

УДК 532.5

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ РУСЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ІНСТИТУТІ ГІДРОМЕХАНІКИ НАН УКРАЇНИ

Б. М. ОСТРОВЕРХ, В. В. ХОМИЦЬКИЙ

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Отримано 10.04.2007

Викладені досягнення у розвитку теорії та моделювання руслових процесів в ІГМ НАНУ на протязі 1952-2007 років. В інституті були сформульовані основні положення методики дослідження деформацій русел рівнинних річок з піщаним ложем, розроблена методика розрахунку повеневих та попускових течій і деформацій русел для передгірських та гірських річок. На основі теоретичних досліджень набули подальшої розробки методики розрахунку та лабораторного моделювання деформацій піщаних русел річок і каналів, у тому числі біля річкових гідротехнічних споруд, де наноси транспортуються, головним чином, у завислому та тягломому стані. Зараз роботи щодо вдосконалення теорії руслових процесів і методів чисельного та лабораторного моделювання виконуються в рамках комплексної теми, що охоплює співробітників чотирьох відділів і двох лабораторій (відділи гідродинаміки гідротехнічних споруд, прикладної гідродинаміки, динаміки пружних систем, технічної гідромеханіки, велика гідравлічна лабораторія та полігон у Київлово, обчислювальний центр берегової та річкової морфодинаміки).

Излагаются достижения в развитии теории и моделировании русловых процессов в ИГМ НАНУ за 1952-2007 годы. В институте были сформулированы основные положения методики исследования деформаций русел равнинных рек с песчаным ложем, разработана методика расчета паводковых и попусковых течений и деформаций русел для предгорных и горных рек. На основании теоретических исследований получили дальнейшее развитие методики расчета и лабораторного моделирования деформаций песчаных русел рек и каналов, в том числе вблизи элементов речных гидротехнических сооружений, где наносы транспортируются, главным образом, во взвешенном и влекомом состоянии. В настоящее время работы по усовершенствованию теории русловых процессов и методов численного и лабораторного моделирования выполняются в рамках комплексной темы, для выполнения которой привлечены сотрудники четырех отделов и двух лабораторий (отделы гидродинамики гидротехнических сооружений, прикладной гидродинамики, динамики упругих систем, технической гидромеханики, большая гидравлическая лаборатория и полигон в Киевлово, вычислительный центр береговой и речной морфодинамики).

The achievements in development of theory and modelling methods relating to river bed processes in the Hydromechanics Institute of NASU are stated out during 1952-2007 period of time. This time the basics were formulated for investigation methods on fluvial flows and bed deformations of lowland rivers with sand channel, for bed deformation of mountain and submountain regions of rivers as well. More advances were achieved in modelling and estimation of sand channels and canal tractional and suspended load materials and in the vicinity of hydrotechnical structures as well.

ВСТУП

Основи теоретичних та лабораторних досліджень руслових процесів в Інституті гідромеханіки НАН України були закладені трудами вчених – засновників Інституту – академіків НАНУ Сухомела Г. Й., Терпугова Н. В. Вони набули розвитку у роботах Розовського І. Л., Базилевича В. А., Єрьоменка Є. В., Гайдученка В. Й. та інших співробітників сучасного відділу гідродинаміки гідротехнічних споруд [1–4]. Тематика, що пов'язана з вивченням нестационарного руху водного потоку, виконувалась в інституті з 1955 до 1989 року, коли були сформульовані основні положення методики дослідження деформацій русел рівнинних річок з піщаним ложем, розроблена методика розрахунку повеневих та попускових течій і деформацій русел для передгірських та гірських річок. Зараз роботи щодо вдосконалення теорії і моделювання руслових процесів виконуються в рамках комплексної теми, що охоплює співробітників чо-

тирьох відділів і двох лабораторій (відділу гідродинаміки гідротехнічних споруджень (ГГС), прикладної гідродинаміки (ПГД), динаміки пружних систем (ДПС), великої гідравлічної лабораторії та полігону в Київлово, обчислювального центру). Для виконання вимірювальних робіт залучалися співробітники інших відділів інституту. Загальне наукове керівництво здійснюється заступником директора інституту по науковій роботі членом-кореспондентом НАН України Нікішовим В. І.

