої граничної швидкості  $u_{\text{B.Г.}} = 1,3U_{\text{нерозм}}$ , при якій починається масовий рух наносів:

$$\frac{U_{\text{нерозм}}}{\sqrt{gD}} = 1,47 \left(\frac{h}{D}\right)^{\frac{1}{6}}.$$
(1.6)

В дослідах А.М. Мухамедова [91] за нерозмивну швидкість прийнято її значення, яке відповідає рухові лише окремих часток по всій довжині лотка, а в дослідах Б.І. Студеничникова [92], – яке відповідає припиненню руху наносів після змиву деякого нестійкого шару часток ґрунту:

$$\frac{U_{\mu e p o 3M}}{\sqrt{g D}} = 1.15 \left(\frac{h}{D}\right)^{0.25}.$$
(1.7)

В.Н. Гончаров [44, 89, 93] в якості характеристики крупності суміші неоднорідних наносів рекомендує приймати середньозважений діаметр. Вплив же ступеню неоднорідності ґрунту на нерозмивну швидкість в ранній своїй роботі [93] В.Н. Гончаров пропонує враховувати коефіцієнтом неоднорідності:

$$\varphi = \frac{D_{\text{cep}}}{D_{\text{max}}}, \qquad (1.8)$$

де  $D_{cep}$  – середньозважений діаметр часток;

*D*<sub>max</sub> – діаметр найбільших часток в суміші,

і розрахунок нерозмивної швидкості для неоднорідних ґрунтів виконувати за наступною формулою:

$$U_{_{Hepo3M}} = 3.9h^{0.2}\varphi^{0.2} (D_{_{cep}} + 0.0014)^{0.3}$$
(1.9)

Г.І. Трофимов [94] за матеріалами натурних спостережень встановив, що можливі випадкові відхилення  $D_{max}$  призводять до того, що значення швидкостей за формулою (1.9) виходять в 1,5–2 рази меншими, ніж в дійсності. Таку розбіжність він пояснював більшою неоднорідністю природних ґрунтів у порівнянні з тими, які випробовувались в лабораторії, і вважає більш правильним коефіцієнт неоднорідності приймати у вигляді наступного відношення:

$$\varphi = \frac{D_{\rm cep}}{D_{90}}, \qquad (1.10)$$

де  $D_{90}$  – діаметр часток, який відповідає 90 % за кривою гранулометричного складу.

У своїх більш пізніх роботах [44, 89] В.Н. Гончаров відмовився від урахування неоднорідності ґрунту за допомогою коефіцієнта  $\varphi$ . Вважаючи, що при змішаному складі ґрунту висота виступів шорсткості визначається не середніми, а найбільш крупними частками  $D_5$ , частка яких складає 5 %, він ввів у знаменник логарифма формули (1.5) замість  $D_{cp}$  крупність  $D_5$ , подаючи її в наступному вигляді:

$$U_{_{Hepo3M}} = 0.95 \sqrt{gD_{_{cep}}} \lg \frac{8.8h}{D_5},$$
 (1.11)

де  $D_5$  – середній розмір найбільш крупних часток, які складають 5% у суміші.

І.І. Леві [95] в якості середнього розміру, який визначав крупність неоднорідних ґрунтів, пропонував приймати також  $D_{cep}$ . Вплив же ступеню неоднорідності суміші на нерозмивну швидкість враховував як введенням у логарифм формули для нерозмивної швидкості замість середнього розміру часток  $D_{cep}$  більш крупного діаметра  $D_{90}$ , так і врахуванням коефіцієнта неоднорідності  $\varphi$ . Його розрахункова формула для неоднорідних ґрунтів має такий вигляд:

$$U_{_{Hepo3M}} = 1.4 \sqrt{g D_{cep}} \varphi^{0.1} \lg \frac{12h}{D_{90}}, \qquad (1.12)$$

де  $\varphi = D_{cep} / D_{max}$ , тобто за рекомендаціями В.Н. Гончарова [93].

У своїй роботі К.В. Гришанін [47] пропонував за характеристику крупності неоднорідних ґрунтів приймати не середньозважений діаметр  $D_{cep}$ , а медіанний  $D_{50}$ , який відповідає 50 % за кривою гранулометричного складу. В якості розрахункової формули нерозмивних швидкостей для неоднорідних ґрунтів ним була рекомендована формула І.І. Леві в наступному вигляді:

$$U_{_{Hepo3M}} = 1,3\sqrt{gD_{_{50}}}\varphi^n \lg \frac{12h}{D_{_{90}}},$$
(1.13)

де  $\varphi = D_{50} / D_{90}$ ;

*n*=0,2 за В.Н. Гончаровим і *n*=0,1 за І.І. Леві.

П.В. Єгіазаров [97] формулу нерозмивної швидкості представив в наступному загальному вигляді:

$$U_{_{Hepo3M}} = \sqrt{f_0 a_{_{SL}} g D} \sqrt{\frac{2}{\lambda}} , \qquad (1.14)$$

де  $a_{SL} = \frac{\rho_S^o - \rho_L^o}{\rho_L^o}$  – відносна щільність часток;

 $f_0$  – коефіцієнт опору рухливого русла в умовах граничної стійкості наносів:

$$f_{0} = \frac{0,06 \,\Phi}{C_{x} \, \lg \left(19 \frac{D_{50}}{D_{r}}\right)},\tag{1.15}$$

де  $\Phi$  – коефіцієнт форми зерен;

 $C_D$  – коефіцієнт опору частки, залежить від форми частки та умов її руху;

*D*<sub>r</sub> – розмір виступів шорсткості.

Так як для неоднорідних ґрунтів  $D_{50} < D_r$ , то нерозмивна швидкість для цих ґрунтів за рекомендаціями І.В. Єгіазарова отримується більшою, ніж для однорідних ґрунтів.

В.Ф. Толмаза [98, 99] також вважав, що нерозмивні швидкості для неоднорідних ґрунтів збільшуються, вводячи в розрахункову формулу коефіцієнт неоднорідності у вигляді:

$$\varphi = \left(\frac{D_r}{D_{cep}}\right)^{\frac{1}{4}}.$$
(1.16)

Спираючись на ряд експериментальних досліджень процесу розмиву на моделі лабораторної річки з мостовим переходом, В.Я. Савенко в своїй роботі [100] рекомендує для визначення нерозмивної швидкості використовувати отримані В.С. Кнорозом вирази. Це формули, які відповідають трьом відомим випадкам гідравлічного опору при турбулентному русі рідини: для автомодельної області, де опір дна потоку не залежить від в'язкості води; для перехідної області, де опір залежить від шорсткості дна та від в'язкості води; для області гладкостінного опору, де опір дна не залежить від шорсткості дна.

Для автомодельній області, при D>1,5 мм, формула має вигляд:

$$U_{{}_{Hepo3M}} = 1,3\sqrt{gh} \lg \frac{12h}{\Delta_a}, \qquad (1.17)$$

де  $\Delta_a$ , згідно рекомендацій [100], слід приймати рівній діаметра часток, забезпеченому на 90 %, тобто  $\Delta_a = D_{90}$ .

У перехідній області, при 1,5>D>0,25 мм:

$$U_{_{Hepo3M}} = 32D^{0,25} \left( \lg \frac{7,5h}{D} - 5,5D \right).$$
(1.18)

В області гладкостінного опору, при D<0,25 мм:

$$U_{_{Hepo3M}} = \frac{90D^{0.05}h^{0.125}}{\sqrt{h^{0.25} + 7.5}} .$$
(1.19)

Наведений короткий огляд робіт показує, що на сьогодні відсутній єдиний підхід до врахування впливу неоднорідності ґрунту на величину нерозмивної швидкості, що свідчить про складність оцінки критерію граничної стійкості неоднорідної за крупністю суміші часток, які складають русло та заплаву.

#### Висновки до розділу 1

1. Процес виходу річки на заплаву можна поділити на два періоди: період виходу руслового потоку на заплаву і період одночасної роботи руслового та заплавного потоків. В заплавному потоці можна виділити три процеси, що формують поле мутності твердої фази: донасичення, транспортування, осідання.

2. Геоморфометрія заплавних ділянок характеризується наявністю значної рослинності, намулків від попередніх повеней та паводків і обумовлює генетичну несхожість з руслами. Для заплавних ділянок не запропоновано математичних моделей, які дозволяють враховувати особливості цих ділянок стосовно розподілу рослинності та намулку. 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 визначити реальний розподіл швидкісної структури та деформацій на заплавах.

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

4. Представлений аналіз фізичної моделі формування заплавного потоку стосовно розподілу наносів під час повеней, паводків в зоні впливу мостового переходу надалі дозволить отримати аналітичну апроксимацію для визначення величини розмивів на заплаві з урахуванням розподілу швидкості всередині шару рослин.

5. Результати досліджень першого розділу викладено у наступних публікаціях [1, 2, 4, 68, 86].

#### РОЗДІЛ 2

# МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЗАВИСЕНЕСНОГО ПОТОКУ З ТРАВ'ЯНОЮ РОСЛИННІСТЮ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗПОДІЛУ ГЛИБИН І ШВИДКОСТЕЙ НА ЗАПЛАВІ

# 2.1 Вихідні рівняння для розробки математичної моделі заплавного потоку

Основою для отримання моделі переносу заплавного потоку в зоні впливу мостового переходу повинні бути рівняння динаміки реальної рідини в "напруженнях" або, що теж саме, рівняння Нав'є – Стокса. Однак існуючі аналітичні та числові методи розв'язування цих рівнянь розроблені лише для найпростіших задач, що не представляють особливого інтересу з практичної точки зору, і переважно для випадку ламінарного руху рідини:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_{LS}} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - g_i - \sum f_i , \qquad (2.1)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_j} = 0, \qquad (2.2)$$

де  $\rho_{SL}$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>;  $g_i$  – проекція об'ємної сили;

 $\sum f_i$  – сума масових сил.

Явище прилипання рідини до поверхонь твердих частинок, які занурені у неї, дозволяє розглядати зависенесний потік, що заповнює певну область простору, як неоднорідне суцільне середовище. Основна його відмінність від однорідного середовища полягає у наявності межі розділу фаз, є розривною поверхнею. За фізичну характеристику стану цього середовища доцільно приймати густину неоднорідного середовища як суму густин окремих його складових. Якщо ж розглядати рідку або тверду фазу окремо, то вони не заповнюють повністю весь об'єм, зайнятий зависенесним потоком, і, по відношенню до нього, не є суцільним середовищем. Отже, гідродинамічні характеристики фаз – це розривні функції координат і часу, які не можуть бути продиференційовані у рамках класичного математичного аналізу, що створює певні труднощі при складанні диференціальних рівнянь руху фаз методами механіки однорідного суцільного середовища.

Оскільки поняття однорідного суцільного середовища тісно пов'язане з уявленням про безперервність його фізичних характеристик стану і руху у просторі, для побудови континуальної моделі руху тієї або іншої фази необхідно перейти від розривних фізичних і гідродинамічних характеристик цієї фази до безперервних характеристик, що диференціюють у просторі та часі по всій області, яка зайнята зависенесним потоком. Такий перехід має місце отриманні динамічних рівнянь твердої або рідкої фази при для феноменологічним методом або ж методом усереднювання. Феноменологічний метод складання рівнянь застосовують до деяких виділених класів сумішей і течій, широко використовують у багатьох роботах, зокрема у [101 – 122]. Цей метод ґрунтується на припущенні: розмір включень набагато менше відстаней, на яких істотно змінюються параметри руху фаз або суміші у цілому. Це дозволяє розглядати кожну фазу окремо як деяке однорідне суцільне середовище, що заповнює весь об'єм, зайнятий сумішшю, і характеризується властивими їй приведеною густиною, полями швидкостей, напруженнями та іншими параметрами.

Необхідно відмітити, що припущення про розмір включень не обов'язкове, оскільки в основі феноменологічної моделі лежить швидше за все інтуїтивне уявлення про суцільність, відповідно, у даному випадку складання рівнянь руху для тієї або іншої фази суміші носить формальний характер. Тому феноменологічний метод не дозволяє відповісти на ряд принципових питань теорії неоднорідних потоків, зокрема на питання про фазові напруження і форми представлення головного вектору поверхневих сил у фазах, у чому і полягає основний недолік цього методу.

Детальніше, з урахуванням особливостей, які властиві для класів сумішей, виведення рівняння виконується ЩО рухаються, методом усереднювання характеристик фаз. У континуальній механіці сумішей широке застосування отримали методи просторового і тимчасового усереднювання [101 – 103, 110, 114, 99]. Використання цих методів вважається необхідним у теорії турбулентних зависенесних потоків, оскільки поля гідродинамічних величин у цих потоках характеризуються різкою мінливістю у просторі – часі. Дo плавних середніх характеристик потоку можна перейти лише усереднюванням початкових полів. Розглянемо більш детально просторовий і часовий методи усереднювання.

У області, зайнятій зависенесним потоком, у тривимірному просторі, виділимо навколо довільно заданої точки O з координатами  $x_i$ , i = 1,2,3, геометрично правильний об'єм Q, наприклад паралелепіпед або кулю, з центром у цій точці. Характерний розмір цього об'єму вважається раз і назавжди заданим, малим у порівнянні з характерним масштабом зависенесного потоку і великим у порівнянні з характерним розміром твердих частинок. Позначимо через  $Q_s(x, t)$  і  $Q_L(x, t)$  об'єми, заповнені твердою і рідкою фазами усередині Q. Ці об'єми і їх поверхні є змінними величинами, залежними від часу і координат геометричного центру об'єму Q. Нехай  $f^*_{s}=(x,t)$  і  $f^*_{L}=(x,t)$  – будь-які (скалярні, векторні або тензорні) фізичні характеристики твердої і рідкої фаз. У будь-який фіксований момент часу ці характеристики є розривними функціями координат у області зависенесного потоку: вони приймають певні ненульові значення у області своєї фази і рівні нулю – поза нею. Середні значення цих функцій у об'ємі визначають за формулами:

$$f_{Q,S} = Sf_S, \quad f_{Q,L} = (1 - S)f_L.$$
 (2.3)

Змінні величини, які входять у (2.1), S і (1 – S) записуються як:

$$S(x,t) = Q_s(x,t)/Q,$$
 (2.4)

$$(1-S)(x,t) = Q_L(x,t)/Q$$
 (2.5)

і являють собою локальні об'ємні концентрації твердої і рідкої фаз або мутність потоку, а змінні величини:

$$f_{s}(x,t) = \frac{1}{Q_{s}(x,t)} \iiint_{Q_{s}(x,t)} f_{s}^{*}(x_{1} + \xi_{1}, \dots, t) d\xi_{1} d\xi_{2} d\xi_{3}$$
(2.6)

$$f_{L}(x,t) = \frac{1}{Q_{L}(x,t)} \iiint_{Q_{L}(x,t)} f_{L}^{*}(x_{1} + \xi_{1}, \dots, t) d\xi_{1} d\xi_{2} d\xi_{3}$$
(2.7)

– середні значення характеристик  $f_s^*(x,t)$  і  $f_L^*(x,t)$  у об'ємах своєї фази, усередині Q.

Отримані, таким чином, усереднені характеристики твердої і рідкої фаз – безперервні функції по всій області, зайнятій зависенесним потоком. З цієї точки зору обидві фази є деякі суцільні середовища, з безперервним розподілом у них фізичних величин. Проте, рух зависенесного потоку має турбулентний характер, тому усереднені за простором характеристики фаз повторно усереднюють певним методом, частіше всього за часом, для переходу до більш плавних і регулярних їх значень. При використанні методу часового усереднювання зазвичай передбачається, що для кожного даного зависенесного потоку існує такий період усереднювання, значення якого є малим, у порівнянні з періодом або масштабом будь-якої повільної зміни у потоці, і великим, у порівнянні з періодами турбулентних пульсацій характеристик фаз. Середні за часом значення функцій  $f_{Q,S}$  і  $f_{Q,L}$  визначаються наступним способом:

$$\overline{f}_{\varrho,s} = \overline{Sf}_s + \overline{Sf}_s', \qquad (2.8)$$

$$\overline{f}_{\mathcal{Q},L} = (1 - \overline{S})\overline{f}_L + \overline{S}\overline{f}_L', \qquad (2.9)$$

де риска зверху є символом часового усереднювання, а  $\overline{S}, \overline{f}_s, \overline{f}_L$  і  $S', f'_s, f'_L$  – усереднені та пульсаційні значення відповідних величин.

Формули (2.8) і (2.9) відповідають послідовному усередненню за простором і часом. Можливо, проте, розглядати і більш загальне просторовочасове усереднювання вихідних характеристик фаз  $f_s^*(x,t)$  і  $f_L^*(x,t)$ . Для цього у чотиривимірному просторі (просторі – часі) виділяють навколо кожної точки (x, t), так званий, «чотиривимірний циліндр» Z, основа якого – вказаний малий фізичний об'єм Q, а висота – деякий інтервал часу T. Середні у Z значення функцій  $f_s^*$  і  $f_L^*$  позначимо відповідно через  $\tilde{f}_{Q,s}$  і  $\tilde{f}_{Q,L}$ ,

$$\tilde{f}_{O,S} = \overline{S}\tilde{f}_S, \qquad (2.10)$$

$$\tilde{f}_{Q,L} = \left(1 - \overline{S}\right) \tilde{f}_L. \tag{2.11}$$

Тут, як і у (2.8) і (2.9), величина  $\overline{S}(x,t)$  являє собою усереднену за часом локальну об'ємну концентрацію твердих частинок у потоці. Середні ж значення  $\tilde{f}_s$  і  $\tilde{f}_L$  дорівнюють:

$$\tilde{f}_{s}(x,t) = \frac{1}{Z_{s}(x,t)} \int \iiint_{Z_{s}(x,t)} f_{s}^{*}(x_{1} + \xi_{1}, \dots, t + \tau) d\xi_{1} d\xi_{2} d\xi_{3} d\tau \qquad (2.12)$$

$$\widetilde{f}_{L}(x,t) = \frac{1}{Z_{L}(x,t)} \int \iiint_{Z_{L}(x,t)} f_{L}^{*}(x_{1} + \xi_{1}, \dots, t + \tau) d\xi_{1} d\xi_{2} d\xi_{3} d\tau$$
(2.13)

де  $Z_s(x,t)$ ,  $Z_L(x,t)$  – складові частини циліндра Z, «заповнені» твердою і рідкою фазами. Відзначимо, що у теорії зависенесних потоків вирази для середніх значень, типу (2.12) – (2.13), вперше були отримані Ф. І. Франклем [118, 119].

Отже, при складанні усереднених рівнянь для зависенесного потоку середні значення гідродинамічних характеристик фаз визначають або,

відповідно, за формулами (2.10) (2.11) при послідовному усереднені у просторі і часі, або, відповідно, за формулами (2.12) і (2.13) при одинарному просторовочасовому усередненні. Оскільки праві частини нерівностей (2.10) (2.11) відмінні від правих частин відповідних рівностей (2.12) і (2.13), середні  $\overline{f}_s$  і  $\overline{f}_L$ не дорівнюють відповідним середнім  $\tilde{f}_s$  і  $\tilde{f}_L$ . Тому, залежно від того, як виконується операція усереднення за простором і за часом, послідовно або поодиноко, слід розрізнювати дві концепції складання усереднених рівнянь зависенесного потоку: безперервну, що відповідає послідовному усередненню, і дискретну, відповідну поодинокому. У основі визначень названих концепцій лежить той факт, що на стадії усереднювання, відносно турбулентних рухів твердої або рідкої фази, її миттєві характеристики є безперервними функціями координат і часу при послідовному усереднюванні за простором і часом, і розривними функціями при поодинокому просторово-часовому усереднюванні. У науковій літературі, присвяченій виведенню рівнянь зависенесного потоку методом усереднювання, широке застосування отримала безперервна концепція [101 – 103, 110, 114 – 117]. Основи дискретної концепції були закладені у працях Ф. I. Франкля [118 – 120].

Основна відмінність між усередненими рівняннями, складеними у рамках безперервної і дискретної концепцій, полягає у тому, що у першому випадку вони містять моменти кореляції пульсацій об'ємної концентрації і швидкостей фаз, тоді як у другому випадку, ці моменти у явному вигляді відсутні. Ця обставина привела до того, що була зроблена спроба «удосконалити» рівняння Ф. И. Франкля явним виділенням у них вказаних моментів кореляції [119, 120]. Однак дискретна концепція складання рівнянь має суттєву перевагу над безперервною. Розглянемо у якості гідродинамічних характеристик твердої та рідкої фаз  $f_s^*(x,t)$  і  $f_L^*(x,t)$  швидкості руху цих фаз  $U_{si}^*(x,t)$  і  $U_{Li}^*(x,t)$  по заданому напрямку  $\partial x_i$ . У результаті усереднювання цих швидкостей, відповідно до формул (2.10) – (2.13) і наступних перетворень, згідно з [121 – 124], отримаємо:

$$\overline{U}_{Si} = \frac{\overline{q}_{Si}}{\overline{S}} - \frac{\overline{S'U'_{Si}}}{\overline{S}}, \qquad (2.14)$$

$$\overline{U}_{Li} = \frac{\overline{q}_{Si}}{1 - \overline{S}} - \frac{\overline{S'U'_{Li}}}{1 - \overline{S}}, \qquad (2.15)$$

$$\tilde{U}_{si} = \bar{q}_{si}/\bar{S}, \qquad (2.16)$$

$$\widetilde{U}_{Li} = \overline{q}_{Li} / (1 - \overline{S}). \tag{2.17}$$

Величини  $\bar{q}_{si}$  і  $\bar{q}_{li}$ , що входять у (2.14) – (2.17), є об'ємними витратами твердої і рідкої фаз через поперечний до напряму  $\partial x_i$  переріз, площа якого дорівнює одиниці. Моменти кореляції  $\overline{S'W'_i}$  і  $\overline{S'V'_i}$  – дифузійні турбулентні потоки твердої і рідкої фаз через переріз. Абсолютні значення цих моментів однакові, оскільки дифузійний зсув об'єму твердої фази у напряму  $\partial x_i$ супроводжується, унаслідок безперервності зависенесного потоку, витісненням рівного об'єму рідкої фази у протилежному напрямку.

В зависенесному потоці витрати фаз  $\bar{q}_{si}$  і  $\bar{q}_{Li}$  визначаються переносною усередненою швидкістю руху зависенесного потоку по напряму  $\partial x_i$ , відповідними швидкостями турбулентної дифузії  $\frac{\overline{S'U'_{Si}}}{\overline{S}}$  та  $\frac{\overline{S'U'_{Li}}}{1-\overline{S}}$ , а також швидкостями гравітаційної дифузії по заданому напрямку 0x3, які обумовлені вільним падінням твердих частинок у потоці, що їх переносить. При цьому дифузійні швидкості у  $\overline{q}_{si}$  протилежні дифузійним швидкостям у  $\overline{q}_{Li}$ . Перераховані швидкості входять як складові у усереднені швидкості  $\widehat{W}_i$ ,  $\widehat{V}_i$ (2.16), (2.17). Що стосується усереднених швидкостей  $\overline{W}_i$  і  $\overline{V}_i$ , то вони не містять дифузійних складових, обумовлених турбулентним перенесенням, оскільки відповідно до (2.14) і (2.15) ці складові алгебраїчно віднімаються з повних швидкостей руху фаз. Сказане дозволяє зробити важливий висновок: на відміну від усереднених швидкостей  $\widehat{W}_i$ ,  $\widehat{V}_i$ , характерних для дискретної концепції, усереднені швидкості  $\overline{W}_i$  і  $\overline{V}_i$  у безперервній концепції визначаються сукупністю гідродинамічних процесів, всією ЩО не відбуваються У зависенесному потоці, і у цьому сенсі вони є не істинними, а фіктивними

швидкостями, які не піддаються прямому виміру. Неврахування цієї обставини може бути причиною логічних суперечностей будь-якої теорії зависенесного потоку, побудованої у рамках безперервної концепції. Приклад тому – обговорені у гострій дискусії кінематичні залежності гравітаційної теорії Веліканова [125]. З виразів (2.14) і (2.15), згідно [125], витікає, що між паралельними непроникними площинами у сталій, рівномірній, горизонтальній течії, у якій тверді частинки нерівномірно розподілені по глибині, середні за часом вертикальні витрати обох фаз рівні нулю, вертикальні ж усереднені швидкості фаз приймають ненульове значення. Це фізично суперечить умовам даної течії. У той же час з (2.16) і (2.17) витікає, що у цій течії вертикальні усереднені швидкості обох фаз рівні нулю.

Таким чином, щоб уникнути різного роду суперечностей, теорію зависенесних потоків у придонній області доцільно будувати і розвивати у рамках саме дискретної концепції, а в основній товщі – в рамках безперервної концепції. Відзначимо, що одним з шляхів розвитку цієї теорії є подальше вдосконалення методу усереднювання. Методи послідовного просторового і за часом усереднювання є більш практичними та наочними, але вони найбільш доцільні для однорідних і квазістаціонарних полів гідродинамічних величин потоку або з малими зваженими включеннями. У загальному випадку, просторові та за часом значення залежать, відповідно, від об'єму і довжини інтервалу усереднення.

Для отримання рівнянь осередненого турбулентного руху Рейнольдсом запропонований прийом заміни актуальних швидкостей  $V_i$  та тиску  $p_{LS}$  на осереднені  $\overline{V_i}$ ,  $\overline{p}$  та пульсаційні  $V'_i$ ,  $p'_i$  [100, 47]:

$$V_i = \overline{V_i} + V_i'; (i=1,2,3); p = \overline{p} + p'.$$
 (2.18)

Під осередненим значенням актуальної величини  $\varphi$  розуміється звичне інтегральне середнє за часом *t* за період осереднення *T* :

$$\overline{\varphi}(x_1, x_2, x_3, t) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} \varphi(x_1, x_2, x_3, t) d\tau .$$
(2.19)

Використовуючи вираз (2.18) і осереднення за допомогою формули (2.19) обидві частини рівняння Нав'є – Стокса Рейнольдсом були отримані рівняння осередненого турбулентного руху та нерозривності, які у векторній формі мають наступний вигляд:

$$\frac{\partial \overline{V_i}}{\partial t} + \overline{V_j} \frac{\partial \overline{V_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{V_i V_j'}}{\partial x_j} - g_i - \sum \overline{f_{P_i}}.$$
(2.20)

$$\frac{\partial \overline{V_i}}{\partial x_i} = 0.$$
(2.21)

Рівняння (2.20) відрізняється від рівняння Нав'є – Стокса (2.1) наявністю додаткового тензора турбулентних або рейнольдсових напружень  $V_iV_j''$ . Для практичних цілей і зручності роботи рівняння (2.20) та (2.21) доцільно представити в скалярній формі через проекції на осі декартових координат з урахуванням вищенаведеного зі знехтуванням в'язких напружень  $\frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_i}$ :

$$\frac{\partial \overline{V_i}}{\partial t} + \overline{V_j} \frac{\partial \overline{V_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{V_i V_j'}}{\partial x_j} - g_i - \sum \overline{f_i}, \qquad (2.22)$$

$$\frac{\partial \overline{V_i}}{\partial x_i} = 0 , \qquad (2.23)$$

У розгорнутій формі рівняння (2.22), (2.23) запишуться наступним чином:

$$\frac{\partial \overline{V_1}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_1^2}}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_1V_2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \overline{V_1V_3}}{\partial x_3} = -\frac{1}{\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial p}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_1^2}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_1V_2'}}{\partial x_2} - \frac{\partial \overline{V_1V_3'}}{\partial x_3} - \sum \overline{f_1}, \qquad (2.24)$$

$$\frac{\partial \overline{V_2}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_2 V_1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_2}^2}{\partial x_2} + \frac{\partial \overline{V_2 V_3}}{\partial x_3} = -\frac{1}{\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial p}{\partial x_2} - \frac{\partial \overline{V_2 V_1'}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_2'}^2}{\partial x_2} - \frac{\partial \overline{V_2' V_3'}}{\partial x_3} - \sum \overline{f_2}, \qquad (2.25)$$

$$\frac{\partial \overline{V_3}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_3V_1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_3V_2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \overline{V_3^2}}{\partial x_3} = -\frac{1}{\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial p}{\partial x_3} - \frac{\partial \overline{V_3V_1'}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_3V_2'}}{\partial x_2} - \frac{\partial \overline{V_3'}}{\partial x_3} - g - \sum \overline{f_3}, \qquad (2.26)$$

$$\frac{\partial \overline{V_1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \overline{V_3}}{\partial x_3} = 0, \qquad (2.27)$$

де  $x_i$  (*i*=1,2,3) – координати.

Наведена система рівнянь турбулентного руху, які описують гідродинамічне поле швидкостей і тиску в водостоках, є незамкненою, тому її інтегрування пов'язано з великими труднощами. До цього слід додати труднощі математичного характеру, які пов'язані з нелінійністю рівнянь руху, а також складнощі числової реалізації скінченно-різницевих аналогів представлених рівнянь. Тому для розв'язування прикладних задач гідродинаміки переважно використовують наближені математичні моделі течій, в яких враховують тільки головні, визначальні фактори, а дією другорядних, як правило, нехтують.

$$\frac{\partial \overline{V_1}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_1^2}}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_1V_2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \overline{V_1V_3}}{\partial x_3} = -\frac{1}{\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial p}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_1^2}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_1V_2'}}{\partial x_2} - \frac{\partial \overline{V_1V_3'}}{\partial x_3} - \overline{f_{P_1}}, \qquad (2.28)$$

$$\frac{\partial \overline{V_2}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_2 V_1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_2}^2}{\partial x_2} + \frac{\partial \overline{V_2 V_3}}{\partial x_3} = -\frac{1}{\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial p}{\partial x_2} - \frac{\partial \overline{V_2 V_1'}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_2'}^2}{\partial x_2} - \frac{\partial \overline{V_2 V_3'}}{\partial x_3} - \overline{f_{P2}}, \qquad (2.29)$$

$$\frac{\partial \overline{V_3}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_3V_1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_3V_2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \overline{V_3^2}}{\partial x_3} = -\frac{1}{\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial p}{\partial x_3} - \frac{\partial \overline{V_3V_1'}}{\partial x_1} - \frac{\partial \overline{V_3V_2'}}{\partial x_2} - \frac{\partial \overline{V_3^2}}{\partial x_3} - g - \overline{f_{Ch}} - \overline{f_{P3}},$$
(2.30)

де  $f_{Ch}$  – сила зчеплення або силу опору відриву зерна ґрунту;  $f_{Pi}$  – сила опору рослинності.

#### 2.2 Аналіз складових сил опору в заплавному потоці

#### 2.2.1 Сила зчеплення

Експериментальні дослідження процесів втрати стійкості донних частинок описувалися у науковій літературі багато разів і достатньо детально, наприклад у [28, 126 – 128]. Умови ж початку руху наносів трактуються різними авторами неоднозначно. Придонна частина наносів є перепоною і при її взаємодії з турбулентним потоком виникають сили опору  $F_D$ . Відрив частинок від дна відбувається за рахунок підйомної сили  $F_L$ , яка виникає за рахунок перепаду тисків, що найбільш характерно для заплавних ділянок. Швидкість придонного шару рідини зменшена в порівнянні з шарами, що знаходяться вище. Через це швидкість шару під частинкою V<sub>1</sub> менша ніж швидкість шару над частинкою V<sub>2</sub>, що призводить до виникнення тиску в нижній частині та зменшення його в верхній [127, 128]. Значення  $F_L$  має перевищувати силу власної ваги частинки  $F_G$ .

У процесі поступального руху частка обертається, взаємодіючи з несним середовищем, утягуючи в обертальний рух елементи рідини. У результаті на тій стороні частки, де направлення обтікання та обертання елементів рідини співпадають, тиск буде зниженим у порівнянні з областю, де ці напрямки протилежні. Внаслідок цього виникає поперечна сила  $F_{\omega}$ , або сила Магнуса, під дією якої частка буде рухатись в область зниженого тиску [127, 129, 130].

У процесі руху частки в потоці, об'єм рідини, який нею витісняється, переміщується у зворотному напрямку, обтікає частку та заміщує звільнене нею місце. Безпосередньо до частки приєднується маса рідини, яка рухається разом з нею. Таким чином, на кожну з часток впливає, так звана, інерційна сила, що характеризує прискорення приєднаної маси частки відносно оточуючої рідини. Цю силу називають силою приєднаних мас [129, 130].

Крім того на частинку діє турбулентний режим представлений пульсаціями, вектор яких може бути направлений в будь-який бік.

За результатами досить великої кількості експериментальних досліджень [131] встановлено, що властивості дна зависенесного потоку залежать від процесу кольматації. Зависенесний потік при впливі на дно з часом кольматує його. Кольматація, у результаті заповнення пор між зернами піску та каміння колоїдним намулком, перетворює незв'язне дно у зв'язне. Величина зміцнення залежить від розміру, від якості та кількості матеріалу, що заповнює пори. Ефект зміцнення залежить від мінералогічного складу та цементуючих властивостей зависі; він тим більше, чим менше розмір часток, що осідають на дно, та більше тривалість кольматації. У результаті кольматації вирівнюються, згладжуються нерівності дна, збільшується зчеплення зерен донного грунту.

