

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КПІ"

На правах рукопису  
УДК 532:543

ТКАЧУК СЕРГІЙ ГРИГОРОВИЧ

ОСНОВИ АНАЛІТИЧНОГО ПРОГНОЗУ РУСЛОВИХ ДІЛОРМАЦІЙ  
ПРИ СТИСНЕННІ РІЧОК ГІДРОТЕХНІЧНИМИ І ТРАНСПОРТНИМИ  
СПОРУДАМИ

05.14.07 - Механіка рідини, газу і плазми

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

КИЇВ 1995

Дисертація в рукописі  
Робота виконана  
університеті.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00761610 (L)

Науковий консультант - заслужений діяч науки і техніки,  
доктор технічних наук, професор  
БОЛЬШАКОВ ВАЛЕРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор  
КРИЛЬ СТЕПАН ІВАНОВИЧ

- доктор технічних наук, професор  
ШЕРЕНКОВ ІГОР АРКАДІЙОВИЧ

- доктор фізико-математичних наук,  
професор ШМАКОВ ЮРІЙ ІВАНОВИЧ

Провідня організація - "УКРВОДПРОЕКТ" Державного  
комітету України по водному господарству, м. Київ.

З'ясування відбувається "21" грудня 1995 р. о 15 годині  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.13 у  
Національному технічному університеті України "КПІ" за  
адресою:

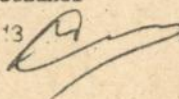
252056, м. Київ, пр-кт Лермонтова, 37, корпус 5, ауд. 406

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного  
технічного університету України.

Автореферат розісланий "23" *листопада* 1995 р.

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради Д 01.02.13

 Рожалін В.П.

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В гідротехнічному і транспортному будівництві раз за разом виликає потреба в стисненні річкового потоку поперечними спорудами, розташованими на заплавах чи в самому руслі. Серед них, як приклад, можна навести: півзагати, будівельні перемички, захисні дамби забудованої території і мостові переходи. Всі перелічені випадки поперечного стиснення потоку зводяться до однієї розрахункової схеми, що найбільш виразно відзеркаляється саме на мостових переходах, які за способом визначення своїх генеральних розмірів являють собою гідротехнічні споруди на автомобільних дорогах та залізницях. Тому з метою скорочення викладу, головна увага надалі зосереджується на руслових деформаціях при стисненні річок мостовими переходами.

Будівництво доріг пов'язано з подоланням різної величини річок та водотоків, через які споруджуються мостові переходи. На терені України нараховується близько 73 тис. водотоків, серед яких 131 мають довжину більше 100 км. Тому цілком природно, що розвиток дорожнього будівництва передбачає спорудження великої кількості мостових переходів. Адже, щоб довести густину мережі автомобільних доріг до 40...50 км. на 1000 кв. км. площі території, яка на думку В.Ф.Бабкова достатня для України, ще доведеться збудувати від 11 до 17 тис. км. доріг загального користування з твердим покриттям.

Виконання таких обсягів дорожнього будівництва вимагає значних коштів. Але при цьому слід взяти до уваги, що зараз внаслідок бездоріжжя питома вага транспортних витрат лише у олійськогосподарській продукції сягає 40%, а прями збитки -

15%. Таким чином, вирішення транспортної проблеми є одним з актуальніших питань нашої держави. Складовою часткою цієї проблеми є вдосконалення прогнозів руслових деформацій на мостових переходах.

Тема дисертації виходить з подальшого розвитку багат річної науково-дослідної роботи під загальною назвою "Гідравлічні дослідження і розрахунки відкритих потоків при неусталеному русі в нестиснених руслах і при плановому їх стисненні", що виконувалась на кафедрі гідравліки Київського автомобільно-дорожнього інституту і була віднесена Президією АН УРСР до числа найважливіших (N 398 від С. 11.75 р.).

Наукова актуальність теми знайшла своє місце в рішеннях V щорічного гідрологічного з'їзду (1986 р.): " - продовжити удосконалення теоретичних засад системи руслових прогнозів і розробку методів окремих прогнозів руслових деформацій на різних структурних рівнях, а також для різних видів інженерних споруд".

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи полягає у створенні на прикладі мостових переходів аналітичної основи для прогнозів загального розмиву при плановому стисненні річок з виходом на інженерні рішення.

З урахуванням типізації річок за русловими процесами, задачі досліджень доцільно розглянути окремо для рівнинних і блукаючих річок. У зв'язку з цим задачі досліджень для рівнинних річок ствляються у такому порядку:

- встановити характер трансформації руслової витрати в зоні впливу мостових переходів;

- розробити методик визначення розподілу загальної витрати води між отвором і переливною частиною низьководних

мостових переходів;

- провести експериментальні і натурні обґрунтування отриманих залежностей трансформації та розподілу потоку;

- скласти для кожного розрахункового випадку математичну модель загальних руслових деформацій;

- вивести квазілінійні рівняння руслових деформацій з урахуванням конкретних умов на переході;

- розробити методику розв'язання задачі Коші для верхньої границі загального розмиву та багаторічного прогнозу руслових деформацій в зоні впливу мостових переходів;

- виконати аналіз отриманих рішень для дослідження:

а) залежності трансформації руслової витрати від загального розмиву під мостом;

б) впливу характеру зміни руслової витрати вдовж ріки на величину загального розмива;

в) залежності часу настання піку розмива від форми інтегральної функції гідрографа;

г) відносного впливу основних чинників загального розмиву на його величину;

е) вірогідності отриманих розрахункових залежностей.

Для мостових переходів через білуканчі річки зміст основних задач досліджень, такий:

- обґрунтувати раціональні обриси виправних дамб;

- отримати аналітичний зв'язок рівняння балансу наносів для умов зміни ширини зони регулювання по узгальненому закону;

- з'ясувати вплив параметрів обрису виправних дамб на величину загального розмиву під мостом;

- виконати інтегрування неоднорідного рівняння деформацій, яке враховує можливий для блукаючих річок дефіцит транспортуючої спроможності потоку.

Методи досліджень. Мета дисертаційної роботи і обумовлені нею задачі досліджень знаходять ся в колі проблем, що пов'язані з взаємодією потоку рідини з еродованим руслом. Тому методика їх вирішення зумовлена методами властивими динаміці руслових потоків та теорії руслових процесів. Ця нова наукова галузь, що вичлила і сформувалась в останні десятиліття, використовує теорії і методи в першу чергу, так і споріднених дисциплін, як механіка рідини, геоморфологія, гідрологія.

Проте численні способи перенесення законів гідромеханіки на річки не дозволяють покищо одержати для них строгих рішень. Це обумовлено тим, що всі закони механіки рідини виведені за умов сталості границь потоку. Річки ж характеризуються помітною змінністю своїх границь, спричиненою рухливістю русел і заплав, що відбувається по властивим їм специфічним законам, які досліджуються суміжними науками. Тому при розв'язанні задач про розвиток руслових деформацій в часі і вдовж русла обов'язково належить розглядати разом гідромеханічний та гідроморфологічний аспекти проблеми.

Виходячи з цього в дисертації нарівні з методами механіки рідини (математичне та фізичне моделювання) застосовуються здобутки гідроморфологічної теорії руслового процесу, наприклад, концепції його дискретності, структурованості та стхастичності. При цьому для розв'язання систем рівнянь руслового процесу і окремих гідравлічних задач використані виключно аналітичні методи,

вірогідність яких обґрунтовується гідравлічним моделюванням і, там де це є можливим, даними натурних спостережень.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні важливої науково-технічної проблеми, пов'язаної з рухом рідини у відкритих руслах з змінними в часі граничними умовами та наявності створення природного режиму водотоку. В цьому напрямі найсуттєвіші наукові результати вбачаються у наступному:

- розроблені аналітичні рішення системи рівнянь загальних руслових деформацій з урахуванням конкретних початкових умов, змінних границь русла і зони впливу гідротехнічних споруд, а також за наявності тенденції до фоноворого замулення малих річок;

- отримано теоретичне обґрунтування формули витрати донних наносів при пасмовій формі їх руху;

- запропоновано теоретичне визначення параметрів трансформації руслової витрати в зоні впливу мостових переходів;

- розроблена методика розрахунку розподілу загальної витрати між отвором і переливним частиним низьководних мостових переходів;

- вирішена в першому наближенні планова задача руслових деформацій на мостових переходах через великі річки.

Практична значимість і впровадження результатів досліджень. Отримані в роботі теоретичні рішення мають цілком певну практичну значимість. Створена на їх основі методика прогнозу загальних руслових деформацій для найбільш поширених випадків стиснення річок в плані відзначається високою обчислювальною стійкістю в умовах явно некоректної

вихідної інформації.

Всі рішення доведені до розрахункових залежностей, отриманих при меншій кількості припущень в порівнянні з існуючими і наочно відбиваючих функціональний зв'язок між величиною розмиєла та факторами, що його обумовлюють.

Крім того, на базі аналітичних рішень суттєво спрощуються способи прогнозу експлуатаційної надійності мостових переходів та створення систем їх оптимального проєктування, зокрема, на річках з русловом багаторукавністю.

На засадах аналітичних рішень створено теоретичне підґрунтя до розв'язання цілої низки прикладних задач прогнозу руслових деформацій в зоні впливу гідротехнічних споруд найрізноманітнішого призначення, що закладає передумови подальшого розвитку технічної механіки рідини.

На основі виконаних досліджень розроблені "Рекомендації до аналітичного прогнозу загальних руслових деформацій на мостових переходах", ухвалені на підсекції штучних споруд НТР Міншляхбуду УРСР (протокол №3 від 21 травня 1990 р.) і впроваджені інститутом Укрдінпродор, а також "Рекомендації по розрахунку і прогнозу замулення і руслових деформацій на малих річках України", впроваджені у 1992 році Державним комітетом України по водному господарству.