З 1983 р. багато робіт здійснено згідно рішення миськівконкому Києва про співпрацю між ІГМ та київськими проектними і виробничими установами. Усі значні проекти річного будівництва (Київська ГЕС, Московський і Південний мости та ін.) здійснювались з науковим супроводом інституту. У цьому напрямку зроблено уточнені рекомендації для визначення гранулометричного складу завислих наносів, що транспортуються річищем, та сформована методика розрахунку просторових деформацій русел на підставі розрахунку балансу

осередненого по глибині потоку завислих наносів. Нині проводиться низка досліджень за угодами з проектними та виробничими організаціями методами математичного та фізичного моделювання.

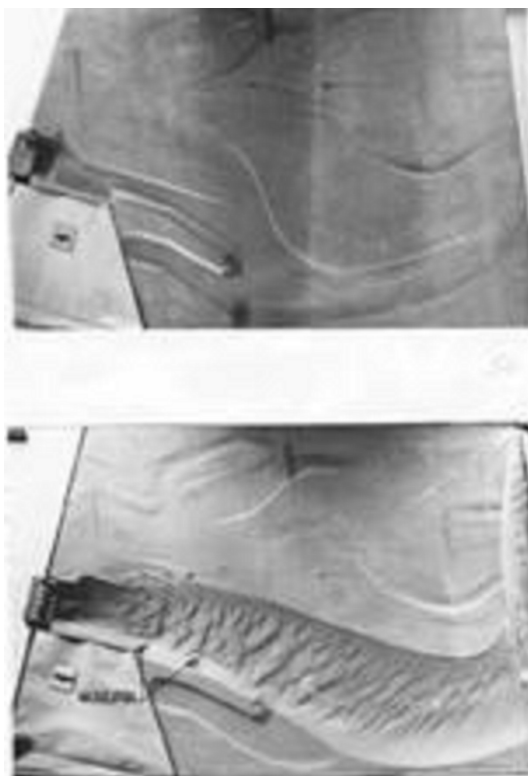


Рис. 2. Фрагмент аеродинамічного стенду з деформованою моделлю до і після експерименту (1960 р.)

На протязі багатьох років виконувалась тема, основний зміст якої був закономірним продовженням тем, розроблених раніше, і полягав у подальшому вдосконаленню методик розрахунку та лабораторного моделювання деформацій піщаних русел річок і каналів, у тому числі біля річкових гідротехнічних споруд, де наноси транспортуються, головним чином, у завислому та тягломому стані. Зацікавленість проектних і виробничих організацій проявлялась у пропозиціях на виконання численних договірних робіт щодо наукового супроводу проектних та експлуатаційних робіт на руслових ділянках річок. Як приклад наведемо крупні модельні дослідження течій у нижньому б'єфі Київської ГЕС 1950-1960 рр., проектування та будівництво якої здійснювалось в ті роки. На рис. 1 представлена фотографія великомасштабної жорсткої гідравлічної моделі. Середньомасштабні моделі і деформовані моделі виконувались на стендах закритої гідравлічної лабораторії та на аеродинамі-

чному стенді (рис. 2 і 3).



Рис. 3. Вигляд гідравлічної лабораторії ІГМ НАН України з моделями київської ділянки Дніпра (1963 р., аеродинамічний стенд ліворуч на другому плані)

1. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Чисельну математичну модель можна сформулювати в рамках наступних традиційних припущень:

- рух потоку в межах ділянки русла, що розглядається, є несталим та безвихровим, звідки робиться висновок, що витрати та інші гідравлічні характеристики потоку та донних відкладень – параметри потоку, що залежать від часу;
- інерційними (у тому числі коріолісовими) силами можна знехтувати;
- об'ємний зміст завислих наносів малий;
- внаслідок малості поперечних швидкостей потоку берегова лінія не деформується – тобто в процесі деформування русла змінюється тільки глибина розрахункового перетину.