Вивченню механізму та закономірностей дії сил молекулярного зчеплення присвячено багато робіт [131]. Сила зчеплення – це один з факторів, від якого залежить підвищення опору розмиву дрібнозернистих грунтів (діаметром менше 0,1 – 0,15 мм), відкладених, як правило, на заплавних ділянках річок. Сили зчеплення у ґрунтах мають молекулярно-контактний, цементаційний, структурно-колоїдний (водно-адсорбційний) та механічний характер. Враховуючи фізико-хімічну природу взаємодії піщаних, глинистих та болотистих ґрунтів, які характерні для дна руслових та заплавних потоків, з водою, виникають сили зчеплення молекулярного характера. Згідно з проведеними у роботі Ц. Є. Мірцхулави [131] дослідженнями силу опору відриву зерна ґрунту можна визначити за залежністю:

$$\overline{f}_{Ch} = 350C_{Ch}D^2g$$
, (2.31)

для відриву множини часток:

$$\overline{f}_{Ch} = \frac{k_{Cp}C_{Ch}Sg}{C_{\phi 1}D},$$
(2.32)

де  $k_{cp}$  – межа втомленості розриву зв'язних ґрунтів, за експериментами [131],  $k_{cp} = 350$ ;

 $C_{ch}$  – зчеплення ґрунту у стані повного водонасичення, кг/м<sup>2</sup>;  $\overline{S}$  – розподіл зважених наносів по вертикалі або мутність потоку;  $C_{\Phi l}$  – перший коефіцієнт форми частки наносів, дорівнює відношенню об'єму частки до діаметра рівновеликого шару у третьому ступені,  $C_{\Phi l} = \pi/6$ ; D – діаметр частинок наносів, м.

#### 2.2.2 Сила опору рослинності

Зона впливу мостового переходу розповсюджується не тільки у руслі річки, а й на заплавні частині. На річках з дуже широким розливом, особливо при наявності заплавної багаторукавності, споруджують заплавні мости. Таким чином зона дослідження розвитку деформацій охоплює два постійно взаємодіючі потоки з різною шорсткістю. При цьому суттєвим є те, що витрата заплавного потоку може перевищувати руслову витрату. Поверхня заплавної частини переважно покрита рослинністю, різною за густістю та розмірами заростей, що впливає на пропускну здатність заплави. Рішення проблеми у вигляді повного усунення рослинності під мостовим переходом не можливе, оскільки це може призвести до негативних екологічних наслідків – ерозії берегів.

Визначення ж пропускної здатності та глибини розмиву на заплаві, спираючись на обмежені емпіричні рішення задачі у вигляді коефіцієнтів Манінга та Шезі, не може бути достатньо прийнятним. Серед робіт гідравлічного напрямку [132, 133] запропонований підхід, згідно з яким розподіл поля швидкостей по вертикалі необхідно визначати з урахуванням розподіленої сили, яка діє у шарі рослин:

$$f_P = \frac{1}{2} C_X s_P V^2, \qquad (2.33)$$

де  $C_X$  — коефіцієнт опору, який визначають за експериментальними дослідженнями, для випадку опору рослинності, згідно [132],  $C_X=0,4$ ; V — складова швидкості потоку; *s*<sub>p</sub> – площа міделевого перетину тіла, яке обтікається, саме стебла рослини – нескінченно малий відрізок циліндра, який можна представити:

$$s_p = D_{cm} \Delta z_{cm}, \qquad (2.34)$$

де  $D_{cm.}$  – діаметр стебла рослини, що обтікається, м;

 $\Delta z_{cm.}$  – частина стебла рослини, що обтікається, за висотою, м.

У тонкому шарі потоку висотою  $\Delta x_3$  та об'ємом  $q = BL\Delta x_3$  знаходиться  $N = \frac{B}{\Delta x_2} \frac{L}{\Delta x_1}$  штук таких індивідуальних перешкод. Вони витискують об'єм рідини  $(N \cdot 0.25\pi D_{cm.}^2 \Delta z_{cm.})/(BL\Delta x_3)$ . Загальну міделеву площу, яка розподілена у об'ємі шару, можна визначити за залежністю  $s_p = Ns_{ind} = \frac{B}{\Delta x_2} \frac{L}{\Delta x_1} \frac{D_{cm.} \Delta z_{cm.}}{BL\Delta x_3}$ . Для заплавного потоку шириною  $B_{p+3} - B_p$  та діаметром стебла  $D_{cm.} = 7 \cdot 10^{-3} M$ 

$$s_p = \frac{D_{cm.}\Delta z_{cm.}}{\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3}.$$
(2.35)

Сила опору рослинності, згідно [130], визначається за залежністю:

$$\overline{f_{P_i}} = \frac{C_x s_p}{2\overline{V}} \left( \overline{V^2 V_i} + \overline{V_j} \overline{V_j} \overline{V_i'} \right), \qquad (2.36)$$

відповідно проекції сили на осі  $Ox_i$  (*i*=1,2,3) координат:

$$\overline{f_{P1}} = \frac{C_X s_P}{2\overline{V}} \left( \overline{V^2 V_1} + \overline{V_1} \overline{V_1^{\ell}} + \overline{V_2} \overline{V_2' V_1'} + \overline{V_3} \overline{V_3' V_1'} \right);$$
(2.37)

$$\overline{f_{P2}} = \frac{C_x s_p}{2\overline{V}} \left( \overline{V^2 V_2} + \overline{V_1} \overline{V_1 V_2'} + \overline{V_2} \overline{V_2'^2} + \overline{V_3} \overline{V_3 V_2'} \right);$$
(2.38)

$$\overline{f_{P3}} = \frac{C_x s_p}{2\overline{V}} \left( \overline{V^2 V_3} + \overline{V_1} \overline{V_1 V_3'} + \overline{V_2} \overline{V_2' V_3'} + \overline{V_3} \overline{V_3'}^2 \right),$$
(2.39)

де 
$$V = \sqrt{\sum_{i=1+3} \overline{V_i^2}}$$

## 2.3 Гідродинамічний опис процесів, що відбувається на заплавних ділянках з елементами рослинності в наближенні до двовимірної задачі

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 в двовимірній постановці.

У зв'язку з цим нижче запропоновано отримання двовимірних рівнянь розподілу швидкісної структури та глибини заплавного потоку. Ці рівняння отримаємо із загальних тривимірних рівнянь гідродинаміки (2.27, 2.28 – 2.30) шляхом інтегрування останніх по вертикалі від відмітки дна  $z_0$  до вільної поверхні *H*, тобто за глибиною потоку:

$$h = H - z_0.$$
 (2.40)

Скориставшись способом та позначеннями, які наведені в роботах [1,5], середнє за глибиною значення будь-якої змінної функції — характеристики потоку  $\Phi(x_1, x_2, x_3, t)$  позначимо ламаними дужками:

$$\left\langle \Phi \right\rangle = \frac{1}{h} \int_{z_0}^{H} \Phi dx_3 \,. \tag{2.41}$$

Інтегрування за глибиною складових, які містять невідомі функції не під знаком похідної у відповідності з (2.41), дозволить отримати наступний вираз:

$$\int_{z_0}^{H} \Phi dx_3 = h \langle \Phi \rangle.$$
 (2.42)

При інтегруванні за глибиною доданків, які містять похідні по горизонтальним координатам та за часом, необхідно скористатись властивостями інтегралів, які залежать від параметрів [100].

Інтеграл (2.42), який залежить від параметрів *H* і *z*<sub>0</sub>, можна диференціювати, відповідно його похідна:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h \langle \Phi \rangle \right) = \int_{z_0}^{H} \frac{\partial \Phi(x_1, x_2)}{\partial x} dx_3 + \Phi_{x_3 = H} \frac{\partial H}{\partial x} + \Phi_{x_3 = z_0} \frac{\partial z_0}{\partial x} .$$
(2.43)

Із рівняння (2.43) отримаємо наступну формулу для інтегрування гідравлічних характеристик під знаком похідної:

$$\int_{z_0}^{H} \frac{\partial \Phi(x_1, x_2)}{\partial x_i} dx_3 = \frac{\partial \langle \Phi \rangle h}{\partial x_i} - \Phi_H \frac{\partial H}{\partial x_i} + \Phi_{z_0} \frac{\partial z_0}{\partial x_i} = h \frac{\partial \langle \Phi \rangle}{\partial x_i} + (\langle \Phi \rangle - \Phi_H) \frac{\partial H}{\partial x_i} + (\Phi_{z_0} - \langle \Phi \rangle) \frac{\partial z_0}{\partial x_i} .$$
(2.44)

У формулі (2.44) і надалі індексом *Н* позначаються значення гідродинамічних характеристик на вільній поверхні потоку, а індекс  $z_0$  – на дні.

Помножимо рівняння нерозривності (2.27) на *dx*<sub>3</sub> та проінтегруємо за глибиною:

$$\sum_{i=1}^{2} \left( \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left\langle \overline{V}_{i} \right\rangle h - \overline{V}_{iH} \frac{\partial H}{\partial x_{i}} + \overline{V}_{iz_{0}} \frac{\partial z_{0}}{\partial x_{i}} \right) + \left( \overline{V}_{3H} - \overline{V}_{3z_{0}} \right) = 0.$$
(2.45)

Ураховуючи, що на дні потоку вектор швидкості дорівнює нулю, тобто  $\overline{V}_{3_{z_0}} = 0$ , а вертикальна складова швидкості на вільній поверхні

$$\overline{V}_{3H} = \frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \sum_{i=1}^{2} \overline{V}_{iH} \frac{\partial H}{\partial x_i}, \qquad (2.46)$$

то із виразу (2.45) з урахуванням (2.46) отримаємо

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \sum_{i=1}^{2} \frac{\partial U_i h}{\partial x_i} = 0.$$
(2.47)

Для випадку усталеного руху рівняння (2.47) приймає вид

$$h\sum_{i=1}^{2} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^{2} U_i \frac{\partial h}{\partial x_i} = 0.$$
(2.48)

Під  $U_i = \langle \overline{V_i} \rangle$  мається на увазі середнє за глибиною значення горизонтальної складової швидкості.

Інтегруючи рівняння (2.30), в результаті отримаємо закон розподілу осередненого гідростатичного тиску по вертикалі, який буде використаний при інтегруванні рівнянь (2.28), (2.29):

$$\int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial \overline{V_{3}}}{\partial t} dx_{3} + \int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial \overline{V_{1}V_{3}}}{\partial x_{1}} dx_{3} + \int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial \overline{V_{2}V_{3}}}{\partial x_{2}} dx_{3} + \int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial \overline{V_{3}}^{2}}{\partial x_{3}} dx_{3} = -\frac{1}{\overline{\rho_{LS}}} \int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial p}{\partial x_{3}} dx_{3} - \int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial \overline{V_{3}V_{2}'}}{\partial x_{2}} dx_{3} - \int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial \overline{V_{3}V_{2}'}}{\partial x_{3}} dx_{3} - \int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial \overline{V_{3}V_{2}}}{\partial x_{3}} dx_{3} - \int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial \overline{V_{3}V_{2}}}{\partial$$

При інтегруванні доданків рівняння (2.49) використаємо залежність (2.44), а для доданків, які містять похідні по вертикальній координаті  $x_3$ , – формулу:

$$\int_{x_3}^{H} \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} dx_3 = \int_{x_3}^{H} d\Phi = \Phi_H - \Phi_{x_3}.$$
(2.50)

Ураховуючи властивості інтегралів, які залежать від параметрів, та очевидне співвідношення, що

$$V_{3H} = V_{1H} \frac{\partial H}{\partial x_1} + V_{2H} \frac{\partial H}{\partial x_2}, \qquad (2.51)$$

рівняння (2.49) можна привести до вигляду:

$$\frac{\overline{p}}{\overline{\rho}_{LS}} = \frac{\overline{p}_{H}}{\overline{\rho}_{LS}} + \frac{\partial}{\partial t} \int_{x_{3}}^{H} \overline{V_{3}} dx_{3} + \frac{\partial}{\partial x_{1}} \int_{x_{3}}^{H} \overline{V_{1}V_{3}} dx_{3} + \frac{\partial}{\partial x_{2}} \int_{x_{3}}^{H} \overline{V_{2}V_{3}} dx_{3} - \left(\overline{V_{3}}^{2}\right)_{x_{3}} - \sum_{i=1}^{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left\langle \overline{V_{i}V_{3}'} \right\rangle_{H-x_{3}} + \left[ \left\langle \overline{V_{i}V_{3}'} \right\rangle_{H-x_{3}} + \left[ \left\langle \overline{V_{i}V_{3}'} \right\rangle_{H-x_{3}} - \left\langle \overline{V_{i}V_{3}'} \right\rangle_{H-x_{3}} - \left\langle \overline{V_{i}V_{3}'} \right\rangle_{H-x_{3}} - \left\langle \overline{V_{i}V_{3}'} \right\rangle_{H-x_{3}} + \left[ \left( \overline{V_{i}V_{3}'} \right)_{x_{3}} - \left\langle \overline{V_{i}V_{3}'} \right\rangle_{H-x_{3}} \right] \frac{\partial x_{3}}{\partial x_{i}} \right\} - \left( \overline{V_{3H}^{\prime 2}} - \overline{V_{3x_{3}}^{\prime 2}} \right) + g(H-x_{3}) + \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot g}{C_{\Phi 1}D} \int_{x_{3}}^{H} \overline{S} dx_{3} + (2.52) + \frac{C_{X}s_{p}}{2} \int_{x_{3}}^{H} \frac{1}{\overline{V}} \left( \overline{V^{2}V_{3}} + \overline{V_{1}}\overline{V_{1}V_{3}'} + \overline{V_{2}}\overline{V_{2}'V_{3}'} + \overline{V_{3}}\overline{V_{3}^{2}} \right) dx_{3}$$

Обмежимося випадком усталеного руху, тоді друга складова правої частини дорівнює нулю. Третій, четвертий та п'ятий доданки, що мають порядок похідних величин  $\langle \overline{v_i} \rangle$  та їх квадратів при відсутності вторинних течій поперечної циркуляції, будуть дорівнювати нулю. Порядок доданків, що виражають турбулентні напруження, хай буде  $\overline{v_i V_3} \approx \rho \tau$ , порядок зміни горизонтальних розмірів потоку буде L, порядок величини  $H - x_3 \approx h$ . Тоді порядок доданків, які стоять під знаком суми, дорівнює  $\frac{th}{L}$ , порядок доданку  $\overline{\rho_{Ls} V_3^2} - \tau$ , порядок останнього доданку  $-\overline{\rho_{Ls}gh}$ . Враховуючи, що розглядається задача теорії мілкої води, тобто  $h \ll L$ , то складовими під знаком суми можна знехтувати. На поверхні потоку виконується очевидна умова, що  $\overline{V_{3H}} = 0$ . Тоді розподіл тиску в потоці запишеться у вигляді

$$\overline{p} = \overline{p}_{H} + \overline{\rho_{LS}}g(H - x_{3}) - \overline{\rho_{LS}}\overline{V_{3}^{2}} + \overline{\rho_{LS}}\int_{x_{3}}^{H} \overline{f_{P3}}dx_{3} + \overline{\rho_{LS}}\int_{x_{3}}^{H} \overline{f_{Ch}}dx_{3} = \overline{p}_{H} + \overline{\rho_{LS}}g(H - x_{3}) - \overline{\rho_{LS}}\overline{V_{3}^{2}} + \frac{\overline{\rho_{LS}}}{\overline{\rho_{LS}}}\overline{V_{3}} + \frac{\overline{\rho_{LS}}}{\overline{\rho_{LS}}}\int_{x_{3}}^{H} \overline{V_{1}}\overline{V_{1}}V_{3}'dx_{3} + \frac{k_{Cp}C_{Ch}}{C_{\Phi 1}D}\int_{x_{3}}^{H} \overline{S}dx_{3}.$$
(2.53)

Якщо проінтегрувати, згідно (2.42), вираз для вертикальної складової сили опору рослинності  $\int_{x_3}^{H} \overline{f_{P3}} dx_3 = \frac{C_x s_p}{2} \int_{x_3}^{H} \overline{V_1} \overline{V_1} \overline{V_3}' dx_3 = \frac{C_x s_p}{2} \frac{\langle \overline{V_1} \rangle}{\langle \overline{U} \rangle} \langle \overline{V_1} \overline{V_3}' \rangle (H - x_3)$ , а також – для

сили зчеплення, розподіл тиску в заплавному потоці можна представити як

$$\overline{p} = \overline{p}_{H} + \overline{\rho_{LS}}g(H - x_{3}) - \overline{\rho_{LS}}\overline{V_{3}^{\ell}} + \frac{C_{X}s_{p}}{2}\overline{\rho_{LS}}\frac{\langle \overline{V_{1}} \rangle}{\langle \overline{U} \rangle} \langle \overline{V_{1}}\overline{V_{3}} \rangle (H - x_{3}) + \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot \langle \overline{S} \rangle g}{C_{\Phi 1}D} (H - x_{3}).$$
(2.54)

Таким чином, розподіл тиску в заплавному потоці відрізняється від гідростатичного такими складовими:

$$-\overline{\rho_{LS}}\overline{V_3^{\rho}}, \frac{C_x s_p}{2} \overline{\rho_{LS}} \frac{\langle \overline{V_1} \rangle}{\langle \overline{U} \rangle} \langle \overline{V_1}\overline{V_3'} \rangle (H - x_3), \frac{k_{C_p} C_{C_h} \cdot \langle \overline{S} \rangle g}{C_{\Phi_1} D} (H - x_3).$$
  
При  $\overline{V} \approx \overline{V_1}$  або  $\frac{\overline{V_1}}{\overline{V}} \approx 1$ 

$$\overline{p} = \overline{p}_{H} + \overline{\rho_{LS}}g(H - x_{3}) - \overline{\rho_{LS}}\overline{V_{3}^{\prime\prime}} - \frac{C_{X}s_{p}}{2}\overline{\rho_{LS}}\langle\overline{V_{1}V_{3}^{\prime}}\rangle(H - x_{3}) - \frac{k_{Cp}C_{Ch}\cdot\langle\overline{S}\rangle g}{C_{\Phi 1}D}(H - x_{3}).$$
(2.55)

Розподіл зважених наносів по вертикалі (мутність потоку) визначається,

як правило, за формулою Рауза [40]  $\overline{S}(x_3) = \overline{S}(z) \left(\frac{h-x_3}{x_3} \frac{z}{h-z}\right)^{\frac{W_r}{M'_r}}$  ( $W_z$  – гідравлічна швидкість,  $\kappa$  – параметр Кармана  $\kappa = 0.435$ ,  $U_r$  – динамічна швидкості  $U_r = \sqrt{ghI_{x_1}}$ ,  $I_{x_1}$  – уклон вільної поверхні потоку). Для розрахунку за цією формулою необхідно знати придонний вміст наносів  $\overline{S}(z)$ . Однак величину  $\overline{S}(z)$  повинна була б давати раціонально побудована теорія руху тягнених наносів, але такої теорії поки не існує. Певним кроком в усуненні вище відміченого недоліку існуючих теорій донних наносів дає методика, яка розглянута в роботі [100], де наведені залежності для визначення питомої витрати зважених наносів

$$q_{e_3} = \int_{\Delta}^{h} \overline{\text{US}} dx_3$$
 та  $q_{e_3} = F \text{UhS}_0$ . Залежність  $q_{e_3} = \int_{\Delta}^{h} \overline{\text{VS}} dx_3$  можна представити як  $q_{e_3} = \langle \overline{\text{VS}} \rangle h$ ,

тоді залежність для визначення осередненої мутності  $\langle \overline{s} \rangle$  можна представити як

$$\left\langle \overline{S} \right\rangle = FS_0,$$
 (2.56)

де S<sub>0</sub> – відлікова концентрація донних наносів, визначається за методикою [134];

F-фактор, який враховує параметр зважування частинок наносів, визначається за методикою [134].

Приймаючи  $\overline{p}_{H} = const$ , тобто виключаючи із розгляду бароклинні течії, підставивши значення  $\overline{p}$  із рівняння (2.55) та  $\overline{f}_{P1}$ ,  $\overline{f}_{P2}$  із (2.56) у формули (2.28) та (2.29) по поздовжньому і поперечному напрямках, отримаємо:

$$\frac{\partial \overline{V_{1}}}{\partial t} + \frac{\partial V_{1}^{2}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial \overline{V_{1}V_{2}}}{\partial x_{2}} + \frac{\partial \overline{V_{1}V_{3}}}{\partial x_{3}} = -g \frac{\partial h}{\partial x_{1}} - \frac{C_{x}s_{p}}{2} \frac{\partial}{\partial x_{1}} h \left\langle \overline{V_{1}V_{3}'} \right\rangle - \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot g}{C_{\Phi 1}D\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial}{\partial x_{1}} h \left\langle \overline{S} \right\rangle - \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \overline{V_{1}^{2}} - \overline{V_{3}^{2}} \right) - \frac{\partial \overline{V_{1}V_{2}'}}{\partial x_{2}} - \frac{\partial \overline{V_{1}V_{3}'}}{\partial x_{3}} - \frac{C_{x}s_{p}}{2} \left( \overline{V_{1}^{2}} + \overline{V_{1}^{2}} + \frac{\overline{V_{2}}}{\overline{V_{1}}} \overline{V_{2}'V_{1}'} + \frac{\overline{V_{3}}}{\overline{V_{1}}} \overline{V_{3}'V_{1}'} \right),$$

$$(2.57)$$

$$\frac{\partial \overline{V_2}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_2 V_1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \overline{V_2}^2}{\partial x_2} + \frac{\partial \overline{V_2 V_3}}{\partial x_3} = -g \frac{\partial h}{\partial x_2} - \frac{C_x s_p}{2} \frac{\partial}{\partial x_2} h \left\langle \overline{V_1 V_3'} \right\rangle - \frac{k_{Cp} C_{Ch} \cdot g}{C_{\Phi 1} D \overline{\rho}_{LS}} \frac{\partial}{\partial x_2} h \left\langle \overline{S} \right\rangle - \frac{\partial \overline{V_2 V_1'}}{\partial x_1} - \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \overline{V_2'}^2 - \overline{V_3'}^2 \right) - \frac{\partial \overline{V_2' V_3'}}{\partial x_3} - \frac{C_x s_p}{2} \left( \overline{V_1 V_2} + \overline{V_1 V_2'} + \frac{\overline{V_2}}{\overline{V_1}} \overline{V_2'}^2 + \frac{\overline{V_3}}{\overline{V_1}} \overline{V_3 V_2'} \right).$$

$$(2.58)$$

Згідно з формулою (2.44) для інтегрування гідравлічних характеристик під знаком похідної член  $\frac{\partial}{\partial x_i} h \langle \overline{V_i} \overline{V_3'} \rangle$  у правій частині рівнянь (2.57) — (2.58) можна представити як

$$\frac{\partial}{\partial x_{i}}h\left\langle\overline{V_{i}V_{3}'}\right\rangle = \int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial\overline{V_{i}V_{3}'}}{\partial x_{i}}dx_{3} + \overline{V_{i}V_{3H}'}\frac{\partial H}{\partial x_{i}} - \overline{V_{i}V_{3z_{0}}'}\frac{\partial z_{0}}{\partial x_{i}} = h\frac{\partial\left\langle\overline{V_{i}V_{3}'}\right\rangle}{\partial x_{i}} + \left(\left\langle\overline{V_{i}V_{3}'}\right\rangle - \overline{V_{i}V_{3H}'}\right)\frac{\partial H}{\partial x_{i}} + \left(\overline{V_{i}V_{3z_{0}}'} - \left\langle\overline{V_{i}V_{3}'}\right\rangle\right)\frac{\partial z_{0}}{\partial x_{i}} + \overline{V_{i}V_{3z_{0}}'}\frac{\partial H}{\partial x_{i}} - \overline{V_{i}V_{3z_{0}}'}\frac{\partial z_{0}}{\partial x_{i}} + \left(\overline{V_{i}V_{3}'}\right)\frac{\partial H}{\partial x_{i}} + \left(\overline{V_{i}V_{3z_{0}}'} - \left\langle\overline{V_{i}V_{3}'}\right\rangle\right)\frac{\partial z_{0}}{\partial x_{i}} + \overline{V_{i}V_{3z_{0}}'}\frac{\partial H}{\partial x_{i}} - \overline{V_{i}V_{3z_{0}}'}\frac{\partial Z_{0}}{\partial x_{i}} + \left(\overline{V_{i}V_{3}'}\right)\frac{\partial H}{\partial x_{i}} + \left(\overline{V_{i}V_{3z_{0}}'}\right)\frac{\partial H}{\partial x_{i}}$$

Ураховуючи вираз (2.59), рівняння (2.57) – (2.58) будуть мати наступний вигляд:

$$\frac{\partial \overline{V_{1}}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_{1}^{2}}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial \overline{V_{1}V_{2}}}{\partial x_{2}} + \frac{\partial \overline{V_{1}V_{3}}}{\partial x_{3}} = -\left(g + \frac{C_{x}s_{p}}{2}\left\langle\overline{V_{1}V_{3}'}\right\rangle - \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot g}{C_{\Phi 1}D\overline{\rho}_{Ls}}\left\langle\overline{S}\right\rangle\right)\frac{\partial h}{\partial x_{1}} - h\left(\frac{C_{x}s_{p}}{2}\frac{\partial\left\langle\overline{V_{1}V_{3}'}\right\rangle}{\partial x_{1}} + \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot g}{C_{\Phi 1}D\overline{\rho}_{Ls}}\frac{\partial\left\langle\overline{S}\right\rangle}{\partial x_{1}}\right) - \frac{\partial}{\partial x_{1}}\left(\overline{V_{1}^{2}} - \overline{V_{3}^{2}}\right) - \frac{\partial\overline{V_{1}V_{2}'}}{\partial x_{2}} - \frac{\partial\overline{V_{1}V_{3}'}}{\partial x_{3}} - \frac{C_{x}s_{p}}{2}\left(\overline{V_{1}^{2}} + \overline{V_{1}^{2}} + \frac{\overline{V_{2}}}{\overline{V_{1}}}\overline{V_{2}}V_{1}' + \frac{\overline{V_{3}}}{\overline{V_{1}}}\overline{V_{3}}V_{1}'\right),$$

$$(2.60)$$

$$\frac{\partial \overline{V_{2}}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_{2}V_{1}}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial \overline{V_{2}}^{2}}{\partial x_{2}} + \frac{\partial \overline{V_{2}V_{3}}}{\partial x_{3}} = -\left(g + \frac{C_{X}s_{p}}{2}\left\langle\overline{V_{1}V_{3}'}\right\rangle + \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot g}{C_{\Phi 1}D\overline{\rho_{LS}}}\left\langle\overline{S}\right\rangle\right)\frac{\partial h}{\partial x_{2}} - h\left(\frac{C_{X}s_{p}}{2}\frac{\partial\left\langle\overline{V_{1}V_{3}'}\right\rangle}{\partial x_{2}} + \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot g}{C_{\Phi 1}D\overline{\rho_{LS}}}\frac{\partial\left\langle\overline{S}\right\rangle}{\partial x_{2}}\right) - \frac{\partial\overline{V_{2}V_{1}'}}{\partial x_{1}} - \frac{\partial}{\partial x_{2}}\left(\overline{V_{2}'}^{2} - \overline{V_{3}'}^{2}\right) - \frac{\partial\overline{V_{2}V_{3}'}}{\partial x_{3}} - \frac{C_{X}s_{p}}{2}\left(\overline{V_{1}V_{2}} + \overline{V_{1}V_{2}'} + \frac{\overline{V_{2}}}{\overline{V_{1}}}\overline{V_{2}'}^{2} + \frac{\overline{V_{3}}}{\overline{V_{1}}}\overline{V_{3}V_{2}'}\right).$$

$$(2.61)$$

Помножимо рівняння (2.60) і (2.61) на *dx*<sub>3</sub> та проінтегруємо за глибиною та оцінимо порядок доданків, користуючись способом та оцінкою наведеними в роботі [100].

Інтегрування за глибиною інерційного доданку рівняння руху  $\frac{\partial \overline{V_i}}{\partial t}$  з урахуванням виразу (2.44) і того, що дно нерозмивне, тобто  $\frac{\partial z_0}{\partial t} = 0$ , а також  $\langle \overline{V_i} \rangle = U_i$ , дасть наступне

$$\int_{x_{3}}^{H} \frac{\partial \overline{V_{i}}}{\partial t} dx_{3} = h \frac{\partial \left\langle \overline{V_{i}} \right\rangle}{\partial t} + \left( \left\langle \overline{V_{i}} \right\rangle - \overline{V_{iH}} \right) \frac{\partial H}{\partial t} = h \frac{\partial U_{i}}{\partial t} + \left( U_{i} - \overline{V_{iH}} \right) \frac{\partial H}{\partial t} .$$
(2.62)

Проведемо оцінку доданків правої частини рівняння (2.62), приймаючи, що величина *t* має порядок  $T = \frac{L}{V}$  при зміні швидкості на порядок *V* на відстань *L*. Отримаємо, що порядок першого доданку буде  $\frac{V^2h}{L}$ , порядок другого доданку —  $\frac{V^2\delta_H}{L}$ , тобто порядок другого доданку менше основного доданку в співвідношенні  $\delta_H \ll h$ .

Перед інтегруванням нелінійних доданків лівої частини виду  $\frac{\partial \overline{V_i^2}}{\partial x_i} \left( \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{V_i V_j}; i, j = 1, 2 \right)$ , 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<sub>i</sub> у вигляді:

$$\overline{V_i} = U_i + u_i, \qquad (2.63)$$

де  $u_i = \overline{V_i} - U_i \neq 0$  — відхилення локальної швидкості  $\overline{V_i}$  від осередненої за глибиною  $U_i$ , причому величина  $u_i$  повинна тотожно відповідати умові:

$$\langle u_i \rangle = \frac{1}{h} \int_{z_0}^{H} u_i dx_3 = 0.$$
 (2.64)

З урахуванням цього для нелінійних конвективних доданків можна отримати

$$\left\langle \overline{V_i^2} \right\rangle = \frac{1}{h} \int_{z_0}^{H} \overline{V_i^2} dx_3 = \frac{1}{h} \int_{z_0}^{H} (U_i + u_i)^2 dx_3 = \frac{1}{h} \left[ \int_{z_0}^{H} U_i^2 dx_3 + 2 \int_{z_0}^{H} U_i \cdot u_i dx_3 + \int_{z_0}^{H} u_i^2 dx_3 \right].$$
(2.65)

На основі залежності (2.64) другий доданок в квадратних дужках дорівнює нулю:

$$\int_{z_0}^{H} U_i u_i dx_3 = U_i \int_{z_0}^{H} u_i dx_3 = 0$$
(2.66)

З урахуванням виразу (2.66) та після нескладних перетворень представимо рівняння (2.65) у вигляді:

$$\left\langle \overline{V_{i}^{2}} \right\rangle = \frac{1}{h} \left[ U_{i}^{2}h + \int_{z_{0}}^{H} u_{i}^{2} dx_{3} \right] = U_{i}^{2} \left[ 1 + \frac{\int_{z_{0}}^{u} u_{i}^{2} dx_{3}}{U_{i}^{2}h} \right] = \alpha_{h} U_{i}^{2}, \qquad (2.67)$$

де  $\alpha_h = 1 + \frac{\int_{-\infty}^{H} u_i^2 dx_3}{U_i^2 h}$  – коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілу швидкостей на вертикалі та приймає значення більше одиниці, тобто  $\alpha_h > 1$ .

Аналогічно можливо записати залежність та для доданків вигляду  $\overline{V_i}\overline{V_j}$ :

$$\left\langle \overline{V_i} \overline{V_j} \right\rangle = \alpha_h U_i U_j \,. \tag{2.68}$$

$$\left\langle \overline{V_i} \overline{V_j} \right\rangle_{\mu} = \alpha_{\mu} U_i U_j, \qquad (2.69)$$

де  $\alpha_{H} = \frac{(\overline{V_{i}}\overline{V_{j}})_{H}}{U_{i}U_{j}}$  – коефіцієнт, який враховує відношення добутків складових швидкостей на вільній поверхні потоку до добутків складових осереднених за глибиною потоку швидкостей.