/пробачія роботи. Основні результати роботи доповідались на 3-ій Всесоюзній конференції з гідравліки дорожніх водопропускних споруд (Гомель, 1972), наукових конференціях професорсько-викладацького складу Київського автомобільно-дорожнього інституту (1984, 1985, 1986 рр.), 4-ій Республіканській конференції з науково-технічних

проблем гідравліки дорожніх водопропускних споруд (Саратов, 1985), НТР Укрводпроєкту (Київ, 1989, 1990 рр.), Республіканському науковому семінарі з гідравліки відкритих русел і споруд (Київ, 1989), Українському науковому семінарі з гідравліки відкритих русел і споруд (Київ, 1993).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 26 наукових праць, в тому числі учбовий посібник.

Структура та об'єм роботи. Робота викладена на 340 аркушах друкованого тексту та ілюстрована 51 малюнком, містить 10 таблиць, 2 додатки і список літератури 217 найменувань.

#### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми, подається загальна характеристика роботи, розробляється структурно-логічна схема дисертації. Згідно цієї схеми, робота може бути умовно поділена на чотири частини: концептуальні положення інженерного прогнозу руслових деформацій (розділи 1 і 2); прогноз загальних руслових деформацій на великих та середніх рівнинних ріках (розділи 3 і 4); прогноз загального розмиву через малі річки (розділ 5); визначення розрахункової величини загального розмиву на мостових переходах через блукаючі річки (розділ 6). Всі вони, за винятком постановочного - першого, ґрунтуються на одній методологічній основі, відрізняючись лише граничними умовами розв'язування задачі.

Перший розділ містить у собі аналіз інженерних аспектів прогнозу руслових деформацій на мостових переходах та системи рівнянь, що описують процес розвитку загального розмиву.

Виходячи з невисокої точності гідрологічної та морфологічної інформації (похибка може сягати 30%), можна стверджувати, що точність прогнозу руслових деформацій не перевищить наведені числа. Якщо до цього додати неусталені режими річкового потоку і рух руслових мікро- і мезоформ, завдяки яким здійснюється транспортування донних наносів, то стане цілком зрозумілою втрата первинного сенсу у терміні розрахунок стосовно загального розмиву на мостових переходах. Мова може йти тільки десь про прогнозу розрахункової величини руслових деформацій, як результату деякого мінованого процесу, що розгортається на сильному фоні випадковостей.

Ієрархія структурних рівней, встановлена гідроморфологічною теорією руслового процесу (М.С.Кондратьєв, Ш.В.Попов), тлумачить руслові деформації як рух руслових мезоформ (пасм, боковиків, осередків). Причому їх рух і деформації здійснюються під впливом осередненого поля швидкостей. Таким чином, турбулентність руслового потоку грає головну роль не рівні окремої частинки ґрунту чи мікроформи, для структурного рівня мезоформ не є визначальною, за винятком когерентних вихрових структур, задіяних у формуванні донних пасм (К.В.Гришенін, Д.І.Гринвальд, Б.Ф.Сніщенко, А.В.Клаєв, В.М.Нікітін, М.І.Зайцев).

З огляду на зверхність довжини русла над його шириною, які в зоні впливу мостових переходів рівняються на порядок і навіть більше, прогноз руслових деформацій може бути ідеалізований одновимірною задачею. Варто зауважити, що це стосується тільки русла, де саме і очікуються деформації дна. Отже процес розвитку руслових деформацій ставиться у

залежність від двох аргументів: відстані та часу, що, в решті-решт, є загальноприйнятливим у річковій гідравліці.

Двофазність руслового потоку, компонентами якого є вода і наноси, вимагає для його опису щонайменше чотири рівняння: нерозривності та руху, відповідно для твердої і рідкої фаз.

Домінантним у цій системі слід розглядати рівняння деформацій (балансу наносів), яке в диференціальній формі відтворює закон збереження твердої фази руслового потоку. Відомо декілька способів написання і виведення цього рівняння, які належать М.М.Бернадському, М.О.Веліканову, Ф.М.Ексієру, І.І.Леві, М.С.Факторовичу, П.О.Ройновичу і М.О.Деметьюву, К.В.Гришанину, О.В.Андрєєву. Беручи до уваги необхідність застосування рівняння балансу наносів до стиснених потоків і узгодженість з формулою витрати наносів, в дисертації використовується це рівняння у формі, запропонованій О.В.Андрєєвим

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

де:  $G$  - витрата наносів;  $B$  - ширина русла;  $h$  - глибина оди в руслі, що змінюється відповідно вodomірному графіку повені та за рахунок деформацій дна;  $l$  і  $t$  - відстань і час, незалежні змінні.

Наведене рівняння придатне у випадках, коли берега русла під час повені не руйнуються, або ж цим руйнуванням можна снєхтувати. Якщо зважити на те, що руйнування берегів різко зменшується після затоплення заплав, а саме цей момент і є початковим для розвитку руслових деформацій в зоні стиснення (при рівнях води менших рівня бровок русла загальний розмив виникнути не може), то використання рівняння (1) можна вважати цілком виправданим.

Дорівнювання нулю правої частини рівняння балансу наносів свідчить про відповідність витрати наносів транспортувучій спроможності потоку. В дійсності це положення справедливе не завжди. Чимало малих річок замулюється внаслідок перевищення фактичної витрати наносів над транспортувучою спроможністю руслового потоку. З цієї ж причини має місце нарощування дна деяких блукаючих річок. Тому у цих випадках рівняння балансу наносів повинно мати вигляд

$$\frac{\partial G}{\partial t} - \int \frac{\partial h}{\partial t} = g_{nb} \quad (2)$$

де  $g_{nb}$  - витрата наносів на одиницю довжини, які потрапляють в русло через його бровки або осідають на дно внаслідок перенасичення потоку.

За рівняння руху твердої фази потоку править формула витрати наносів, де в інтегральній формі остання ставиться в залежність від гідравлічних параметрів течії води. У зв'язку з дискретністю руслового процесу, який до того ж розгортається на тлі випадковостей, теоретичне визначення витрати донних і завислих наносів аж до сих пір являє нову - рішену проблему. Тому існуючих емпіричних залежностей тільки для донних наносів налічується кілька десятків. Найуживаніші із них запропоновані вітчизняними (І.В.Єгізаров, В.А.Гончаров, І.І.Леві, Г.І.Шамов, М.О.Веліканов, К.В.Гришанин, К.І.Росинський, Ю.А.Ібад-Заде, Б.Ф.Сніщенко і З.Д.Копаліані) та зарубіжними (Дюбуа, Шюкліч, Мак Дугал, Лаурсен, де Вріс, Г.Ейнштейн) дослідниками.

Серед цих формул найбільш зручна і проста має вигляд

$$g_n = A V^n \quad (3)$$

де:  $g_n$  - питома витрата наносів;  $V$  - середня швидкість потоку;  $m$  і  $A$  - показник степені і коефіцієнт, які залежать від фізичних властивостей наносів. Треба зауважити, що в досить значному діапазоні гранулометричного складу наносів  $m$  змінюється дуже повільно. Для пісчаних і гравелистих ґрунтів  $m = 4$  і є фактично сталим. Коефіцієнт  $A$  більш залежний від розміру зерен і ерозійної ситуації на водозборі. Для точного його визначення варто користуватися даними натурних досліджень, але, якщо такі відсутні, можна вдатися до емпіричних формул І.І.Леві. Тим більше, що делі буде доведений незначний вплив навіть великої помилки у визначенні його величини на остаточні результати прогнозу.

Формула (3) вперше була застосована в інституті Гідромеханіки НАН України і рекомендована для практичного використання К.В.Гришаниним і О.В.Андрєєвим.

Коли рух наносів відбувається переважно в пасмовому режимі, то їх питома витрата в більшій мірі відповідає залежності Б.Ф.Сніщенко і З.Д.Кочаліані

$$g_n = 0.011 h \frac{v^4}{(gh)^{3/2}} \quad (4)$$

ду  $g$  - прискорення вільного падіння. В дисертації ця формула отримала теоретичне обґрунтування на засадах теорії розмірностей. Сталість коефіцієнта  $A$ , який у даному випадку дорівнює 0,011, підтверджує малу залежність витрати наносів від їх розміру та фізичних властивостей, принаймні, для пісчаного діапазону. Але є дані (В.О.Базилевич, Н.К.Грибовська, В.І.Козицький), що цей коефіцієнт для зважених наносів знаходиться у зворотній залежності від площі водозбору.

Нехтуючи інерційними ефектами неусталеного руху лавинного потоку, що вважається цілком прийнятним для річкових рік (І.І.Леві, К.В.Гришанін, О.В.Андрєєв), рівняння нерозривності для води зводиться до умови сталості витрати в живому перерізі

$$Q_p = B h V \quad (5)$$

де:  $Q_p$  - витрата руслового потоку;  $B$ ,  $h$ ,  $V$  - ширина, глибина і середня швидкість води в руслі.

Рух водної фази потоку описується рівняннями:

нерівномірного руху рідини із змінною витратою вздовж русла (Г.О.Петров)

$$\frac{dh}{dl} = \frac{I_o - I_r \pm \alpha_o \left( \frac{2Q}{g\omega^2} - \frac{\theta}{g\omega} \right) \frac{dQ}{dl}}{1 - Fr} \quad (6)$$

де:  $\omega$  - площа живого перерізу;  $\alpha_o$  - коректив кількості руху;  $I_o$  - потяг дна;  $I_r$  - похил затрат енергії;  $\theta$  - проекція швидкостей приєднуючихся чи відокремлюючихся частинок рідини на напрямок динамічної осі руслової течії;  $Fr$  - число Фруда;

і рівняння нерівномірного руху в непрямокутних руслах

$$\frac{dh}{dl} = \frac{I_o - I_r \pm \frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} \frac{d\omega}{dl}}{1 - Fr} \quad (7)$$

де  $\alpha$  - коректив кінетичної енергії.

У деяких випадках (низьководні мостові переходи на малих річках, переходи через блукаючі ріки), коли деформації вільної поверхні незначні або того ж порядку, що і висота структурних формувань наносів, використовується основне рівняння рівномірного (квазірівномірного) руху води

$$I_o = I_p = I_r \quad (8)$$

В залежності від умов задачі із наведених восьми

рівнянь (1...8) вибираються ті, що відповідають крайовим умовам в зоні впливу гідротехнічних споруд. Складена в такий спосіб система з чотирьох рівнянь розв'язується аналітично при дотриманні тих чи інших початкових умов.