За вихідні дані нерегулярної системи, що складається з кінцевого числа одновимірних ділянок русел, приймаються такі гідролого-морфометричні параметри:

Q_0, Q_i – витрати у витокі руслової системи та по ділянкам русел (елементам системи);

z_0, z_i – відмітка рівня моря і відмітки у вузлах розгалуження з розрахунку лінійного увявлення про вільну поверхню (перше наближення);

B_j, H_j, L_j – середня ширина, глибина та довжина ділянок (довжина завжди перевищує ширину, а у протилежному випадку розглядається планова задача);

w_j – середня площа поперечного перетину ділянки;

$w_0 = Q/U_0$ – площа неразмивного перетину;



Рис. 1. Великий стенд на території ІГМ НАН України з моделлю нижнього б'єфу Київської ГЕС (1960 р.)

n_j – коефіцієнти шорсткості в рукавах та їх ділянках;

d_{50} , ε – медіанний діаметр та пористість донних відкладень.

В основу математичної моделі руслової течії з урахуванням розгалуження рукавів (перша задача) покладені рівняння збереження та руху маси потоку у вузлах розгалуження та елементах рукавів, сполучності рівнів вільної поверхні у вузлах розгалуження та рівняння зв'язку між сумарними модулями опору і середніми відмітками. Для окремих ділянок руслового потоку видається можливим сформулювати рівняння руслових деформацій у рамках методу балансу наносів в одновимірній постановці (друга задача). Тоді для описання руху тяглих наносів необхідно додати рівняння збереження твердих витрат, рівняння стану наносів у вигляді формули наносів і рівняння форми перетинів русла [2–6]. Вказані рівняння входять у замкнену нелінійну систему рівнянь, яка вирішується методом послідовних наближень.

Для вирішення першої задачі робиться припущення про сталий рух води у відкритому одновимірному руслі. Звідси впливає, що швидкість течії усереднюється по живому перетину, а глибина усереднюється по ширині ріки [22, 23]. В межах ділянок параметри русла приймаються постійними, а падіння вільної поверхні – лінійним. Лінійною (кускочно-плоскою) припускається також вільна поверхня у межах послідовно розташованих ділянок русел без розгалуження. Задача нестійкого

руху потоку у відкритому руслі при наявності розгалуження і стоку в базове водоймище (у цьому випадку ділянка устя річки враховує також наявність барових ділянок злиття русла і базової водойми) може бути вирішена у рамках двовимірної теорії мілкої води Сен-Венана. Для руслових ділянок нестійкого руху відкритого потоку задача достатньо точно описується системою одновимірних рівнянь. В кінцево-різницевої аналогії рівняння набувають вигляду:

рівняння нерозривності руслового потоку

$$\Delta_t Q_i + \Delta_t w_i = 0; \quad (1)$$

рівняння несталоного руху рідини

$$\frac{Q_i^2}{K_i^2} \Delta_l \left(\frac{1}{w_i} \right) + \frac{1}{g} \Delta_t z_i = 0; \quad (2)$$

рівняння однозначного зв'язку середнього рівня і модуля опору (рівняння стану русла)

$$a_i^2 = F_i(z_i). \quad (3)$$

При наявності розгалуження до рівнянь додаються:

рівняння сполучності рівнів у вузлах розгалуження

$$z_{kd,j} = z_{ku,j} = z_{k,j} \quad j = 1 \dots N \quad (4)$$

та рівняння нерозривності течії у вузлах розгалуження

$$\sum_i^k Q_i A_{ij} = \Delta q_i \quad j = 1 \dots N, \quad (5)$$

де i – номер елемента; j – номер вузла; A_{ij} – матриця напрямку течії у вузлі (+1 – втікає, -1 – витікає); Δq – точність рішення задачі.

Для стаціонарної течії інерційними членами можна знехтувати. Внаслідок нелінійності рівнянь стану в рамках методу кінцевих різниць задача може бути розвязана способом послідовних наближень. Алгоритм рішення першої задачі прийнято таким:

1) З припущенням лінійності поверхні потоку задаються відмітки у всіх вузлах розгалуження рукавів, починаючи з z_0 – рівня моря, і визначаються падіння напору Δz_j на всіх ділянках рукавів.

2) За формулою Шезі-Маннінга визначаються середні модулі витрат $K_{m,j}$ та відповідні модулі опору F_j ділянок рукавів.