За допомогою інтегрування за глибиною складових рівняння руху виду  $\frac{\partial}{\partial x_i} \overline{V_i} \overline{V_j}$  з урахуванням формул (2.44), (2.67) – (2.69), а також того, що вектор швидкості біля дна дорівнює нулю, тобто  $(\overline{V_i} \overline{V_j})_{z_0} = 0$ , можна отримати

$$\int_{z_0}^{H} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \overline{V_i} \overline{V_j} \right) dx_3 = \frac{\partial}{\partial x_i} h \left\langle \overline{V_i} \overline{V_j} \right\rangle + \left[ \left\langle \overline{V_i} \overline{V_j} \right\rangle - \left( \overline{V_i} \overline{V_j} \right)_H \right] \frac{\partial H}{\partial x_i} + \left[ \left( \overline{V_i} \overline{V_j} \right)_{z_0} - \left\langle \overline{V_i} \overline{V_j} \right\rangle \right] \frac{\partial z_0}{\partial x_i}$$
(2.70)

або

$$\int_{z_{0}}^{H} \frac{\partial}{\partial x_{i}} \overline{V_{V}} \overline{V_{j}} dx_{3} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} h \alpha_{h} U_{i} U_{j} + \left[ \alpha_{h} U_{i} U_{j} - \alpha_{H} U_{i} U_{j} \right] \frac{\partial H}{\partial x_{i}} - \alpha_{h} U_{i} U_{j} \frac{\partial z_{0}}{\partial x_{i}} =$$

$$= \alpha_{h} \frac{\partial}{\partial x_{i}} h U_{i} U_{j} + U_{i} U_{j} h \frac{\partial \alpha_{h}}{\partial x_{i}} + (\alpha_{h} - \alpha_{H}) U_{i} U_{j} \frac{\partial H}{\partial x_{i}} - \alpha_{h} U_{i} U_{j} \frac{\partial z_{0}}{\partial x_{i}} =$$

$$= \alpha_{h} h \frac{\partial U_{i} U_{j}}{\partial x_{i}} - U_{i} U_{j} \left[ \alpha_{h} \frac{\partial z_{0}}{\partial x_{i}} - (\alpha_{h} - \alpha_{H}) \frac{\partial H}{\partial x_{i}} - h \frac{\partial \alpha_{h}}{\partial x_{i}} \right].$$
(2.71)

Проведемо оцінку порядку доданків у правій частині (2.71). Приймемо, що на відстані *L* порядок зміни швидкості дорівнює *V*, глибини – *h*, відміток вільної поверхні та дна – відповідно  $\delta_H$  та  $\delta_{z_0}$ , приймемо  $\delta_H \approx \delta_{z_0} << h$ ,  $\alpha_h$  і  $\alpha_H$ дорівнюють 1, а перший доданок у правій частині дорівнює  $\frac{V^2h}{L}$ , інші доданки –  $\frac{V^2\delta_H}{L}$ ,  $\frac{V^2\delta_{z_0}}{L}$ ,  $\frac{V^2\delta_a h}{L}$ . Таким чином, при інтегруванні конвективних доданків за глибиною потоку в рівняннях двовимірної задачі з'являються додаткові доданки у вигляді  $U_i U_j \alpha_H \frac{\partial H}{\partial x_i}$ ;  $U_i U_j \frac{\partial \alpha_h}{\partial x_i}$ ;  $U_i U_j \alpha_h \frac{\partial z_0}{\partial x_i}$ , порядок яких менше за основного доданка в співвідношеннях  $\delta_H << h$ ;  $\delta_{z_0} << h$ ;  $\delta_{\alpha} <<1$ .

У праву частину рівнянь (2.60) та (2.61) під знаком похідної по горизонтальним координатам  $x_1, x_2$  входять величини нормальних та дотичних турбулентних напружень у вигляді доданків  $\frac{\partial \overline{V_i} \overline{V'_j}}{\partial x_i}$ , якщо проінтегрувати ці доданки з урахуванням виразу (2.44), можна отримати:

$$\int_{z_0}^{H} \frac{\partial \overline{V_i} \overline{V_j'}}{\partial x_i} dx_3 = \frac{\partial}{\partial x_i} h \left\langle \overline{V_i} \overline{V_j'} \right\rangle + \left[ \left\langle \overline{V_i} \overline{V_j'} \right\rangle - \left( \overline{V_i} \overline{V_j'} \right)_H \right] \frac{\partial H}{\partial x_i} + \left[ \left( \overline{V_i} \overline{V_j'} \right)_{z_0} - \left\langle \overline{V_i} \overline{V_j'} \right\rangle \right] \frac{\partial z_0}{\partial x_i} .$$
(2.72)

Якщо прийняти порядок зміни величини турбулентних напружень  $\tau$  на відстань L, то перший доданок у правій частині (2.72) матиме порядок  $\frac{\tau h}{L}$ , а інші доданки – порядок  $\frac{\tau \delta_{H}}{L}$  та  $\frac{\tau \delta_{z_{0}}}{L}$ , тобто менше порядку основного першого доданку у співвідношенні  $\delta_{H} \approx \delta_{z_{0}} << h$ .

Інтегрування доданків, що містять похідні турбулентних напружень за вертикальною координатою x<sub>3</sub>, дасть наступне:

$$\int_{z_0}^{H} \frac{\partial \overline{V_i} \overline{V_3}'}{\partial x_3} dx_3 = \int_{z_0}^{H} d\left(\overline{V_i} \overline{V_3}'\right) = \left(\overline{V_i} \overline{V_3}'\right)_H - \left(\overline{V_i} \overline{V_3}'\right)_{z_0}, \qquad (2.73)$$

тобто різницю дотичних турбулентних напружень, що діють на вільній поверхні  $\tau_{iH} = (\overline{V_i}\overline{V_3}')_H$  та на дні потоку  $\tau_{iz_0} = (\overline{V_i}\overline{V_3}')_{z_0}$ .

Після інтегрування рівнянь руху (2.60) та (2.61) запишемо двовимірні рівняння. При цьому будемо нехтувати доданками вищого порядку мализни у порівнянні з основними доданками  $\frac{V^2h}{L}$  і  $\frac{\tau h}{L}$ . Порядок доданків сили опору рослинності  $\frac{C_x s_p h}{2} \frac{\partial \langle \overline{V_i V_3} \rangle}{\partial x_1} \approx \frac{h \tau}{L}$  та сили тертя на дні та вільній поверхні  $\tau_{iH}$ ,  $\tau_{iz_0}$ (*i*=1,2) залежать від конкретних умов задачі та в загальному випадку можуть бути сувимірними з порядком вище основних доданків. Тому ці доданки також матимуть місце в кінцевих двовимірних рівняннях руху. Приймемо:

$$N_{P} = \frac{C_{X}s_{P}}{2}, \ N_{Ch} = \frac{k_{CP}C_{Ch} \cdot g}{C_{\phi_{1}}D\rho_{LS}}.$$
(2.74)

Двовимірні рівняння руху після ділення на *h* та з урахуванням (2.74) запишуться у вигляді:

рівняння кількості руху (у напрямку на вісь  $X_1$ ) –

$$\frac{\partial U_{1}}{\partial t} + \alpha_{h} \left[ \frac{\partial U_{1}^{2}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial U_{1}U_{2}}{\partial x_{2}} \right] = -\left(g + N_{P} \left\langle \overline{V_{1}V_{3}'} \right\rangle - N_{Ch} \left\langle \overline{S} \right\rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_{1}} - h \left(N_{P} \frac{\partial \left\langle \overline{V_{1}V_{3}'} \right\rangle}{\partial x_{1}} + N_{Ch} \frac{\partial \left\langle \overline{S} \right\rangle}{\partial x_{1}} \right) - \frac{\partial \left\langle \overline{V_{1}V_{2}'} \right\rangle}{\partial x_{2}} - \frac{1}{h} \left[ \left( \overline{V_{1}V_{3}'} \right)_{H} - \left( \overline{V_{1}V_{3}'} \right)_{z_{0}} \right] - N_{P} \left[ \alpha_{h} U_{1}^{2} + \left\langle \overline{V_{1}^{2}} \right\rangle + \frac{U_{2}}{U_{1}} \left\langle \overline{V_{2}V_{1}'} \right\rangle \right],$$

$$(2.75)$$

рівняння кількості руху (у напрямку на вісь  $X_2$ ) –

$$\frac{\partial U_{2}}{\partial t} + \alpha_{h} \left[ \frac{\partial U_{1}U_{2}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial U_{2}^{2}}{\partial x_{2}} \right] = -\left(g + N_{p} \langle \overline{V_{1}V_{3}'} \rangle + N_{Ch} \langle \overline{S} \rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_{2}} - h \left(N_{p} \frac{\partial \langle \overline{V_{1}V_{3}'} \rangle}{\partial x_{2}} + N_{Ch} \frac{\partial \langle \overline{S} \rangle}{\partial x_{2}} \right) - \frac{\partial \langle \overline{V_{2}V_{1}'} \rangle}{\partial x_{1}} - \frac{\partial \partial \langle \overline{V_{2}V_{1}'} \rangle}{\partial x_{1}} - \frac{\partial \partial \langle \overline{V_{2}V_{2}'} \rangle}{\partial x_{2}} - \langle \overline{V_{3}^{P}} \rangle \right) - \frac{1}{h} \left[ \left( \overline{V_{2}V_{3}'} \right)_{H} - \left( \overline{V_{2}V_{3}'} \right)_{z_{0}} \right] - N_{p} \left[ \alpha_{h} U_{1}U_{2} + \langle \overline{V_{1}V_{2}'} \rangle + \frac{U_{2}}{U_{1}} \langle \overline{V_{2}^{P}} \rangle \right],$$

$$(2.76)$$

рівняння нерозривності –

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U_1 h}{\partial x_1} + \frac{\partial U_2 h}{\partial x_2} = 0$$
(2.77)

# 2.4 Розробка усталених двовимірних рівнянь для прогнозування розподілу швидкостей та глибин в турбулентних потоках на заплавах з трав'яною рослинністю

Розрахунок усталених 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 (2.76) – (2.77), якщо в останніх прийняти,  $U_1 = U$ ,  $U_2 \approx 0$  та використати умову стаціонарності  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ . У результаті осереднення турбулентних характеристик за глибиною потоку в двовимірних рівняннях

(2.75) – (2.76) наявні доданки  $\frac{\partial \langle \overline{V_i V_i} \rangle}{\partial x_i}$ ;  $\frac{\partial}{\partial x_i} (\langle \overline{V_i^2} \rangle - \langle \overline{V_3^2} \rangle)$ , (*i*=1,2), що виражають вклад дотичних та нормальних напружень в динамічний баланс імпульсу сил в двовимірних течіях. На відміну від рівнянь тривимірних турбулентних течій в двовимірних рівняннях вплив нормальних турбулентних напружень на формування двовимірних течій виражається лише різницею середніх за глибиною нормальних напружень по вертикальному та горизонтальному напрямках. Аналіз проведений в роботі [135], оцінки значень різності дисперсії вертикальної пульсаційної компоненти швидкості  $\overline{V_1^2}$  та дисперсій поздовжньої і поперечної компонент швидкості  $\overline{V_1^2}$  і  $\overline{V_2^2}$  показав, що нормальними турбулентними напруженнями при розгляді задач в рамках двовимірної ідеалізації реальних течій можна нехтувати. Таким чином, згідно [136, 137], враховуючи вище наведені умови спрощення, отримаємо усталені рівняння двовимірних течій на заплавах з трав'яною рослинністю:

$$\alpha_{h} \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{1}} = -\left(g + N_{P} \left\langle \overline{V_{1} V_{3}'} \right\rangle - N_{Ch} \left\langle \overline{S} \right\rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_{1}} - h\left(N_{P} \frac{\partial \left\langle \overline{V_{1} V_{3}'} \right\rangle}{\partial x_{1}} + N_{Ch} \frac{\partial \left\langle \overline{S} \right\rangle}{\partial x_{1}} \right) - \frac{\partial \left\langle \overline{V_{1} V_{2}'} \right\rangle}{\partial x_{2}} - \frac{1}{h} \left[ \left(\overline{V_{1} V_{3}'} \right)_{H} - \left(\overline{V_{1} V_{3}'} \right)_{z_{0}} \right] - N_{P} \left[ \alpha_{h} U^{2} + \left\langle \overline{V_{1}^{P}} \right\rangle \right],$$

$$0 = -\left(g + N_{P}\left\langle\overline{V_{1}V_{3}'}\right\rangle + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle\right)\frac{\partial h}{\partial x_{2}} - h\left(N_{P}\frac{\partial\left\langle\overline{V_{1}V_{3}'}\right\rangle}{\partial x_{2}} + N_{Ch}\frac{\partial\left\langle\overline{S}\right\rangle}{\partial x_{2}}\right) - \frac{\partial\left\langle\overline{V_{2}V_{1}'}\right\rangle}{\partial x_{1}} - \frac{1}{h}\left[\left(\overline{V_{2}V_{3}'}\right)_{H} - \left(\overline{V_{2}V_{3}'}\right)_{z_{0}}\right] - N_{P}\left\langle\overline{V_{1}V_{2}'}\right\rangle,$$

$$(2.79)$$

$$\frac{\partial U h}{\partial x_1} = 0.$$
 (2.80)

Отримана система усталених двовимірних рівнянь руху заплавного потоку з елементами рослинності (2.78) – (2.80) є незамкнутою, оскільки в рівняннях руху наявні дотичні і нормальні турбулентні напруження, фізичний зміст яких полягає в урахуванні осередненого переносу кількості пульсаційного

(2.78)
руху пульсаційними швидкостями. Наявність в рівняннях цих напружень приводить до необхідності апроксимації за допомогою певних співвідношень та моделей турбулентності членів турбулентного переносу.

Виникає питання: яка повинна бути складність моделі для отримання результатів з достатньою для практичний цілей точністю. Відповідь необхідно шукати у складності вихідних рівнянь та розв'язуваних задач. У деяких складних ситуаціях необхідно реалізовувати рівняння в частинних похідних для осередненого руху. Члени турбулентного переносу, які з'являються в цих рівняннях, повинні визначатися у кожній точці середовища за допомогою моделей турбулентності.

У деяких випадках є достатнім лише наближений опис турбулентності. Так, в задачах про великі водні маси значення турбулентної в'язкості приймається постійним [39, 50]. Більш складні моделі в таких задачах себе не виправдовують із-за значних невизначеностей в завданні межових умов та похибок в числових рішеннях.

Для розрахунку двовимірних течій за допомогою рівнянь (2.78) – (2.80) необхідно виразити величини дотичних та нормальних турбулентних напружень, які діють між струминками двовимірних течій, через швидкість U. Значення  $\langle \overline{V_i V_i'} \rangle$ ,  $\langle \overline{V_i^2} \rangle$  будемо визначати, як прийнято в роботах [100, 135], ґрунтуючись на гіпотезі Бусінеска:

$$-\overline{V_i}\overline{V_j'} = v_t \left(\frac{\partial \overline{V}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{V}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}k\delta_{ij}, \qquad (2.81)$$

де  $v_t$  – турбулентна в'язкість; k – кінетична енергія турбулентності;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases}$ ,

приймаючи v, пропорційною швидкості U, згідно [50]:

$$v_t = 2\Lambda U . \tag{2.82}$$

де л – коефіцієнт турбулентного обміну

$$\Lambda = \frac{h}{2MC}, \qquad (2.83)$$

С – коефіцієнт Шезі

$$C = \frac{Q_{f-p}}{B_{f-p}h_{cep}^{3/2}I_{x_1}^{1/2}},$$
(2.84)

 $M - функція коефіцієнта Шезі, при <math>10 \le C \le 60$  M = 0,7C + 6, при C > 60 - M = 48;

- $Q_{f_{-p}}$  витрата заплавного потоку;
- $B_{f^{-p}}$  ширина заплавного потоку;
- $h_{cep}$  середня глибина заплавного потоку.

Тоді за формулою (2.81)  $-\overline{V_1V_2'} = v_t \left(\frac{\partial \overline{V_1}}{\partial x_2} + \frac{\partial \overline{V_2}}{\partial x_1}\right), -\overline{V_1V_3'} = v_t \left(\frac{\partial \overline{V_1}}{\partial x_3} + \frac{\partial \overline{V_3}}{\partial x_1}\right),$  $-\overline{V_1^2} = 2v_t \frac{\partial \overline{V_1}}{\partial x_1},$ а з урахуванням формули (2.82) для двовимірної задачі

$$-\left\langle \overline{V_1 V_2'} \right\rangle = \Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2}, \qquad (2.85)$$

$$-\left\langle \overline{V_{1}V_{3}'}\right\rangle = \Lambda \frac{U^{2}}{h}, \qquad (2.86)$$

$$-\left\langle \overline{V_{1}^{2}}\right\rangle = 2\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{1}}.$$
(2.87)

Для розрахунку дотичних напружень на дні приймається квадратичний закон тертя [100] і з урахуванням  $U_1 = U$ ,  $U_2 \approx 0$ 

$$\left(\overline{V_{1}V_{3}'}\right)_{z_{0}} = \frac{C_{f}\overline{U^{2}}}{K_{\Phi}}, \quad \left(\overline{V_{2}V_{3}'}\right)_{z_{0}} = 0.$$
 (2.88)

де С<sub>f</sub> – емпіричний коефіцієнт тертя:

$$C_f = \frac{n^2 g}{h^{1/3}}, \qquad (2.89)$$

де *n* – коефіцієнт шорсткості.

Для русел довільного перетину у вираз розрахунку локального значення сили тертя по дну необхідно вводити поправковий коефіцієнт К<sub>Ф</sub>, який враховує форму русла. Доцільність введення коефіцієнта К<sub>Ф</sub> наведено в роботах [100, 135]. Значення коефіцієнта К<sub>Ф</sub> визначається за залежністю:

$$K_{\Phi} = \frac{C^2}{x_2 V_{cep}^2} \int_{0}^{x_2} \frac{U^2}{C_h^2} dx_2 , \qquad (2.90)$$

де  $V_{cep}$  – середня швидкість,  $V_{cep} = Q_{f-p}/B_{f-p}$ ;  $C_h$  – коефіцієнт Шезі за глибиною:

$$C_h = \frac{1}{n} h_{cep}^{1/6}.$$
 (2.91)

Ураховуючи залежності для турбулентних напружень (2.85) – (2.88) [136, 137], представимо усталені рівняння двовимірних течій на заплавах з трав'яною рослинністю:

$$\alpha_{h}\frac{\partial U^{2}}{\partial x_{1}} = -\left(g + N_{P}\Lambda\frac{U^{2}}{h} + N_{Ch}\langle\overline{S}\rangle\right)\frac{\partial h}{\partial x_{1}} - h\left(N_{P}\frac{\partial}{\partial x_{1}}\left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right) + N_{Ch}\frac{\partial\langle\overline{S}\rangle}{\partial x_{1}}\right) - \frac{\partial}{\partial x_{2}}\left(\Lambda\frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}}\right) - \frac{C_{f}U^{2}}{hK_{\Phi}} - N_{P}\left[\alpha_{h}U^{2} + 2\Lambda\frac{\partial U^{2}}{\partial x_{1}}\right],$$

$$(2.92)$$

$$0 = -\left(g + N_{P}\Lambda \frac{U^{2}}{h} + N_{Ch}\langle \overline{S} \rangle\right) \frac{\partial h}{\partial x_{2}} - h\left(N_{P}\frac{\partial}{\partial x_{2}}\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right) + N_{Ch}\frac{\partial\langle \overline{S} \rangle}{\partial x_{2}}\right) - \frac{\partial}{\partial x_{1}}\left(\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}}\right) - N_{P}\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}}.$$
 (2.93)

Після перетворень рівняння переносу заплавного потоку з трав'яною рослинністю для прогнозування розподілу глибин і швидкостей матимуть наступний вигляд:

$$\left[ \alpha_{h} + N_{P} 2\Lambda \right] 2U \frac{\partial U}{\partial x_{1}} = -\left( g + N_{P}\Lambda \frac{U^{2}}{h} + N_{Ch} \langle \overline{S} \rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_{1}} - h \left( N_{P} \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right) + N_{Ch} \frac{\partial \langle \overline{S} \rangle}{\partial x_{1}} \right) - \frac{\partial}{\partial x_{2}} \left( \Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}} \right) - \left[ \frac{C_{f}}{hK_{\Phi}} + N_{P}\alpha_{h} \right] U^{2},$$

$$\left[ \frac{C_{f}}{hK_{\Phi}} + N_{P}\alpha_{h} \right] U^{2},$$

$$(2.94)$$

$$\left(g + N_{P}\Lambda \frac{U^{2}}{h} + N_{Ch}\langle \overline{S} \rangle\right) \frac{\partial h}{\partial x_{2}} = -h\left(N_{P} \frac{\partial}{\partial x_{2}} \left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right) + N_{Ch} \frac{\partial \langle \overline{S} \rangle}{\partial x_{2}}\right) - \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left(\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}}\right) - N_{P}\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}}.$$
(2.95)

При розрахунку двовимірних стаціонарних гідродинамічних течій на заплавах, в зонах зі складною геометрією, отримання різницевих рівнянь суттєво ускладнюється. В зв'язку з цим є необхідність перетворити рівняння (2.94) – (2.95) та умову нерозривності (2.80) за методом перетворення координат, запропонованим у роботах авторів [138]. Цей метод дозволяє за допомогою відповідного перетворення координат звести рішення рівнянь усталеного руху в смузі змінної ширини, тобто в області з рухомими границями, до розв'язування цих рівнянь в смузі постійної ширини:

$$x > 0; 0 \le \eta \le 1$$
 (2.96)

де  $\eta$  – нова поперечна координата.

Перейдемо від координат  $x_1, x_2$  до координат  $x, \eta$ :

$$x = x_1; \quad \eta = \frac{x_2 - x_2(1)}{x_2(N) - x_2(1)} = \frac{x_2 - y_0}{b}$$
(2.97)

де  $b = x_2(N) - x_2(1)$  змінна ширина потоку по рівню води.

Оператори диференціювання в старих координатах  $x_1, x_2$  виражатимуться через оператори диференціювання в нових координатах за допомогою формул для похідних складних функцій декількох аргументів [9]:

$$\frac{\partial}{\partial x_1} = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{A_1}{b} \frac{\partial}{\partial \eta}; \quad \frac{\partial}{\partial x_2} = \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial \eta}; \quad A_1 = -\left(\frac{\partial y_0}{\partial x_1} + \eta \frac{\partial B}{\partial x_1}\right) = -\left(\frac{\partial y_0}{\partial x} + \eta \frac{\partial B}{\partial x}\right). \tag{2.98}$$

Запишемо рівняння двовимірних течій (2.80), (2.94) – (2.95) в новій системі координат з урахуванням співвідношень (2.98). Після нескладних перетворень:

$$\left[ \alpha_{h} + N_{p} 2\Lambda \right] 2U \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{A_{1}}{b} \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) = - \left( g + N_{p}\Lambda \frac{U^{2}}{h} + N_{cp} \langle \overline{S} \rangle \right) \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{A_{1}}{b} \frac{\partial h}{\partial \eta} \right) - h \left[ N_{p} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right) + \frac{A_{1}}{b} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right) \right) + N_{ch} \left( \frac{\partial \langle \overline{S} \rangle}{\partial x} + \frac{A_{1}}{b} \frac{\partial \langle \overline{S} \rangle}{\partial \eta} \right) \right] - \frac{1}{b^{2}} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial \eta} \right) - \left[ \frac{C_{f}}{hK_{\phi}} + \alpha_{h} N_{p} \right] U^{2},$$

$$(2.99)$$

$$\left(g + N_{p}\Lambda \frac{U^{2}}{h} + N_{cp}\left\langle\overline{S}\right\rangle\right)\frac{1}{b}\frac{\partial h}{\partial\eta} = -\frac{h}{b}\left(N_{p}\frac{\partial}{\partial\eta}\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right) + N_{ch}\frac{\partial\left\langle\overline{S}\right\rangle}{\partial\eta}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\Lambda}{b}\frac{\partial U^{2}}{\partial\eta}\right) + \frac{A_{l}}{b^{2}}\frac{\partial}{\partial\eta}\left(\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial\eta}\right) - \frac{N_{p}\Lambda}{b}\frac{\partial U^{2}}{\partial\eta},$$

$$-\frac{N_{p}\Lambda}{b}\frac{\partial U^{2}}{\partial\eta},$$

$$\frac{\partial Uh}{\partial x} = A_{p}\partial Uh$$
(2.100)

$$\frac{\partial Uh}{\partial x} + \frac{A_1}{b} \frac{\partial Uh}{\partial \eta} = 0.$$
 (2.101)

Алгоритм реалізації рівнянь двовимірних течій на заплавних потоках з елементами рослинності в смузі постійної ширини лишається таким же, як і для прямокутних русел.

Дискретні аналоги рівнянь (2.80), (2.94) – (2.95) та (2.99) – (2.101) наведені у розділі 3.

### 2.5 Математична модель заплавного потоку з трав'яною рослинністю з урахуванням сили опору при обтіканні мостових опор

При обтіканні мостової опори виникає місцеве порушення структури основного потоку, врахувати яке можна через динамічні характеристики потоку, що набігає, та безпосередні розміри споруди, шляхом включення у модельні рівняння (2.94), (2.95) сили опору при обтіканні мостових опор.

При проектуванні мостових переходів найбільший інтерес являє собою величина максимального розмиву, який може відбутися у процесі експлуатації мостового переходу при розрахунковій повені. На відміну від розглянутих вище складових сил, розподіл яких розглядається по всьому розрахунковому об'єму потоку, сила опору при обтіканні мостових опор призводить до локального порушення структури річкового потоку.

Місцеве порушення структури потоку, при обтіканні мостової опори, можна виразити через динамічні характеристики набігаючого потоку та безпосередні розміри споруди. На підставі досліджень Г. Шліхтінга, К. Вігхардта, І.О. Ярославцева [139 – 141] отримано вираз для усередненої складової сили опору при обтіканні мостових опор:

$$f_{Pier} = \frac{1}{2} C_{pier} s_{pser} V^2, \qquad (2.102)$$

де  $C_{pier}$  – коефіцієнт опору, який визначається за експериментальними дослідженнями, для випадку опору при обтіканні нескінченного циліндра  $C_{pier}$  =1,2, згідно з [142];

s<sub>pier</sub> – міделева площа мостової опори, яка обтікається потоком.

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

$$s_{pier} = \frac{K_f l_{pier} b_{pier}}{B_{pier} L_{pier} \Delta x_3},$$
(2.103)

де *K<sub>f</sub>* – коефіцієнти форми опори, для незатоплених мостових опор визначаються за даними [139, 143];

 $l_{0pier}$  – довжина опори, при косому набіганні потоку  $l_{pier} = l_{0pier} \cos \alpha_{pier}$ ;  $b_{0pier}$  – ширина опори, при нормальному набіганні потоку  $b_{pier} = b_{0pier}$ , при косому набіганні потоку  $b_{pier} = l_{0pier} \sin \alpha_{pier} + b_{0pier} \cos \alpha_{pier}$ ;

 $\alpha_{pier}$  – кут набігання потоку на мостову опору.

Сила опору при обтіканні мостових опор, згідно з [120], визначається за залежністю:

$$\overline{f_{pier}} = \frac{1}{2\overline{V}} C_{pier} s_{pier} \left( \overline{V^2 V_i} + \overline{V_j} \overline{V_j} \overline{V_i'} \right), \qquad (2.104)$$

відповідно проекції сили на осі  $Ox_i$  (*i*=1,2,3) координат:

$$\overline{f_{pier1}} = \frac{1}{2\overline{V}} C_{pier} s_{pier} \left( \overline{V^2 V_1} + \overline{V_1} \overline{V_1^{\ell}} + \overline{V_2} \overline{V_2' V_1'} + \overline{V_3} \overline{V_3' V_1'} \right);$$
(2.105)

$$\overline{f_{pier2}} = \frac{1}{2\overline{V}} C_{pier} s_{pier} \left( \overline{V^2 V_2} + \overline{V_1} \overline{V_1 V_2'} + \overline{V_2} \overline{V_2'^2} + \overline{V_3} \overline{V_3' V_2'} \right);$$
(2.106)

$$\overline{f_{pier3}} = \frac{1}{2\overline{V}} C_{pier} s_{pier} \left( \overline{V^2 V_3} + \overline{V_1} \overline{V_1' V_3'} + \overline{V_2} \overline{V_2' V_3'} + \overline{V_3} \overline{V_3'}^2 \right).$$
(2.107)

Відповідно розподіл гідродинамічного тиску в заплавному потоці визначатиметься за залежністю:

$$\overline{p} = \overline{p}_{H} + \overline{\rho_{LS}}g(H - x_{3}) - \overline{\rho_{LS}}\overline{V_{3}^{\prime 2}} + \overline{\rho_{LS}}\int_{x_{3}}^{H} \overline{f_{P3}}dx_{3} + \overline{\rho_{LS}}\int_{x_{3}}^{H} \overline{f_{Pier3}}dx_{3} + \overline{\rho_{LS}}\int_{x_{3}}^{H} \overline{f_{Ch}}dx_{3} = \overline{p}_{H} + \overline{\rho_{LS}}g(H - x_{3}) - \overline{\rho_{LS}}\overline{V_{3}^{\prime 2}} + \overline{\rho_{LS}}\frac{C_{X}s_{p}}{2}\int_{x_{3}}^{H} \overline{\overline{V_{1}}}\overline{V_{1}}V_{3}'dx_{3} + \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot g}{C_{\Phi 1}D}\int_{x_{3}}^{H} \overline{S}dx_{3} + \overline{\rho_{LS}}\frac{C_{pier}s_{pier}}{2}\int_{x_{3}}^{H} \overline{\overline{V_{1}}}\overline{V_{1}}V_{3}'dx_{3},$$

$$(2.108)$$

після інтегрування:

$$\overline{p} = \overline{p}_{H} + \overline{\rho_{LS}}g(H - x_{3}) - \overline{\rho_{LS}}\overline{V_{3}^{\prime 2}} + (C_{X}s_{p} + C_{pier}s_{pier})\frac{\overline{\rho_{LS}}}{2}\frac{\langle \overline{V_{1}}\rangle}{\langle \overline{U}\rangle}\langle \overline{V_{1}}\overline{V_{3}}\rangle(H - x_{3}) + \frac{k_{Cp}C_{Ch}\cdot\langle \overline{S}\rangle g}{C_{\Phi 1}D}(H - x_{3}),$$
(2.109)

при спрощенні  $\overline{V} \approx \overline{V_1}$  або  $\frac{\overline{V_1}}{\overline{V}} \approx 1$ 

$$\overline{p} = \overline{p}_{H} + \overline{\rho_{LS}}g(H - x_{3}) - \overline{\rho_{LS}}\overline{V_{3}^{\#}} - (C_{X}s_{p} + C_{pier}s_{pier})\frac{\overline{\rho_{LS}}}{2} \langle \overline{V_{1}}\overline{V_{3}} \rangle (H - x_{3}) - \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot \langle \overline{S} \rangle g}{C_{\Phi 1}D} (H - x_{3}).$$
(2.110)

Ураховуючи вираз (2.110), рівняння (2.60) – (2.61) будуть мати наступний вигляд:

$$\frac{\partial \overline{V_{1}}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_{1}^{2}}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial \overline{V_{1}V_{2}}}{\partial x_{2}} + \frac{\partial \overline{V_{1}V_{3}}}{\partial x_{3}} = -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \overline{V_{1}^{p}} - \overline{V_{3}^{p}} \right) - \frac{\partial \overline{V_{1}V_{2}'}}{\partial x_{2}} - \frac{\partial \overline{V_{1}V_{3}'}}{\partial x_{3}} - \frac{C_{X}s_{p} + C_{pier}s_{pier}}{2} \left( \overline{V_{1}^{2}} + \overline{V_{1}^{p}} + \frac{\overline{V_{2}}}{\overline{V_{1}}} \overline{V_{1}} + \frac{\overline{V_{3}}}{\overline{V_{1}}} \overline{V_{3}V_{1}'} \right) - \left( g + \frac{C_{X}s_{p} + C_{pier}s_{pier}}{2} \left\langle \overline{V_{1}V_{3}'} \right\rangle + \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot g}{C_{\phi 1}D\overline{\rho_{LS}}} \left\langle \overline{S} \right\rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_{1}} - h \left( \frac{C_{X}s_{p} + C_{pier}s_{pier}}{2} \frac{\partial \left\langle \overline{V_{1}V_{3}'} \right\rangle}{\partial x_{1}} + \frac{k_{Cp}C_{Ch} \cdot g}{C_{\phi 1}D\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial \left\langle \overline{S} \right\rangle}{\partial x_{1}} \right).$$

$$(2.111)$$

$$\frac{\partial \overline{V_{2}}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{V_{2}V_{1}}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial \overline{V_{2}}^{2}}{\partial x_{2}} + \frac{\partial \overline{V_{2}V_{3}}}{\partial x_{3}} = -\frac{\partial \overline{V_{2}V_{1}'}}{\partial x_{1}} - \frac{\partial}{\partial x_{2}} \left(\overline{V_{2}'^{2}} - \overline{V_{3}'^{2}}\right) - \frac{\partial \overline{V_{2}V_{3}'}}{\partial x_{3}} - \frac{C_{x}s_{p} + C_{pier}s_{pier}}{2} \left(\overline{V_{1}V_{2}} + \overline{V_{1}V_{2}'} + \frac{\overline{V_{2}}}{\overline{V_{1}}} \overline{V_{2}'^{2}} + \frac{\overline{V_{3}}}{\overline{V_{1}}} \overline{V_{3}V_{2}'}\right) - \left(g + \frac{C_{x}s_{p} + C_{pier}s_{pier}}{2} \left\langle \overline{V_{1}V_{3}'} \right\rangle + \frac{k_{cp}C_{ch} \cdot g}{C_{\phi 1}D\overline{\rho_{LS}}} \left\langle \overline{S} \right\rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_{2}} - h \left(\frac{C_{x}s_{p} + C_{pier}s_{pier}}{2} \frac{\partial \left\langle \overline{V_{1}V_{3}'} \right\rangle}{\partial x_{2}} + \frac{k_{cp}C_{ch} \cdot g}{C_{\phi 1}D\overline{\rho_{LS}}} \frac{\partial \left\langle \overline{S} \right\rangle}{\partial x_{2}}\right).$$

(2.112)

Помножимо рівняння (2.111) і (2.112) на *dx*<sub>3</sub> та проінтегруємо за глибиною та оцінимо порядок доданків, користуючись способом та оцінкою наведеними в роботі [100].