У другому розділі наводиться аналіз сучасного стану методів розрахунку загального розмиву, який править за основу для формулювання мети дисертаційної роботи та визначення задач досліджень.

Огляд розвитку теорії загального розмиву починається постулату М.А.Белелюбського (1875 р.), який безроздільно панував в інженерній практиці майже вісімдесять років. Якби "постулат" застосовувати за умови, коли довжина моста дорівнює ширині русла, тоді він дає точну величину нижньої границі розмиву при розрахунковому рівні води. В усіх інших випадках постулат М.А.Белелюбського прогнозує величину загального розмиву з певною похибкою. Тому уточнення та модифікації "постулата" (О.О.Кабалін, Ф.Г.Зброжек, М.Ф.Срібний), запроваджені з метою його поширення на всі випадки проектування мостів, не мали очікуваного успіху.

Ця обставина спонукала деяких дослідників шукати емпіричні способи, які корегували би "постулат" з метою усунення зайвих запасів в стійкості споруд, що подекуди спостерігались в результаті його застосування. Серед них перш за все слід назвати пропозиції А....Латишенкова, Л.Л.Ліштвана, І.І.Херхеулідзе. До цього варто додати, що шлях створення емпіричних залежностей виявився мало перспективним. Завдяки відсутності загальної теоретичної основи, емпіричний напрямок має досить обмежені можливості до саморозвитку. Емпіричні формули можуть відобразити лише

певний стан процесу, і не здатні пояснити причини його початку, розвитку та стабілізації.

Нова науково обґрунтована теорія загального розмиву пов'язана з рішенням диференціального рівняння балансу наносів (1). Його якісний аналіз безпосередньо свідчить, що деформації дна припиняються ( $\partial h / \partial t = 0$ ), коли на всьому протязі розрахункової ділянки встановлюється природна витрата наносів ( $\partial G / \partial l = 0$ ). Цим положенням скористався О.В. Андреев, виводячи формулу нижньої границі розмиву, яка в узагальненому виді репрезентується виразом

$$h_{pH} = h_{p\delta} \left( \frac{Q_{pH}}{Q_{p\delta}} \right)^{2/3} \left( \frac{B_{pH}}{B_{p\delta}} \right)^{2/3} \quad (9)$$

де:  $Q_{pH}$  і  $Q_{p\delta}$  - відповідно витрати води під мостом при стисненні потоку і в природних умовах;  $B_{pH}$  - ширина русла під мостом, яка може бути більше природної (при штучному розширенні) і менше (при стисненні русла);  $h_{p\delta}$  - природна глибина води в руслі при розрахунковому рівні води;  $h_{pH}$  - глибина води під мостом після розмиву при тому ж рівні води.

В гідротехнічному будівництві при стисненні ріки перемичками граничні величини руслових деформацій визначаються по аналогічній формулі І.І. Леві, а для двох окремих випадків перекриття мостом тільки русла рівнинної і стиснення русла беззапальної ріки подібні залежності виведені Е. Лаурсеном.

Головним недоліком усіх наведених вище способів прогнозу руслових деформацій є розгляд кінцевого стану процесу, а не його розвитку, що потребує введення в аналіз часового чинника. За цим криється не тільки новий теоретичний сенс, а цілком конкретний економічний зиск. Бо,

нехтуючи нестационарність руслових деформацій, наперед закладаються завищені результати прогнозу, які спричиняють невиправдані запаси у розмірах споруд. Повна картина розвитку руслових деформацій, що розгортаються у просторі і часі, може бути отримана тільки інтегруванням рівняння балансу наносів.

Насьогодні для різних потреб гідротехнічного і транспортного будівництва числові способи інтегрування рівняння балансу наносів розробили вітчизняні вчені: М.М.Бернадський, К.І.Росинський, І.А.Кузьмін, Л.І.Вікулова, І.А.Розовський, В.О.Базилевич, А.В.Караушев, М.Шаясупов і Б.С.Клечив, О.В.Андреев, Г.А.Федотов, І.С.Ротенбург, Нгуен Суан Трук, В.А.Большаков і С.Л.Хурсин, В.Я.Савенко та ін. Серед відомих пропозицій по використанню кінцевих рівниць для розрахунку руслових деформацій за кордоном можна назвати роботи: М. де Вріса, Дж. Кунге і Н.Пердро, Чанга і Хілла, Чена і Саймона, Верде.

Суттєвий фактор, який має неабиякий вплив на стабільність обчислювального процесу, впливає з підвищеною чутливістю числових рішень нестационарних задач гідравліки, і надто з розвиваємим дном, до точності та узгодженості вихідної інформації. Ця обставина підкреслюється в роботах М.С.Грушевського, Л.С.Кучмента, С.М.Мундерецького. Враховуючи, що в природних умовах така інформація принципово не може бути точною, завдяки дискретності і стохастичності руслових процесів, числові методи прогнозу повинні будуватись на термії і спеціальних алгоритмах розв'язку некоректних задач.

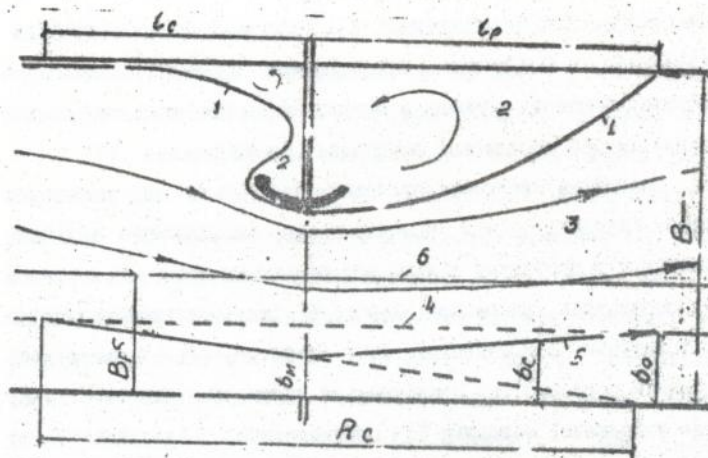
Всі ці проблеми не мають ваги при застосуванні

аналітичних методів інтегрування рівняння балансу наносів. На користь останніх свідчить також їх порівняно простий агліз на надійність, принципи якого все більше впроваджуються в практику проектування гідротехнічних споруд.

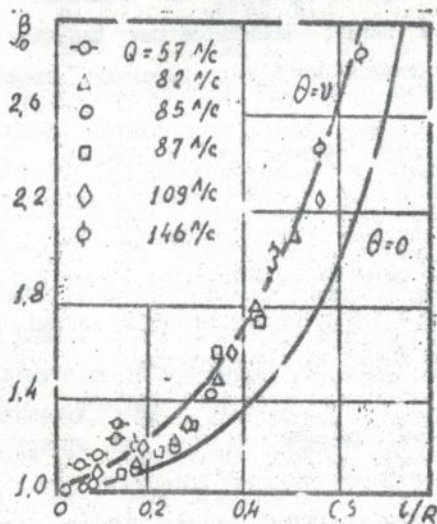
Певні переваги аналітичних рішень спонукали до їх розробки І.І.Леві, К.В.Гришаніна, В.А.Скрильникова, Ляо Конг Дао, Я.І.Кафанова, а за кордоном Тінней, Комура і Саймона, Аксої. Всі вони мають багато спільного і відрізняються, головним чином, рекомендаціями щодо визначення транспортувочої спроможності потоку. Але присутня у цих рішеннях вада, що стосується припущення про сталість рівня і витрати води за деякий невеликий проміжок часу, ставить їх ближче до числових рішень ніж до аналітичних. Саме тому вони не мають розв'язку в остаточному вигляді і, зрештою, зводяться до графо-аналітичного або числового способів.

Особливості малих річок характеризуються підвищеною вразливістю до зміни режимів стоку води і наносів. Екологічно шкідливе землекористування призводить до того, що 60% малих річок України інтенсивно замулюються. Тому гідротехнічні споруди на малих річках, з одного боку повинні щонайменше створювати природні умови, а, з другого, при їх проектуванні, треба враховувати наслідки цього небезпечного явища. З цього приводу, стосовно мостових переходів на малих річках, де тільки можливо, варто розглядати варіанти мостів з переливними підходами і низьководних переходів.

До розвитку гідравлічних розрахунків переливних гідротехнічних споруд вагомий внесок зробили: В.О.Орехнович, С.В.Андреев, Є.В.Болдаков, Б.Ф.Перевозниєв, Т.С.Полторанова



Мал. 1. Схема мостового переходу через рівнинну ріку:  
 1 - гранична лінія току; 2 - засліяна зона;  
 3 - заплава; 4 - центральний відсік; 5 - центральна струминка; 6 - брівка русла.



Мал. 2 Порівняння теоретичних і емпіричних досліджень.

М.А.Петров, І.П.Константинов, Б.А.Глотов, Г.А.Федотов, О.А.Курганович, В.В.Даденков, Ю.В.Парахник. Проблема одночасного розвитку процесів розмива і замулення на мостових переходах в аналітичній постановці розглядається вперше.

Специфіка прогнозу руслових деформацій на переходах через блукаючі річки пов'язана із залежністю величини розмиву під мостом не тільки від стиснення потоку, а також від параметрів виправних дамб. В існуючих рекомендаціях (С.Т.Алтунін, О.В.Андреев, І.С.Ротенбург, Г.І.Херхеулідзе) останній обставині не приділяється уваги. Тому до цього часу нема узгодженої методики їх проектування. Підвалинки такої методики розроблені в даній роботі, причому вперше в урахуванням дефіциту транспортуючої спроможності потоку.

У третьому розділі розглядаються питання трансформації руслової витрати при наявності на заплавах споруд, стискаючих потік в плані. Найпоширенішим випадком такого стиснення є спорудження мостового переходу, схема якого показана на мал. 1.

Через перекриття частини заплав дамбами, вода в перекритих ділянках в зоні стиснення стікає в русло, формуючи у ньому потік із змінною витратою вздовж шляху. В зоні розтікання руслової витрати теж змінюється з течією, але тут русло звільняється від заплавної води і в створі нового розтікання набуває природних характеристик.