3) По рівняннях руху потоку, записаним у різницевому вигляді, нехтуючи інерційними членами, визначаються витрати на всіх ділянках рукавів.

4) Перевіряються неув'язки рівнянь нерозривності у всіх вузлах розгалуження рукавів. При цьому позитивною витратою вважається витрата, що втікає у вузол розгалуження, а негативною – витрата, що витікає з нього. У вузлах послідовного з'єднання ділянок (без розгалуження) неув'язка приймається рівною нулю, позаяк $Q_{j,i} = Q_{j-1,i}$.

5) Відшукується шляхом перебору вузол розгалуження, у якому неув'язка ΔQ_j має найбільше абсолютне значення (крім вузла “море”, де відмітка має постійне значення z_0). Релаксація неув'язки у цьому вузлі здійснюється шляхом виправлення відмітки вільної поверхні з урахуванням знаку неув'язки: якщо неув'язка має позитивний знак, то відмітка вузла підвищується на задану величину, що зменшується з кожним кроком ітерації у залежності від коефіцієнта релаксації $a_R \leq 1$. У зворотному випадку (неув'язка має негативний знак) відмітка вузла понижується на ту саму величину.

6) Далі операції повторюються, починаючи з п. 2 алгоритму, до тих пір, поки найбільша неув'язка у вузлах розгалуження не стане менше заданої точності розрахунку (2–3 відсотки загальної витрати).

Розроблений алгоритм має абсолютну збіжність, позаяк вказана замкнута система алгебраїчних рівнянь має єдине рішення. Швидкість збіжності залежить від заданої точності та коефіцієнту релаксації.

Природним продовженням використання чисельних методів розрахунку деформації дельтової системи на нерегулярній одновимірній сітці є створення моделі дослідження руслової деформації методом балансу наносів [6].

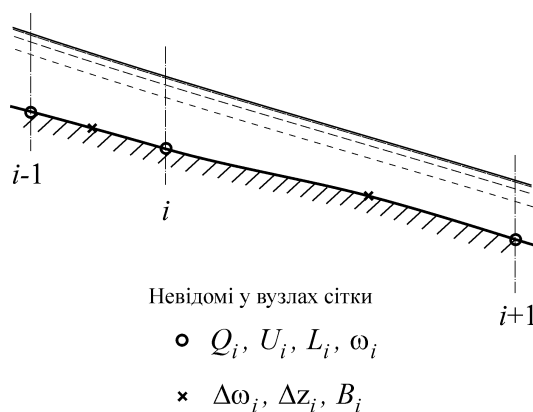


Рис. 4. Схема різницевої сітки деформованого русла

Математичну модель рішення задачі про деформування річкових та гирлових ділянок русла (друга задача) сформулюємо в рамках методу кінцевих різниць за явної схеми, доповнюючи систему рівнянь руху потоку рівняннями руху твердого стоку. В систему різницевих рівнянь входять:

$$\Delta_t(w_i) = \frac{\Delta t_s}{(1-w)\Delta l} \Delta l(Q_{s,i}); \quad (6)$$

$$\Delta z_{s,i} = -\frac{1}{B_i} \Delta_t(w_i), \quad (7)$$

де символом $\Delta_k(\dots)$ позначена кінцева різниця по індексній змінній на нерегулярній сітці (рис. 4). Для більш точного описання деформації русла в цьому випадку на русловому елементі рекомендується згущати сітку.

Підрахунок балансу наносів перш за все включає в себе визначення витрат наносів. У результаті аналізу [11] численних залежностей різних авторів для підрахунку витрат завислих наносів та нагурних вимірів на рівнинних річках басейнів Чорного і Азовського морів (представлених в гідрологічних щорічниках) було встановлено, що найбільш теоретично обґрунтованою [12, 13] та більш зручною для практичних розрахунків наносів у рівнинних річках є залежність М.А. Великанова:

$$S = A \frac{u^3}{gHW}, \quad (8)$$

де S – мутність потоку; u – середня швидкість потоку; H – середня глибина потоку; g – прискорення вільного падіння; W – середньозважена гідравлічна крупність завислих наносів; A – безрозмірний коефіцієнт пропорційності.