Приймемо:

$$N_{pier} = \frac{C_{pier} s_{pier}}{2}.$$
(2.113)

Двовимірні рівняння руху після ділення на *h* та з врахуванням (2.74) і (2.113) запишуться у вигляді:

рівняння кількості руху (у напрямку на вісь  $X_1$ ) –

$$\frac{\partial U_{1}}{\partial t} + \alpha_{h} \left[ \frac{\partial U_{1}^{2}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial U_{1}U_{2}}{\partial x_{2}} \right] = -\left(g + \left(N_{P} + N_{pier}\right)\left(\overline{V_{1}V_{3}'}\right) - N_{Ch}\left(\overline{S}\right)\right) \frac{\partial h}{\partial x_{1}} - h\left(\left(N_{P} + N_{pier}\right)\frac{\partial\left(\overline{V_{1}V_{3}'}\right)}{\partial x_{1}} + N_{Ch}\frac{\partial\left(\overline{S}\right)}{\partial x_{1}}\right) - \frac{\partial\left(\overline{V_{1}V_{2}'}\right)}{\partial x_{1}} - \frac{\partial\left(\overline{V_{1}V_{2}'}\right)}{\partial x_{2}} - \frac{1}{h}\left[\left(\overline{V_{1}V_{3}'}\right)_{H} - \left(\overline{V_{1}V_{3}'}\right)_{z_{0}}\right] - \left(N_{P} + N_{pier}\right)\left[\alpha_{h}U_{1}^{2} + \left\langle\overline{V_{1}}^{2}\right\rangle + \frac{U_{2}}{U_{1}}\left\langle\overline{V_{2}'V_{1}'}\right\rangle\right],$$

$$(2.114)$$

рівняння кількості руху (у напрямку на вісь  $X_2$ ) –

$$\frac{\partial U_{2}}{\partial t} + \alpha_{h} \left[ \frac{\partial U_{1}U_{2}}{\partial x_{1}} + \frac{\partial U_{2}^{2}}{\partial x_{2}} \right] = -\left(g + \left(N_{P} + N_{pier}\right)\left(\overline{V_{1}V_{3}'}\right) + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle\right) \frac{\partial h}{\partial x_{2}} - h\left(\left(N_{P} + N_{pier}\right)\frac{\partial\left\langle\overline{V_{1}V_{3}'}\right\rangle}{\partial x_{2}} + N_{Ch}\frac{\partial\left\langle\overline{S}\right\rangle}{\partial x_{2}}\right) - \frac{\partial\left\langle\overline{V_{2}V_{1}'}\right\rangle}{\partial x_{1}} - \frac{\partial\left(\left\langle\overline{V_{2}V_{2}'}\right\rangle}{\partial x_{2}} - \left\langle\overline{V_{3}^{P}}\right\rangle\right) - \frac{1}{h} \left[\left(\overline{V_{2}V_{3}'}\right)_{H} - \left(\overline{V_{2}V_{3}'}\right)_{z_{0}}\right] - \left(N_{P} + N_{pier}\right)\left[\alpha_{h}U_{1}U_{2} + \left\langle\overline{V_{1}V_{2}'}\right\rangle + \frac{U_{2}}{U_{1}}\left\langle\overline{V_{2}^{P}}\right\rangle\right],$$

$$(2.115)$$

При  $U_1 = U$ ,  $U_2 \approx 0$  та використати умову стаціонарності  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$  рівняння (2.78) та (2.79) приймуть наступний вигляд:

$$\alpha_{h} \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{1}} = -\left(g + \left(N_{P} + N_{pier}\right)\left(\overline{V_{1}V_{3}'}\right) - N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle\right)\frac{\partial h}{\partial x_{1}} - h\left(\left(N_{P} + N_{pier}\right)\frac{\partial\left\langle\overline{V_{1}V_{3}'}\right\rangle}{\partial x_{1}} + N_{Ch}\frac{\partial\left\langle\overline{S}\right\rangle}{\partial x_{1}}\right) - \frac{\partial\left\langle\overline{V_{1}V_{2}'}\right\rangle}{\partial x_{2}} - \frac{1}{h}\left[\left(\overline{V_{1}V_{3}'}\right)_{H} - \left(\overline{V_{1}V_{3}'}\right)_{z_{0}}\right] - \left(N_{P} + N_{pier}\right)\left[\alpha_{h}U^{2} + \left\langle\overline{V_{1}^{P}}\right\rangle\right],$$

$$(2.116)$$

$$0 = -\left(g + \left(N_{P} + N_{pier}\right)\left(\overline{V_{1}V_{3}'}\right) + N_{Ch}\left(\overline{S}\right)\right)\frac{\partial h}{\partial x_{2}} - h\left(\left(N_{P} + N_{pier}\right)\frac{\partial\left\langle V_{1}V_{3}'\right\rangle}{\partial x_{2}} + N_{Ch}\frac{\partial\left\langle S\right\rangle}{\partial x_{2}}\right) - \frac{\partial\left\langle V_{2}V_{1}'\right\rangle}{\partial x_{1}} - \frac{1}{h}\left[\left(\overline{V_{2}V_{3}'}\right)_{H} - \left(\overline{V_{2}V_{3}'}\right)_{z_{0}}\right] - \left(N_{P} + N_{pier}\right)\left(\overline{V_{1}V_{2}'}\right),$$

$$(2.117)$$

Ураховуючи залежності для турбулентних напружень (2.85) – (2.87) представимо усталені рівняння (2.116) і (2.117) двовимірних течій на заплавах з трав'яною рослинністю:

$$\alpha_{h} \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{1}} = -\left(g + \left(N_{p} + N_{pier}\right)\Lambda \frac{U^{2}}{h} + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle\right)\frac{\partial h}{\partial x_{1}} - h\left(\left(N_{p} + N_{pier}\right)\frac{\partial}{\partial x_{1}}\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right) + N_{Ch}\frac{\partial\left\langle\overline{S}\right\rangle}{\partial x_{1}}\right) - \frac{\partial}{\partial x_{2}}\left(\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}}\right) - \frac{C_{f}U^{2}}{hK_{\Phi}} - \left(N_{p} + N_{pier}\right)\left[\alpha_{h}U^{2} + 2\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{1}}\right],$$

$$(2.118)$$

$$0 = -\left(g + \left(N_{P} + N_{pier}\right)\Lambda \frac{U^{2}}{h} + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle\right)\frac{\partial h}{\partial x_{2}} - h\left(\left(N_{P} + N_{pier}\right)\frac{\partial}{\partial x_{2}}\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right) + N_{Ch}\frac{\partial\left\langle\overline{S}\right\rangle}{\partial x_{2}}\right) - \frac{\partial}{\partial x_{1}}\left(\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}}\right) - \left(N_{P} + N_{pier}\right)\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}}$$

$$(2.119)$$

Після перетворень рівняння переносу заплавного потоку з трав'яною рослинністю (2.118) та (2.119) для прогнозування розподілу глибин і швидкостей, згідно з [144, 145], матимуть наступний вигляд:

$$\left[ \alpha_{h} + \left( N_{p} + N_{pier} \right) 2\Lambda \right] 2U \frac{\partial U}{\partial x_{1}} = - \left( g + \left( N_{p} + N_{pier} \right) \Lambda \frac{U^{2}}{h} + N_{Ch} \left\langle \overline{S} \right\rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_{1}} - h \left( \left( N_{p} + N_{pier} \right) \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right) + N_{Ch} \frac{\partial \left\langle \overline{S} \right\rangle}{\partial x_{1}} \right) - \left( 2.120 \right) \\ - \frac{\partial}{\partial x_{2}} \left( \Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}} \right) - \left[ \frac{C_{f}}{hK_{\Phi}} + \left( N_{p} + N_{pier} \right) \alpha_{h} \right] U^{2},$$

$$\left(g + \left(N_{P} + N_{pier}\right)\Lambda \frac{U^{2}}{h} + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle\right)\frac{\partial h}{\partial x_{2}} = -h\left(\left(N_{P} + N_{pier}\right)\frac{\partial}{\partial x_{2}}\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right) + N_{Ch}\frac{\partial\left\langle\overline{S}\right\rangle}{\partial x_{2}}\right) - \frac{\partial}{\partial x_{1}}\left(\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}}\right) - \left(N_{P} + N_{pier}\right)\Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial x_{2}} \cdot (2.121)$$

Запишемо рівняння двовимірних течій (2.120), (2.121) в новій системі координат з урахуванням співвідношень (2.98). Після нескладних перетворень:

$$\left[ \alpha_{h} + \left( \mathbf{N}_{p} + N_{pier} \right) 2\Lambda \right] 2U \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{A_{i}}{b} \frac{\partial U}{\partial \eta} \right) = - \left( g + \left( \mathbf{N}_{p} + N_{pier} \right) \Lambda \frac{U^{2}}{h} + \mathbf{N}_{cp} \left\langle \overline{S} \right\rangle \right) \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{A_{i}}{b} \frac{\partial h}{\partial \eta} \right) - \frac{1}{b^{2}} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \Lambda \frac{\partial U^{2}}{\partial \eta} \right) - h \left[ \left( \mathbf{N}_{p} + N_{pier} \right) \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right) + \frac{A_{i}}{b} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right) \right) + \mathbf{N}_{ch} \left( \frac{\partial \left\langle \overline{S} \right\rangle}{\partial x} + \frac{A_{i}}{b} \frac{\partial \left\langle \overline{S} \right\rangle}{\partial \eta} \right) \right] - \left[ \frac{C_{f}}{h \mathbf{K}_{\Phi}} + \alpha_{h} \left( \mathbf{N}_{p} + N_{pier} \right) \right] U^{2},$$

$$(2.122)$$

$$\left(g + \left(N_{p} + N_{pier}\right)\Lambda\frac{U^{2}}{h} + N_{Cp}\left\langle\overline{S}\right\rangle\right)\frac{1}{b}\frac{\partial h}{\partial \eta} = -\frac{h}{b}\left(\left(N_{p} + N_{pier}\right)\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right) + N_{Ch}\frac{\partial\left\langle\overline{S}\right\rangle}{\partial \eta}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\Lambda}{b}\frac{\partial U^{2}}{\partial \eta}\right) + \frac{A_{1}}{b^{2}}\frac{\partial}{\partial \eta}\left(\Lambda\frac{\partial U^{2}}{\partial \eta}\right) - \frac{\left(N_{p} + N_{pier}\right)\Lambda}{b}\frac{\partial U^{2}}{\partial \eta}.$$
(2.123)

Дискретні аналоги рівнянь (2.120) – (2.121), а також (2.122) – (2.123) наведені у розділі 3.

#### Висновки до розділу 2

1. Існуючі методи розрахунку транспортуючої здатності руслових та заплавних потоків не враховують складного силового поля на частки наносів та рослинність. Метод прогнозу деформацій в зоні впливу мостових переходів базується на визначенні глибини розмиву заплавної ділянки на основі співвідношення дійсної та нерозмивної швидкостей. У відповідності з цим, у роботі запропоновано комплекс залежностей для визначення складових сил опору: відриву зерен ґрунту та при обтіканні елементів рослинності. 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 зависенесного потоку з трав'яною рослинністю для прогнозування розподілу глибин і швидкостей на заплаві.

2. Математична модель заплавного потоку ґрунтується на загальних рівняннях переносу неоднорідного потоку та рівнянні нерозривності (2.24) – (2.27). Модельна форма рівнянь отримана, спираючись на припущення про мализну часток та мализну прискорень потоку в порівнянні з прискоренням сили тяжіння. В рівняннях переносу (2.94) – (2.95) врахований закон розподілу осередненого гідростатичного тиску по вертикалі (2.104), що дає наступні переваги: пряму залежність між тиском і швидкістю, наявність глибини потоку. Розроблені рівняння заплавного потоку враховують в своєму складі розподіл наносів осередненої мутності, зважених за рахунок силу зчеплення дрібнозернистих ґрунтів та силу опору рослинності (2.32), (2.36). За методом перетворення координат отримані різницеві рівняння усталеного руху та умова нерозривності в смузі змінної ширини, тобто в області з рухомими границями. Це дозволить розв'язувати ці рівняння для потоків з неправильною змінною конфігурацією в поперечному перерізі.

3. При обтіканні мостової опори виникає місцеве порушення структури основного потоку, врахувати яке можна через динамічні характеристики потоку, що набігає, та безпосередні розміри споруди, шляхом включення у модельні рівняння сили опору при обтіканні мостових опор. Запропоновано відповідну двовимірну математична модель усталеного заплавного потоку, як і в звичайних координатах, так і в перетворених, для потоків з неправильною змінною формою в поперечному перерізі. Ця математична модель 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. Реалізація двовимірної математичної моделі заплавного потоку з урахуванням обтіканні опору при мостових опор дозволить встановити величину максимального розмиву, що є відправним показником при призначенні глибини закладання основ опор мосту.

4. Результати досліджень другого розділу викладено у наступних публікаціях [136, 137, 144, 145].

#### РОЗДІЛ З

# РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗАПЛАВНОГО ПОТОКУ З ТРАВ'ЯНОЮ РОСЛИННІСТЮ

## 3.1 Дискретні аналоги рівнянь усталеного потоку на заплавах з трав'яною рослинністю

Реалізація цих моделей повинна проводитися за допомогою числових методів, що засновані не тільки на математичних висновках, але і дозволяють врахувати фізичну суть поставленої задачі.

Представлена задача вирішується за допомогою програмних пакетів. У запропонованих програмних пакетах використовується декартова сітка, яка дозволяє створювати прямокутні комірки, тим самим вона проста і зручна в створенні, особливо на ділянках зони впливу мостових переходів, де дуже складна конфігурація рельєфу.

Розв'язування запропонованих рівнянь усталеного турбулентного потоку на заплавах з трав'яною рослинністю для прогнозування розподілу глибин і швидкостей проводитиметься методом послідовних наближень. Дискретні аналоги рівнянь (2.80), (2.94) – (2.95), згідно [136], мають наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{h} + N_{P} 2\Lambda_{i,j} \end{bmatrix} 2U_{i,j} \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x_{1}} = -\left(g + N_{P}\Lambda_{i,j} \frac{(U^{2})_{i,j}}{h_{i,j}} + N_{Ch} \langle \overline{S} \rangle_{i,j}\right) \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x_{1}} - h_{i,j} - h_{i,j}$$

$$\left(g + N_{P}\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j} + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}\right) \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta x_{2}} = -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{\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j+1} - \left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}}{\Delta x_{2}}\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\left[\Lambda_{i+1,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i+1,j-1}\right) - \Lambda_{i,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right)\right] - N_{P}\Lambda_{i,j}\frac{\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j}}{\Delta x_{2}}\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\left[\Lambda_{i+1,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i+1,j-1}\right) - \Lambda_{i,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right)\right] - N_{P}\Lambda_{i,j}\frac{\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j}}{\Delta x_{2}}\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\left[\Lambda_{i+1,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i+1,j-1}\right) - \Lambda_{i,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right)\right] - N_{P}\Lambda_{i,j}\frac{\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j}}{\Delta x_{2}}\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\left[\Lambda_{i+1,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i+1,j-1}\right) - \Lambda_{i,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right)\right] - N_{P}\Lambda_{i,j}\frac{\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j}}{\Delta x_{2}}\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\left[\Lambda_{i+1,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i+1,j-1}\right) - \Lambda_{i,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right)\right] - N_{P}\Lambda_{i,j}\frac{\left(U^{2}\right)_{i,j+1}}{\Delta x_{2}}\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\left[\Lambda_{i+1,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i+1,j-1}\right) - \Lambda_{i,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right)\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\left[\Lambda_{i+1,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i+1,j-1}\right) - \Lambda_{i,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j+1}\right)\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\left[\Lambda_{i+1,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1}\right) - \frac{1}{2\Delta x_{2}}\left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1}\right) - \frac{1}{2\Delta x_{2}}\left(\left(U^{2}\right)$$

$$\frac{(U \cdot h)_{i+1,j} - (U \cdot h)_{i,j}}{\Delta x_1} = 0.$$
(3.3)

Із (3.1) отримаємо рівняння розподілу швидкості в усталеному заплавному потоці з елементами рослинності:

$$U_{i+1,j} = U_{i,j} - \frac{\Delta x_{1}}{\left[\alpha_{h} - N_{P}2\Lambda\right]2U_{i,j}} \left[ \left(g - N_{P}\Lambda_{i,j}\frac{\left(U^{2}\right)_{i,j}}{h_{i,j}} + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}\right) \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x_{1}} + h_{i,j} \left[ -\frac{N_{P}}{\Delta x_{1}} \left[ \left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right)_{i+1,j} - \left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j}\right] + N_{Ch}\frac{\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i+1,j}}{\Delta x_{1}} - \left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}}{\Delta x_{1}} \right] - \frac{1}{\Delta x_{2}^{2}} \left[ \Lambda_{i,j}\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1}\right)\left(U^{2}\right)_{i,j} + \Lambda_{i,j-1}\left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right] + \left[ \frac{C_{f}}{h_{i,j}K_{\Phi}} + \alpha_{h}N_{P} \right] \left(U^{2}\right)_{i,j} \right].$$

$$(3.4)$$

На заплавних потоках можна приймати  $\frac{\partial h}{\partial x_1} = 0$  та проводити розрахунок за спрощеним рівнянням:

$$U_{i+1,j} = U_{i,j} - \frac{\Delta x_1}{[\alpha_h - N_P 2\Lambda] 2 U_{i,j}} \left[ h_{i,j} \left[ -\frac{N_P}{\Delta x_1} \left[ \left( \Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i+1,j} - \left( \Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i+1,j} - \langle \overline{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x_1} \right] - \frac{1}{\Delta x_2^2} \left[ \Lambda_{i,j} \left( U^2 \right)_{i,j+1} - \left( \Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} \right) \left( U^2 \right)_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} \left( U^2 \right)_{i,j-1} \right] + \left[ \frac{C_f}{h_{i,j} K_{\Phi}} + \alpha_h N_P \right] \left( U^2 \right)_{i,j} \right].$$
(3.5)

3 (3.2) отримаємо відповідне рівняння розподілу глибини в поперечних перерізах заплавного потоку:

$$h_{i,j+1} = h_{i,j} - \frac{\Delta x_2}{g - N_P \left(\Lambda \frac{U^2}{h}\right)_{i,j}} + N_{Ch} \langle \overline{S} \rangle_{i,j}} \left[ h_{i,j} \left( -\frac{N_P}{\Delta x_2} \left[ \left(\Lambda \frac{U^2}{h}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda \frac{U^2}{h}\right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i,j+1} - \langle \overline{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x_2} \right] + \frac{1}{2\Delta x_1 \Delta x_2} \left[ \Lambda_{i+1,j} \left( U^2 \right)_{i+1,j+1} - \left( U^2 \right)_{i+1,j-1} \right) - \Lambda_{i,j} \left( U^2 \right)_{i,j+1} - \left( U^2 \right)_{i,j-1} \right) - N_P \Lambda_{i,j} \frac{\left( U^2 \right)_{i,j+1} - \left( U^2 \right)_{i,j}}{\Delta x_2} \right].$$
(3.6)

Умову нерозривності перевірятимемо, ґрунтуючись на рівнянні (3.3):

$$U_{i,j} = \frac{(U \cdot h)_{i+1,j}}{h_{i,j}} \,. \tag{3.7}$$

Дискретні аналоги рівнянь (2.99) – (2.101) мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \left[\alpha_{h}+N_{P}2\Lambda\right]2U_{i,j}\left(\frac{U_{i+1,j}-U_{i,j}}{\Delta x}+\frac{A_{1}}{b}\frac{U_{i,j+1}-U_{i,j}}{\Delta\eta}\right) &= -\left(g+N_{P}\Lambda_{i,j}\frac{\left(U^{2}\right)_{i,j}}{h_{i,j}}+N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}\right)\times \\ \times\left(\frac{h_{i+1,j}-h_{i,j}}{\Delta x}+\frac{A_{1}}{b}\frac{h_{i,j+1}-h_{i,j}}{\Delta\eta}\right) -h_{i,j}\left[N_{P}\left(\frac{1}{\Delta x}\left[\left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right)_{i+1,j}-\left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j}\right]+\frac{A_{1}}{b\Delta\eta}\left[\left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j+1}-\left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j}\right]\right]\right) + \\ +N_{Ch}\left(\frac{\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i+1,j}-\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}}{\Delta x}+\frac{A_{1}}{b}\frac{\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j+1}-\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}}{\Delta\eta}\right)\right] -\frac{1}{b^{2}\Delta\eta^{2}}\left[\Lambda_{i,j}\left(U^{2}\right)_{i,j+1}-\left(\Lambda_{i,j}+\Lambda_{i,j-1}\right)\left(U^{2}\right)_{i,j}+ \\ +\Lambda_{i,j-1}\left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right] -\left[\frac{C_{f}}{h_{i,j}K_{\Phi}}+\alpha_{h}N_{P}\right]\left(U^{2}\right)_{i,j}, \end{aligned}$$

$$(3.8)$$

$$\left(g + N_{P}\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j} + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}\right) \frac{1}{b} \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta \eta} = -\frac{h_{i,j}}{b} \left(\frac{N_{P}}{\Delta \eta} \left[\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j}\right] + N_{Ch} \frac{\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j+1} - \left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}}{\Delta \eta}\right] - \frac{1}{2\Delta x \Delta \eta} \left[\left(\frac{\Lambda}{b}\right)_{i+1,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i+1,j+1}\right) - \left(\frac{\Lambda}{b}\right)_{i,j} \left(\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right)\right] + \frac{A_{I}}{b^{2} \Delta \eta^{2}} \left[\Lambda_{i,j+1}\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda_{i,j+1} + \Lambda_{i,j}\right)\left(U^{2}\right)_{i,j+1}\right] - \frac{N_{P}}{b} \Lambda_{i,j} \frac{\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j}}{\Delta \eta}.$$

$$(3.9)$$

$$\frac{(U \cdot h)_{i+1,j} - (U \cdot h)_{i,j}}{\Delta x} + \frac{A_1}{b} \frac{(U \cdot h)_{i,j+1} - (U \cdot h)_{i,j}}{\Delta \eta} = 0.$$
(3.10)

Із (3.8) отримаємо рівняння розподілу швидкості в усталеному заплавному потоці з елементами рослинності:

$$\begin{aligned} U_{i+1,j} &= U_{i,j} - \frac{\Delta x A_{1}}{b} \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{\Delta \eta} - \frac{\Delta x}{[\alpha_{h} + N_{p} 2\Lambda] 2 U_{i,j}} \left[ \left( g + N_{p} \Lambda_{i,j} \frac{(U^{2})_{i,j}}{h_{i,j}} + N_{ch} \langle \overline{S} \rangle_{i,j} \right) \times \right] \\ &\times \left( \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x} + \frac{A_{1}}{b} \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta \eta} - h_{i,j} \right] - h_{i,j} \left[ N_{p} \left( \frac{1}{\Delta x} \left[ \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i+1,j} - \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i,j} \right] + \frac{A_{1}}{b \Delta \eta} \left[ \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i,j+1} - \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i,j+1} \right] \right] \right] + N_{ch} \left[ \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i,j+1} - \langle \overline{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x} + \frac{A_{1}}{b} \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i,j+1} - \langle \overline{S} \rangle_{i,j}}{\Delta \eta} \right] - \frac{1}{b^{2} \Delta \eta^{2}} \left[ \Lambda_{i,j} \left( U^{2} \right)_{i,j+1} - \left( \Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} \right) U^{2} \right]_{i,j} \right] + \Lambda_{i,j-1} \left[ \frac{C_{f}}{h_{i,j} K_{\Phi}} + \alpha_{h} N_{p} \right] U^{2} \right]_{i,j} \right], \end{aligned}$$

$$(3.11)$$

а із (3.9) отримаємо відповідне рівняння розподілу глибини в поперечних перерізах заплавного потоку:

$$h_{i,j+1} = h_{i,j} - \frac{\Delta \eta}{g + N_p \left(\Lambda \frac{\overline{U}^2}{h}\right)_{i,j} + N_{Ch} \langle \overline{S} \rangle_{i,j}} \left[ h_{i,j} \left( \frac{N_p}{\Delta \eta} \left[ \left(\Lambda \frac{\overline{U}^2}{h}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda \frac{\overline{U}^2}{h}\right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i,j+1} - \langle \overline{S} \rangle_{i,j}}{\Delta \eta} \right] - \frac{1}{2\Delta x \Delta \eta} \left[ \Lambda_{i+1,j} \left( \overline{U^2}\right)_{i+1,j+1} - \left(\overline{U^2}\right)_{i+1,j+1} \right) - \Lambda_{i,j} \left( \overline{U^2}\right)_{i,j+1} - \left(\overline{U^2}\right)_{i,j-1} \right] + \frac{A_1}{b\Delta \eta^2} \left[ \Lambda_{i,j+1} \left(\overline{U^2}\right)_{i,j+1} - \left(\overline{U^2}\right)_{i,j+1} - \left(\overline{U^2}\right)_{i,j+1} \right] - \left( \Lambda_{i,j+1} + \Lambda_{i,j} \right) \left[ \overline{U^2}\right]_{i,j+1} - N_p \Lambda_{i,j} \frac{\left(\overline{U^2}\right)_{i,j+1} - \left(\overline{U^2}\right)_{i,j}}{\Delta \eta} \right].$$

$$(3.12)$$

Умову нерозривності перевірятимемо, грунтуючись на рівнянні (3.10):

$$\left(U\cdot h\right)_{i,j} = \frac{b\Delta\eta (U\cdot h)_{i+1,j} + \Delta x A_1 (U\cdot h)_{i,j+1}}{b\Delta\eta + A_1 \Delta x}.$$
(3.13)

Дискретні аналоги рівнянь з урахуванням сили опору при обтіканні мостових опор (2.120) – (2.121) мають наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{h} + \left(N_{P} + N_{pier}\right) 2\Lambda \end{bmatrix} 2U_{i,j} \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x_{1}} = -\left(g + \left(N_{P} + N_{pier}\right)\Lambda_{i,j} \frac{\left(U^{2}\right)_{i,j}}{h_{i,j}} + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}\right) \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x_{1}} - h_{i,j} - h_{i,j} \left[\left(N_{P} + N_{pier}\right)\frac{1}{\Delta x_{1}}\left[\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right)_{i+1,j} - \left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j}\right] + N_{Ch}\frac{\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i+1,j}}{\Delta x} - \left(\overline{S}\right)_{i,j}\right] - \frac{1}{\Delta x_{2}^{2}}\left[\Lambda_{i,j}\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1}\right)\left(U^{2}\right)_{i,j} + \Lambda_{i,j-1}\left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right] - \left[\frac{C_{f}}{h_{i,j}K_{\Phi}} + \alpha_{h}\left(N_{P} + N_{pier}\right)\right]\left(U^{2}\right)_{i,j},$$

$$(3.14)$$

$$\left(g + \left(N_{P} + N_{pier}\right)\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j} + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}\right) \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta x_{2}} = -h_{i,j}\left[\frac{N_{P} + N_{pier}}{\Delta x_{2}}\left[\left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda \frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j}\right] + N_{Ch}\frac{\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j+1} - \left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}}{\Delta x_{2}}\right] - \frac{1}{2\Delta x_{1}\Delta x_{2}}\left[\Lambda_{i+1,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i+1,j-1}\right) - \Lambda_{i,j}\left(\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right)\right] + \left(3.15\right) - \left(N_{P} + N_{pier}\right)\Lambda_{i,j}\frac{\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j}}{\Delta x_{2}}.$$

## Із (3.14) отримаємо рівняння розподілу швидкості:

$$U_{pieri+1,j} = U_{i,j} - \frac{\Delta x_{1}}{[\alpha_{h} + (N_{P} + N_{pier})2\Lambda]2U_{i,j}} \left[ \left( g + (N_{P} + N_{pier})\Lambda_{i,j} \frac{(U^{2})_{i,j}}{h_{i,j}} + N_{Ch} \langle \overline{S} \rangle_{i,j} \right) \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x_{1}} + h_{i,j} \left[ \frac{N_{P} + N_{pier}}{\Delta x_{1}} \left[ \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i+1,j} - \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i+1,j} - \langle \overline{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x_{1}} \right] + \frac{1}{\Delta x_{2}^{2}} \left[ \Lambda_{i,j} (U^{2})_{i,j+1} - \left( \Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} (U^{2})_{i,j-1} \right] + \left[ \frac{C_{f}}{h_{i,j} K_{\Phi}} + \alpha_{h} (N_{P} + N_{pier}) \right] (U^{2})_{i,j} \right],$$
(3.16)

або

$$U_{pieri+1,j} = U_{i,j} - \frac{\Delta x_{1}}{[\alpha_{h} - (N_{P} + N_{pier})2\Lambda]2U_{i,j}} \left[ h_{i,j} \left[ -\frac{N_{P} + N_{pier}}{\Delta x_{1}} \left[ \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i+1,j} - \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i+1,j} - \langle \overline{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x_{1}} \right] - \frac{1}{\Delta x_{2}^{2}} \left[ \Lambda_{i,j} (U^{2})_{i,j+1} - \left( \Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} \right) (U^{2})_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} (U^{2})_{i,j-1} \right] + (3.17) + \left[ \frac{C_{f}}{h_{i,j} K_{\Phi}} + \alpha_{h} (N_{P} + N_{pier}) \right] (U^{2})_{i,j} \right].$$

### 3 (3.15) отримаємо відповідне рівняння розподілу глибини:

$$h_{i,j+1} = h_{i,j} - \frac{\Delta x_2}{g + (N_P + N_{pier}) \left(\Lambda \frac{U^2}{h}\right)_{i,j}} + N_{Ch} \langle \overline{S} \rangle_{i,j}} \left[ h_{i,j} \left( \frac{(N_P + N_{pier})}{\Delta x_2} \left[ \left(\Lambda \frac{U^2}{h}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda \frac{U^2}{h}\right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i,j+1}}{\Delta x_2} - \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x_2} \right] - \frac{1}{2\Delta x_1 \Delta x_2} \left[ \Lambda_{i+1,j} \left( (U^2)_{i+1,j+1} - (U^2)_{i+1,j-1} \right) - \Lambda_{i,j} \left( (U^2)_{i,j+1} - (U^2)_{i,j-1} \right) \right] - (N_P + N_{pier}) \Lambda_{i,j} \frac{(U^2)_{i,j+1} - (U^2)_{i,j}}{\Delta x_2} \right].$$
(3.18)

Дискретні аналоги рівнянь з урахуванням сили опору при обтіканні мостових опор (2.122) – (2.123) мають наступний вигляд:

$$\begin{split} \left[ \alpha_{h} + \left( N_{P} + N_{pier} \right) 2\Lambda \right] 2U_{i,j} \left( \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x} + \frac{A_{i}}{b} \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{\Delta \eta} \right) &= - \left( g + \left( N_{P} + N_{pier} \right) \Lambda_{i,j} \frac{\left( U^{2} \right)_{i,j}}{h_{i,j}} + N_{ch} \left\langle \overline{S} \right\rangle_{i,j} \right) \times \\ \times \left( \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x} + \frac{A_{i}}{b} \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta \eta} \right) - h_{i,j} \left[ \left( N_{P} + N_{pier} \right) \left( \frac{1}{\Delta x} \left[ \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i+1,j} - \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i,j} \right] + \frac{A_{i}}{b\Delta \eta} \left[ \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i,j+1} - \left( \Lambda \frac{U^{2}}{h} \right)_{i,j} \right] \right] \right) + \\ + N_{ch} \left[ \left( \frac{\left\langle \overline{S} \right\rangle_{i+1,j} - \left\langle \overline{S} \right\rangle_{i,j}}{\Delta x} + \frac{A_{i}}{b} \frac{\left\langle \overline{S} \right\rangle_{i,j+1} - \left\langle \overline{S} \right\rangle_{i,j}}{\Delta \eta} \right] \right] - \frac{1}{b^{2} \Delta \eta^{2}} \left[ \Lambda_{i,j} \left( U^{2} \right)_{i,j+1} - \left( \Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} \right) \left( U^{2} \right)_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} \left( U^{2} \right)_{i,j-1} \right] - \\ - \left[ \frac{C_{f}}{h_{i,j} K_{\Phi}} + \alpha_{h} \left( N_{P} + N_{pier} \right) \right] \left( U^{2} \right)_{i,j}, \end{split}$$

$$(3.19)$$

$$\left(g + \left(N_{P} + N_{pier}\left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j} + N_{Ch}\left\langle\overline{S}\right\rangle_{i,j}\right) \frac{1}{b} \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta\eta} = -\frac{h_{i,j}}{b} \left[\frac{N_{P} + N_{pier}}{\Delta\eta} \left[\left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda\frac{U^{2}}{h}\right)_{i,j+1}\right] + N_{Ch}\left(\overline{S}\right)_{i,j+1} - \left(\overline{S}\right)_{i,j}\right] - \frac{1}{2\Delta x \Delta \eta} \left[\left(\frac{\Lambda}{b}\right)_{i+1,j} \left(\left(U^{2}\right)_{i+1,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i+1,j-1}\right) - \left(\frac{\Lambda}{b}\right)_{i,j} \left(\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right)\right] + \frac{A_{i}}{b^{2} \Delta \eta^{2}} \left[\Lambda_{i,j+1}\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda_{i,j+1} + \Lambda_{i,j}\right)\left(U^{2}\right)_{i,j} + \Lambda_{i,j}\left(U^{2}\right)_{i,j-1}\right] - \frac{N_{P} + N_{pier}}{b} \Lambda_{i,j} \frac{\left(U^{2}\right)_{i,j+1} - \left(U^{2}\right)_{i,j}}{\Delta \eta}.$$
(3.20)

Із (3.19) отримаємо рівняння розподілу швидкості:

$$\begin{split} U_{i+1,j} &= U_{i,j} - \frac{\Delta x A_1}{b} \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{\Delta \eta} - \frac{\Delta x}{\left[\alpha_h + \left(N_P + N_{pier}\right) 2\Lambda\right] 2U_{i,j}} \left[ \left( g + \left(N_P + N_{pier}\right) \Lambda_{i,j} \frac{\left(U^2\right)_{i,j}}{h_{i,j}} + N_{Ch} \left\langle \overline{S} \right\rangle_{i,j} \right) \times \\ &\times \left( \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x} + \frac{A_1}{b} \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta \eta} \right) - h_{i,j} \left[ \left(N_P + N_{pier} \left( \frac{1}{\Delta x} \left[ \left( \Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i+1,j} - \left( \Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j} \right] \right] + \frac{A_1}{b \Delta \eta} \left[ \left( \Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j+1} - \left( \Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j} \right] \right] + \\ &+ N_{Ch} \left[ \left( \frac{\left\langle \overline{S} \right\rangle_{i+1,j} - \left\langle \overline{S} \right\rangle_{i,j}}{\Delta x} + \frac{A_1}{b} \frac{\left\langle \overline{S} \right\rangle_{i,j+1} - \left\langle \overline{S} \right\rangle_{i,j}}{\Delta \eta} \right] \right] - \frac{1}{b^2 \Delta \eta^2} \left[ \Lambda_{i,j} \left( U^2 \right)_{i,j+1} - \left( \Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} \right) \left( U^2 \right)_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} \left( U^2 \right)_{i,j-1} \right] - \\ &- \left[ \frac{C_f}{h_{i,j} K_{\Phi}} + \alpha_h \left( N_P + N_{pier} \right) \right] \left( U^2 \right)_{i,j} \right], \end{split}$$

(3.21)

#### а із (3.20) отримаємо відповідне рівняння розподілу глибини:

$$h_{i,j+1} = h_{i,j} - \frac{\Delta \eta}{g + \left(N_{P} + N_{pier}\right) \left(\Lambda \frac{\overline{U}^{2}}{h}\right)_{i,j}} + N_{Ch} \langle \overline{S} \rangle_{i,j}} \left[ h_{i,j} \left(\frac{N_{P} + N_{pier}}{\Delta \eta} \left[ \left(\Lambda \frac{\overline{U}^{2}}{h}\right)_{i,j+1} - \left(\Lambda \frac{\overline{U}^{2}}{h}\right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i,j+1}}{\Delta \eta} - \frac{\langle \overline{S} \rangle_{i,j+1}}{\Delta \eta} \right] - \frac{1}{2\Delta x \Delta \eta} \left[ \Lambda_{i+1,j} \left( \overline{U^{2}}_{i+1,j+1} - \left(\overline{U^{2}}\right)_{i+1,j-1}\right) - \Lambda_{i,j} \left( \overline{U^{2}}_{i,j+1} - \left(\overline{U^{2}}\right)_{i,j-1} \right) \right] + \frac{A_{1}}{b\Delta \eta^{2}} \left[ \Lambda_{i,j+1} \left( \overline{U^{2}}_{i,j+1} - \left(\overline{U^{2}}\right)_{i,j+1}\right) - \left(\Lambda_{i,j+1} + \Lambda_{i,j}\right) \left[ \overline{U^{2}}_{i,j+1} - \left(\overline{U^{2}}\right)_{i,j-1} \right] - \left(N_{P} + N_{pier}\right) \Lambda_{i,j} \frac{\left(\overline{U^{2}}\right)_{i,j+1} - \left(\overline{U^{2}}\right)_{i,j}}{\Delta \eta} \right].$$

$$(3.22)$$

Числова реалізація запропонованих математичних моделей за ітераційними методами розрахунку гідродинамічних характеристик заплав з рослинністю обумовила необхідність формулювання початкових та граничних умов для врахування характерних особливостей руху заплавних потоків в зоні впливу мостових переходів.