Повдовжній градієнт руслової витрати спричиняє виникнення градієнту витрати наносів, що врешті-решт є головним чинником розвитку руслових деформацій. Тому з метою інтегрування рівняння балансу наносів виникає нагальна потреба знаходження аналітичної залежності зміни руслової

витрати за відстанню.

Спосіб, в який вирішується в дисертації ця задача, ґрунтується на сумісному розв'язанні основних рівнянь руху (6) і (7). Але обчислення похідної  $dh/dl$  для всього русла не завжди дає змогу уникнути теоретичної невизначеності. Тому, не втрачаючи загальності міркувань, рівняння (7) записується для центральної струминки, про яку відомо, що: її ширина змінюється за лінійним законом; витрата становить 20-25% загальної витрати ріки; турбулентні дотичні напруження на її бічних поверхнях непомітно малі і ними можна знехтувати (Л.Г.Солов'йова, Ю.В.Абрамов). Тоді для центральної струмки рівняння (7) набуває вигляд (Ю.В.Абрамов)

$$\frac{dh}{dl} = \frac{I_0 - I_r \pm \frac{Q_0^2}{gb^3 h^3} \frac{b_0}{R}}{1 - Fr} \quad (10)$$

де:  $b_0$  і  $b_0'$  - поточна і гранична ширина центральної струминки;  $Q_0$  - витрата води в межах центральної струминки;  $R$  - параметр, що дорівнює відстані від границь зони впливу до точки виродження ширини центральної струминки, див. мал. 1.

Відповідно до центральної струминки в руслі окреслюється центральний відсік із сталою шириною  $b_0$ , але із змінною вздовж шляху витратою води  $Q_0$ . Рух води у центральному відсіку описується рівнянням (6).

Враховуючи, що центральна струминка повністю зосереджена у центральному відсіку, можна з достатньою певністю стверджувати конгруентність їх кривих вільної поверхні. Це дає можливість вважати рівними праві частини рівнянь (6) і (10). Після скорочення подібних членів

виводиться диференціальне рівняння трансформації витрати у центральному відсіку

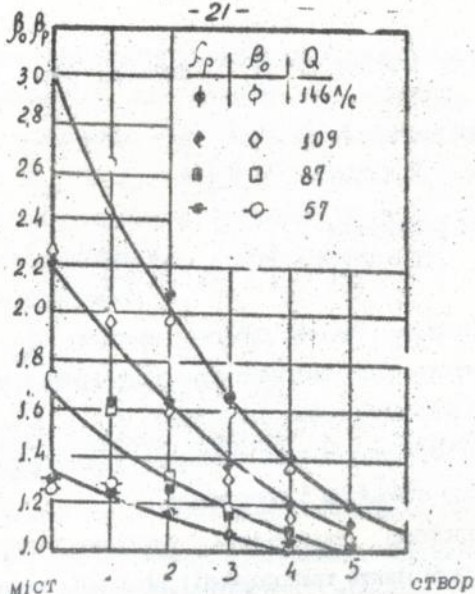
$$\frac{Q_0^a}{R} \left( \frac{b_0}{b} \right)^a = \pm K_0 Q_0 dQ_0 \quad (11)$$

де:  $Q_0$  - змінна  $b_a$  відстанню витрати води у центральному відсіку;  $K_0$  - коефіцієнт, залежний від величини  $\theta$ , який змінюється від 1, коли  $\theta = v$ , ( $v$  - швидкість води у центральній струминці), до 2 при  $\theta = 0$ .

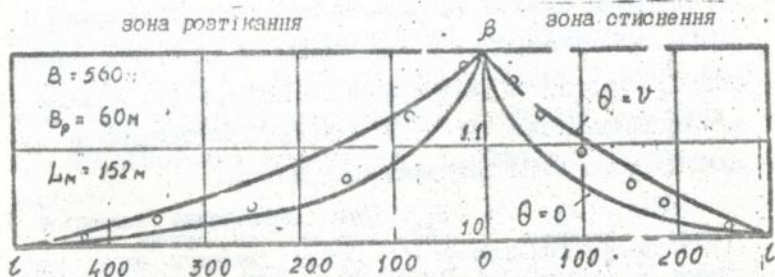
Задаючи  $\theta$  встановити характер зміни величини  $\theta$  не має можливості. Тому рівняння (11) розв'язується для двох граничних випадків, коли  $\theta = v$  і  $\theta = 0$ . Найбільша теоретична розбіжність між цими граничними ішеннями не перевищує 30%, якій відповідає безкінечно р'яке стиснення ріки. В реальних умовах ця розбіжність становить не більше 20% і є цілком задовільною для руслових розрахунків, бо знаходиться у межах похибки вихідних даних.

Приділяючи належну увагу трансформації руслової витрати, отримані теоретичні рішення були співставлені з даними лабораторних досліджень великомасштабної моделі мостового переходу, спорудженій на русловому майданчику Українського науково-дослідного інституту гідротехніки і меліорації. Результати експериментальних досліджень винесені на мал.2, де дві контурні лінії відповідають двом теоретичним розв'язкам рівняння (11). Легко помітити, що дослідні точки розташовані ближче до кривої  $\theta = v$ , принаймі в області значних стиснень. Саме тому це рівняння приймається для подальшого аналізу.

Виходячи з експериментально доведеної практичної тотожності характеристик трансформації витрати у



Мал. 3 Дослідні дані про трансформацію витрати у центральному відсіку і руслі загалом.



Мал. 4 Співставлення теоретичних рішень з результатами натурних досліджень В.П.Баховчука.

центральному відсіку і руці вгалом (мал. 3), можна записати, що:

у зоні стиснення

$$Q_p = Q_{p\delta} \left(1 - l/R_o\right)^{-1} \quad (12)$$

у зоні розтікання

$$Q_p = Q_{p\delta} \left[1 - \left(l_o + l_p - l\right)R_p^{-1}\right]^{-1} \quad (13)$$

де:  $Q_p$  - змінна за течією руслова витрати;  $Q_{p\delta}$  - природне руслове витрати води, змінна згідно гідрографа повені;  $l$  - відстань від початку зони стиснення;  $R_o$  і  $R_p$  - параметри центральної струминки в зоні стиснення і розтікання;  $l_o$  і  $l_p$  - довжина зони стиснення і розтікання.

На практиці здебільшого зручніше користуватись величиною коефіцієнта трансформації руслової витрати, який дорівнює

$$\beta_p = Q_p / Q_{p\delta} \quad (14)$$

Завдячуючи натурним дослідженням В.П.Баховчука на р. Беризина біля м. Борисова, видалась нагода порівняти з ними отримані в дисертації теоретичні рішення, мал. 4. Видно, що поле натурних точок не виходить за межі теоретичних кривих і біля мосту наближається до розв'язків (12), (13). Таким чином, адекватність відтворення трансформації руслової витрати залежностями (12) і (13) слід вважати ствердженою як лабораторними, так і натурними дослідженнями.

Якщо  $l = l_o$ , то  $\beta_p = \beta_{pn}$ . Тоді переписуючи залежність (12) з урахуванням формули (14), можна одержати вираз для визначення параметру  $R_o$

$$R_o = \frac{\beta_p \cdot l_o}{\beta_{pn} - 1} \quad (15)$$

Величина коефіцієнту трансформації руслової витрати під мостом обчислюється за методом О.В.Андрєєва способом послідовних наближень. Але допустивши невеликий запас, ототожнюючи  $\beta_{p\delta}$  і  $\beta_N$ , де  $\beta_N$  - коефіцієнт загального стиснення потоку, видається можливим уникнути послідовних наближень, визначаючи  $\beta_N$  безпосередньо по очевидній залежності О.В.Андрєєва

$$\beta_N = \frac{Q}{p\delta + Q_{з\delta}(L_N - B_{p\delta})} \quad (16)$$

де:  $Q$  - загальна витрата водотоку;  $Q_{з\delta}$  - природна питома витрата заплав.

В дисертації розроблений спосіб обчислення змінних під час пов'язані меж зон стиснення і розтікання. Беручи за основу аналітичне рішення диференціального рівняння (10), яке належить Ю.В.Абрамову, після, певним чином, виконаних перетворень, маємо довжину зони впливу

$$l_{зв} = \frac{h_{p\delta}}{I_0} \left( \frac{\beta_N^2}{2\beta_N - 1} \right)^{0.3} - 1 \quad (17)$$

Формула враховує як гідроморфологічні характеристики ріки (природні глибину  $h_{p\delta}$  та похил русла  $I_0$ ), так і міру їх спотворення гідротехнічними спорудами (коефіцієнт стиснення  $\beta_N$ ). При відсутності стиснення ( $\beta_N = 1$ ) формула (17) втрачає сенс.

Для визначення довжини зони стиснення треба скористатись отриманим в дисертації параметром  $\eta$ , який дорівнює

$$\eta = \frac{l_0}{l_{30}} = 1 - \frac{1}{2} \text{Fr} \frac{\beta_M^2 - 1}{\left( \frac{\beta_M^2}{2\beta_M - 1} \right)^{2.3} - 1} \quad (18)$$

Тоді:  $l_0 = l_{30} \eta$  (19)

$$l_p = l_{30} (1 - \eta) \quad (20)$$

Виявляється, що величина  $l_0$  залежить не тільки від величин стиснення  $\beta$  а й від кінетичності потоку Fr. Цей результат цілком узгоджується з фізичними засадами гідравліки неї вномірного руху рідини у відкритих руслах. Чим більшу кінетичну енергію має потік, тим менше потенціальної енергії у формі підпору треба накопичити, щоб перетнути стиснений переріз. Довжина зони стиснення, при інших схожих умовах, знаходиться у прямій залежності від величини підпору. З цього виходить, що із збільшенням кінетичності потоку довжина зони стиснення зменшується, про що і свідчить формула (18).

Таким чином, всі супутні питання, необхідні для практичного застосування формул (12) і (13), в дисертаційній роботі отримали dokonані вирішення.

Зважаючи на важке значення для прогнозу руслових деформацій характеру трансформації руслової витрати, формули (12) і (13) потребують більш ретельного аналізу.