Визначення витрат наносів Q_s звичайно розглядається для двох характерних випадків: випадок крупнозернистих тяглих та випадок мілкозер-

нистих тяглих і напівзавислих наносів. Суттєвим результатом аналізу руху наносів у річці Дніпро є визначення залежності, що встановлює зв'язок швидкості потоку з наведеними у гідрологічних щорічниках повними витратами завислих наносів (що включають руслоформуєчі і транзитні наноси), яку для підрахунку витрат руслоформуєчих завислих наносів $Q_{\text{русл}}$ визнано використовувати у такому вигляді [5, 8]:

$$Q_s = q_s b_H = A_1 \frac{u^4}{W_b} b_H - \frac{W_{tr}}{W_{\text{русл}}} Q_{tr}, \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right], \quad (9)$$

де b_H – ширина потоку, що транспортує руслоформуєчі наноси; W_b , W_{tr} – середньозважена гідравлічна крупність, відповідно, руслоформуєчих і транзитних завислих наносів (в м/с); Q_{tr} – витрати транзитних завислих наносів, які, так само як і величина W_{tr} , приймаються незмінними по усій довжині ділянки ріки значної протяжності, що розглядається (тобто незалежними від швидкості потоку). Хоч переважна маса руслоформуєчих наносів у рівнинних річках з піщаним руслом переміщується у завислому стані, проте в балансі наносів слід враховувати також витрати тяглих наносів Q_l , що переміщуються дном русла у вигляді гряд. Для визначення цих витрат рекомендується використовувати залежність

$$Q_l = q_l b_H = A_l u^4 b_4, \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right], \quad (10)$$

в якій коефіцієнт пропорційності A_l слід визначати згідно залежності, що узагальнює результати експериментального і натурального виміру швидкості переміщення та розмірів гряд [5, 6, 7]:

$$A_l = \frac{110}{H^{3/2}} + \frac{61}{H^{1/2}} \left[\frac{\text{гс}^3}{\text{м}^5} \right]. \quad (11)$$

У деяких випадках у разі відсутності аналізу спостережень користуються формулою Леві [6], яка може бути представлена в такому зручному вигляді:

$$Q_s = D_1 U^4 w \left(1 - \frac{w}{w_0} \right), \quad (12)$$

де D_1 – параметр, що залежить від середньої глибини русла h_a та діаметра часток тяглих наносів d ,

$$D_1 = \frac{k_1}{(gd)^{3/2}} \left(\frac{d}{h_a} \right)^{5/4} = \text{const}. \quad (13)$$

Другий випадок транспорту наносів у вигляді мілких піщаних часток в напівзавислому та тяглому стані звичайно описується формулою, що враховує тертя, обумовлене зернистою шорсткістю дна

[6]. З врахуванням коефіцієнта Шезі за формулою Маннінга, витрати наносів визначаються за формулою:

$$Q_s = D_2 \frac{B}{h_a} U^6, \quad (14)$$

де D_2 – параметр розмірності, що залежить від щільності наносів, коефіцієнта форми живого перетину k_2 (для перетину, близького по формі до параболічного, наближено можна прийняти $k_2=1.5$ [6]), діаметра і гідравлічної крупності w_0 часток,

$$D_2 = k k_2 \left(\frac{\rho}{\rho_0 - \rho} \right)^3 \frac{w_0}{gd} = \text{const}. \quad (15)$$

Коефіцієнт k у формулі (15) бажано визначати за результатами натурних спостережень, зокрема, за рухом побочнів та гряд, а також за даними ремонтних черпань.