#### 3.2 Визначення зони впливу мостового переходу в річковому потоці

Загальний розмив річкового потоку формується в зоні впливу мостового переходу, яка за протяжністю складається із двох зон – стиснення і розтікання. Зона стиснення – зона верхнього б'єфу мостового переходу, де відбувається

збільшення руслової витрати за течією річки та, відповідно, зближення ліній току течії річки, вона обмежується створом початку стиснення і створом мостового переходу. Зона розтікання — зона нижнього б'єфу мостового переходу, де відбувається зменшення руслової витрати та, відповідно, збільшення витрати на заплавах за течією річки, вона обмежується створом мостового переходу і створом повного розтікання, де відновлюється природний режим річки.

Метод з визначення довжини зони впливу мостового переходу в річковому потоці ґрунтується на підході, запропонованому в роботах [141, 144, 146, 148]. На основі аналізу гідравлічних явищ на мостовому переході щодо трансформації руслової витрати отримані залежності зміни параметрів центральної струмини річкового потоку. На початку розрахунку задаються основні вихідні данні, які характеризують загальні параметри розрахункової області. Вихідні данні наведені нижче у табл. 3.1, п. 3.4.

Розрахунок передбачає послідовність з визначенням наступних величин. Визначають природну питому витрату заплав:

$$q_{f-p} = \frac{Q_{riv} - Q_r}{B_{riv} - B_r},$$
(3.23)

де  $Q_{riv}$  – загальна витрата річки, м<sup>3</sup>/с;

 $Q_r$  – руслова витрата річки, м<sup>3</sup>/с;

*B<sub>riv</sub>* – ширина розливу річки, м;

 $B_r$  – середня ширина русла, м.

Розраховують коефіцієнт стиснення річкового потоку:

$$\beta_{br} = \frac{Q_{riv}}{Q_r + q_{f-p}(B_{br} - B_r)}, \qquad (3.24)$$

де *B*<sub>br</sub> – ширина отвору мостового переходу, м.

Визначають довжину впливу мостового переходу:

$$l_{z_{-}br} = \frac{h_r}{J} \frac{\left(\frac{\beta_{br}^2}{2\beta_{br} - 1}\right)^{0.3} - 1}{\beta_{br} - 1},$$
(3.25)

де Ј – поздовжній похил дна;

*h*<sub>*r*</sub> – глибина русла, м.

Розраховують площу живого перерізу річкового потоку:

$$\omega_{riv} = B_r h_r + b_{f-p} h_{f-p} , \qquad (3.26)$$

де  $b_{f-p}$  – середня ширина заплави (більшої та меншої), м;  $h_{f-p}$  – середня глибина заплави (більшої та меншої), м.

Визначають число Фруда:

$$Fr = Q_{riv}^2 B_{riv} / g \omega_{riv}^3 . \tag{3.27}$$

Визначають значення повного підпору:

$$\xi = 1 - 0.5 Fr \frac{\beta_{br}^2 - 1}{\left(\frac{\beta_{br}^2}{2\beta_{br} - 1}\right)^{0.3} - 1}$$
(3.28)

Визначають довжину зони стиснення:

$$l_{z_{z}c} = \xi \cdot l_{z_{z}br} \,. \tag{3.29}$$

Визначають довжину зони розтікання:

$$l_{z_{-s}} = (1 - \xi) l_{z_{-s}} \,. \tag{3.30}$$

Визначають параметри центральної струмини в зоні розтікання:

$$R_{z_{-s}} = \frac{l_{z_{-s}}\beta_{br}}{\beta_{br} - 1}.$$
(3.31)

Визначають параметри центральної струмини в зоні стиснення:

$$R_{z_{-c}} = \frac{l_{z_{-c}}\beta_{br}}{\beta_{br} - 1}.$$
(3.32)

Призначають крок поздовжньої координати розрахункового створу  $\Delta l_i$ , загальну довжину ділянки визначають як:

$$l_{i} = \sum_{i=0}^{i} \Delta l_{i} = l_{i-1} + \Delta l_{i} , \qquad (3.33)$$

де  $l_i$  змінюється від 0 до  $l_{z_{-c}}$  в зоні стиснення та від 0 до  $l_{z_{-s}}$  в зоні розтікання.

Виконують розрахунок значень кривої вільної поверхні річкового потоку в зоні впливу мостового переходу. Визначення зони впливу мостового переходу ґрунтується на рівнянні усталеного нерівномірного руху у відкритих руслах в одномірній постановці. Запропонований підхід до рішення задачі базується на розв'язку, згідно з роботами [147, 148], за методом Ю.В. Абрамова з використанням властивостей центральної струмини річкового потоку в зоні штучного стиснення. Скінченно-різницевий аналог диференційного рівняння, яке описує зміну глибин потоку, має вигляд:

$$h_{i} - h_{i-1} = J\left(l_{i} - l_{i-1}\right) - JR\left[\left(1 - \frac{l_{i}}{R}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-1}\right] \pm \frac{Jh_{r}^{4/3}m^{2}}{2g}\left[\left(1 - \frac{l_{i}}{R}\right)^{-2} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-2}\right], \quad (3.34)$$

де m – зворотна величина до коефіцієнта шорсткості русла n,  $m = \frac{1}{n}$ ;

*R* – параметр центральної струмини;

*l*<sub>*i*</sub> – поздовжня координата розрахункового створу, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Початкові умови:  $h = h_0$  при l = 0;  $h = h_i$  при  $l = l_i$ . Всі розрахунки проводяться відповідно на кожній сходинці повені або паводку, на певну добу. Обчислення треба починати зі створу повного розтікання, де всі гідравлічні характеристики потоку мають природні значення, третій доданок рівняння (3.24) береться зі знаком «+». При чому  $l_{i-1} = 0$ , а  $l_i$  змінюється в зоні розтікання від 0 до  $l_{z_s}$ . Величина параметру центральної струмини 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 «--». Величині  $h_{i-1}$ надати значення отриманої глибини під мостом, відстань прийняти  $l_{i-1} = 0$  та змінити величину параметру центральної струмини в зоні стиснення  $R = R_{z_{-}c}$ . Значення  $l_i$  змінюється від 0 до  $l_{z_{-}c}$  величини, що є відстанню від початку зони стиснення до мосту, де утворюється повний підпір.

Грунтуючись на рівнянні (3.24), проводять розрахунок уклону вільної поверхні річкового потоку:

$$I_{x_{1}} = \frac{h_{i} - h_{i-1}}{l_{i} - l_{i-1}} = J - \frac{JR}{l_{i} - l_{i-1}} \left[ \left(1 - \frac{l_{i}}{R}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-1} \right] \pm \frac{Jh_{r}^{4/3}n^{-2}}{2g(l_{i} - l_{i-1})} \left[ \left(1 - \frac{l_{i}}{R}\right)^{-2} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-2} \right]. \quad (3.35)$$

Зміна уклону вільної поверхні дозволить уточнити межі зон стиснення та розтікання в створі мостового переходу.

## 3.3 Граничні умови біля стінок дамб, мостових опор, а також меж русла

Границя біля стінок дамб, мостових опор представляє собою зріз води або вертикальну бокову стінку (крутий берег). При обтіканні річковим потоком дамб, мостових опор проявляється одна важлива особливість, яка полягає в тому, що основна товща потоку по відношенню до стінок та дна є турбулентною, а течія поблизу точки гальмування відбувається при малих числах Рейнольда. В'язкий прошарок, буферний та логарифмічний шари, які є характерними при обтіканні твердих поверхонь, згідно з [138], об'єднуються в одну внутрішню область, що займає до 20 % товщини всього турбулентного межового шару. На границях розрахункової області, у вузлах, сусідніх з твердими поверхнями, в якості межових використовується залежність для швидкості:

$$U = \frac{U_{\tau}}{\kappa} \ln\left(\left(x_{2}\right)_{c}^{*} E\right), \qquad (3.36)$$

де Е – коефіцієнт шорсткості [138],

 $(x_2)_c^+$  – безрозмірна відстань від стінки, визначається за залежністю:

$$(x_2)_c^* = \frac{\Delta x_2 U_{\tau}}{v}.$$
 (3.37)

Безпосередньо на самих твердих поверхнях (стінці дамби, мостової опори), а також для випадку пологих берегів діє умова прилипання, тобто значення швидкості протоку приймається рівними 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 [138] за значеннями відміток вільної поверхні внутрішніх точок розрахункової області:

$$H(x_1, x_2) = 2H(x_1, x_2 - 1) - H(x_1, x_2 - 2).$$
(3.38)

Гранична відмітка вільної поверхні *H* на межі русло – заплава визначається на основі даних кривої вільної поверхні русла річки в одномірній постановці, яка визначається за методом, запропонованим у роботі [147].

Межові умови на вхідній та вихідній областях змінюються в залежності від фізичних умов уверх по потоку від границі, що розглядається.

На кожному етапі розв'язування задачі на вхідній границі приймається припущення про відсутність впливу стиснення на гідравлічні характеристики потоку. Значення складових векторів швидкості на кожному етапі визначається виходячи з припущення про рівномірну течію. Це обґрунтовується тим, що для запропонованих рівнянь розподілу швидкості додаткові умови, поставлені на вхідній границі, суттєво не впливатимуть на коректність постановки задачі [100, 138]. Відмітка вільної поверхні на цій границі визначається по заданому гідрографу повені та кривій зв'язку рівнів вільної поверхні та витрат.

На вихідній границі вільна поверхня потоку приймається горизонтальною, оскільки в цьому створі вже не має впливу штучного стиснення, а відмітки вільної поверхні приймаються однаковими для всіх розрахункових точок та визначаються із результатів побудови кривої вільної поверхні потоку в одномірній постановці. Поздовжня швидкість *U* визначається за її відомим значенням у внутрішніх точках, із рівняння нерозривності (3.7) або (3.13).

# **3.4** Удосконалений метод розрахунку деформацій на заплавах в зоні впливу мостового переходу

Запропонований метод розрахунку розмивів на заплавах в зоні впливів мостових переходів дозволяє визначити рівні вільної поверхні потоку на різних етапах проходження розрахункового паводка, відповідний розподіл глибин і швидкостей на заплавних ділянках з можливими інтенсивними переформуваннями, а також розмивів на заплавах в зоні впливу мостового переходу.

Всі розрахунки проводяться за вихідними даними (табл. 3.2) відповідно на кожній гілці повені або паводку, на певну добу.

Таблиця 3.1 – Вихідні данні для розрахунку зони впливу мостового переходу та деформацій на заплавах

N⁰	Назва параметра	Позна-	Од.	Примітка (у якому				
		ка	ВИМ.	вигляді задається)				
1	2	3	4	5				
1	Загальна витрата річкового потоку	$\mathcal{Q}_{riv}$	м <sup>3</sup> /с	графік або ряд значень (розрахунок п.3.2)				
2	Руслова витрата	$Q_r$	м <sup>3</sup> /с	графік або ряд значень (розрахунок п.3.2)				
3	Тривалість кожної сходинки паводка	Т	с	ряд значень (розрахунок n.3.2)				
4	Поздовжній уклон дна	J	_	числове значення (розрахунок n.3.2)				
5	Криві зв'язку рівнів вільної поверхні та витрат на початковому створі	$H_{riv}$	М	ряд значень (розрахунок n.3.2)				
6	Середня відмітка дна русла	$Z_r$		числове значення (розрахунок п.3.2)				
7	Середня відмітка дна заплав	$Z_{f-p} = Z_{f-p  cep}$		(розрахунок п.3.2)				
8	Глибина руслового потоку	h <sub>r</sub>	М	$h_r = H_{riv} - Z_r$ ряд значень (розрахунок n.3.2)				
9	Глибина заплавного потоку	$h_{f-p} = h_{f-p \ cep}$	М	$h_{f-p  cep} = H_{riv} - Z_{f-p  cep}$ (розрахунок п.3.2) ряд значень				
10	Прискорення вільного падіння	g	м/с <sup>2</sup>	9,81				
11	Ширина розливу річки	B <sub>riv</sub>	М	числове значення (розрахунок n.3.2)				
12	Середня ширина русла	B <sub>r</sub>	М	числове значення (розрахунок п. 3. 2)				
13	Середня ширина більшої заплави	$b_{_{f-pb}}$	М	(розрахунок п.3.2)				
14	Середня ширина меншої заплави	$b_{f-ps}$	М	(розрахунок п.3.2)				
15	Коефіцієнт шорсткості на заплавах	n		числове значення (розрахунок п.3.2)				
16	Ширина отвору мостового переходу	$B_{br}$	М	числове значення (розрахунок n.3.2)				
17	Відмітки поверхні рельєфу дна заплав на розрахунковій області	$Z_{f-p}$	М	числова матриця, оновлюється після кожної сходинки паводка				

## Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5				
18	Глибина заплавного потоку	$h_{f-p}$	М	h <sub>f-p</sub> = H <sub>riv</sub> – Z <sub>f-p</sub> числова матриця, оновлюється після кожної сходинки паводка				
19	Довжина зони стиснення	$l_{z_{-}c}$	Μ	(розрахунок п.3.2)				
20	Довжина зони розтікання	$l_{z_s}$	М	(розрахунок п.3.2)				
21	Параметри центральної струмини в зоні стиснення	$R_{z_{-}c}$	М	(розрахунок п.3.2)				
22	Параметри центральної струмини в зоні розтікання	$R_{z_s}$	М	(розрахунок п.3.2)				
23	Уклон вільної поверхні	$I_{x_1}$	_	(розрахунок п.3.2) ряд значень				
24	Коефіцієнт кінематичної в'язкості води (в залежності від температури води)	v	м <sup>2</sup> /с	115×10 <sup>-8</sup>				
25	Прискорення вільного падіння	g	м/с <sup>2</sup>	9,81				
26	Густина води річкового потоку	$ ho_{\scriptscriptstyle LS}$	кг/м <sup>3</sup>	998				
27	Параметр Кармана	к	—	0,435				
28	Грансклад донних відкладень ( <sup><i>d<sub>m</sub></i></sup> – середній або медіанний діаметр фракції ґрунту)	$P_{i(dc)}$	ММ	ряд значень				
29	Щільність донного грунту	$ ho_s$	кг/м <sup>3</sup>	—				
30	Гідравлічна швидкість	$W_{z}$	м/с	—				
23	Зчеплення ґрунту у стані повного водонасичення	$C_{Ch}$	кг/м <sup>2</sup>	_				
24	Функція коефіцієнта Шезі	М	_	при 10≤С≤60 М=0,7С+6, при С>60- <i>М</i> =48				
25	Коефіцієнт для визначення сили зчеплення [4]	k <sub>ch</sub>	_	0,035				
26	Перший коефіцієнт форми частки наносів	$C_{\Phi 1}$		$\pi/6$				
27	Коефіцієнт опору рослинності	$C_X$		0,4				
28	Висота рослинності	$h_{\scriptscriptstyle pocn.}$	Μ					
29	Діаметр стебла рослини, що обтікається	D <sub>cm.</sub>	М	$D_{cm.}=7\cdot 10^{-3}M$				

Кінець таблиці 3.1

1	2	3	4	5
		Δz <sub>cm.</sub>	М	якщо $h_{pocn} > h_{f-p}$ ,
20	Частина стебла рослини, що обтікається за висотою			тоді $\Delta z_{cm.} = h_{f-p}$ ,
30				якщо $h_{pocn} < h_{f-p}$ ,
				тоді $\Delta z_{cm.} = h_{pocn.}$
31	Крок поздовжньої координати	$\Delta l = \Delta r$	м	(nonaryyor n 3 2)
	розрахункового створу	$\Delta u_i - \Delta x$	IVI	(розралунок п.э.2)

Послідовність розрахунку, згідно [149] передбачає виконання операцій з визначенням наступних параметрів.

Визначають коефіцієнт трансформації витрати руслового потоку в зоні стиснення:

$$\beta_{z_{-}ci} = \left(1 - \frac{l_i}{R_{z_{-}c}}\right)^{-1}, \qquad (3.39)$$

де  $l_i$  - поточна відстань від створу початку стиснення, змінюється від 0 до  $l_{z_{-}c}$ .

Визначають коефіцієнт трансформації витрати руслового потоку в зоні розтікання:

$$\beta_{z_{-}si} = \left(1 - \frac{l_{z_{-}c} + l_{z_{-}s} - l_{i}}{R_{z_{-}s}}\right)^{-1},$$
(3.40)

де  $l_i$ змінюється від  $l_{z_{-c}}$  до  $l_{z_{-br}}$ .

Визначають витрату заплавних потоків в зоні стиснення:

$$Q_{f-p0i} = Q_{riv} - Q_r \beta_{z_ci}, (3.41)$$

де для більшої заплави

$$Q_{f-pb0} = Q_{f-p0} \cdot k_{f-pb} , \qquad (3.42)$$

для меншої заплави

$$Q_{f-ps0} = Q_{f-p0} \cdot k_{f-ps}, \qquad (3.43)$$

*B*<sub>*f*-*p*</sub> – загальна ширина заплав.

Визначають витрату заплавних потоків в зоні розтікання:

$$Q_{f-p0b(s)i} = Q_{riv} - Q_r \beta_{z_si}, \qquad (3.44)$$

витрати більшої та меншої заплав визначаються за аналогічними залежностями (3.32 та 3.33).

Визначають коефіцієнт Шезі для більшої та меншої заплав:

$$C_{f-pb(s)i} = \frac{Q_{f-p0b(s)i}}{b_{f-pb(s)}h_{f-pb(s)\,cep.i}^{3/2}I_{x_1}^{1/2}}.$$
(3.45)

Розраховують значення швидкості першого наближення в зонах стиснення та розтікання:

$$U_{0i,j} = C_i \sqrt{h_{f-pb(s)i,j} I_{x_1}} .$$
(3.46)

Визначають величину динамічної швидкості на заплавах:

$$U_{i,j} = \sqrt{gh_{f-pb(s)i,j}I_{x_1}} \,. \tag{3.47}$$

Проводять розрахунок межових умов біля струмененапрямних дамб за залежностями (3.27), (3.28).

Розраховують коефіцієнт Шезі за глибиною:

$$C_{hi} = \frac{h_{cep.i}^{1/6}}{n} \,. \tag{3.48}$$

Визначають коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілу швидкостей на вертикалі, згідно з [100]:

$$\alpha_{hi,j} = 1 + \frac{U_{i,j}^2}{\kappa^2 U_{i,j}^2}.$$
(3.49)

Розраховують емпіричний коефіцієнт тертя:

$$C_{fi,j} = \frac{n^2 g}{h_{f-pb(s)i,j}^{1/3}}.$$
(3.50)

Визначають коефіцієнт турбулентного обміну:

$$\Lambda_{i,j} = \frac{h_{f-pb(s)i,j}}{2MC_i} \,. \tag{3.51}$$

Розраховують середню швидкість заплавного потоку:

$$V_{f-pb(s)cepi} = Q_{f-pb(s)0i} / b_{f-pb(s)} h_{f-pb(s)cepi} .$$
(3.52)

Визначають виправний коефіцієнт, який враховує вплив поперечного перерізу більшої та меншої заплав. Для цього розраховують характеристику форми живого перерізу – універсальний параметр форми річкового потоку:

$$\beta_{\Phi_i} = \frac{1}{\omega_{f-pb(s)i} \sqrt{h_{f-pb(s)cep.i}}} \int_{0}^{b_{f-pb(s)}} h_{f-pb(s)i,j}^{3/2} dx_2 .$$
(3.53)

де  $\omega_{f-pb(s)i}$  – площа живого перерізу більшої або меншої заплави.

За визначеним параметром форми підбирають виправний коефіцієнт К<sub>Фі</sub> (див. табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Залежність виправного коефіцієнта від універсального параметру форми річкового потоку

$eta_{\Phi i}$	1,0	1,025	1,05	1,075	1,1	1,125	1,15	1,175	1,2	1,225	1,25	1,275	1,3	1,33
$K_{\Phi i}$	1,0	0,99	0,975	0,96	0,95	0,875	0,81	0,76	0,7	0,65	0,6	0,56	0,53	0,5

Розраховують загальну міделеву площу, яка розподілена у об'ємі шару рослин, що обтікаються потоком:

$$s_{pi,j} = \frac{D_{cm} \Delta z_{cm}}{\Delta x_1 \Delta x_2 h_{f-pb(s)i,j}} \,.$$
(3.54)

Розраховують коефіцієнт, який враховує опір елементів рослинності на заплаві:

$$N_{Pi,j} = \frac{C_X s_{Pi,j}}{2} \,. \tag{3.55}$$

Знаходять середньозважений діаметр відкладень  $D_{cep}$  на основі обчислення добутків медіанних значень діаметрів часток на їх відсотковий склад за формулою [47]:

$$D_{cep} = \sum_{k=1}^{n} \frac{P_n d_m}{100}$$
(3.56)

Розраховують коефіцієнт, який враховує опір відриву зерна ґрунту в придонній області заплавного потоку:

$$N_{Ch} = \frac{k_{Ch}C_{Ch} \times g}{C_{\Phi 1}D_{cep}\overline{\rho}_{LS}}.$$
(3.57)

Для визначення осередненої мутності по вертикалі  $\langle \bar{s} \rangle$  розраховують відлікову концентрацію донних наносів і *F*-фактор, що враховує параметр зважування частинок наносів. Розрахунок цих параметрів проводиться згідно з [134]. Для цього визначають:

- відносну щільність донного грунту

$$s = \frac{\rho_s}{\rho_{LS}},\tag{3.58}$$

- безрозмірний параметр частки

$$D_* = D_{cep} \left[ \frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3},$$
 (3.59)

- критичне значення параметра Шильдса

$$\begin{aligned} \theta_{\kappa p} &= 0,24 (D_{*})^{-1} npu \quad D_{*} \leq 4; \\ \theta_{\kappa p} &= 0,14 (D_{*})^{-0.68} npu \quad 4 < D_{*} \leq 10; \\ \theta_{\kappa p} &= 0,04 (D_{*})^{-0.1} npu \quad 10 < D_{*} \leq 20; \\ \theta_{\kappa p} &= 0,013 (D_{*})^{0.29} npu \quad 20 < D_{*} \leq 150; \\ \theta_{\kappa p} &= 0,55 \qquad npu \quad D_{*} > 150, \end{aligned}$$
(3.60)

- квадрат динамічної швидкості початку руху наносів

$$U_{\tau \kappa p}^{2} = g D_{cep}(s-1) \theta_{\kappa p}, \qquad (3.61)$$

- параметр стійкості частки

$$T = \begin{cases} U_{\vec{n},j}^2 / U_{\tau \kappa p}^2 - 1 & npu & U_{\vec{n},j}^2 / U_{\tau \kappa p}^2 > 1; \\ 0 & npu & U_{\vec{n},j}^2 / U_{\tau \kappa p}^2 \le 1; \end{cases}$$
(3.62)

- відлікову концентрацію донних наносів

$$S_0 = 0.03 \frac{D_{cep}}{\Delta} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.5}}, \qquad (3.63)$$

- нерозмивну швидкість

$$U_{\mu_{i,j}} = 1,47\sqrt{g} D_{cep}^{1/3} h_{i,j}^{1/6}, \qquad (3.64)$$

- висоту донних форм

$$\Delta = \begin{cases} 0,25h_{i,j} \left( 1 - \frac{U_{\mu_{i,j}}}{U_{i,j}} \right) npu \ 0 < \frac{U_{\mu_{i,j}}}{U_{i,j}} < 1; \\ 2,5D_{cep} \qquad npu \frac{U_{\mu_{i,j}}}{U_{i,j}}, \end{cases}$$
(3.65)

- діаметр зважених наносів

$$D_{36ax} = D_{cep}[1 + 0.016(T - 25)]. \tag{3.66}$$

- гідравлічну крупність зважених наносів

$$\begin{cases} W_{z} = \frac{1}{18} \frac{(s-1)gD_{3eax}}{v} & npu \ D_{3eax} < 10^{-4}; \\ W_{z} = 10 \frac{v}{D_{3eax}} \left\{ \left[ 1 + \frac{0,01(s-1)gD_{3eax}}{v} \right]^{0.5} - 1 \right\} npu \ 10^{-4} \le D_{3eax} \le 10^{-3}; \\ W_{z} = 1, 1\sqrt{(s-1)gD_{3eax}} & npu \ D_{3eax} > 10^{-3}. \end{cases}$$
(3.67)

- параметр зважування

$$z_{i,j} = \frac{2,5W_z}{\left[1 + 2\left(\frac{W_z}{U_\tau}\right)^2\right]U_{\tau_{i,j}}} + 2,5\left(\frac{W_z}{U_{\tau^{i,j}}}\right)^{0.8}\left(\frac{S_0}{0,65}\right)^{0.4}.$$
(3.68)

- *F*-фактор

$$F_{i,j} = \frac{\left(\frac{a}{h_{i,j}}\right)^2 - \left(\frac{a}{2h_{i,j}}\right)^{1/2}}{\left[1 - \left(\frac{a}{h_{i,j}}\right)\right]^2 \left(1, 2 - z_{i,j}\right)},$$
(3.69)

де a – відносний рівень, відстань від осередненого рівня дна до відносного рівня. Ця величина приймається рівній половині висоти донних виступів шорсткості  $a = 0.5\Delta$ , у випадку, якщо розміри донних виступів невідомі, то a слід приймати рівним еквівалентній висоті виступів шорсткості. Остаточно визначають осереднену мутність по вертикалі

$$\left\langle \overline{S} \right\rangle_{i,i} = F_{i,j} \mathbf{S}_0. \tag{3.70}$$

За допомогою ітерацій за рівнянням (3.4) або за спрощеним рівнянням (3.5) або за (3.11) визначають поздовжню швидкість в усталеному заплавному потоці з елементами рослинності.

Визначають розподіл глибини в поперечних перерізах заплавного потоку за рівнянням (3.6) або за (3.12).

Проводять розрахунок межових умов біля струмененапрямних дамб за залежністю (3.38).

При перевірці умови нерозривності обчислюють питомі витрати потоку на вертикалях  $q_{f-pij} = U_{i,j} \times h_{ij}$ . Після того обчислюють повну витрату шляхом сумування питомих витрат за кожним поперечним перерізом і множення на ширину розрахункової смуги  $Q_{f-pi} = \sum_{j} q_{f-pij} \times \Delta B$ ,  $\Delta B = x_{2i} - x_{21}$ . Обчислюють коефіцієнти  $k_i = \frac{Q_{f-p_i}}{Q_{f-p0}}$ , де  $Q_{f-p0}$  – витрата в початковому створі. Коректуються швидкості –  $U_{i,j}^{\ \ \mu} = \frac{U_{i,j}^{\ \ \mu}}{k_i}$ , де І, П – номери відповідних наближень. При розрахунку швидкості коректуються два рази. Необхідно проводити перевірку умови нерозривності, обчислюючи питомі витрати  $q_{f-pij} = U_{i,j} \times h_{ij}$ . Далі знов обчислюють швидкості  $U_{i,j}^{\ \ n} = \frac{U_{i,j}^{\ \ n}}{k_i}$ . За коректованими швидкостями обчислюють питомі витрати, знов знаходяться коефіцієнти, які всі повинні дорівнювати одиниці. При необхідності можна збільшити кількість ітераційних циклів перевірки масивів величин. Кінцеву перевірку виконують за дискретним аналогом (3.7) або (3.13).

Роблять перерахунок поздовжнього похилу водної поверхні заплави:

$$I_{x_1} = \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x_1}, \qquad (3.71)$$

далі перераховуються в наступному наближенні величини за формулами (3.45), (3.47) – (3.51), (3.53) – (3.55), (3.58) – (3.70). Визначається розподіл поздовжніх швидкостей та глибин в плані заплавних потоків за рівняннями (3.4) або (3.5), або (3.11) та (3.6) або (3.12) до виконання умови нерозривності. Далі проводять розрахунок глибин після розмиву за співвідношенням:

$$h_{i,j}^{n+1} = \frac{h_{i,j}^{n} U_{i,j}}{U_{_{HepOSMi,j}}},$$
(3.72)

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

Матриця відміток поверхні рельєфу дна заплав на розрахунковій області  $Z_{f-p}$  та матриця глибин заплавного потоку  $h_{f-p}$  оновлюються після кожної сходинки паводка.

# **3.5** Метод розрахунку деформацій на заплавах з урахуванням сили опору при обтіканні мостових опор

При розрахунку руслових деформацій на мостових переходах важливо встановити не тільки середні глибини, але і максимальні, такі, що визначають необхідну глибину закладання основ опор мосту. Відповідно, при проектуванні мостових переходів визначають величину максимального розмиву [145], який може відбутися у процесі експлуатації мосту при розрахунковій повені або паводку. На відміну від врахованих в рівняннях (3.1) - (3.2) складових сил опору рослинності та сили зчеплення, розподіл яких розглядають по всьому розрахунковому об'єму заплавного потоку, сила опору при обтіканні мостових опор призводить до локального порушення структури річкового потоку. Розрахунок в зоні впливу мостових опор проводиться за рівнянням переносу швидкості заплавного потоку з трав'яною рослинністю з урахуванням сили опору при обтіканні мостових опор (3.16) та (3.18) або (3.21) та (3.22).