По-перше, вони є модифікованими рівняннями руху руслового потоку із змінною витратою на шляху, що описують динаміку трансформації при одній витраті  $Q_p$ , наслідок стиснення ріки.

По-друге розглядаючи їх як аналітичне визначення крайових умов на брівках русла, виявляється можливим виключити з розгляду зав'язані течії. В такій спосіб робиться перше

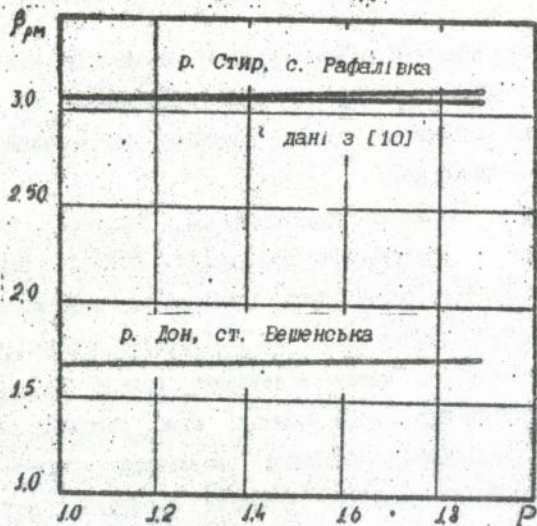
наближення до планової задачі руслових деформацій, яка у цій постановці буде коректна за умов відсутності на річці особливостей: збоченості г'ютку, заплавної багаторукавності, вирів та застійних зон.

По-третє, характер трансформації руслової витрати визначається з урахуванням деформацій вільної поверхні потоку, бо для його опису були використані диференціальні рівняння нерівномірного руху води у відкритих руслах.

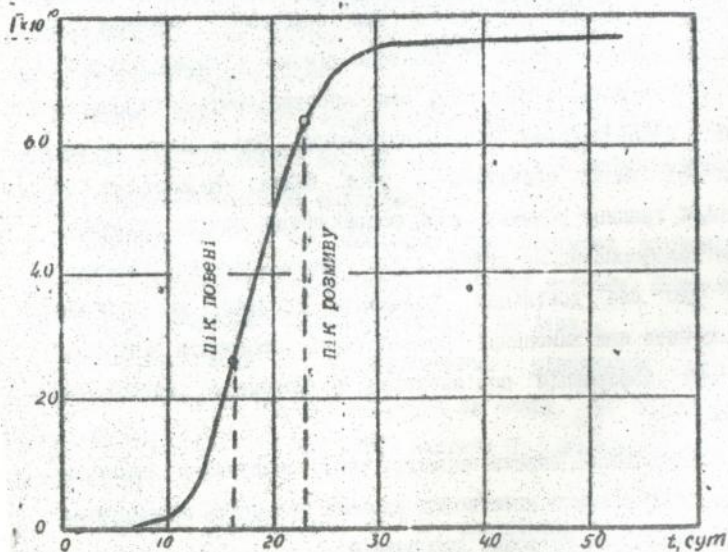
По-четверте, з метою з'ясування впливу на руслову витрату величини загального розмиву, було виконано окреме теоретичне дослідження. Одержані результати свідчать про майже непомітну залежність динаміки формування руслової витрати від величини розмиву, що графічно показано на мал.5.

В четвертому розділі розробляються основи аналітичного прогнозу руслових деформацій при стисненні великих і середніх річок. Розглянуто два типи річок - з переважно донним рухом наносів і річки, на яких спостерігається одночасно донна і зависла форми їх транспортування. Для кожного із них початкові умови задаються у двох видах: відповідно до верхньої границі розмиву, коли розрахункова повинь проходить по ще недеформованому руслу, і для узагальнюючого випадку, коли дно має довільний оздовжній профіль, що треба враховувати при виконанні багаторічних прогнозів. Початок руслових деформацій пов'язується з моментом затоплення заплави.

Таким чином, задача першого типу описується системою рівнянь, що разом з початковими умовами складають математичну модель загальних руслових деформацій:



Мал. 5 Залежність руслової витрати від величини розмиву.



Мал. 6 Інтегральна функція гідрографу  
(мостовий перехід ч/з р. Десна біля с. В.Устьє)

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial l} + B \frac{\partial h}{\partial t} &= 0 \\ G &= 0.011 B h \frac{V^4}{(gh)^{3/2}} \\ Q &= B h V \\ \beta_p &= \left(1 - \frac{1}{R}\right)^{-1} \end{aligned} \quad (21)$$

Після заміни під знаком похідної аргумента  $l$  (відстані) на величину  $\beta_p$  і використання формули сталості руслової витрати, визначається градієнт витрати наносів. Підставляючи отриманий вираз градієнту в рівняння деформацій, останнє перетворюється в квазілінійне

$$\begin{aligned} \frac{4.5Q_{ps}^4 A}{R} \frac{\beta_p^6}{h^{6.6} B_p^3} \frac{\partial h}{\partial l} + B \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{4AQ_{ps}^4}{R} \frac{\beta_p^6}{h^{4.6} B_p^3} - \\ &- \frac{3AQ_{ps}^4}{R} \frac{\beta_p^6}{h^{4.6} B_p^4} \frac{dB_p}{dB_p} \end{aligned} \quad (22)$$

де  $A = 0.011/g$

Його загальний розв'язок становить невизначена функція  $\Phi$ , яка має вигляд

$$\Phi \left( \frac{h B_p^{3/4.6}}{\beta_p^{4/4.6}} ; \frac{4.5 A}{R B_p^4 h^{6.6}} \int Q_{ps}^4 dt + \frac{1}{5\beta_p^6} \right) = 0 \quad (23)$$

Для її визначення треба врахувати початкові умови, тобто розв'язати задачу Коші. Верхній границі загального розв'язу початкові умови задаються виразом

$$h = h_{ps} \quad (24)$$

При цьому рішення задачі Коші набуває неявного виду

$$h = h_{ps} \left[ 1 + \frac{22.5 A \Gamma \beta_p^4 (\beta_p - 1)^{3/4.6}}{1_{\alpha(p)} B_p^4 h^{6.6}} \right] \quad (25)$$

де  $\Gamma = \int Q_{ps}^4 dt$  - інтегральна функція гідрографа.

Довільний поєдовжній профіль дна у початковий момент розмиву задається кубічним сплайном. Отримані на його основі рішення записуються в такий спосіб

$$h = \beta_p^{8/9} T^{8/48} \left[ h_{i+1} \hat{\Delta} + h_i \hat{\Delta}' - M_{i+1} (\hat{\Delta} - \hat{\Delta}^3) - M_i (\hat{\Delta} - \hat{\Delta}^3) \right] \quad (26)$$

де: в зоні стиснення

$$\hat{\Delta}_0 = \frac{R_0 (1 - T^{0.2}) - l_i}{\lambda} \quad (27)$$

$$\hat{\Delta}_c = 1 - \hat{\Delta}_0 \quad (28)$$

в зоні розтікання

$$\hat{\Delta}_p = \frac{l_{3B} - R_p (1 - T^{0.2}) - l_i}{\lambda} \quad (29)$$

$M_i, M_{i+1}$  - моменти сплайна в узлових точках;  $\lambda$  - відстань між вузловими точками сплайну.

Величина  $T$  має вираз

$$T = \frac{1}{\beta_p^8} + \frac{22.5 A \Gamma (1 - 1/\beta_p)}{l_{\sigma(p)} b_p^1 H^{6.6}} \quad (30)$$

Такий спосіб інтегрування репрезентативної системи рівнянь рухових деформацій залишається однаковим для всіх випадків стиснення потоку, розглянутих у даній роботі. Тому надалі в меті заощадження місця будуть наводитись тільки опис математичної моделі та її рішення.

Якщо завислі наноси становлять помітну частину від загальної їх кількості, то цілком зрозуміло, що треба враховувати обидва режими їх руху. Це відблгородься у системі (21) шляхом заміни формули витрати наносів на вираз

$$G = A B V^m \quad (30)$$

де параметри  $A$  і  $m$  забезпечують врахування транспорту донних і завислих наносів.

У цьому випадку верхня границя загального розмиву визначається за явною залежністю

$$h = h_{p\delta} \left[ 0.5 + \left( 0.25 + \frac{m(m+1)A\Gamma\beta_p^m(\beta_p - 1)}{l_{\alpha(p)} B_p^m h_{p\delta}^{m+1}} \right)^{1/2} \right]^{\frac{1}{m+1}} \quad (31)$$

Причому при високих рівнях води, близьких до пікових, вона може бути спрощена з похибкою, що на піку човені не перевищує 2% :

$$h = h_{p\delta} \left[ \frac{m(m+1)A\Gamma\beta_p^m(\beta_p - 1)}{l_{\alpha(p)} B_p^m} \right]^{\frac{1}{2(m+1)}} \quad (32)$$

В разі багаторічного прогнозу розвитку руслових деформацій при урахуванні донних і завислих наносів аналітичне рішення призводить до виразу

$$h = \beta_p T^{\frac{1}{m+1}} \left[ h_{i+1} \hat{\Lambda} + h_i \hat{\Delta} - M_{i+1} (\hat{\Lambda} - \hat{\Delta}^3) - M_i (\hat{\Delta} - \hat{\Delta}^3) \right] \quad (33)$$

де: в зоні стиснення

$$\hat{\Lambda}_0 = \frac{R_{\alpha} (1 - T^{\frac{1}{m+1}}) - l_i}{\lambda} \quad (34)$$

$$\hat{\Delta}_0 = 1 - \hat{\Lambda}_0 \quad (35)$$

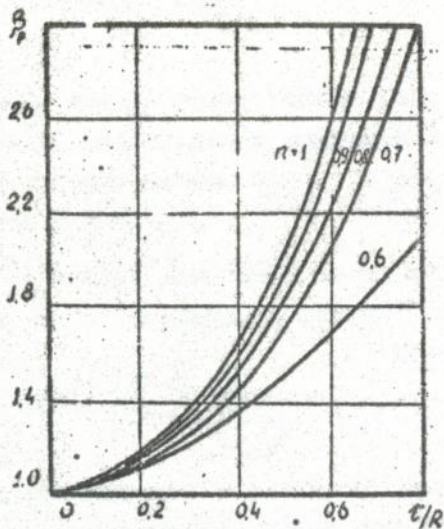
в зоні розтікання

$$\hat{\Lambda}_p = \frac{l_{зв} - R_p (1 - T^{\frac{1}{m+1}}) - l_i}{\lambda} \quad (36)$$