Наведену систему різницевих рівнянь розв'язуємо на нерегулярній одновимірній сітці (рис. 4) з урахуванням формул витрат наносів (9) і (12). Із схеми помітно, що деформування русла (замулення чи розмив дна) відбувається за наявності градієнту швидкості течії, а при постійній швидкості в сусідніх елементах сітки спостерігається транзитний рух наносів. Часовий крок (в секундах) різницевої схеми призначається з умови забезпечення прирощення глибини не більше точності промірів (звичайно 0.05 ... 0.10 м) [8]. Подібним чином складено алгоритм розв'язку планової задачі, де кінцево-різницеві рівняння складаються на нерегулярній двовимірній сітці.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основним об'єктом апробування та впровадження розробленої методики розрахунку деформацій піщаних русел є ділянка річки Дніпро біля Києва протяжністю 40 км від створу Київської ГЕС до с. Вишеньки, де всі ці роки, незважаючи на підпір Канівського водосховища, спостерігаються суттєві деформації русла та небезпечність порушення стійкості інженерних споруд та мереж, що обумовлене затримкою стоку наносів у водосховищі Київської ГЕС та інтенсивним зосередженим забором піску з русла Дніпра на всьому протязі цієї ділянки. Дослідження багаторічних руслових деформацій Дніпра на цій ділянці, що виконане, є складовою частиною комплексного дослідження, що проводилось численними проектними та виробничими установами Києва. Мета цього комплексного дослідження – розробка пропозицій щодо надійної

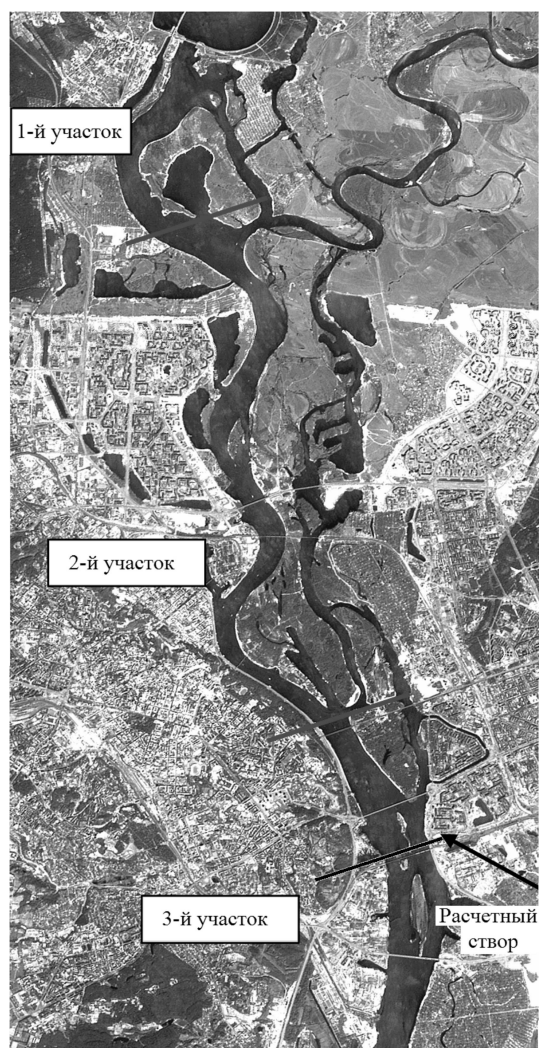


Рис. 5. Схема ділянок київської агломерації річок Дніпро і Десна

експлуатації інженерних споруд і мереж, а також пропозицій про можливі місця розробки ґрунту в руслі та заплавах річки Дніпро на довгостроковий період. З 1983 року у цьому напрямку виконано збір матеріалів руслових зйомок і гідрологічних даних за багаторічний період і аналіз багаторічних переформувань русла Дніпра на досліджуваній ділянці за період 1960-1982 рр. Результати цього аналізу багаторічних переформувань наочно демонструють суттєве перепоглиблення дна русла по всій довжині розглянутої 40-кілометрової ділянки, обумовлене виключно інтенсивним забором піску з дна ріки для виробничих задач, та вплив цього забору на стійкість розташованих тут опор мостів, дюкерів і кабельних переходів (рис. 5).

Під час досліджень був проведений збір свід-

чень про місце розташування, строки і обсяги інтенсивної розробки піску для виробничих потреб у руслі річки Дніпро, і з урахуванням цього було виконано аналіз зйомок русла ділянки Дніпра за період 1960-1982 рр., що дозволило оцінити руслову ситуацію, інтенсивність деформацій дна і зв'язок цих деформацій з результатами забору ґрунту в руслових кар'єрах. Результати цього аналізу, можуть бути також використані для оцінки отриманих у роботі закономірностей прогнозних багаторічних переформувань русла та вірогідності розрахункових величин деформацій дна.