Для виконання розрахунків місцевих зосереджених розмивів біля ряду гідротехнічних транспортних споруд, зокрема струмененапрямних дамб мостових переходів, мостових опор, огороджувальних дамб, руслорегулюючих півзагат застосовують методику [81]. В цій методиці прийняті концептуальні схеми формування розмивів включають найбільш небезпечні сполучення умов і, зокрема, наявність у багатьох випадках донного вихорового вальця, що підсилює інтенсивність вимивання та винесення розмитого ґрунту на один- два порядки. Для проведення розрахунку в зоні впливу мостових опор до вихідних даних, наведених у табл. 3.1 додаються параметри, наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.3 – Вихідні данні для розрахунку деформацій на заплавах з урахуванням сили опору при обтіканні мостових опор

N⁰	Назва параметра	Позна-	Од.	Примітка (у якому вигляді
	Пазва параметра	ка	вим.	задається)
1	2	3	4	5
1	Кут підходу потоку до мостової споруди	$\alpha_{pier}$	град.	_
2	Коефіцієнт форми мостової опори	$K_{f}$	—	визначається за [6]
3	Коефіцієнт опору при обтіканні опори	$C_{pier}$	—	1,2
4	Ширина опори в поперечному напрямку	<b>B</b> <sub>pier</sub>	М	задається навколо опори, як параметр розрахункової області впливу опори
5	Ширина опори в поздовжньому напрямку	$L_{pier}$	М	задається навколо опори, як параметр розрахункової області впливу опори
Кінець таблиці 3.3

1	2	3	4	5
6	Висота опори, яка обтікається потоком	$\Delta x_{3 pier}$	М	$\Delta x_{3pier} \approx h_{ij}$
7	Довжина опори	$l_{_{pier}}$	М	при косому набіганні потоку $l_{pier} = l_{0pier} \cos \alpha_{pier}$
8	Ширина опори	b <sub>pier</sub>	М	при нормальному набіганні потоку $b_{pier} = b_{0pier}$ ; при косому набіганні потоку $\frac{b_{pier} = l_{0pier} \sin \alpha_{pier} + b_{0pier} \cos \alpha_{pier}}{b_{pier} \cos \alpha_{pier}}$

Послідовність розрахунку передбачає виконання операцій з визначенням наступних параметрів.

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 опоруи при обтіканні мостових опор  $x_i$  (i=n). По всім іншим створам визначаються гідродинамічні параметри в межах розрахункової області заплавних ділянок згідно алгоритму, наведеному у підрозділі 3.3.

У зазначених поперечних створах після розрахунку за формулою (3.60) визначають міделеву площу мостової опори, яка обтікається потоком:

$$s_{pier} = \frac{K_f l_{pier} b_{pier}}{B_{pier} L_{pier} h_{f-pb(s)i,j}}.$$
(3.73)

Розраховують коефіцієнт, який враховує опір впливу мостових опор на заплавний потік:

$$N_{pier} = \frac{C_{pier} s_{pier}}{2}.$$
(3.74)

Замість рівняння (3.4) або (3.5) або (3.11) за допомогою ітерацій визначають розподіл поздовжньої швидкості з урахуванням сили опору від мостових опор за рівняннями (3.16) або (3.17), або (3.21).

Глибину потоку на заплаві після розмиву в зоні впливу мостових опор визначають за (3.18) або (3.22) та перераховують за співвідношенням:

$$h_{\max i,j}^{n+1} = \frac{h_{i,j}^{n} U_{pieri,j}}{U_{i,j}}.$$
(3.75)

Розрахунок та перевірка умови нерозривності проводиться згідно з (3.7) або (3.13), (3.71), (3.72).

### Висновки до розділу 3

1. Розподіл по ширині заплавних потоків осереднених по вертикалі швидкостей та глибин на розрахункових поперечних перерізах в запропонованому методі розрахунку передбачає розв'язування скінченнорізницевим методом основних рівнянь відкритого потоку у вигляді поздовжньої та поперечної рівноваги потоку, а також рівняння нерозривності.

2. Числова реалізація запропонованих математичних моделей за ітераційними методами розрахунку гідродинамічних характеристик заплав з рослинністю обумовила необхідність формулювання початкових та граничних умов для врахування характерних особливостей руху заплавних потоків в зоні впливу мостових переходів. Глибина заплавного потоку після розмиву визначатиметься на основі співвідношень дійсної та нерозмивної швидкостей.

3. На основі врахування гідравлічних явищ на мостовому переході розроблений метод визначення параметрів зони його впливу. Запропонований метод дозволяє отримати довжини зони стиснення та розтікання, зміну глибини та похилу вільної поверхні річкового потоку. Числові дослідження необхідно проводити відповідно на кожній сходинці повені або паводку, на певну добу та починати зі створу повного розтікання, де всі гідравлічні характеристики потоку мають природні значення.

4. Запропонований метод розрахунку загальних розмивів на заплавах в зоні впливів мостових переходів дозволяє визначити рівні вільної поверхні потоку на різних етапах проходження розрахункового паводка, відповідний розподіл глибин і швидкостей на заплавних ділянках з можливими інтенсивними переформуваннями, а також розмивів на заплавах в зоні впливу мостового переходу.

5. В 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. Реалізація двовимірної математичної моделі заплавного потоку з урахуванням опору при обтіканні мостових опор дозволить встановити величину максимального розмиву, що є відправним показником при призначенні глибини закладання основ опор мосту.

6. Результати досліджень третього розділу викладено у наступних публікаціях [136, 144, 145, 146, 149].

### РОЗДІЛ 4

## РОЗРАХУНОК РОЗМИВІВ НА ЗАПЛАВАХ В ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ

## 4.1 Розрахунок положення кривої вільної поверхні річкового потоку та визначення зони 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, Донецька область (Україна). Заплава переважно 2-стороння, чергується по берегах. Ґрунти мулисто-піщані та глинисті, на заболочених ділянках торф'янисті. 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. Запроектований автодорожній міст перетинає р. Сіверський Донець під кутом 26°, має довжину 297 м. Для проведення розрахунку проводиться збір вихідних даних, які наведені у табл. 4.1 та 4.2. Далі були визначені параметри зони впливу мостового переходу: довжина зони стиснення та зони розтікання.

Таблиця 4.1 – Вихідні данні розрахунку положення кривої вільної поверхні та деформацій на заплавах р. Сіверський Донець

u	Назва параметра	Позна-	Од.	Примітка (у якому	
1.9.	Пазва параметра	ка	ВИМ.	вигляді задається)	
1	2	3	4	5	
1	Поздовжній похил дна	J	—	0,00018	
2	Середня відмітка дна русла	$Z_r$		143,7	
3	Середня відмітка дна заплав	$Z_{f-p}$		146,64	
1	Прискорення вільного	a	$M/c^2$	0.81	
4	падіння	8	M/C	7,01	
5	Ширина розливу річки	$\overline{B}_{_{riv}}$	М	466,3	
6	Середня ширина русла	$B_r$	М	58,11	

113

Кінець таблиці 4.1

1	2	3	4	5
7	Середня ширина більшої заплави	$b_{_{f-pb}}$	М	212,26
8	Середня ширина меншої заплави	$b_{f-ps}$	М	149,08
9	Коефіцієнт шорсткості на заплавах	п		0,067
10	Ширина отвору мостового переходу	$B_{br}$	М	267
1	Коефіцієнт кінематичної в'язкості води (в залежності від температури води)	v	м <sup>2</sup> /с	115.10-8
2	Густина води річкового потоку	$ ho_{\scriptscriptstyle L\!S}$	кг/м <sup>3</sup>	998
3	Параметр Кармана	К		0,435
4	Середній або медіанний діаметр фракції грунту	$d_{_m}$	ММ	0,41
5	Щільність донного грунту	$ ho_s$	кг/м <sup>3</sup>	2620
6	Гідравлічна швидкість	$W_{z}$	м/с	0,185 (визначена розрахунком)
7	Зчеплення грунту у стані повного водонасичення	$C_{Ch}$	кг/м <sup>2</sup>	0,19
8	Функція коефіцієнта Шезі	М		При $10 \le C \le 60$ M = 0.7C + 6, При $C > 60 - M = 48$
9	Коефіцієнт для визначення сили зчеплення	$k_{\scriptscriptstyle Ch}$		0,035
10	Перший коефіцієнт форми частки наносів	$C_{\Phi 1}$		π/6
11	Коефіцієнт опору рослинності	$C_X$		0,4
12	Висота рослинності	$h_{\it pocn.}$	М	1,1
13	Діаметр стебла рослини, що обтікається	D <sub>cm.</sub>	М	$D_{cm.}=7\cdot 10^{-3}\mathcal{M}$
14	Частина стебла рослини, що обтікається за висотою	$\Delta z_{cm.}$	М	якщо $h_{pocn} > h_{f-p}$ , тоді $\Delta z_{cm.} = h_{f-p}$ , якщо $h_{pocn} < h_{f-p}$ , тоді $\Delta z_{cm.} = h_{pocn}$ .

Доба	Загальна	Руслова	Рівень	Глибина	Глибина
	витрата	витрата	поверхні	русла,	заплави
	річки	$Q_r$ , $M^3$	річки,	$h_r$ , M	$h_{f-p}$ , M
	$Q_{_{riv}}$ , $\mathrm{M}^3$		<i>Н</i> ,м		
1,2	448	207,65	147,24	3,54	0,6
4	506	215	147,5	3,8	0,86
8,4	864	293,32	147,98	4,28	1,34
13,6	1193	368,08	148,27	4,57	1,63
18,8	1658	465,03	148,62	4,92	1,98
24,6	1992	534,73	148,83	5,13	2,19

Таблиця 4.2 – Вихідні параметри розрахункової області р. Сіверський Донець

Результати розрахунку щодо зони впливу мостового переходу представлені у табл. 4.3; табл. А.1 – А2, рис.4.1. У табл. 4.3 наведено розрахунок питомої витрати заплав згідно співвідношення (3.23), де за кожною наступною сходинкою повені відбувається збільшення витрати понад 24 діб. Згідно з формулами (3.25), (3.29), (3.31) отримано величини зон стиснення та розтікання річкового потоку в загальній зоні впливу мостового переходу [146]. Тут з підвищенням витрат спостерігається загальне збільшення довжини зони впливу, також збільшення зони стиснення, збільшення, а потім зменшення, після 8-ї доби, зони розтікання. Відповідним чином спостерігається зміна параметрів центральної струмини в зонах стиснення та розтікання, отриманих за співвідношеннями (3.31), (3.32).

Після проведення розрахунків величин зони стиснення та розтікання отримано розподіл глибин річкового потоку (табл. 4.1, а), де можна визначити зміну глибин безпосередньо в створі мостового переходу. Більш чітко можна визначити межі зон стиснення та розтікання за зміною похилу водної поверхні, визначеною за рівнянням (3.35). На представленому графіку (рис. 4.1, б) на 10 кроці розрахунку спостерігається зміна уклону вільної поверхні в створі мостового переходу. Падіння уклону – з 10 по 12 крок, зростання – на 12 кроці на всіх сходинках повені.

Визначено зону впливу мостового переходу через р. Сіверський Донець, де відбувається розвиток загальних руслових деформацій та розмивів в руслі та на заплавах, яка змінюється від 1195 м до 2144 м. Зі збільшенням витрати від першої сходинки повені до шостої параметри зони стиснення 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. Параметри центральної струмини змінюються відповідно до розподілу зон стиснення та розтікання. Ґрунтуючись на рівнянні усталеного нерівномірного руху в відкритих руслах, отримано зміну глибини потоку, яка в створі мостового переходу збільшується від 0,58 м до 2,17 м. Похил вільної поверхні річкового потоку безпосередньо в створі мосту при переході з зони стиснення в зону розтікання різко змінюється на першій сходинці повені від –0,00004 до –0,00017, на шостій – від –0,00016 до –0,00037.

Запропонований метод на основі зміни ширини розливу та глибини річкового потоку дозволяє визначити параметри зони впливу мостового переходу та межі, в яких потрібно проводити розрахунок загальних та місцевих деформацій в руслі та на заплаві під час повеней або паводків.

Достатньо трудомісткий процес обчислення вимагає велику кількість вихідних даних, які необхідно та складно отримувати в натурних умовах.

Отримані результати є підґрунтям для проведення досліджень щодо прогнозування розвитку деформаційних процесів в річковому потоці з урахуванням штучного стиснення, в зоні впливу мостового переходу [136, 146]. Це залежить від точності та достовірності вихідних даних, які можливо отримати під час тривалих натурних спостережень спеціалістами відповідної кваліфікації.

Доба	Природна	Коефіцієнт	Довжину	Число	Значення	Довжина	Довжина	Параметри	Параметри
	питома	стиснення	впливу	Фруда	повного	зони	зони	центральної	центральної
	витрата	$eta_{br}$	мостового		підпору	стиснення,	розтікання,	струмини в	струмини в
	заплав,		переходу,	Fr	ξ	$l_{z_{-}c}$ M	$l_{z_{-s}}$ M	зоні	зоні
	$q_{_{f-p}}$ , M		$l_{z_{-}br}$ M			, 141	, 111	розтікання	стиснення
	,		, 111					$R_{z_{-}s}, M$	$R_{z_{z_{z_{z_{z_{z_{z_{z_{z_{z_{z_{z_{z_$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,2	0,589	1,355	1194,8	0,01061	0,794	245,7	949,1	3621,6	937,5
4,0	0,713	1,391	1349,2	0,00950	0,823	239,5	1109,8	3950,5	852,4
8,4	1,398	1,476	1673,6	0,01578	0,7232	464,4	1209,3	3748,1	1439,3
13,6	2,021	1,510	1842,2	0,02240	0,613	713,7	1128,6	3341,3	2112,9
18,8	2,923	1,542	2035,0	0,03140	0,464	1090,3	944,7	2687,9	3102,1
24,6	3,570	1,556	2144,3	0,03790	0,355	1382,0	762,3	2133,2	3867,5

Таблиця 4.3 – Обчислені параметри розрахункової області р. Сіверський Донець



б)

Рисунок 4.1 – Визначення параметрів розрахункової області р. Сіверський Донець (1–10 крок – зона стиснення, 11–20 крок – зона розтікання потоку): а) розрахунок глибин потоку h<sub>i</sub>; б) розрахунок похилу вільної поверхні річкового потоку *Ix<sub>i</sub>*.

# 4.2 Розрахунок деформацій на заплавах в зоні впливу мостового переходу

На основі визначених початкових умов (рис. 4.1) та початкових відміток поверхні і глибин річкового потоку (рис. 4.2) проводився розрахунок на ділянці р. Сіверський Донець довжиною 220 м, шириною 540 м [136, 145, 149]. Розв'язування виконувалося на основі вихідних даних, наведених у табл. 4.1.

Були визначені гідродинамічні показники заплавних потоків (рис. 4.2 – 4.10 та додаток А, рис. А.1), від поздовжньої швидкості (рис. 4.3, а), для дотримання умов нерозривності, до розрахунку глибин в поперечних перерізах (рис. 4.12, 4.13) та відміток донної області після проходження паводку за розрахунковими сходинками (рис. 4.14), а також параметри осередненої мутності потоку (додаток А, рис. А.2 – А.8).

Розмив русла р. Сіверський Донець зупиняється лише на спаді весняної повені після 6-ої за вихідним гідрографом розрахункової сходинки. Згідно з розрахунками, проведеними за розробленою методикою, при порівнянні з початковими відмітками, розмив більшої заплави становить  $h_p = 0,96$  м, меншої заплави –  $h_p = 1,28$  м, що перевищує відповідні деформації згідно спостережень, наведених у роботі [1].

Запропонований підхід дозволяє в двовимірній постановці визначити параметри зони впливу мостового переходу (рис. 4.1) та для дотримання умов нерозривності провести розрахунок середньої швидкості на кожній з заплав. Визначені початкові та межові умови є основою для реалізації скінченнорізницевих аналогів рівнянь переносу (3.4), (3.6) або (3.11), (3.12). Відповідно до цього, отримані масиви даних глибин в поперечних перерізах потоку (рис. 4.12) та відміток поверхні рельєфу заплав (рис. 4.14), що дозволяє надавати точний прогноз розвитку деформаційних процесів.



Рисунок 4.2 – Початкові дані на розрахунковій області до проходження повені: а) відмітки поверхні <sup>Z</sup><sub>f-p</sub> рельєфу дна потоку русла та заплав; б) глибина річкового потоку на розрахунковій області



Рисунок 4.3 – Розрахунок значення швидкості першого наближення  $U_{0i,j}$  в зонах стиснення та розтікання: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



## б)

Розрахункові кроки по ширині потоку

Рисунок 4.4 – Розрахунок величини динамічної швидкості U<sub>*i*,*j*</sub> на заплавах: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Рисунок 4.5 – Розрахунок коефіцієнта  $\alpha_{hi,j}$ , який враховує нерівномірність розподілу швидкостей на вертикалі: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Рисунок 4.6 – Розрахунок емпіричного коефіцієнта тертя  $C_{fi,j}$ : а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Рисунок 4.7 – Розрахунок коефіцієнта турбулентного обміну  $\Lambda_{i,j}$ : а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



б)

Рисунок 4.8 – Розрахунок коефіцієнта N<sub>Pi,j</sub>, який враховує опір елементів рослинності на заплаві: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Рисунок 4.9 – Розрахунок нерозмивної швидкості  $U_{_{hep.i,j}}$ : а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Рисунок 4.10 – Розрахунок осередненої мутності по вертикалі  $\langle \overline{S} \rangle_{i,j}$ : а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Рисунок 4.11 – Розрахунок поздовжньої швидкості в заплавному потоці з елементами рослинності  $U_{i,j}$ : а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку







Розрахункові кроки по ширині потоку



Рисунок 4.12 – Розрахунок глибини в поперечних перетинах заплавного потоку  $h_{i,j}$ : а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Рисунок 4.13 – Розрахунок величини розмиву-намиву: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Розрахункові кроки по ширині потоку

a)

б)



## Розрахункові кроки по ширині потоку

Рисунок 4.14 – Відмітки поверхні рельєфу дна заплав: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку

Розроблена математична модель дозволяє враховувати особливості заплавних ділянок стосовно розподілу рослинності та намулку, дає можливість визначити реальний розподіл швидкісної структури в шарі рослин неоднорідного потоку та деформацій на заплавах.

Представлені результати числового експерименту дозволяють дослідити розвиток деформацій на заплавах саме в зоні впливу мостового переходу з урахуванням особливостей рельєфу та взаємодії з русловим потоком на реальних об'єктах транспортних споруд.

# 4.3 Розрахунок деформацій на заплавах з урахуванням опору при обтіканні мостових опор

Наступним кроком досліджень є визначення параметрів максимального розмиву з урахуванням в модельних рівняннях сили опору при обтіканні мостових опор. Це дозволить в повній мірі надавати прогноз розвитку деформацій на заплавах, достатньо точно визначати необхідну глибину закладання основ опор мосту при проектуванні дорожніх об'єктів та споруд на рівнинних та передгірських ділянках річок. Для проведення розрахунку на ділянці річки в зоні впливу мостового переходу проводиться збір вихідних даних. У табл. 4.4 наведені вихідні дані для р. Сіверський Донець на автомобільній дорозі T-05-14 Добропілля - Лиман в межах Донецької області.

u	Назва параметра	Позна-	Од.	Примітка (у якому вигляді
1.4.	Пазва параметра	ка	ВИМ.	задається)
1	2	3	4	5
1	Кут підходу потоку до	$\alpha_{pier}$	град.	26°
1	мостової споруди			20
2	Коефіцієнт форми	$K_{f}$		1.0
	мостової опори			1,0
3	Коефіцієнт опору при	$C_{pier}$		1.2
5	обтіканні опори			1,2
4	Висота опори, яка	$\Delta x_{3 \text{ min}}$	м	$\Delta x_{3,\text{ping}} \approx h_{ii}$
•	обтікається потоком	Spier	171	spier ij

Таблиця 4.4 – Вихідні данні для розрахунку з урахуванням впливу мостових опор

Кінець таблиці 4.4

1	2	3	4	5
5	Довжина опори (без урахування косого набігання)	l <sub>0pier</sub>	М	15
6	Ширина опори (без урахування косого набігання)	$b_{0pier}$	М	1,5
7	Ширина опори в поперечному напрямку	<b>B</b> <sub>pier</sub>	М	задається навколо опори, як параметр розрахункової області впливу опори
8	Ширина опори в поздовжньому напрямку	$L_{pier}$	М	задається навколо опори, як параметр розрахункової області впливу опори

За запропонованим методом (п. 3.5) та з урахуванням межових умов (п. 3.3) були визначені гідродинамічні показники заплавних ділянок р. Сіверський Донець, в тому числі поздовжня швидкість  $U_{i,j}$  з урахуванням сили опору при обтікання мостових опор (рис. 4.15, 4.16), глибина (рис. 4.17) та відмітки донної області після проходження паводку (рис. 4.18, 4.19) за розрахунковими сходинками [145, 149].

За представленими результатами числового експерименту отримані параметри максимальних розмивів на заплавних ділянках, що дозволить визначити глибину закладання мостових опор. Максимальна поздовжня швидкість U<sub>i,i</sub> після 6 сходинки повені (на початку її спаду) змінюється в межах від 2,45 м/с до 2,32 м/с, відповідно на меншій та більшій заплавах. Різниця відміток дна заплав після 6 сходинки та перед початком 1-ї змінюється від 0,19 м до 1,91 м на меншій заплаві та від 0,035 м до 2,75 м – на більшій заплаві. При обтіканні потоком мостової опори особливо на заплавних ділянках з намулками та з рослинністю створюється специфічні умови переносу гідродинамічних характеристик потоку. Запропонована двовимірна математична модель заплавного потоку для прогнозування розподілу максимальних глибин та швидкостей на заплаві дозволяє враховувати ці умови. Згідно з проведеними розрахунками розмив більшої заплави становить  $h_p = 0.96$  м, меншої заплави —  $h_p = 1.28$  м (рис. 4.14).



Рисунок 4.15 – Розрахунок коефіцієнта  $N_{pier}$ , який враховує опір впливу мостових опор на заплавний потік: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку







Рисунок 4.17 – Розрахунок глибини в поперечних перетинах заплавного потоку *h*<sub>*i*,*j*</sub> з урахуванням сили опору від мостових опор: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Рисунок 4.18 – Розрахунок величини розмиву-намиву з урахуванням опору від впливу мостових опор: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Розрахункові кроки по ширині потоку

1 5 9

б)

Рисунок 4.19 – Відмітки поверхні рельєфу дна заплав з урахуванням опору від впливу мостових опор: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку

13 17 21 25 29 33 37 41 45 49 53 57 61

Ряд1

Величина максимального розмиву, з урахуванням впливу опору мостових опор, на більшій заплаві складає  $h_p = 2,75$  м, на меншій заплаві —  $h_p = 1,91$  м (рис. 4.19). На меншій заплаві розмив перевищує попередні результати в 1,5 рази, на більшій заплаві — в 2,8 раз, що обумовлено врахуванням як впливу опору при обтіканні мостових опор, так і ефекту стиснення між опорами та насипами підходів в створі мостового переходу.

4.4 Порівняльний аналіз результатів за методом С.Г. Ткачука – О.В. Андреєва з результатами розрахунку деформацій за запропонованими методами

З метою обґрунтування та підтвердження адекватності запропонованих методів розрахунку деформацій на заплавах в зоні впливу мостових переходів проведемо порівняльний аналіз результатів запропонованих методів з методом С.Г. Ткачука – О.В. Андреєва.

За методом С.Г. Ткачука [147] визначають природну питому витрату заплав за формулою (3.23) –  $q_{f-p} = \frac{Q_{riv} - Q_r}{B_{riv} - B_r}$  (результати розрахунків наведені у табл. 4.2).

Далі розраховують коефіцієнт стиснення річкового потоку за формулою (3.24)  $\beta_{br} = \frac{Q_{riv}}{Q_r + q_{fer}(B_{br} - B_r)}$  (табл. 4.2).

Визначають витрату заплавних потоків в зоні стиснення за (3.41)  $Q_{f-p0i} = Q_{riv} - Q_r \beta_{z_ci}$ , для більшої заплави — за (3.42)  $Q_{f-pb0} = Q_{f-p0} \cdot k_{f-pb}$ , для меншої заплави — за (3.43)  $Q_{f-ps0} = Q_{f-p0} \cdot k_{f-ps}$ .

Визначають витрату заплавних потоків в зоні розтікання за (3.44)  $Q_{f-p0b(s)i} = Q_{riv} - Q_r \beta_{z_si}$ , витрати більшої та меншої заплав визначаються за аналогічними залежностями (3.42 та 3.43). Визначають коефіцієнт Шезі для більшої та меншої заплав за співвідношенням (3.45)  $C_{f-pb(s)i} = \frac{Q_{f-p0b(s)i}}{b_{f-pb(s)}h_{f-pb(s)\,cep.i}^{3/2}I_{x_1}^{1/2}}$ , результати розрахунку представлені у табл. А.1, А.2.

Розраховують значення швидкості першого наближення в зонах стиснення та розтікання за формулою (3.46) –  $U_{0i,j} = C_i \sqrt{h_{f-pb(s)i,j}I_{x_1}}$ , результати розрахунку представлені на рис. 4.3.

Знаходять, згідно з [47], середньозважений діаметр відкладень  $D_{cep}$  на основі обчислення добутків медіанних значень діаметрів часток на їх відсотковий склад за формулою (3.56)  $D_{cep} = \sum_{k=1}^{n} \frac{P_n d_m}{100}$  та нерозмивну швидкість – за (3.64)  $U_{n_{i,j}} = 1,47\sqrt{g} D_{cep}^{1/3} h_{i,j}^{-1/6}$ , результати розрахунку наведені на рис. 4.9.



140



б)

Рисунок 4.20 – Поверхня відносної похибки розрахункових глибин за методом С.Г. Ткачука – О.В. Андреєва та за методом розрахунку глибин з урахуванням опору від впливу рослинності, відриву зерен ґрунту та мостових опор: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку

За методом О.В. Андреєва розмив заплавних ділянок відбувається при перевищенні нерозмивної швидкості над швидкістю в потоці. Відповідно до співвідношення (1.2) глибину потоку на заплаві після розмиву визначають за формулою:

$$h^{n+1} = \frac{h^n \beta_{br} U_{0i,j}}{(1-\lambda) U_{\mu_{i,j}}}, \qquad (4.1)$$

де ширина опори, згідно з табл. 4.4  $b_{0pier} = 1,5$  м, довжина прогону мосту,  $l_{np} = 26,7$  м, відносна ширина опори складає  $\lambda = 0,0562$ .

Також необхідно проводити перевірку умови нерозривності, обчислюючи питомі витрати  $q_{f-pij} = U_{i,j} \times h_{ij}$  та коректуючи швидкості  $U_{i,j}^{II} = \frac{U_{i,j}^{II}}{k_i}$ , згідно п.п 3.4.

На рис. 4.20 представлена поверхня відносної похибки розрахункових глибин за методом С.Г. Ткачука – О.В. Андреєва та за запропонованим методом розрахунку глибин з урахуванням опору від впливу рослинності, відриву зерен грунту та мостових опор. Максимальна відносна похибка змінюється в межах від 0,4 до 0,5. Відмінність результатів спостерігається переважно біля мостових опор та в зоні переходу русла на заплаву. Це може бути пояснене недостатньою точністю та розбіжністю в основних розрахункових залежностях. Розрахункові показники за методом С.Г. Ткачука – О.В. Андреєва в характерних точках, де має місце максимальна відносна похибка, різко змінюються на відміну від більш плавних розрахункових значень за запропонованим удосконаленим методом.

#### Висновки до розділу 4

1. Визначено зону впливу мостового переходу через р. Сіверський Донець, де відбувається розвиток загальних руслових деформацій та розмивів в руслі та на заплавах, яка змінюється від 1195 м до 2144 м. Зі збільшенням витрати від першої сходинки повені до шостої параметри зони стиснення 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. Параметри центральної струмини змінюються відповідно до розподілу зон стиснення та розтікання. Грунтуючись на рівнянні усталеного нерівномірного руху в відкритих руслах, отримано зміну глибини потоку, яка в створі мостового переходу збільшується від 0,58 м до 2,17 м. Похил вільної поверхні річкового потоку безпосередньо в створі мосту при переході з зони стиснення в зону розтікання різко змінюється на першій сходинці повені від –0,00004 до –0,00017, на шостій – від –0,00016 до –0,00037.

2. Розмив русла р. Сіверський Донець зупиняється на спаді весняної повені після шостої розрахункової сходинки за вихідним гідрографом. Згідно з розрахунками проведеними за запропонованим методом розмив більшої заплави становить  $h_p = 0,96$  м, меншої заплави —  $h_p = 1,28$  м. Максимальне значення поздовжньої швидкості потоку за результатами числового експерименту спостерігається на меншій заплаві та складає 2,5 м/с. Після проведення розрахунку на р. Сіверський Донець визначено, що на меншій заплаві з меншою пропускною здатністю та, відповідно, більшим стисненням, значення загального розмиву більше в порівнянні з деформацією більшої заплави, що відповідає реальним умовам.

3. За результатами числового розрахунку на ділянці р. Сіверський Донець визначено, що в створі мостового переходу на меншій заплаві максимальне значення поздовжньої швидкості перевищує відповідний показник на більшій заплаві на 5 %, що пояснюється її меншою пропускною здатністю. Величина максимального розмиву, з урахуванням впливу опору мостових опор, на більшій заплаві складає  $h_p = 2,75$  м, на меншій заплаві –  $h_p = 1,91$  м. На меншій заплаві розмив перевищує попередні результати в 1,5 рази, на більшій заплаві – в 2,8 раз. Перевищення величини максимального розмиву на більшій заплаві в порівнянні з розмивом на меншій на 30 % обумовлено врахуванням впливу опору при обтіканні мостових опор та ступенем стиснення потоку між ними.

4. Результати досліджень четвертого розділу викладено у наступних публікаціях [136, 145, 146, 149].

#### ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науковоприкладної 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 зависенесного 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 сферу управління організаціях, які входять У Державного агентства автомобільних доріг України (Укравтодор) у вигляді пропозицій щодо удосконалення моделей оцінювання і прогнозування ресурсу мостів, що знаходяться в експлуатації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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

2. 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.

3. Болдаков Е.В. Переходы через водотоки. М.: Транспорт, 1965. 422 с.

4. 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. URL: <u>https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-</u>Australia.pdf

5. Шинкарук Л.А. Вплив мостових переходів на русловий процес на р. Тиса (ділянка Королево-Вилок). *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2014. Вип. 91. С. 191-199.

6. Снищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.:Гидрометеоиздат, 1982. 272 с.

7. Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. Общая геоморфология М.: Высшая школа, 1979. 287 с.

8. John, S., Bridge. The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers // Geological Society, London, Special Publications, 75, 13-71, 1 January 1993. URL: https://sp.lyellcollection.org/content/75/1/13.short

9. Ryan J., Larsen; Francis, C. K., Ting, A.M., ASCE; and Allen, L., Jones, M., Flow Velocity and Pier Scour Prediction in a Compound Channel: Big Sioux River Bridge at Flandreau, South Dakota / ASCE // Journal of Hydraulic

Engineering / Volume 137 Issue 5. May 2011. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jfr3.12562

10. Timothy, J., Fewtrell, Jeffrey, C., Neal, Paul, D., Bates, Peter, J., Harrison Geometric and structural river channel complexity and the prediction of urban inundation // Hydrological Processes, Vol. 25, Issue 20. P. 3173-3186. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.8035

11. Lewin, J., Ashworth, P. The negative relief of large river floodplains [Текст] // Earth-Science Reviews. 2014. Volume 129. P. 1-23. URL: <u>https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825213001864</u>

12. Toshiki, Iwasaki, Yasuyuki, Shimizu, Ichiro, Kimura Numerical simulation of bar and bank erosion in a vegetated floodplain: A case study in the Otofuke River [Текст] // Advances in Water Resources. 2016. Volume 93, Part A. – P. 118–134. URL: <u>https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170815000275</u>

13. Brown, R.A., Pasternack G.B. How to build a digital river [Текст] // Earth-Science Reviews. 2019. Volume 194. P. 283-305. URL: <u>https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.028</u>

14. Vargas Luna, A., Duró, G., Crosato, A., Uijttewaal, W. Morphological adaptation of river channels to vegetation establishment: a laboratory study [TeκcT] // JGR Earth Surface. 2019. Volume124, Issue7. P. 1981-1995. URL: <u>https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018JF004878</u>

15. Konsoer, K., Rhoads, B., Best, J., Langendoen, E., Ursic, M., Abad, J., Garcia, M. Length scales and statistical characteristics of outer bank roughness for large elongate meander bends: The influence of bank material properties, floodplain vegetation and flow inundation [Teκct] // Earth Surface Processes and Landforms. – 2017. Volume 42, Issue 13. P. 2024-2037. URL: <u>https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.4169</u>

16. Crosato, A., Saleh, M. Numerical study on the effects of floodplain vegetation on river planform style [Текст] // Earth Surface Processes and Landforms. – 2010. – Volume 36, Issue 6. P. 711-720. URL: <u>https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.2088</u>

17. Västilä, K., Järvelä, J. Characterizing natural riparian vegetation for modeling of flow and suspended sediment transport [Teκct] // Journal of Soils and ediments. 2018. Volume 18. P. 3114-3130.

18. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.:Гидрометеоиздат, 1982. 272 с.

19. Железняков Г.В. Некоторые особенности движения потока при выходе его на пойму / Управление поверхостными и подземными водными ресурсами и их использование М. АН СССР. 1961. С. 135-144.

20. Железняков Г.В. Пропускная способность русел, каналов и рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1981, 311 с.

21. Соколов Ю. Н. Уравнение наклона гибкой растительности в святи с расчетом гидравлического сопротивления. Динамика и терміка рек и водохранилищ. М.: «Наука», 1984. С. 72-85.

22. Барышников Н.Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 279 с.

23. Михайлова Н.А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками. – Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 235 с.