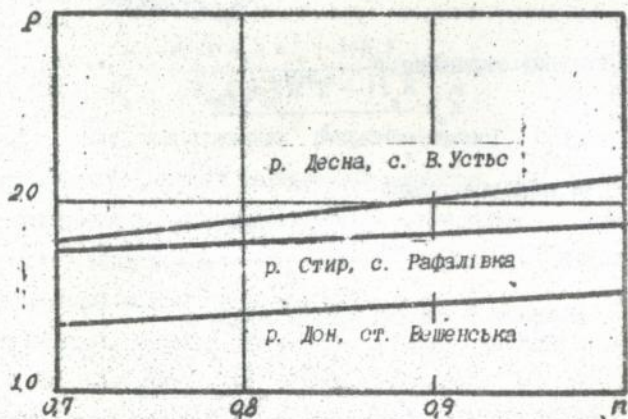
Величина  $T$  при цих умовах дорівнює

$$T = \frac{1}{\beta_p^{m+1}} + \frac{m(m+1)A\Gamma(1 - 1/\beta_p)}{l_{\alpha(p)} B_p^m h_{p\delta}^{m+1}} \quad (37)$$

При зацікавленості величиною загального розмиву тільки у стисненому горизонті, що частіше всього і трапляється, у всіх наведених залежностях величині  $\beta_p$  треба надати значення  $\beta_{pн}$ , або, з деяким запасом,  $\beta_n$ , за формулою (16).



Мал.7 Можливі характеристики трансформації руслової витрати.



Мал.8 Залежність загального розмиву під мостом від характеристик трансформації руслової витрати.

Користування аналітичними залежностями дає змогу заздалегідь визначити час досягнення піку розмива, що неможливо зробити застосовуючи числові алгоритми. Засобом для цього служить аналіз графіка інтегральної функції гідрографа. Виявляється, що цей момент фіксується точкою розташованою на перехідній ділянці між крутою та майже горизонтальною ділянками графіка, мал.6. Далі, за плином часу, загальний розмив стабілізується, що узгоджується з натурними спостереженнями.

Порівняно просто на основі аналітичного інтегрування рівняння балансу наносів здійснюється дослідження залежності величини розмиву від характеру трансформації руслової витрати в зоні впливу гідротехнічних споруд. З цією метою динамічне рівняння (12) записується у вигляді

$$\beta_p = \left(1 - 1/R\right)^{-n} \quad (38)$$

де змінний показник степені  $n$  набуває значення від 1.0 до 0.7. При цьому забезпечується охоплення всього поля між граничними кризисами на мал. 7. Результати теоретичного аналізу свідчать про повільне зростання величини розмива із збільшенням показника  $n$ . Причому така залежність виявляє практично лінійні властивості, мал. 8. З огляду на ці обставини набуває рацію застосування в розроблених рішеннях саме залежності (12), у якій показник степені  $n = 1$ , що створює певний запас в надійності споруд.

На великих річках має сенс розгляд планової задачі руслових деформацій. Зважаючи на те, що розроблені в дисертації рішення не обмежуються руслами із сталою шириною, а придатні в умовах довільної і плавної зміни обрисів берегів, зовсім не складно перейти до постановки планової

задачі, принайм', у першому наближенні. Уможливлення цієї мети здійснюється шляхом розподілу всього потоку на струминки з оптимальною витратою у спосіб, який запропоновано М.О.Великановим, а затим для кожної струминки застосувати одержані з роботи аналітичні рішення. Розподіл на струминки слід робити при рівні води, що відповідає початковим умовам. Програма такого розрахунку розроблена В.Ю.Кузнєцовим.

Аналітичний прогноз руслових деформацій дає детерміновану величину глибини розмива. Для врахування випадкових чинників її треба помножити на характеристику надійності  $\eta_n$ , в разі одногумірної задачі, на коефіцієнт форми русла  $\epsilon_\Phi$

$$h_p = h \eta_n \epsilon_\Phi \quad (39)$$

Характеристику надійності можна визначити за методом В.Ш.Ципік, якщо відомі середнє квадратичне відхилення глибини  $\sigma_h$  та ймовірність безвідмовної роботи споруди Р%. На підставі аналізу отриманих залежностей середнє квадратичне відхилення глибини у деформованому руслі дорівнює  $\sigma_h = 0.23$ , що цілком задовільно для руслових прогнозів. Тоді при

$$P\% = 95\% \quad \eta_n = 1.38$$

$$P\% = 99\% \quad \eta_n = 1.55$$

Коефіцієнт форми русла визначається за натурними даними, або не враховується зовсім при плановій постановці задачі.

Вирішення питань аналітичного прогнозу руслових деформацій в зоні впливу гідротехнічних споруд на малих річках викладається в п'ятому розділі. При цьому ставляться дві основні проблеми. Перша стосується вибору типу мостового переходу; друга - врахування фонового, відносно загального розмива, замулення малих річок.

Інженерні рішення щодо типу переходу передбачають порівняння техніко-економічних показників варіантів, серед яких можуть бути висоководні мостові переходи, висоководні мости з переливними підходами та низьководні мостові переходи.

Одним з головних показників варіантів є їх вартість, залежна від генеральних розмірів мостових переходів, яка в свою чергу визначається схемою протікання потоку через його споруди. Тому в дисертації вперше розроблена методика розрахунку розподілу витрати між отвором і переливною частинами низьководних переходів, яка спирається на фундаментальний закон збереження кількості руху. Отримані розрахункові залежності тримають вид неявних алгебраїчних виразів, в яких невідомою величиною розглядається відносна витрата  $Q^{пер}/Q$ , де  $Q^{пер}$  - витрата потоку, що переливається через підходи та прогінні споруди:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{L_H h_M} \left(1 - \frac{Q^{пер}}{Q}\right)^2 + \left[ \frac{Q^2}{B^{пер} h_{пер}} - \frac{1}{2\varphi^2} \frac{Q^2 h_M L_M}{(B^{пер})^2 (h_{пер})^2} \right] \left(\frac{Q^{пер}}{Q}\right)^2 - \\ & - \frac{B^{пер}}{8g\varphi^4} \frac{Q^4}{(B^{пер})^4 (h_{пер})^4} \left(\frac{Q^{пер}}{Q}\right)^4 = \frac{Q_{ps}^2}{B_p \left[ h_p + \frac{1}{2g\varphi^2} \frac{Q^2}{(B^{пер})^2 (h_{пер})^2} \right] \left(\frac{Q^{пер}}{Q}\right)^2} + \\ & + \frac{Q_{пб}^2}{B_{п} \left[ h_{п} + \frac{1}{2g\varphi^2} \frac{Q^2}{(B^{пер})^2 (h_{пер})^2} \right] \left(\frac{Q^{пер}}{Q}\right)^2} - \\ & - \frac{1}{2} g \left[ (h_M^2 + h_0^2 - h_p^2) L_M + (h_{пер})^2 B^{пер} \right] \end{aligned} \quad (40)$$

де:  $h_M$  - відстань між дном русла та низом прогінних будов;  
 $h_{п}$  - висота насипів підходів;  $h_0$  - будівельна висота моста;  
 $h_p$  - відстань по вертикалі між рівнями проїзної частини і дном

русла;  $Q_{p, \delta}$ ,  $Q_{п0}$  - природні витрати русла і заплав;  $B_{p, \delta}$ ,  $B_{п0}$  - ширина русла і заплав;  $\varphi$  - коефіцієнт швидкості водозальву в широкому порогом.

В залежності від схеми переливу (підтопленої чи непідтопленої), значення величин  $h^{пер}$  та  $\varphi$  у виразі (40) будуть різними:

$$\begin{aligned} \text{при підтопленні } (H > Z_{нас} + h_k), \quad h^{пер} = h - h_{нас}; \\ \varphi = 0.85; \end{aligned}$$

при вільному

$$\text{переливі } (h < Z_{нас} + h_k), \quad h^{пер} = h_k; \quad \varphi = 0.96$$

де:  $H = PРВВ$  - розрахунковий рівень високої води;  $Z_{нас}$  - відмітка верха насипів;  $h_k$  - критична глибина переливного потоку, яка в даному випадку записується в такий спосіб

$$h_k = \left[ \frac{\alpha}{g} \right]^{1/3} \left[ \frac{Q}{B^{пер}} \right]^{2/3} \left[ \frac{Q^{пер}}{Q} \right]^{2/3} \quad (41)$$

З допомогою залежності (40) визначаються значення витрат, що переливається через споруди переходу  $Q^{пер}$  та протікаючої через його отвір  $Q_M$ . Тоді коефіцієнт трансформації руслової витрати буде дорівнювати

$$\beta_{ГМ} = \frac{Q_M + Q^{пер} L_M / B^{пер}}{Q_{р0}} \quad (42)$$

де  $B^{пер}$  - ширина фронту перелива.

Характер зміни коефіцієнта трансформації  $\beta_p$  вздовж зони стиснення низьководних мостових переходів приймається лінійним, що обґрунтовується експериментальними дослідженнями виконаними разом з Ю.В.Парехником. За цих обставин репрезентативна система рівнянь приймає вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial l} - B \frac{\partial h}{\partial t} &= 0 \\ G &= A V V^m & (43) \\ Q &= B h V \\ \beta_p &= 1 + k l \end{aligned}$$

де  $k$  - коефіцієнт прямої пропорційності.