За час роботи та впровадження результатів наукових досліджень у народне господарство з 1983 р. виконані такі значні теми:

1. Гідравлічні дослідження течій річок Дніпро, Об та інших, аналіз багаторічних переформувань русла річки Об біля м. Барнаула (за 1897-1982 рр.). За цими дослідженнями запроектовані і побудовані великі руслові нерозмивні моделі ділянок річок. Зокрема на ділянці річки Об довжиною 14 км було виконано попередні експерименти щодо швидкісної структури в природно-побутових умовах біля інженерних споруд і водозаборів промислового водопостачання. В подальшому передбачалось цю руслову модель використовувати також для дослідження планових течій у звивистому розгалуженому руслі в загальнонауковому плані, а не тільки для виробки оптимальних регуляційних заходів, запланованих програмою.

2. Математичне моделювання течій в районі Південного, Дарницького мостових переходів м. Києва на річці Дніпро (починаючи з робіт Базилевича В. А. з київськими інститутами Союздорпроект та Союзтранспроект). В 1983 році було виконано збір вихідних даних та їх обробка з проведенням гідроморфологічного аналізу. Роботи були продовжені з 2003 р., коли почалося проектування та наступне будівництво нового авто-залізничного переходу поблизу Дарницького залізничного мосту у столиці.

3. Гідравлічні дослідження водозабірної споруди на річці Дунай (робота Дейнеки В. І. – хоздоговір з Укрпівденгіпроводгоспом Держкомводгоспу). В рамках цього та інших договорів в Інституті гідромеханіки АН УРСР була розроблена конструкція водозабору, який було визнано винаходом (а.с. № 821644) і побудовано в голові каналу Дунай-Сасик та Деснянського [7]. У 1983 році були виконані натурні дослідження з метою перевірки ефективності цієї споруди. Аналіз результатів цих досліджень довів суттєву перевагу запропонованої конструкції в аспекті мінімізації замулення голови каналу.

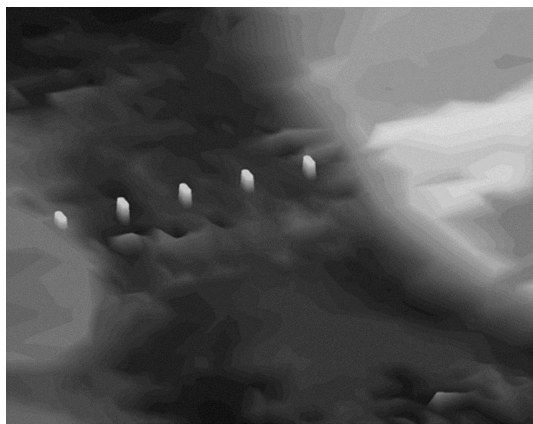


Рис. 6. Ділянка річки Дніпро, що моделювалася за вимірами Союздорпроекту у 2004 р. (Телицька протока у створі Дарницького мосту)

4. З 1998 р. виконуються роботи в рамках наукового супроводу проекту глибоководного судового ходу Дунай–Чорне море на території української ділянки Кілійської дельти.

Першим етапом цих досліджень є аналіз багаторічних переформувань київської ділянки річки Дніпро за період 1960–1982 рр. (Київська ГЕС стала до ладу восени 1963 р.). Об'єктом аналізу були періодичні численні руслові зйомки, здійснені техділянкою ДБУВП'а та зйомки охоронних зон різних інженерних споруд і мостів, виконаних в окремі роки різними проектними і експлуатаційними установами м. Києва. Деякі гідрологічні дані, а саме: криві $Q = f(H)$ в побутовому стані і при підпорі Канівської ГЕС, уклони вільної поверхні води під час високих повеней, найбільш характерні гідрографи по в/п Київ за період 1921–1970 рр., нормативні графіки коливань рівнів в створі північної границі жилмасиву “Оболонь” за час вимірів швидкостей (Союздорпроект) в створі Московського мосту до його побудови у 1969 році, а також аналіз переформування русла річок Дніпро і Десенка на ділянці від гирла Десни до Подільського мосту за період 1913–1974 рр. представлені у звіті ІГМ АН УРСР за 1977 рік.