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

25. Grenfell, S.E., Ellery, W.N., Grenfell, M.C. Geomorphology and dynamics of the Mfolozi River floodplain, KwaZulu-Natal, South Africa // Geomorphology, Vol. 107. Issues 3-4. P. 226-240. URL: <u>https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X08005485</u>

26. Eric, W., Larsen, Steven, E., Greco Modeling Channel Management Impacts on River Migration: A Case Study of Woodson Bridge State Recreation Area, Sacramento River, California, USA // Environmental Management, Vol. 30, P. 209-224(2002). URL: <u>https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-</u> 002-2663-1 27. Sean j. Bennett , John S. Bridge An experimental study of flow, bedload transport and bed topography under conditions of erosion and deposition and comparison with theoretical models / THE Journal of The international association of Sedimetologists, Vol. 42, Issue 1. 1995. P. 117-146. URL:https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-3091.1995.tb01274.x

28. Михайлова Н.А., Фоменко Г.С. Исследование кинематической структуры турбулентного потока и движения твердых частиц в его придонной области // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. 1975. № 6. С. 670-678.

29. Dragićević, S., Živković, N., Novković, I., Etrović, A., Tošić, R., Milevski, I. Hydrological and suspended sediment regime in the Kolubara River during the extreme year of 2014 [Teκct] // Revista de Geomorfologie. 2016. Vol. 18. P. 32-46. DOI 10.21094/rg.2016.040, URL: http://revistadegeomorfologie.ro\

30. Маккавеев В.М. К теории турбулентного режима и взвешивания наносов // Изв. ГГИ. 1931. № 32. С. 5-26.

31. Рауз Х. Механика жидкости. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. 368 с.

32. Великанов М.А. Перенос взвешенных частиц турбулентным потоком // Изв. АН СССР. ОТН. 1944. №3. С. 189-208.

33. Великанов М.А. Движение взвешенных наносов // Вестн. МГУ. Сер. физ.-мат. и естеств. наук. 1953. №8. С. 45-55.

34. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. М.: Гостехиздат, 1955. Т. 2. 324 с.

35. Франкль Ф. И. Опыт полуэмпирической теории движения взвешенных наносов в неравномерном потоке // Докл. АН СССР. 1955. 102, № 6. С. 1093-1096.

36. Баренблатт Г.И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке // Прикладная математика и механика. 1953. Вып. 17. №3. С. 261-274.

37. Баренблатт Г.И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке, занимающем полупространство или плоский открытый канал конечной глубины// Прикладная математика и механика. 1955. Т. 19. № 1. С. 61-88.

38. Баренблатт Г.И. О некоторых вопросах теории движения взвешенных частиц в турбулентном потоке // Прикладная математика и механика / Вести. МГУ. Сер. физ.-мат. и естеств. наук. 1955. № 8. С. 53-56.

39. Bogardi J. Sediment transport in alluvial streams. Bp.: Akad. Kiado, 1974. 826 p.

40. Маккавеев ВМ. Вопросы теории турбулентности и движения наносов // Тр. ГГИ. 1963. № 110. С. 54-87.

41. Буевич Ю.А. О гидродинамике однородных суспензий // ЖПМТФ, 1969. №6. С. 72-80.

42. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.

43. Sediment transportation mechanics: Suspension of sediment // JHD ASCE. 1963, Vol. 89. N 5. p. 45 -76.

44. Дементьев М.А. Об основах инженерного расчета потоков в системах непрерывного трубопроводного транспорта зернистых материалов // Изв. ВНИИГ. 1975. № 108.с. 3 -26.

45. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. М.: Гидрометеоиздат. Моск.отд-ние, 1962. 374 с.

46. Гришанин К.В. Гидравлика переката с заходящими плесовыми лощинами // Вопросы гидравлики и гидротехн. строительства. Л.; М : Речиздат. 1952. С. 62 -83.

47. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. 2-е изд. Л. : Гидрометеоиздат, 1979. 312 с.

48. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М. : Транспорт, 1972. 216 с.

49. Караушев А.В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 392 с.

50. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Караушев А.В., Речная гидравлика. Л. : Гидрометеоиздат, 1969. 416 с.

51. Караушев А. В. Теория и методы расчетов речных наносов. Л. : Гидрометеоиздат, 1977. 272 с.

52. Барышников Н.Е., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловыепроцессы. Л. : Гидрометеоиздат, 1988. 454 с.

53. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л. : Гидрометеоиздат, 1979.312 с.

54. Егиазаров И.В. Транспортирующая способность открытых потоков // Изв. АН СССР. ОТН. 1956. Вып. 2. С. 93-108.

55. Михайлова Н.А. Применение высокочастотной киносъемки для исследования мутности придонного слоя потока // Изв. АН СССР. ОТН. 1952. № 10. С. 1501-1506.

56. Славінська О.С. Моделювання гідродинамічних процесів у відкритих зависенесучих потоках // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Рівне, 2007. Ч.2. Вип. 4(40). С. 141-153.

57. Славінська О.С. Дослідження розвитку загальних руслових деформацій в зоні впливу мостового переходу // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К. : НТУ, 2008. Вип. 75. С. 286-295.

58. Шрайбер А.А., Гавин Л.Б., Наумов В.А., Яценко В.П. Турбулентные течения газовзвеси. К.: Наук. думка, 1987. 240 с.

59. Россинский К.Г., Кузьмин И А Русловый процесс. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 372 с.

60. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.

61. Sediment transportation mechanics: Suspension of sediment // JHD ASCE. 1963, Vol. 89. N 5. P. 45-76.

62. Дементьев М.А. Об основах инженерного расчета потоков в системах непрерывного трубопроводного транспорта зернистых материалов // Изв. ВНИИГ. 1975. № 108. С. 3-26.

63. Нигматулин Р.И. Методы механики сплошной среды для описания многофазных смесей // ПММ. 1970. т. 34. С. 1097-1112.

64. Соу С. Гидродинамика многофазных сред. М.: Мир, 1971. 525 с.

65. Фукс Н.А. Успехи механики аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 159 с. 66. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М. : Мир, 1976. 632 с.

67. Лятхер В.М., Гурин И.Н. Гидравлические характеристики потоков над поверхностью, покрытой травянистой растительностью // Водные ресурсы №3. 1978. С. 159-168.

68. 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. URL: <u>https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/03/IX-Conference-23-24-Florence-Italy.pdf</u>

69. Менжулин Г.В. Об аеродинамических параметрах растительного покрова. Тр.ГГО. 1972. Вып. 282. С. 133-143.

70. Марунич С. В. Характеристики турбулентности в условиях леса по градиентным и структурным наблюдениям. Тр. ГГИ. 1971. Вып. 198. С. 154-165.

71. Менжулин Г.В. К методике расчета метеорологического режима в растительном сообществе. Метеорология и гидрология. 1970. №2. С. 92-99.

72. Дубов А.С., Быкова Л.П., Марунич С.В. Турбулентность в растительном покрове. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 183 с.

73. Kadlec R. H. Overland flow in wetlands: vegetation resistance // Journal of Hidraulic engineering. Vol. 116 NO. 5. 1990. P. 691-706.

74. Симонов В.В. Модель приповерхностного турбулентного потока при наличии проницаемых препятствий // Физика пограничного слоя. *Труды ГГО*. 1984. Вып. 483. С. 22-35.

75. Kwang, Seok Yoon, Seung, Oh Lee, Seung, Ho Hong Time-averaged turbulent velocity flow field through the various bridge contractions during large flooding [TeκcT] // Water. 2019. Volume 11 (1). P. 143. URL: <u>https://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/143</u>

76. Славінська О. С., Бабич Ю.Д. Теоретичні засади розвитку деформацій на заплавних ділянках в зоні впливу мостових переходів / Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2009. Вип. 78. С. 3-8. URL: <u>http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi\_i\_stroitelstvo/78/003-008.pdf</u>

77. Kouchakzadeh S; Townsend R. D. Maximum scour depth at bridge abutments terminating in the floodplain zone. *Canadian Journal of Civil Engineering*; Ottawa. 1997. Vol. 24, Iss.6. P. 996-1006. URL: <u>https://search.proquest.com/openview/646836c370590887cdcef54739666592/1?pq-origsite=gscholar&cbl=47617</u>

78. Reinaldo Morales, Robert Ettema, M.ASCE Insights from Depth-Averaged Numerical Simulation of Flow at Bridge Abutments in Compound Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2013. Volume 139 Issue 5. URL: <u>https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000693</u>

79. Cardoso A.H., Bettess R. Effects of Time and Channel Geometry on Scour at Bridge Abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1999. Vol. 125. Issue 4. URL: <u>https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:4(388)</u>

80. Методика розрахунку розмивів дна та берегів перед гірських ділянок річок та місцевих розмивів біля річкових гідротехнічних споруд (МРР 218-02070915-231-3-2003) / розроб. В.Я. Савенко, О.С. Славінська, О.Є. Щодро К.: УКРАВТОДОР: НТУ, 2003. 45 с.

81. Takaaki, Okamoto, Hiroshi, Takebayashi, Michio, Sanjou, Ryuta, Suzuki, Keiichi, Toda Log jam formation at bridges and the effect on floodplain flow: A flume experiment // Journal of flood risk management, Vol. 13, Issue S1, January 2020, e12562. URL: <u>https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jfr3.12562</u>

82. Mahesh, R., Gautam, Kunio, Watanabe, Hiroyuki, Ohno Effect of bridge construction on floodplain hydrology – assessment by using monitored data and artificial neural network models // Journal of Hydrology. Vol. 292. Iss. 1-4. P. 182-197. URL: <u>https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169404000204</u>

83. Арефьев, Н.В., Михалев, М.А., Скворцова, О.С. Общий размыв русла и понижение уровня воды в нижнем бьефе водохранилищных гидроузлов //

Природообустройство. 2008. Вып. 1. С. 83-87. URL: <u>http://www.eecca-</u> water.net/file/Arefev-N.V.-Obschiy-razmyv-rusla.pdf

84. Neilands, R., Gjunsburgs, B., Neilands, R.R. Theoretical analysis of the method of scour development in time during the flood. URL: <u>https://www.academia.edu/download/31139247/pub4859.pdf</u>

85. FernandoDe Falco, RaffaeleMele The monitoring of bridges for scour by sonar and sedimetri / NDT & E International. Vol. 35, Issue 2. P. 117-123, URL: <u>https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963869501000317</u>

86. 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.

87. Кнороз В.С. Неразмывающие скорости для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие. Известия ВНИИГ., т. 59.,1958.

88. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков. Гидрометеоиздат, Л., 1954.

89. Кнороз В.С. О деформациях дна и о влиянии их на гидравлический режим потоков // В кн.: Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. М.: Гидрометеоиздат. 1960. Т. 5. С. 166 -175.

90. Шамов В.И. Формула для определения предельной скорости и расхода донных наносов. Труды ГГИ, вып. 36, 1952.

91. Мухамедов А.М., Ирмухамедов Х.А., Каюмов О.А. К вопросу оценки размывающей способности потока. Труды САНИИРИ, вып. 117, 1968.

92. Студеничников Б.И. Размывающая способность потока и методы русловых расчётов. Изд. литературы по строительству. М., 1964.

93. Гончаров В.Н. Движение наносов. ОНТИ, главная редакция строительной литературы, М.Л., 1938.

94. Трофимов Г.И. «О неразмывающей скорости для песчаных грунтов»., Гидротехническое строительство, № 1, 1956.

95. Леви И.И. Динамика русловых потоков. Госэнергоиздат. М.Л., 1957.

96. Егиазаров И.В. Горный русловой и селевой процесс. Классификация и расчёт. Сб. «Селевые потоки и горные русловые процессы». Изд-во АН Арм. ССР, Ереван, 1968.

97. Леви И.И. Движение речных потоков в нижних бьефах гидротехнических сооружений. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1955. 256 с.

98. Талмаза В.Ф., Крошкин А.Н. Гидроморфометрические характеристики горных рек., Изд-во «Кыргызстан», Фрунзе, 1968.

99. Талмаза В.Ф. Некоторые особенности движения влекомых наносов на реках горно-предгорной зоны // Динамика и термика горных рек. М. : Энергоиздат. 1973. С. 49-97.

100. Савенко В.Я. Математические модели и методы расчета квазитрехмерных безнапорных потоков. К. : Техніка, 1995. 184 с.

101. Аэро Э. Л., Булыгин А. Н., Кувшинский Е. В. Асимметрическая гидромеханика // Прикл. математика и механика. 1965. Вып. 2. С. 297-308.

102. Грин А. Е., Ибхди П. М. Динамическая теория взаимодействующих континуумов // Механика. 1966. № 3. С. 98-108.

103. Динамика сплошных сред в расчетах гидротехнических сооружений / Под ред. В. М. Лятхера, Ю. С. Яковлева. М.: Энергия, 1976. 397 с.

104. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М. : Гостехиздат, 1954. 795 с.

105. Рахматулин Х. А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред // Прикл. математика и механика. 1956. 20, вып. 2. С. 184-195.

106. Седов П. И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1973. Т. 1. 536 с.

107. Уоллис Т. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 440 с.

108. Файзуллаев Д. Ф. Гидродинамические модели движения смесей. – Ташкент: Фан, 1972. 200 с.

109. Фортье А. Механика суспензий. М.: Мир, 1971. 264 с.

110. Нигматулин Р. И. Пространственное осреднение в механике гетерогенных смесей // Проблемы осреднения и построения континуальных моделей механики сплошной среды. М., 1980. С. 53-77.

111. Криль С. И. О гравитационной теории переноса взвешенных твердых частиц турбулентным потоком жидкости // Гидромеханика. 1978. Вып. 37. С. 92-96.

112. Горбис 3. Р., Спокойный Ф. Е. Некоторые закономерности пульсационного движения твердой частицы в турбулентном потоке // Изв. АН СССР. Сер. МЖГ. 1969. № 1. С. 137-141.

113. Андерсон Д. Таннехилл Дж. Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: "Мир", 1990. Т. 1, 2. 725 с.

114. Шрайбер А. А. О влиянии частиц дискретной фазы на интенсивность турбулентности потока газовзвеси // Гидромеханика. 1980. Вып. 41. С. 100-103.

115. Яценко В. П., Миронова М. В. Расчет движения мелкодисперсных частиц в турбулентном пограничном слое // Турбулентные двухфазные течения и техника эксперимента. Таллин, 1985. С. 138-143.

116. ChcesewrightR., Doan K. S. Space-time correlation measurements in a turbulent natural convection boundary layer // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1978.21, N 7. P. 911- 21.

117. Fletcher R. D. Suspension stratification in the atmosphere // Phys. Fluids Suppl. 1967. 10, N 9, pt 2. P. 223-236.

118. Франкль Ф. И. Уравнения энергии для движения жидкости со взвешенными наносами // Докл. АН СССР. 1955. 102, № 5. С. 903.

119. Франкль Ф. И. К теории движения взвешенных насосов // Докл. АН СССР. 1953, 92, № 2. С. 247-250.

120. Франкль Ф. И. О системе уравнении движения взвешенных наносов
 // Исследование максимального стока, волнового воздействия и движения
 наносов. 1960. С. 132-137.

121. Oesterle B. Repartitions de concentration dans un ecoulement gaz - solide. Ori-gine et influence des forces de portance // C r. Acad. sci. B. 1979. 288, N 10. S. 167-170.

122. Славінська О.С. Метод прогнозування загальних руслових деформацій в двофазних потоках з пасмовим дном // Дороги і мости: Збірник наукових праць: Т.ІІ.К.:ДерждорНДІ, 2007. Вип. 7. С. 189 - 198.

123. Славінська О.С. Визначення загальних руслових деформацій під мостовим переходом на основі квазітривимірного методу розрахунку неоднорідних потоків // Автошляховик України. 2008. №6. С. 33-36.

124. Николаевский В. Н. Тензор напряжений и осреднение в механике сплошных сред // Прикл. математика и механика. 1975. 39, Вып. 2. С. 374-379.

125. Великанов М.А. Три типа движения речных наносов. Изд. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1963. №1. С. 122-128.

126. Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 191 с.

127. Гришин Н.Н. Механика придонных наносов. М.: Наука, 1982. 160 с.

128. Романовский В. В. Исследование начальной скорости влечения частиц наносов // Труды ГГИ. 1974. Вып. 210. С. 130-150.

129. Славінська О.С. Гідродинамічний опис структури придонної області турбулентного потоку з урахуванням кореляцій руху часток наносів // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Рівне НУВГП, 2006. Вип. 31. С. 278-286.

130. Славінська О.С. Метод прогнозування загальних і місцевих деформацій підмостових русел з урахуванням процесів у придонної області // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К. : НТУ, 2011. Вип. 81. С. 155-161.

131. Мирцхулава Ц. Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М. : Колос, 1967. 179 с. 132. Гаев Е.А., Никитин И.К. Гидродинамика потока при наличии легко проницаемой шероховатости. Ламинарный режим // Гидромеханика. 1982. Вып. 45. С. 65-73.

133. Гаев Е.А., Карчев Я.Я. Численное исследование несжимаемого пограничного слоя, сформированного легко проницаемой шероховатостью. Рукопись. Депонирована в УкрНИИ НТИ 22.02.1984. № 296. 11 с.

134. 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.

135. Шеренков И.А. Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков, М.: Энергия, 1978. 240 с.

136. 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: <u>https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208634</u>

137. 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. : HTY, 2020. С. 143. URL: <u>http://vstup.ntu.edu.ua/konf-76.pdf</u>

138. Савенко В.Я., Славинская Е.С. Моделирование процессов развития внутренних течений с учетом анизотропии открытых турбулентных потоков / К. : НТУ, 2004. 176 с.

139. Андреев О.В. Проектирование мостовых переходов. М.: Транспорт, 1980. 215 с.

140. Федотов Г. А. Изыскание и проектирование мостовых переходов. –
 М.: Изд. Центр «Академия», 2005. 304 с.

141. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1969. 742 с.

142. Журавлев М.М. Местный размыв у опор моста. М. : Транспорт, 1984. 111 с.

143. Андреев О.В., Федотов Г.А. Проектирование мостовых переходов с применением ЭЦВМ. М. : МАДИ, 1976. Ч. II. 120 с.

144. 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.

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

146. 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

147. Ткачук С.Г. Прогнозування руслових деформацій на мостовіх переходах. Частини 3 і 4. К. : НТУ, 2004. 98 с.

148. Башкевич І. В., Солодкий С. Й. Дослідження впливу трансформації руслової витрати на величину загального розмиву. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* : науково-технічний збірник. 2020. Вип. 107. С. 7-14.

149. 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. <u>doi.org/10.31435/rsglobal\_wos/31052020/7089</u>

ДОДАТОК А РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ З ВИЗНАЧЕННЯ ЗОНИ ВПЛИВУ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ ТА ПАРАМЕТРІВ РІЧКОВОГО ПОТОКУ