Розв'язуючи систему (43) при початкових умовах, відпо-  
відних довільному профілю дна русла, одержуємо для зони  
стиснення і під мостом наступні розрахункові залежності

$$h = \beta_p T^{\frac{1}{m-1}} \left[ h_{i+1} \hat{\Delta} + h_i \hat{\Delta} - M_{i+1} (\hat{\Delta} - \hat{\Delta}^2) - M_i (\hat{\Delta} - \hat{\Delta}^2) \right] \quad (44)$$

$$\hat{\Delta}_0 = \frac{\frac{1}{K} \left( T^{\frac{1}{m-1}} - 1 \right) - l_i}{\lambda} \quad (45)$$

$$T = \frac{1}{\beta_p^{m-1}} + \frac{m(m-1)kA\Gamma}{B_p \gamma^{m+1}} \quad (46)$$

де зміст всіх величин відомий з попереднього.

При помітній активізації на малих річках процесів  
замулення, р'вняння балансу наносів в системі (43) приймає  
вид (2). Якщо внаслідок браку спостережень величина  
гононої бічної витрати наносів приймається сталою  $g_{ab} =$   
 $const$ , то рішення такої системи являє собою наступну  
розрахункову залежність

$$h = \left( \beta_p^m - \frac{B_p^{m-1} \beta_p g_{ab}}{KAQ_p \delta} \right)^{\frac{1}{m}} T^{\frac{1}{m-1}} \left[ h_{i+1} \hat{\Delta} + h_i \hat{\Delta} - M_{i+1} (\hat{\Delta} - \hat{\Delta}^2) - M_i (\hat{\Delta} - \hat{\Delta}^2) \right] \quad (47)$$

яка разом з виразами (45) і (46) надає можливість  
прогнозувати результати одночасного розвитку процесів роз-  
мива та замулення.

Якщо інформація про бічне надходження наносів може бути

конкретизована, що дозволить виразити бічну витрату наносів як функцію часу  $g_{nb} = g_{nb}(t)$ , то з урахуванням обумовлених умов прогноз руслових деформацій на низьководних мостових переходах через малі річки здійснюється на основі таких рішень:

$$h = T^{-\frac{1}{m-1}} \left[ h_{i+1} \hat{\Delta} + h_i \hat{\Delta} - M_{i+1} \left( \hat{\Delta} - \hat{\Delta}^2 \right) - M_i \left( \hat{\Delta} - \hat{\Delta}^2 \right) \right] \quad (48)$$

$$\hat{\Delta} = \frac{1 \left[ \left[ \beta_p - \frac{3^{m-1} \beta_p h^m}{k \Delta Q_p^m} \left( g_{nb}(t) - g_{nb}(t_0) \right) \right]^{\frac{1}{m}} T^{\frac{1}{m+1}} - 1 \right] - 1_i}{\lambda} \quad (49)$$

$$T = 1 + \frac{m+1}{B_p h} \int g_{nb}(t) dt - \frac{1(m-1)k\beta_p^{m-1} \Delta \Gamma}{B_p h^{m+1}} \quad (50)$$

Аналогічні рішення отримані для прогнозу деформації в урахуванні замулення малих річок і для висоководних мостових переходів, на яких зрелив води через верх не догуквається

В останньому шостому розділі розв'язують задачу, які стосуються прогнозу деформації дна на мостових переходах через блукачі річки. Після загальної характеристики цих річок, пропонується раціональний обрис виправних дамб у плані. На основі накопиченого досвіду рекомендується штучна зміна ширини багаторукавного русла згідно узагальнюючій залежності

$$B = D / (1 + a)^{1/r} \quad (51)$$

де:  $a$  і  $D$  - параметри об'єкту, які визначаються за допомогою граничних умов;  $r$  - показник степені, що при решті однакових умов визначає кривинну обрисів виправних дамб;  $l$  - відстань від початку зони регулювання, тобто від створу, де штучна

ширину русла дорівнює характерній величині  $B_0$  (О.В. Андрєєв).

В роботі докладно висвітлені питання розрахунку координат  $X$  та  $Y$  виправних дамб, змінної кривизни  $\rho$  та мінімального радіусу  $R_{min}$ , що забезпечує безвідривне їх обтікання.

На відміну від стиснення рівнинних річок, у зоні регулювання беззаплавних - витрата води змінюється тільки з часом, залишаючись сталою по довжині. Тому у даному випадку крайові умови, що обумовлюють загальний розмив, інші. В такій якості виступають самі виправні дамби, які в зоні регулювання повільно стискають потік згідно залежності (51).

Математична модель руслових деформацій при стисненні блукаючих річок виходить із системи рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial t} - B \frac{\partial h}{\partial t} &= 0 \\ G &= A B^m \\ Q &= B h V \\ I_0 &= I_p = I_r \end{aligned} \quad (52)$$

і початкових умов, які задаються так само як на рівнинних річках. Розходження стосується лише визначення моменту початку розвитку руслових деформацій. З цієї задачі він співпадає з початком підвищення рівня води під час повені.

Інтегруючи систему (52), при дотриманні початкових умов (24), виводиться верхня границя загального розмиву

$$h = h_0 \left[ 1 + \frac{m(m-r)\Delta T}{rD^r h^{m+1} B^{m-r}} \right]^{\frac{m-1}{m(m-r)}} \quad (53)$$

Довгостроковий прогноз руслових деформацій виконується з урахуванням початкових умов, які відтворюють довільний профіль дна за допомогою сплайнової апроксимації

$$\lambda = T^{\frac{n-1}{n(m-r)}} \left[ h_{i+1} \hat{\Delta} + h_i \hat{\Delta} - M_{i+1} \left( \hat{\Delta} \cdot \hat{\Delta}^2 \right) - M_i \left( \hat{\Delta} - \hat{\Delta}^2 \right) \right] \quad (54)$$

$$T = 1 + \frac{\lambda(m-r)\Delta\Gamma}{rD^r B^{m-r} h^{m+1}} \quad (55)$$

$$\hat{\Delta} = \frac{D^r}{B^r \Gamma^{r(m-r)}} - 1, \quad \hat{\Delta} = 1 - \hat{\Delta} \quad (56)$$

Аналіз виразу (53) свідчить, що середня квадратична похибка глибини розмиву  $\bar{\sigma}_h$  в залежності від розмірів частинок ґрунту і параметрів обрису виправних дамб, знаходиться в межах від 0.12 до 0.19. Тобто значно менша ніж на рівнинних річках, що пояснюється більшою точністю визначення ширини штучного русла на блукаючих річках, ніж градієнту руслової витрати на рівнинних. При цьому характеристика надійності не перевищує, при:

$$P\% = 95\% \quad \eta_n = 1.31$$

$$P\% = 99\% \quad \eta_n = 1.45$$

Посилаючись на дослідження Б.Ф.Перевознікова, коефіцієнт форми русла на переходах через блукаючі річки приймається в діапазоні  $1.53 < \xi_{\Phi} < 2.0$ . Тоді розрахункова глибина в розмитому руслі має визначатись по формулі (39).

На блукаючих річках з дрібнозернистим річищем і дефіцитом транспортної спроможності потоку завислі наноси осідають на дно, нерозшучи його відмітки. За цих обставин у рівнянні балансу наносів системи (51) повинна з'явитись права частина, яка дорівнює погонній кількості наносів, що осідають на дно за одиницю часу  $g_{об}$ . Зважаючи на істотні труднощі по визначенні величини  $g_{об}$ , доцільно надати їй

сталості із значенням, осередненим за весь період повені, або навіть за рік при багатомодальних повенях. В такому разі розрахункові залежності аналітичного прогнозу руслових деформацій набувають виду

$$h = ST^{\frac{m-1}{m-r}} \left[ h_{i+1} \hat{\Delta} + h_i \hat{\Delta} - M_{i+1} \left( \hat{\Delta} - \hat{\Delta}^3 \right) - M_i \left( \hat{\Delta} - \hat{\Delta}^3 \right) \right] \quad (57)$$

$$\hat{\Delta} = \frac{D^r}{B^r T^{r/(m-r)} - 1} - 1, \quad \hat{\Delta} = 1 - \hat{\Delta} \quad (58)$$

$$T = 1 + \frac{m(m-r)A\Gamma}{rD^r h^{m+1} B^{m-r}} \quad (59)$$

$$S = \left( 1 - \frac{r}{r-1} \frac{D^r B^{m-r-1} h^m g_{ab}}{AQ^m} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (60)$$

У всіх наведених залежностях, коли мається на увазі тільки мостовий створ, треба замість ширини штучного русла  $B$  підставляти ширину отвору  $L_m$ .

Вираз (57) відрізняється від (54) додатковим множником  $S$ , що враховує природний процес замулення, на тлі якого розгортається процес розмиву. Чим більша величина  $g_{ab}$ , тим менше  $S$ , відтак зменшується і глибина розмитого русла. Коли фактична витрата наносів не перевищує транспортуючу спроможність потоку ( $g_{ab} = 0$ ), то залежність (57) перетворюється на (54).

Теоретичні дослідження впливу параметрів виправних дамб на величину розмива доводять помітний ефект довжини зони регулювання  $l_0$ , з розвитком якої руслові деформації під мостом зменшуються. В той же час параметр  $r$  на величину розмива практично не впливає.

Але якщо на річці спостерігається помітний дефіцит транспортуючої спроможності потоку, що призводить до фонового підвищення відміток річища, то виправні дамби в плані слід передбачати більш плавними, щоб запобігти замуленню отвору мостового переходу. Ця рекомендація виходить з аналізу величини  $S$  (60). Дійсно, із зростанням параметру  $r$ , тобто із збільшенням кривизни планових обрисів виправних дамб, величина  $S$  зменшується, а з нею зменшується і глибина в розмитому руслі, що впливає на залежності (57). Отже, за певних умов, ефект замулення може перевершити процес розмива, що призведе до зменшення живого перерізу мостового отвору.

Таким чином, в дисертації закладені теоретичні основи прогнозів руслових деформацій на мостових переходах через річки з русловою багаторукавністю, особливість яких полягає в залежності не тільки від міри стиснення потоку, а також від параметрів виправних дамб. Саме тому в умовах руслової багаторукавності не можна спочатку проектувати міст, а потім регуляційні споруди, бо це місце на рівнинних річках. Проектування мостових переходів через блукаючі річки є типовою задачею оптимального проектування, в якій застосовуючи методи математичного програмування вишукується оптимальні за техніко-економічними показниками варіант на множині величин отворів і параметрів виправних дамб. До цього варто додати, що, використовуючи сучасні засоби електронної обчислювальної техніки, система оптимального проектування стає водночас системою автоматичного проектування (САПР) мостових переходів на річках з русловою багаторукавністю.