доба			1				1		<u> </u>	<sup>/</sup> клон вільної п	оверхні І <sub>хі</sub>										
	Зона розтікання Lz-с								Зона стиснения Lz-с												
1	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1,2	-2,25206E-06	-6,78528E-06	-1,13786E-05	-1,6004E-05	-2,0626E-05	-2,5194E-05	-2,9645E-05	-3,3895E-05	-3,7833E-05	-4,1315E-05	-0,00016455	-0,00013881	-0,00011574	-9,5007E-05	-7,6298E-05	-5,9364E-05	-4,399E-05	-2,9992E-05	-1,7212E-05	-5,5151E-06	
доба		Глибина h																			
1,2	0,594474075	0,594529402	0,594696099	0,59497564	0,59536883	0,59587555	0,59649451	0,59722282	0,59805554	0,598985	0,58438254	0,57120871	0,56022378	0,55120688	0,54396555	0,53833138	0,53415634	0,53130984	0,52967626	0,52915284	
доба										delta h	1										
1,2	-5,53274E-05	-0,000166697	-0,000279543	-0,00039319	-0,00050672	-0,00061896	-0,00072831	-0,00083271	-0,00092946	-0,001015	-0,01561746	-0,01317384	-0,01098493	-0,0090169	-0,00724133	-0,00563418	-0,00417504	-0,00284649	-0,00163358	-0,00052342	
доба									Кое	ріцієнт Шезі за	глибиною С <sub>ь</sub>										
1,2	13,68613073	13,68634301	13,68698251	13,6880546	13,6895618	13,691503	13,6938723	13,6966575	13,6998386	13,7033849	13,6471323	13,595369	13,5514402	13,5148419	13,4850873	13,4617074	13,4442505	13,4322832	13,4253912	13,4231791	
доба			Коефіцієнт	грансформації	і витрати русло	вого потоку в з	оні розтікання	Beta <sub>Zs</sub>					Коефіцієнт	г трансформац	ції витрати рус	лового потоку н	з зоні стисненн	я Betazc			
1,2	1,355130802	1,308656383	1,265263961	1,2246568	1,18657506	1,15079027	1,11710068	1,08532754	1,05531182	1,02691164	1,02691164	1,05531182	1,08532754	1,11710068	1,15079027	1,18657506	1,2246568	1,26526396	1,30865638	1,3551308	
доба				Витрата зап	плавних потокі	в в зоні розтікаї	ння Q <sub>s</sub>							Витрата з	аплавних пото	ків в зоні стисн	ення Q.		İ		
1,2	166,6070891	176,2575022	185,2679386	193,700016	201,607689	209,038401	216,034043	222,631737	228,864501	234,761797	234,761797	228,864501	222,631737	216,034043	209,038401	201,607689	193,700016	185,267939	176,257502	166,607089	
доба									Ви	грата більшої з	аплави Q <sub>f-pb0</sub>										
1,2	104,2609334	110,3000587	115,9386934	121,215397	126,163934	130,813994	135,191792	139,320559	143,220956	146,911421	146,911421	143,220956	139,320559	135,191792	130,813994	126,163934	121,215397	115,938693	110,300059	104,260933	
доба									Ви	грата меншої з	аплави Q <sub>f-ps0</sub>										
1,2	62,34615563	65,95744348	69,32924521	72,4846189	75,4437545	78,2244067	80,8422507	83,3111785	85,6435455	87,8503769	87,8503769	85,6435455	83,3111785	80,8422507	78,2244067	75,4437545	72,4846189	69,3292452	65,9574435	62,3461556	
доба									Коефіці	<mark>нт Шезі для бі.</mark>	льшої заплави	C <sub>ib</sub>	<u>I</u>	<u> </u>			<u> </u>	<u>_</u>			
1,2	488,0749057	297,472295	241,4565422	212,859491	195,156969	183,087431	174,432342	168,113373	163,578477	160,567273	80,45568	85,3997847	90,9751776	97,4379131	105,20866	115,034041	128,390771	148,72355	186,771974	311,889699	
доба									Коефіці	ент Шезі для м	еншої заплави	Cis									
1,2	345,2780824	210,4403697	170,8132315	150,582863	138,059595	129,521261	123,398404	118,928186	115,720071	113,58986	56,9166384	60,4142388	64,3584304	68,9303535	74,4276012	81,3783552	90,8272865	105,211273	132,127811	220,639652	
Табл	иня А.2 – (	Обчислен	і парамет	ри річкої	вого пото	ку після і	постої с	холинки 1	розрахун	кового па	волку										
доба																					
					Зона розті	кання Lz-с						Зона стиснення Lz-с									
1	10	0			7 6				2	1	1	2	3	4	5	-			0	10	
24,6	5 01160E 06	9	8	7	/   0	5	4	5	·	1	1	. 2	5			6	7	8	9	- v	
лоба	-5,24468E-06	-1,63715E-05	<b>8</b> -2,85712E-05	-4,1983E-05	5 -5,6766E-05	5 -7,3106E-05	-9,1217E-05	-0,00011135	-0,00013377	-0,00015883	-0,00036713	-0,00029631	-0,00023736	-0,00018783	-0,00014587	-0,00011005	7.9272E-05	<b>8</b> -5,2654E-05	-2,9501E-05	-9,2559E-06	
дооа	-5,24468E-06	-1,63715E-05	<b>8</b> -2,85712E-05	-4,1983E-05	5 -5,6766E-05	5 -7,3106E-05	-9,1217E-05	-0,00011135	-0,00013377	-0,00015883 Глиб	-0,00036713 ина h	-0,00029631	-0,00023736	-0,00018783	-0,00014587	-0,00011005	<b>7</b> -7,9272E-05	<b>8</b> -5,2654E-05	-2,9501E-05	-9,2559E-06	
24,6	5 -5,24468E-06 5 2,090879566	-1,63715E-05 2,091604401	2,093867001	-4,1983E-05 2,09781565	5 -5,6766E-05	5 -7,3106E-05 3 2,11146303	-9,1217E-05 2,12156654	-0,00011135 -2,13417306	-0,00013377 5 2,14956145	-0,00015883 <b>Глиб</b> 2,16804964	-0,00036713 ина h 2,16201395	2 -0,00029631 5 2,1394263	-0,00023736 2,12133266	-0,00018783 2,10701468	2,09589529	-0,00011005 2,08750605	7 -7,9272E-05 2,08146316	8 -5,2654E-05 2,0774494	-2,9501E-05 2,07520057	-9,2559E-06 2,074495	
24,6 доба	5 2,090879566	-1,63715E-05 2,091604401	8 -2,85712E-05 2,093867001	-4,1983E-05 2,09781565	5 -5,6766E-05	5         -7,3106E-05           3         2,11146303	-9,1217E-05	-0,00011135 -0,13417306	-0,00013377 2,14956145	-0,00015883 Глиб 2,16804964 delt	ина h 2,16201395 а h	2 -0,00029631 5 2,1394263	-0,00023736 2,12133266	-0,00018783 2,10701468	-0,00014587 2,09589529	6 -0,00011005 2,08750605	7 -7,9272E-05 2,08146316	8 -5,2654E-05 2,0774494	-2,9501E-05 2,07520057	-9,2559E-06	
24,6 доба 24,6	-5,24468E-06 2,090879566 -0,000724835	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626	8 -2,85712E-05 2,093867001 -0,00394865	-4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215	-5,6766E-05 -5,0766E-05 -0,00784524	-7,3106E-05           3         2,11146303           4         -0,0101035	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652	2,13417306 -0,01538838	2 -0,00013377 2,14956145 3 -0,01848819	-0,00015883 Глибі 2,16804964 delt -0,02195036	а h -0,00036713 ина h 2,16201395 а h -0,02798605	2 -0,00029631 2,1394263	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557	
24,6 доба 24,6 доба	-5,24468E-06 2,090879566 -0,000724835	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626	8 -2,85712E-05 2,093867001 -0,00394865	-4,1983E-05	5 -5,6766E-05 5 2,1036178 5 -0,00784524	-7,3106E-05           3         2,11146303           4         -0,0101035	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652	- 2,13417306 0,01538838	-0,00013377 2,14956145 -0,01848819 Koed	-0,00015883 Глиб 2,16804964 delt -0,02195036 оіцієнт Шезі	ина h 2,16201395 а h -0,02798605 за глибино	-0,00029631 2,1394263 -0,02258765	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557	
24,6 доба 24,6 доба 24,6 24,6	-5,24468E-06 2,090879566 -0,000724835 16,87770404	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626 16,87867905	8 -2,85712E-05 2,093867001 -0,00394865 16,88172077	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226	5 -5,6766E-05 5 2,1036178 5 -0,00784524 6 16,894798	-7,3106E-05           -3           2,11146303           -0,0101035           -3           16,905283	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383	2,13417306 -0,01538838 - 0,01538838	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koeq</li> <li>16,9557436</li> </ul>	-0,00015883 Глибі 2,16804964 delt -0,02195036 ріцієнт Шезі 16,9799628	-0,00036713       ина h       2,16201395       а h       -0,02798605       за глибино       16,9720751	2 -0,00029631 2,1394263 5 -0,02258765 10 Ch 16,942393	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376 16,8595873	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889	
24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b>	5,24468E-06 2,090879566 -0,000724835 5 16,87770404	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626 16,87867905 <b>Ko</b>	8 -2,85712E-05 2,093867001 -0,00394865 16,88172077 ефіцієнт тран	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 <b>HCФОРМАЦІЇ</b>	<ul> <li>5</li> <li>-5,6766Е-05</li> <li>5</li> <li>2,1036178</li> <li>5</li> <li>-0,00784524</li> <li>6</li> <li>16,894798</li> <li>витрати рус</li> </ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>-0,0101035</li> <li>16,905283</li> <li>2,1080F0 HOTOI</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 <b>ку в зоні ро</b>	с 2,13417306 2,13417306 с -0,01538838 с 16,9354524 Зтікання Ве	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koed</li> <li>16,9557436</li> <li>tazs</li> </ul>	-0,00015883 Глиб 2,16804964 delt -0,02195036 ріцієнт Шезі 16,9799628	а h -0,00036713 ина h 2,16201395 а h -0,02798605 за глибино 16,9720751	<ul> <li>-0,00029631</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>O Ch</li> <li>16,942393</li> <li>Kc</li> </ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 рефіцієнт тра	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ї витрати р</b>	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 услового пот	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 <b>70KY B 30Hi C</b>	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376 16,8595873 тиснення В	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889	
24,6 24,6 24,6 24,6 24,6 24,6 24,6	-5,24468E-06 2,090879566 -0,000724835 16,87770404 1,5560528	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626 16,87867905 Ko 1,474085844	8           -2,85712E-05           2,093867001           -0,00394865           16,88172077           ефіцієнт тран           1,400322186	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 нсформації 1,33358903	<ul> <li>5</li> <li>-5,6766E-05</li> <li>5</li> <li>2,1036178</li> <li>5</li> <li>-0,00784524</li> <li>6</li> <li>16,894798</li> <li><b>ВИТРАТИ РУС</b></li> <li>3</li> <li>1,27292696</li> </ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>-0,0101035</li> <li>16,905283</li> <li>2,1080F0 H0T01</li> <li>1,21754355</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 <b>Ky B 30Hi P0</b> 1,16677852	<ul> <li>3</li> <li>-0,00011135</li> <li>2,13417306</li> <li>-0,01538838</li> <li>-0,01538838</li> <li>16,9354524</li> <li>зтікання Ве</li> <li>1,12007731</li> </ul>	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koed</li> <li>16,9557436</li> <li>tazs</li> <li>1,07697073</li> </ul>	-0,00015883 Глибі 2,16804964 delt -0,02195036 оіцієнт Шезі 16,9799628 1,03705913	-0,00036713         una h         2,16201395         a h         -0,02798605         3a ГЛИБИНО         16,9720751         1,03705913	<ul> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>O Ch</li> <li>16,942393</li> <li>Kc</li> <li>1,07697073</li> </ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>9ефіцієнт тр</b> а 1,12007731	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ї витрати р</b> 1,21754355	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 <b>услового пот</b> 1,27292696	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 оку в зоні с 1,33358903	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376 16,8595873 <b>тиснення В</b> 1,40032219	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889 1,5560528	
24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b>	-5,24468E-06 2,090879566 -0,000724835 -0,00072485 -0,00075 -0,00075 -0,00075 -0,00075 -0,00075	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626 16,87867905 <b>Ko</b> 1,474085844	8           -2,85712E-05           2,093867001           -0,00394865           16,88172077           ефіціснт тран           1,400322186           E	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 <b></b>	<ul> <li>с.5,6766Е-05</li> <li>с.5,6766Е-05</li> <li>с.1036178</li> <li>с.</li></ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>-0,0101035</li> <li>16,905283</li> <li>2,1080F0 HOTOH</li> <li>1,21754355</li> <li>DKIB B 30HI PO</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 ку в зоні ро 1,16677852 зтікання Q	<ul> <li>3</li> <li>-0,000111135</li> <li>2,13417306</li> <li>-0,01538838</li> <li>-0,01538838</li> <li>16,9354524</li> <li>3тікання Ве</li> <li>1,12007731</li> <li>s</li> </ul>	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koed</li> <li>16,9557436</li> <li>tazs</li> <li>1,07697073</li> </ul>	Глиб       -0,00015883       Глиб       2,16804964       delt       -0,02195036       ріцієнт Шезі       16,9799628       1,03705913	а h -0,00036713 ина h 2,16201395 а h -0,02798605 за глибино 16,9720751 1,03705913	<ul> <li>-0,00029631</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>-0,02258765</li> <li>HO Ch</li> <li>16,942393</li> <li>KC</li> <li>1,07697073</li> </ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>рефіцієнт тр</b> а 1,12007731	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ї витрати р</b> 1,21754355 плавних по	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 услового пот 1,27292696 гоків в зоні о	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 <b>70KY B 30HI C</b> 1,33358903 <b>2TUCHEHHR (</b>	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376 16,8595873 <b>тиснення В</b> 1,40032219 <b>2</b> c	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889 1,5560528	
24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b>	-5,24468E-06 2,090879566 2,090879566 5 -0,000724835 5 16,87770404 5 1,5560528 1159,931886	<ul> <li>-1,63715E-05</li> <li>2,091604401</li> <li>-0,0022626</li> <li>16,87867905</li> <li>Ko</li> <li>1,474085844</li> <li>1203,762077</li> </ul>	8         -2,85712E-05         2,093867001         -0,00394865         16,88172077         eфiцiснт тран         1,400322186         E         1243,205718	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 нсформації 1,33358903 Витрата зап. 1278,88994	<ul> <li>5 -5,6766E-05</li> <li>5 2,1036178</li> <li>5 -0,00784524</li> <li>6 16,894798</li> <li><b>ВИТРАТИ РУС</b></li> <li>3 1,27292696</li> <li><b>ЛАВНИХ ПОТС</b></li> <li>4 1311,32777</li> </ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>2,0101035</li> <li>16,905283</li> <li>16,905283</li> <li>2,1080F0 H0T0H</li> <li>1,21754355</li> <li>9KiB B 30Hi P0</li> <li>1340,94294</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 ку в зоні ро 1,16677852 зтікання Q 1368,08852	<ul> <li>3</li> <li>-0,00011135</li> <li>2,13417306</li> <li>-0,01538838</li> /ul>	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koed</li> <li>16,9557436</li> <li>tazs</li> <li>1,07697073</li> <li>1416,11144</li> </ul>	-0,00015883         Глиб         2,16804964         delt         -0,02195036         Diцієнт Шезі         16,9799628         1,03705913         1437,45337	Image: colored system       -0,00036713         Image: colored system       2,16201395         Image: colored system       -0,02798605         Image: colored system <th><ul> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>-0,02258765<th>-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>eфiцiснт тр</b> 1,12007731 1393,06106</th><th>-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за 1368,08852</th><th>-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ї витрати р</b> 1,21754355 <b>плавних по</b> 1340,94294</th><th>6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 <b>услового пот</b> 1,27292696 <b>гоків в зоні с</b> 1311,32777</th><th>7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 0Ky B 30Hi C 1,33358903 THCHEHHS ( 1278,88994</th><th>8         -5,2654E-05         2,0774494         -0,00401376         16,8595873         тиснення В         1,40032219         2c         1243,20572</th><th>-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208</th><th>-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889 1,5560528 1159,93189</th></li></ul></th>	<ul> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>-0,02258765<th>-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>eфiцiснт тр</b> 1,12007731 1393,06106</th><th>-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за 1368,08852</th><th>-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ї витрати р</b> 1,21754355 <b>плавних по</b> 1340,94294</th><th>6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 <b>услового пот</b> 1,27292696 <b>гоків в зоні с</b> 1311,32777</th><th>7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 0Ky B 30Hi C 1,33358903 THCHEHHS ( 1278,88994</th><th>8         -5,2654E-05         2,0774494         -0,00401376         16,8595873         тиснення В         1,40032219         2c         1243,20572</th><th>-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208</th><th>-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889 1,5560528 1159,93189</th></li></ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>eфiцiснт тр</b> 1,12007731 1393,06106	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за 1368,08852	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ї витрати р</b> 1,21754355 <b>плавних по</b> 1340,94294	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 <b>услового пот</b> 1,27292696 <b>гоків в зоні с</b> 1311,32777	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 0Ky B 30Hi C 1,33358903 THCHEHHS ( 1278,88994	8         -5,2654E-05         2,0774494         -0,00401376         16,8595873         тиснення В         1,40032219         2c         1243,20572	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889 1,5560528 1159,93189	
24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b> 24,6 <b>доба</b>	-5,24468E-06 2,090879566 2,090879566 -0,000724835 -0,00072485	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626 16,87867905 K0 1,474085844 1203,762077	8           -2,85712E-05           2,093867001           -0,00394865           16,88172077 <b>ефіціснт тран</b> 1,400322186           1243,205718	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 <b>HC¢OPMALIÏ</b> 1,33358903 <b>BHTPATA 3AII.</b> 1278,88994	<ul> <li>-5,6766E-05</li> <li>-5,6766E-05</li> <li>2,1036178</li> <li>-0,00784524</li> <li>16,894798</li> <li>BUTPATU PYC</li> <li>1,27292696</li> <li>JABHUX ПОТС</li> <li>4 1311,32777</li> </ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>2,0101035</li> <li>-0,0101035</li> <li>16,905283</li> <li>2,1080F0 HOTOH</li> <li>1,21754355</li> <li>50KIB B 30HI PO</li> <li>7 1340,94294</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 ку в зоні ро 1,16677852 зтікання Q 1368,08852	<ul> <li>2,13417306</li> <li>2,13417306</li> <li>-0,01538838</li> <li>16,9354524</li> <li>371кання Ве</li> <li>1,12007731</li> <li>1393,06106</li> </ul>	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koed</li> <li>16,9557436</li> <li>tazs</li> <li>1,07697073</li> <li>1416,11144</li> <li>Вит</li> </ul>	-0,00015883         Глибі         2,16804964         delt         -0,02195036         ріцієнт Шезі         16,9799628         1,03705913         1437,45337         рата більшо	-0,00036713         ина h         2,16201395         а h         -0,02798605         за глибино         16,9720751         1,03705913         1437,45337         й заплави С	<ul> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>-0,02258765<th>-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>рефіцієнт тр</b> 1,12007731 1393,06106</th><th>-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за 1368,08852</th><th>-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ії витрати р</b> 1,21754355 <b>плавних по</b> 1340,94294</th><th>6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 ycлового пот 1,27292696 гоків в зоні с 1311,32777</th><th>7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 0Ky B 30Hi C 1,33358903 CTUCHEHHS ( 1278,88994</th><th>8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376 16,8595873 <b>ТИСНЕННЯ В</b> 1,40032219 <b>2</b>c 1243,20572</th><th>-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208</th><th>-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889 1,5560528 1159,93189</th></li></ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>рефіцієнт тр</b> 1,12007731 1393,06106	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за 1368,08852	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ії витрати р</b> 1,21754355 <b>плавних по</b> 1340,94294	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 ycлового пот 1,27292696 гоків в зоні с 1311,32777	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 0Ky B 30Hi C 1,33358903 CTUCHEHHS ( 1278,88994	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376 16,8595873 <b>ТИСНЕННЯ В</b> 1,40032219 <b>2</b> c 1243,20572	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889 1,5560528 1159,93189	
доба       24,6       доба	-5,24468E-06 2,090879566 2,090879566 -0,000724835 -0,000724 -0,000724835 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485	<ul> <li>-1,63715E-05</li> <li>2,091604401</li> <li>-0,0022626</li> <li>16,87867905</li> <li>Ko</li> <li>1,474085844</li> <li>1203,762077</li> <li>669,3300463</li> </ul>	8         -2,85712E-05         2,093867001         -0,00394865         16,88172077         eфiцicнт тран         1,400322186         1243,205718         691,2619667	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 <b>+cформації</b> 1,33358903 <b>Витрата зап.</b> 1278,88994 711,103531	<ul> <li>5 -5,6766E-05</li> <li>5 2,1036178</li> <li>5 -0,00784524</li> <li>6 16,894798</li> <li><b>ВИТРАТИ РУС</b></li> <li>3 1,27292696</li> <li><b>ЛАВНИХ ПОТС</b></li> <li>4 1311,32777</li> <li>1 729,139995</li> </ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>-0,0101035</li> <li>-0,0101035</li> <li>16,905283</li> <li><b>2,1080F0 H0T01</b></li> <li>1,21754355</li> <li><b>5 1,21754355</b></li> <li><b>5 30Hi po</b></li> <li>7 1340,94294</li> <li>7 745,606973</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 ку в зоні ро 1,16677852 зтікання Q 1368,08852 760,700782	<ul> <li>3</li> <li>-0,00011135</li> <li>2,13417306</li> <li>-0,01538838</li> /ul>	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koed</li> <li>16,9557436</li> <li>tazs</li> <li>1,07697073</li> <li>1416,11144</li> <li>But</li> <li>787,403055</li> </ul>	-0,00015883         Глибі         2,16804964         delt         -0,02195036         іцієнт Шезі         16,9799628         1,03705913         1437,45337         рата більшо         799,269848	-0,00036713         ина h         2,16201395         а h         -0,02798605         за глибино         16,9720751         1,03705913         1437,45337         й заплави Q         799,269848	<ul> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>-0,02258765<th>-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>&gt;cфiцiєнт тр</b> 1,12007731 1393,06106 774,586308</th><th>-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за 1368,08852 760,700782</th><th>-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 13 витрати р 1,21754355 плавних по 1340,94294 745,606973</th><th>6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 <b>услового пот</b> 1,27292696 <b>гоків в зоні с</b> 1311,32777</th><th>7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 0Ky B 30Hi C 1,33358903 2TUCHEHINS ( 1278,88994 711,103531</th><th>8         -5,2654E-05         2,0774494         -0,00401376         16,8595873         тиснення В         1,40032219         2c         1243,20572         691,261967</th><th>-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208 669,330046</th><th>-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889 11,5560528 1159,93189 644,959065</th></li></ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>&gt;cфiцiєнт тр</b> 1,12007731 1393,06106 774,586308	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за 1368,08852 760,700782	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 13 витрати р 1,21754355 плавних по 1340,94294 745,606973	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 <b>услового пот</b> 1,27292696 <b>гоків в зоні с</b> 1311,32777	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 0Ky B 30Hi C 1,33358903 2TUCHEHINS ( 1278,88994 711,103531	8         -5,2654E-05         2,0774494         -0,00401376         16,8595873         тиснення В         1,40032219         2c         1243,20572         691,261967	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208 669,330046	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889 11,5560528 1159,93189 644,959065	
доба       24,6       доба	5,24468E-06 2,090879566 2,090879566 -0,000724835 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485 -0,00075 -0,00075 -	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626 16,87867905 K0 1,474085844 1203,762077 6669,3300463	8           -2,85712E-05           2,093867001           -0,00394865           16,88172077           ефіціснт тран           1,400322186           1243,205718           691,2619667	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 HCформації 1,33358903 BHTPATA 3AIL 1278,88994 711,103531	<ul> <li>5 -5,6766E-05</li> <li>5 2,1036178</li> <li>5 -0,00784524</li> <li>6 16,894798</li> <li><b>ВИТРАТИ РУС</b></li> <li>3 1,27292696</li> <li><b>ЛАВНИХ ПОТС</b></li> <li>4 1311,32777</li> <li>1 729,139995</li> </ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>-0,0101035</li> <li>-0,0101035</li> <li>16,905283</li> <li>16,905283</li> <li>1,21754355</li> <li>0KIB B 30HI p0</li> <li>7 1340,94294</li> <li>7 745,606973</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 ку в зоні ро 1,16677852 зтікання Q 1368,08852 760,700782	<ul> <li>30,000111135</li> <li>2,13417306</li> <li>-0,01538838</li> <li>-0,01538838</li> <li>16,9354524</li> <li>37iкання Ве</li> <li>1,12007731</li> <li>1393,06106</li> <li>774,586308</li> </ul>	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koed</li> <li>16,9557436</li> <li>16,9557436</li> <li>16,9557436</li> <li>1416,11144</li> <li>But</li> <li>3 787,403055</li> <li>Вит</li> </ul>	-0,00015883 <b>Глиб</b> 2,16804964 <b>delt</b> -0,02195036 <b>DIUIENT IIIE3I</b> 16,9799628 1,03705913 1437,45337 <b>рата більшо</b> 799,269848 <b>рата меншо</b>	-0,00036713         ина h         2,16201395         а h         -0,02798605         за глибино         16,9720751         1,03705913         1437,45337         й заплави ( 799,269848         й заплави ( 3 аплави ( 2 аплави (	<ul> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>-0,02258765</li> <li>-0,02258765</li> <li>16,942393</li> <li>Kc</li> <li>1,07697073</li> <li>1,07697073</li> <li>1416,11144</li> <li>Pr-pb0</li> <li>787,403055</li> <li>Pr-ps0</li> </ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>сфіцієнт тр</b> 1,12007731 1393,06106 774,586308	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за 1368,08852 760,700782	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ї витрати р</b> 1,21754355 <b>плавних по</b> 1340,94294 745,606973	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 yc.noBoro IIOT 1,27292696 TOKIB B 30HI 0 1311,32777 729,139995	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 0Ky B 30Hi C 1,33358903 2THCHEHHS ( 1278,88994 711,103531	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376 16,8595873 TUCHEHHS 1,40032219 2c 1243,20572 691,261967	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208 669,330046	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 16,8555889 16,8555889 1,5560528 1159,93189 644,959065	
доба       24,6	-5,24468E-06 2,090879566 2,090879566 5 -0,000724835 5 16,87770404 5 1,5560528 6 1159,931886 5 6 44,9590647 5 5 514,9728215	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626 16,87867905 Ko 1,474085844 1203,762077 669,3300463 534,4320303	8           -2,85712E-05           2,093867001           -0,00394865           16,88172077           eфiцicнт тран           1,400322186           1243,205718           691,2619667           551,9437509	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 <b>+cформації</b> 1,33358903 <b>Витрата зап.</b> 1278,88994 711,103531 567,786409	<ul> <li>5</li> <li>-5,6766E-05</li> <li>5</li> <li>2,1036178</li> <li>5</li> <li>-0,00784524</li> <li>6</li> <li>16,894798</li> <li><b>ВИТРАТИ РУС</b></li> <li>3</li> <li>1,27292696</li> <li><b>ЛАВНИХ ПОТС</b></li> <li>4</li> <li>1311,32777</li> <li>1</li> <li>729,139995</li> <li>9</li> <li>582,187771</li> </ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>-0,0101035</li> <li>-0,0101035</li> <li>16,905283</li> <li>16,905283</li> <li>1,21754355</li> <li>1,21754355</li> <li>1,21754355</li> <li>1,340,94294</li> <li>7</li> <li>1340,94294</li> <li>5</li> <li>745,606973</li> <li>595,335964</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 ку в зоні ро 1,16677852 зтікання Q 1368,08852 760,700782 607,387739	<ul> <li>3.3</li> <li>-0,000111135</li> <li>2,13417306</li> <li>2,13417306</li> <li>-0,01538838</li> <li>16,9354524</li> <li>37iкання Ве</li> <li>1,12007731</li> <li>1393,06106</li> <li>774,586308</li> <li>618,474751</li> </ul>	соросси и сорос	Image: colored system         -0,00015883         Глибі         2,16804964         delt         -0,02195036         DinicHT IIIesi         16,9799628         1,03705913         1437,45337         рата більшо         799,269848         рата меншо         638,183524	-0,00036713         ина h         2,16201395         a h         -0,02798605 <b>за глибино</b> 16,9720751         11,03705913         1437,45337 <b>заплави (</b> 799,269848 <b>заплави (</b> 638,183524	<ul> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>-0,02258765</li> <li>16,942393</li> <li>KC</li> <li>16,942393</li> <li>KC</li> <li>1,07697073</li> <li>1,07697073</li> <li>1416,11144</li> <li>P.pb0</li> <li>787,403055</li> <li>P.ps0</li> <li>628,708387</li> </ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>eфiцicнт тр</b> 1,12007731 1393,06106 774,586308 618,474751	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 <b>ансформаці</b> 1,16677852 <b>Витрата за</b> 1368,08852 760,700782 607,387739	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ї витрати р</b> 1,21754355 <b>плавних по</b> 1340,94294 745,606973	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 yc.10B0F0 H0T 1,27292696 FOKIB B 30HI ( 1311,32777 729,139995 582,187771	7 -7,9272Е-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 оку в зоні с 1,33358903 стиснення ( 1278,88994 711,103531 567,786409	8         -5,2654E-05         2,0774494         -0,00401376         16,8595873         тиснення В         1,40032219         2c         691,261967         551,943751	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208 669,330046 534,43203	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 -0,00070557 16,8555889 11,5560528 1159,93189 644,959065 514,972821	
доба       24,6       доба	-5,24468E-06 2,090879566 2,090879566 -0,000724835 -0,000724 -0,000724835 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626 16,87867905 K0 1,474085844 1203,762077 6669,3300463 534,4320303	8           -2,85712E-05           2,093867001           -0,00394865           16,88172077           eфiцiснт тран           1,400322186           1243,205718           691,2619667           551,9437509	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 HCΦΟΡΜΑЦΙΪ 1,33358903 BHTPATA 3AL 1278,88994 711,103531 567,786409	<ul> <li>5</li> <li>-5,6766E-05</li> <li>5</li> <li>2,1036178</li> <li>5</li> <li>-0,00784524</li> <li>6</li> <li>16,894798</li> <li><b>ВИТРАТИ РУС</b></li> <li>3</li> <li>1,27292696</li> <li><b>ЛАВНИХ ПОТО</b></li> <li>4</li> <li>1311,32777</li> <li>1</li> <li>729,139995</li> <li>9</li> <li>582,187771</li> </ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>-0,0101035</li> <li>16,905283</li> <li>16,905283</li> <li>1,21754355</li> <li>1,21754355</li> <li>1,21754355</li> <li>1,340,94294</li> <li>745,606973</li> <li>595,335964</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 <b>Ky B 30Hi po</b> 1,16677852 <b>3TiKaHHЯ Q</b> 1368,08852 760,700782 607,387739	<ul> <li>30,000111135</li> <li>2,13417306</li> <li>2,13417306</li> <li>-0,01538838</li> <li>16,9354524</li> <li>37iкання Ве</li> <li>1,12007731</li> <li>1393,06106</li> <li>774,586308</li> <li>618,474751</li> </ul>	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koed</li> <li>16,9557436</li> <li>16,9557436</li> <li>1416,11144</li> <li>Вит</li> <li>787,403055</li> <li>Вит</li> <li>628,708387</li> <li>Коефіціє</li> </ul>	I         -0,00015883         Глибі         2,16804964         delt         -0,02195036         Diцієнт Шезі         16,9799628         1,03705913         1437,45337         рата більшо         799,269848         рата меншо         638,183524         нт Шезі для	-0,00036713         ина h         2,16201395         а h         -0,02798605         за глибино         16,9720751         1,03705913         1437,45337         й заплави ( 799,269848         аллави ( 638,183524         більшої зап	<ul> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>Ch</li> <li>16,942393</li> <li>Kc</li> <li>1,07697073</li> <li>1,07697073</li> <li>1416,11144</li> <li>P-pb0</li> <li>787,403055</li> <li>P-ps0</li> <li>628,708387</li> <li>LJIABH Cib</li> </ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>сфіцієнт тра</b> 1,12007731 1393,06106 774,586308 618,474751	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за 1368,08852 760,700782 607,387739	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>ї витрати р</b> 1,21754355 <b>плавних по</b> 1340,94294 745,606973	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 <b>услового пот</b> 1,27292696 <b>гоків в зоні с</b> 1311,32777 729,139995 582,187771	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 <b>70KY B 30Hi C</b> 1,33358903 <b>2TUCHENHS (</b> 1278,88994 711,103531 567,786409	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376 16,8595873 TUCHEHHY B 1,40032219 2c 1243,20572 691,261967 551,943751	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208 669,330046 534,43203	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 -0,00070557 16,8555889 11,5560528 1159,93189 644,959065 514,972821	
доба       24,6	5,24468E-06 2,090879566 2,090879566 -0,000724835 -0,000 -	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626 16,87867905 <b>Ko</b> 1,474085844 1203,762077 669,3300463 534,4320303 2223,1690854	8           -2,85712E-05           2,093867001           -0,00394865           16,88172077           ефіцієнт тран           1,400322186           1243,205718           691,2619667           551,9437509           174,4680873	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 <b></b>	<ul> <li>5</li> <li>-5,6766E-05</li> <li>5</li> <li>2,1036178</li> <li>5</li> <li>-0,00784524</li> <li>6</li> <li>16,894798</li> <li><b>ВИТРАТИ РУС</b></li> <li>3</li> <li>1,27292696</li> <li><b>ЛАВНИХ ПОТС</b></li> <li>4</li> <li>1311,32777</li> <li>1</li> <li>729,139995</li> <li>9</li> <li>582,187771</li> <li>4</li> <li>130,558621</li> </ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>-0,0101035</li> <li>16,905283</li> <li>16,905283</li> <li>1,21754355</li> <li>1,21754355</li> <li>1,340,94294</li> <li>745,606973</li> <li>595,335964</li> <li>117,644488</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 ку в зоні ро 1,16677852 зтікання Q 1368,08852 760,700782 607,387739	<ul> <li>-0,000111135</li> <li>2,13417306</li> <li>2,13417306</li> <li>-0,01538838</li> <li>16,9354524</li> <li>37iкання Ве</li> <li>1,12007731</li> <li>1,12007731</li> <li>1393,06106</li> <li>774,586308</li> <li>618,474751</li> <li>99,0309472</li> </ul>	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koed</li> <li>16,9557436</li> <li>16,9557436</li> <li>1416,11144</li> <li>Bur</li> <li>787,403055</li> <li>Bur</li> <li>628,708387</li> <li>Koeфiцic</li> <li>91,8433088</li> </ul>	-0,00015883         Глиб         2,16804964         delt         -0,02195036 <b>inii∈нт Шезі</b> 16,9799628         11,03705913         1437,45337         рата більшо         799,269848         рата меншо         638,183524         нт Шезі для         85,5598917	-0,00036713         ина h         2,16201395         a h         -0,02798605         3a глибино         16,9720751         16,97207513         11,03705913         1437,45337         й заплави Q         638,183524         більшої зап         56,2758436	<ul> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>O Ch</li> <li>16,942393</li> <li>KC</li> <li>1,07697073</li> <li>1,07697073</li> <li>1416,11144</li> <li>P-pb0</li> <li>787,403055</li> <li>Peps0</li> <li>628,708387</li> <li>LJIABU Cib</li> <li>61,7107757</li> </ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>сфіцієнт тр</b> 1,12007731 1393,06106 774,586308 618,474751 67,8275594	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 <b>ансформаці</b> 1,16677852 <b>Витрата за</b> 1368,08852 760,700782 607,387739	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 <b>1</b> 6,8844452 <b>1</b> 6,8844452 <b>1</b> 6,8844452 <b>1</b> 6,8844452 <b>1</b> 6,8844452 <b>1</b> 16,8844452 <b>1</b> 1754355 <b>1</b> 175455 <b>1</b> 175455 <b>1</b> 175455 <b>1</b> 1754555 <b>1</b> 175455 <b>1</b> 1754555 <b>1</b> 1754555 <b>1</b> 175555 <b>1</b> 1755555555555555555555555555555555555	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 yc.10B0F0 H0T 1,27292696 FOKIB B 30HI ( 1311,32777 729,139995 582,187771 582,187771	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 0Ky B 30Hi C 1,33358903 2TUCHEHH9 ( 1278,88994 711,103531 567,786409 107,748088	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376 16,8595873 TUCHEHHS B 1,40032219 2c 1243,20572 691,261967 551,943751 128,518759	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208 669,330046 534,43203 166,249997	-9,2559E-06 2,074495 -0,00070557 -0,00070557 16,8555889 11,5560528 1159,93189 644,959065 514,972821 285,996033	
доба       24,6       доба	5,24468E-06 2,090879566 2,090879566 -0,000724835 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485 -0,00072485 -0,0000	-1,63715E-05 2,091604401 -0,0022626 16,87867905 <b>Ko</b> 1,474085844 1203,762077 669,3300463 534,4320303 2223,1690854	8         -2,85712E-05         2,093867001         -0,00394865         16,88172077         eфiцicнт тран         1,400322186         1243,205718         691,2619667         551,9437509         174,4680873	7 -4,1983E-05 2,09781565 -0,00580215 16,8870226 <b>HCΦΟΡΜΑЦΙΪ</b> 1,33358903 <b>BHTPATA 3AII.</b> 1278,88994 711,103531 567,786409 148,059424	<ul> <li>5</li> <li>-5,6766E-05</li> <li>5</li> <li>2,1036178</li> <li>5</li> <li>-0,00784524</li> <li>6</li> <li>16,894798</li> <li><b>ВИТРАТИ РУС</b></li> <li>3</li> <li>1,27292696</li> <li><b>ЛАВНИХ ПОТС</b></li> <li>4</li> <li>1311,32777</li> <li>1</li> <li>729,139995</li> <li>9</li> <li>582,187771</li> <li>4</li> <li>130,558621</li> </ul>	<ul> <li>-7,3106E-05</li> <li>-7,3106E-05</li> <li>2,11146303</li> <li>-0,0101035</li> <li>-0,0101035</li> <li>16,905283</li> <li><b>2,1080F0 H0T01</b></li> <li>1,21754355</li> <li><b>50KIB B 30HI P0</b></li> <li>1,21754355</li> <li><b>50KIB B 30HI P0</b></li> <li>745,606973</li> <li>595,335964</li> <li>117,644488</li> </ul>	4 -9,1217E-05 2,12156654 -0,01260652 16,9187383 <b>Ky B 30Hi PO</b> 1,16677852 <b>3TiKahh9</b> 1368,08852 <b>3TiKahh9</b> (0,7,00782) 607,387739 107,451833	<ul> <li>2,13417306</li> <li>2,13417306</li> <li>2,13417306</li> <li>-0,01538838</li> <li>16,9354524</li> <li>37iкання Ве</li> <li>1,12007731</li> <li>1393,06106</li> <li>774,586308</li> <li>618,474751</li> <li>99,0309472</li> </ul>	<ul> <li>-0,00013377</li> <li>-0,00013377</li> <li>2,14956145</li> <li>-0,01848819</li> <li>Koed</li> <li>16,9557436</li> <li>tazs</li> <li>1,07697073</li> <li>1416,11144</li> <li>But</li> <li>787,403055</li> <li>But</li> <li>628,708387</li> <li>Koediuic</li> <li>91,8433088</li> <li>Koediuic</li> </ul>	I         -0,00015883         Глиб         2,16804964         delt         -0,02195036         initent Illesi         16,9799628         1,03705913         1437,45337         рата більшо         799,269848         рата меншо         638,183524         нт Шезі для         85,5598917         нт Шезі для	-0,00036713         ина h         2,16201395         а h         -0,02798605         за глибино         16,9720751         11,03705913         1437,45337         й заплави Q         799,269848         3аллави Q         638,183524         більшої зап         56,2758436	<ul> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>2,1394263</li> <li>-0,02258765</li> <li>Ch</li> <li>16,942393</li> <li>Kc</li> <li>1,07697073</li> <li>1416,11144</li> <li>P-pb0</li> <li>787,403055</li> <li>P-ps0</li> <li>628,708387</li> <li>LJави Сіь</li> <li>61,7107757</li> <li>LJави Сіз</li> </ul>	-0,00023736 2,12133266 -0,01809364 16,9184275 <b>cdpiuicHTTp</b> 1,12007731 1393,06106 774,586308 618,474751 67,8275594	-0,00018783 2,10701468 -0,01431797 16,8993418 ансформаці 1,16677852 Витрата за 1368,08852 760,700782 607,387739 607,387739	-0,00014587 2,09589529 -0,01111939 16,8844452 1,21754355 плавних по 1340,94294 745,606973 595,335964 83,2853902	6 -0,00011005 2,08750605 -0,00838924 16,8731625 <b>услового пот</b> 1,27292696 <b>гоків в зоні с</b> 1311,32777 729,139995 582,187771 582,187771	7 -7,9272E-05 2,08146316 -0,0060429 16,8650119 0Ky B 30Hi C 1,33358903 711,103531 711,103531 567,786409 107,748088	8 -5,2654E-05 2,0774494 -0,00401376 16,8595873 <b>тиснення В</b> 1,40032219 2c 1243,20572 691,261967 551,943751 128,518759	-2,9501E-05 2,07520057 -0,00224883 16,8565442 etazc 1,47408584 1203,76208 669,330046 534,43203 166,249997	-9,2559E-06 -9,2559E-06 -0,00070557 -0,00070557 16,8555889 11,5560528 1,5560528 -0,00070557 -0,0007057 -0,0007057 -0,0007057 -0,0007057	

## Таблиця А.1 – Обчислені параметри річкового потоку після першої сходинки розрахункового паводку



Рисунок А.1 – Розрахунок середньої швидкості заплавного потоку V<sub>f-pb(s)cepi</sub>: а) після першої сходинки розрахункового паводку; б) після шостої сходинки розрахункового паводку



Рисунок А.2 – Розрахунок Т - параметру стійкості частки









Рисунок А.4 – Розрахунок  $\Delta$  – висоти донних форм, м



Рисунок А.5 – Розрахунок діаметра зважених наносів



РОЗРАХУНКОВІ КРОКИ ПО ШИРИНІ ПОТОКУ

Рисунок А.6 – Розрахунок гідравлічної крупності зважених наносів W<sub>z</sub>



Рисунок А.7 – Розрахунок параметра зважування  $z_{i,j}$  часток наносів



Рисунок А.8 – Розрахунок *F*-фактору

ДОДАТОК Б ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

*<u><b>ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО</u>* АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ (VKPAETODOP) « 11» 20/90 03680, МСІ1 м. Київ, вул. Фізкультури, 9

#### **ДОВІДКА**

### про використання результатів науково-дослідної роботи

Результати науково-дослідної роботи здобувача кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету Цинки Анатолія Олександровича у вигляді Зміни № 1 до ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина II. Будівництво», яка була розроблена на замовлення Державного автомобільних агентства доріг України (Укравтодор) та наразі використовується у практиці проектування мостових переходів на автомобільних дорогах загального користування.

Начальник Відділу інноваційного розвитку

OKYME

Олександр ТИМОЩУК

## ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ МОДО ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО-УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ІНСТИТУТ З ПРОЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ДОРОЖНЬОГО ГОСПОДАРСТВА УКРДІПРОДОР 03037, м. Київ, Повітрофлотський пр-кт, 39/1 тел./факс: (044) 206-64-30 е-mail: okt@diprodor.com

"<u>12</u>"\_\_\_\_06 2020р. на №\_\_\_\_\_від

## **ДОВІДКА**

#### про використання результатів науково-дослідної роботи

Результати досліджень, які відображені в науково-дослідній роботі здобувача кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету Цинки Анатолія Олександровича «Удосконалення розрахунку розмивів на заплавах в зоні впливу мостових переходів», використані при виконанні розрахунків деформацій на заплавах у проекті поточного середнього ремонту мостового переходу через р. Сіверський Донець біля с. Брусівка на автомобільній дорозі Т-05-14, км 83+575, Донецька область.

Проведені розрахунки дали можливість на стадії проектування зазначеного мостового переходу визначити параметри загального та максимального розмиву на заплавних ділянках, що сприятиме підвищенню надійності мостової споруди.

Економічний ефект від впровадження результатів роботи для зазначеного об'єкта становить 530 (п'ятсот тридцять) тис. грн.





ТОВ "Інститут комплексного проектування об'єктів будівництва"

03057, м. Київ, Україна, вул. Дегтярівська, 33а Код ЕДРПОУ 39994993, ІПН 399949926515 Тел.:+38 044 331 18 43

р/р 26004056113805 в ПАТ КБ "Приватбанк", м.Київ МФО 380775

№ 216 від 26.06.2020 р.

office@icdi.biz www.icdi.biz

Limited Liability Company "Integrated Construction Design Institute"

03057, Kyiv, Ukraine, 33A Dehtiarivska street EDRPOU code 39994993, ITN 399949926515 Tel.:+38 044 331 18 43



qualityaustri

account 26009056111943 (EUR), account 26001056112843 (USD) Bank Privatbank, Dnipro, Ukraine, SWIFT code PBANUA2X

### **ДОВІДКА**

про впровадження результатів наукових досліджень здобувача кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету Цинки Анатолія Олександровича

Даною довідкою засвідчується, що результати наукових досліджень Цинки Анатолія Олександровича щодо закономірностей розвитку деформацій на заплавних ділянках мостових переходів та розрахунку параметрів загального та максимального розмивів на заплавах отримали практичне застосування при проектуванні та виконанні робіт з реконструкції та капітального ремонту мостових переходів на автомобільних дорогах загального користування державного значення України у Львівській, Полтавській областях, які виконувались протягом 2019-2020 років.

Головний інженер ТОВ «Інститут комплексного проектування об'єктів будівництва», к.т.н., ст.наук.співр.



Андрій ФАЛЬ



#### УКРАВТОДОР

## СЛУЖБА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ У КИЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

вул. Народного ополчення, 11-А, м.Київ, 03151, тел.(044) 249-86-95, факс (044) 200-04-70 e-mail: <u>kievoad@ukr.net</u>, веб-сайт: <u>http://kiev.ukravtodor.gov.ua</u>, код ЄДРПОУ 26345736

16.07. do20 No Dec 366 на № від

## **ДОВІДКА**

#### про впровадження результатів роботи

Даною довідкою засвідчується, що результати досліджень, відображені в дисертаційній роботі Цинки Анатолія Олександровича на тему «Удосконалення розрахунку розмивів на заплавах в зоні впливу мостових переходів», використані для прогнозування деформацій на заплавах мостових переходів, проєктна документація на капітальний ремонт яких наразі розробляється на замовлення Служби автомобільних доріг у Київській області.

Проведені розрахунки дозволили визначити глибину закладання опор мостових споруд, способи і матеріали їх укріплення, і тим самим зменшити витрати на ремонти та експлуатаційне утримания цих мостових переходів.

Заступник начальника з розвитку доріг

О.М. Кошель

Міністерство освіти і науки України НАШОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ **YHIBEPCHTET** 2070915 20 20 p. 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1 тел.: 280-82-03

#### **ДОВІДКА**

#### про впровадження результатів науково-дослідної роботи

Результати дисертаційної роботи Цинки А.О. за темою «Удосконалення методу розрахунку розмивів на заплавах в зоні впливу мостових переходів» впроваджено у навчальний процес, а саме при викладанні 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 пересічень", для студентів переходів і тунельних спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП "Мости та транспортні тунелі", а також у дипломному проектуванні.

Проректор з навчальної роботи НТУ,	
професор	О.К. Грищук
I DA	
Завідувач кафедри мостів, тунелів	/
та гідротехнічних споруд НТУ, у инника	e -
професор	А.М. Онищенко

## **ДОДАТОК В**

# СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ 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: <u>https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208634</u>

## 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: <u>https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.270</u>

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: <u>https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.198</u>

## 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. URL: <u>https://isg-</u> 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. URL: <u>https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-Australia.pdf</u>

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. : HTY, 2020. С. 143. URL: <u>http://vstup.ntu.edu.ua/konf-76.pdf</u>

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.