## В И С Н О В К И

Найважливіші результати дисертаційної роботи полягають в створенні на новій методологічній основі математичних моделей взаємодії потоку з деформованим руслом та розробці аналітичних методів їх реалізації.

Цілим самостійне значення мають результати отримані по окремим напрямкам (розділам) роботи. Найсуттєвіші з них вбачаються в наступному:

- отримано теоретичне обґрунтування формули витрати донних наносів при пасмовій формі їх руху;

- виведена аналітична залежність трансформації руслової витрати в межах зони впливу висоководних мостових переходів, яка враховує міру стиснення та деформації вільної поверхні потоку;

- визначені змінні під час повені границі зон стиснення і розтікання;

- розв'язана у першому наближенні в аналітичній постановці планова задача руслових деформацій на мостових переходах через великі та середні рівнинні річки;

- встановлено тенденція до замулення малих річок і дефіцит транспортної спроможності потоку на річках з русловою гетерогенністю (букавичих);

На основі отриманих аналітичних рішень головні висновки можуть бути сформульовані таким чином:

- середня квадратична похибка розроблених інженерних способів прогнозу загального розмиву не перевищує середньої квадратичної похибки вихідної гідрологічної та морфологічної інформації;

- пік розмиву, який завжди відстає від піку повені,

може бути визначеним до розрахунку за допомогою графіки інтегральної функції гідрографа, що значно підвищує оперативність прогнозу;

- коефіцієнт форми русла, всупереч існуючим нормам, змінюється внаслідок руслових деформацій і може бути знайдений при розв'язанні планової задачі;

- протяжність зон стиснення і розтікання, змінюючись під час повені, залежить від міри стиснення та енергетичного стану руслового потоку;

- характер трансформації руслової витрати практично не залежить від величини загального розмиву;

- помилка у визначенні крупності наносів має дуже незначний вплив на остаточні результати прогнозу;

- подовження зони регулювання на мостових переходах через блукаючі річки призводить до зменшення величини розмиву під мостом, яка в той же час залишається майже незалежною від обрисів виправних дамб;

- в умовах помітного дефіциту транспортуючої спроможності потоку, планові обриси виправних дамб повинні бути більш гллавними, щоб запобігти замуленню отвору моста наносами.

#### ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

1. О параметре нестационарности потока ливневых вод. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1971, вып. 12, с. 9 -15, (соавтор В.А.Большаков).

Здобувачу належить обробка та аналіз результатів числового експерименту.

2. Проектирование струенаправляющих дамб на переходах через блуждающие реки. - В сб.: Гидравлика дорожных

водопропускных сооружений, Гомель: Издание БелНИИТ, 1973, с. 39 - 43, (соавтор В.А.Большаков).

В статті аналізуються запропоновані здобувачем складені обриси струминонаправляючих дамб.

3. Применение математических методов при расчете мостовых переходов на блуждающих реках. В сб.: Гидравлика дорожных водопропускных сооружений, Гомель: Издание БелНИИТ, 1973, с. 43 - 48.

4. Анализ обтекаемости струнаправляющих дамб составного очертания. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1977, вып. 24, с. 58 - 62.

5. Расчет общего размыва на блуждающих реках с учетом регулирующего влияния струнаправляющих дамб. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1977, вып. 24, с. 62 - 64.

6. Учет оптимальной ширины русла при расчете отверстий мостов на реках с русловой многоруканностью. - Автомобильные дороги, 1978, №2, с. 8 - 11, (соавторы А.А.Курганович, В.М.Шестаков, А.А.Дударь, В.Я.Савенко).

Здобувач особисто приймав участь в натурних обстеженнях Карпатських річок з русловою багаторуканністю та систематизації матеріалів для тексту статті.

7. Гидравлическое обоснование проектирования мостовых переходов на блуждающих участках рек. - Межвузовское полиграфическое предприятие при КИИХ, 1979. 94 с, (соавтор А.А.Курганович).

Здобувачем написані розділи 1...5 та підготовлені приклади гідравлічних розрахунків мостових переходів.

8. Определение руслового расхода на переходах через

равнинные реки. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1981, вып. 32, с. 16 - 20.

9. Характер изменения оптимальной ширины русел рек Карпат. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, вып. 32, с. 20 - 23, (соавторы А.А.Курганович, В.Я.Савенко, А.А.Дудерь).

Здобувач приймає участь в натурних обстеженнях та їх аналізі.

10. Интегрирование уравнения баланса наносов при стеснении мостовым переходом русловой зоны. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1982, вып. 35, с. 93 - 98.

11. Интегрирование уравнения баланса наносов для мостовых переходов с небольшим стеснением. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1983, вып. 36, с. 55 - 59.

12. Гидравлический расчет низководных мостовых переходов. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1984, вып. 38, с. 12 - 16, (соавторы: В.Ю.Даденков, А.А.Чурганович, Т.С.Степаненко).

Здобувачем розроблено метод розрахунку розподілу загальної витрати води між отвором і переливною частиною переходу на основі застосування закону збереження кількості руху.

13. Аналитическое решение уравнения баланса наносов при гелинейном законе изменения руслового расхода вдоль течения. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1984, вып. 39, с. 22 - 29

14. Аналитические основы расчета общих русловых

деформаций на мостовых переходах. В кн.: Тезисы докладов IV Республиканской конференции по научно-техническим проблемам гидравлики дорожных водопропускных сооружений. Саратов, 1986, с. 21 - 26.

17. Нестационарность общих русловых деформаций на мостовых переходах. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1985, вып. 40, с. 15 - 17.

16. Экспериментальные исследования изменения руслового расхода в верхнем бьефе мостовых переходов. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1985, вып. 41, с. 54 - 57.

17. Аналитический метод определения верхнего предела размыва. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1986, вып. 42 - с. 38 - 46.

18. Влияние ошибок определения расхода наносов на определение общего размыва русла. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1986, вып. 43 - с. 19 - 21.

19. Теоретическое определение зон сжатия и растекания мостовых переходов через равнинные реки. - В сб.: Русловые процессы на мостовых переходах, Москва: МАДИ, 1986, - с. 46 - 53, (соавтор Е.В. Гарнацкий).

Здоувачу належить теоретичне обґрунтування меж дикі дослідження.

20. Выбор начальных условий для расчета общих русловых деформаций на мостовых переходах через равнинные реки. - В сб.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1987, вып. 44, с. 11 - 14.

21. Обоснование предельных значений русловых деформаций на мостовых переходах. - В сб.: Гидравлика и гидротехника,

Київ: Техніка, 1987, вип. 45 - с. 14 - 18.

22. Определение характерных глубин в зоне растекания на мостовых переходах через равнинные реки. - В об.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1988, вып. 46 - с. 70 - 76.

23. Теоретическое обоснование длины зоны скатия на мостовых переходах через равнинные реки. - В об.: Гидравлика и гидротехника, Киев: Техніка, 1989, вып. 49 с. 52 -56, (соавтор Е.В.Сарнацкий).

Здобувачем розроблена методика дослідження.

24. Инженерные рекомендации по гидравлическим и русловым расчетам мостовых переходов на основе двумерной теории гидравлики (гидравлические расчеты). - Киев, 1980. - 21 с. - Ротапринт Оргдорстроя Миндорстроя УССР, (соавторы: А.А.Курганович, В.Я.Савенко).

Здобувачу належить матеріал, що стосується розрахунку і проектуванню струмоуправляючих та виправних дамб.

25. Инженерные рекомендации по гидравлическим и русловым расчетам на основе двумерной теории гидравлики (русловые расчеты). - Киев, 1980. - 23 с. - Ротапринт Оргдорстроя Миндорстроя УССР, (соавторы: А.А.Курганович, В.Я.Савенко).

Здобувачем написані розділи, де розглянуті способи розрахунків загального розмиву.

26. Рекомендации по проектированию активных способов защиты струмоуправляющих дамб мостовых переходов от местного размыва. - Киев, 1985. - 24 с. - Ротапринт Оргдорстроя Миндорстроя УССР, (соавторы: А.А.Курганович, А.А.Дударь, О.Н.Климов, Л.А.Шинкарук).

Безпосередня участь здобувача виявилась в підготовці і написанні пунктів 2.1 - 2.9 рекомендацій.

### ANNOTATION

Tkachuk S. G. The analytical prediction bases of the stream channel deformation on the river constraint by hydrotechnical and transport buildings.

The dissertation is on taking science degree of the Doctor of Technical Sciences on the speciality 05.14.07. - liquid, gas and plasm mechanic, Ukrainian National Technical University (KPI.), 1995.

26 scientific works containing theoretical researches of the natural stream moving under the variable limited conditions, which change in consequence of the stream deformation in hydrotechnical buildings zone influence, are maintained. It is known, that the main facts determining the size of the total backwash, are transformation of the stream flow and hydrography integral function. The proposed methods implantation of the stream deformation prediction was implemented in the process of projection. Data estimating the reliability of the offered decisions are adduced.

### АННОТАЦИЯ

Ткачук С. Г. Основы аналитического прогноза русловых деформаций при стеснении рек гидротехническими и транспортными сооружениями.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.07 - механика жидкости, газа и плазмы, Национальный технический университет Украины (КПИ), 1995

Защищается 26 научных работ, содержащих теоретические исследования движения естественных потоков с переменными граничными условиями, которые изменяются в результате деформаций

русла в зоне влияния гидротехнических сооружений. Установлено, что главными факторами, определяющими величину общего размыва, являются трансформации руслового расхода и интегральная функция гидрографа. Осуществлено внедрение предложенных методов прогноза русловых деформаций в практику проектирования, приводятся данные по оценке надежности предложенных решений.

Ключеві слова:

р'чка, когерентні вихори, трансформація витрати, розмив, мостови<sup>9</sup> п'єтехід.

*Г. Калуж*

40000

AB 33.565