Сьогодні в межах м. Києва в річковій заплаві та через р. Дніпро будуються мостові переходи, а вздовж берегів – наминаються майданчики для будівництва та здійснюється прокладання шляхів сполучення. Згідно генплану передбачаються будівельні роботи на Рибальському та Трухановому островах, урочищі Горбачиха, Нижня Теличка, Осокорки та нижче аж до Плотів. Особливе занепокоєння викликають розташування та обсяги видобутку піску для будіндустрії та наміву будмай-

данчиків на руслових ділянках (див. малюнок 5).

Інтенсифікація промислового та житлового будівництва у Києві призвела до того, що вже у згаданому рішенні міськвиконкому м. Києва відмічається, що внаслідок безконтрольної розробки ґрунту в руслі Дніпра та його прибережних заплавах склались умови, які не відповідають вимогам надійної експлуатації життєво важливих для міста об'єктів – мостів, дюкерів, гідротехнічних та інженерних споруд. У зв'язку з цим виникла потреба в комплексному дослідженні руслових процесів від Київської ГЕС до с. Вишеньки (довжиною 40 км – 109–149 км від гирла Дніпра) (рис. 5) з метою проведення розрахунків розповсюдження вниз за течією загальних розмивів дна Дніпра на багаторічний період и розробки рекомендацій щодо захисту мостів, інженерних споруд від місцевих і загальних розмивів на основі довгострокових прогнозів руслових процесів і щодо видобування ґрунту з русла Дніпра.

Досліди на гідравлічних моделях з розмивом русла відзначаються великою трудомісткістю. Значного часу потребує настроювання, тарировка моделі, зміна гідравлічних режимів, не кажучи про тривалість завершення процесів розмиву та затрати часу на інструментальні виміри гідравлічних характеристик потоку і визначення геометричних параметрів переформування рельєфу, ложа русла.

При формуванні вихідних даних моделей зараз широко використовуються засоби геоінформаційних систем, що допомагають у проектуванні фізичних і чисельних моделей, візуалізації та інтерпретації результатів. Доступні гідрологічні та гідроморфометричні матеріали річок складаються у розрахункову базу даних. Так, на рис. 6 наведено тривимірне чисельне зображення ділянки річища Дніпра, що використовувалася для створення кінцево-різницевої розрахункової сітки та профілів дна фізичної моделі і для візуалізації результатів розрахунків (рис. 7).

Досвід досліджень, проведених в ІГМ НАН України за термін з 1960 рр., свідчить, що видобуток піску з руслових кар'єрів, намив островів, берегів та інші подібні роботи пов'язані з днопоглиблюванням і проведені не належним чином, можуть завдати непоправної шкоди річковим спорудам, особливо таким, як опори мостів, водоводи, кабелі та магістральні трубопроводи, що прокладені на дні, призвести до підвищення відміток води в результаті стиснення повеневого потоку. В зв'язку з цим згадані роботи повинні плануватися в комплексі з урахуванням перспективного будівництва з метою недопущення затоплення та розмиву берегів та островів багаторукавної запла-



Рис. 7. Поле швидкостей, отримане на розрахунковій ділянці Дарницького мосту

ви Дніпра з обов'язковим прогнозуванням можливого негативного впливу. Інститут гідромеханіки НАН України пропонує державним установам розробити та виконати комплексний довгостроковий проект "Оцінка техногенного впливу берегових та руслових споруд, а також видобутку річкового піску, на гідрологічний та морфологічний режим річки Дніпро в межах м. Києва". Метою роботи є вирішення задач прогнозування загальних деформацій дна та розробка рекомендацій щодо мінімізації місцевих деформацій на базі моніторингу та програмної системи моделювання динаміки течій і твердого стоку, а також, при необхідності, детального фізичного моделювання узгодженої проектною ділянкою річки Дніпро у м. Києві. З допомогою матеріалів гідроморфометричних зйомок та фізичних, аналітичних і чисельних моделей деформацій окремих річкових ділянок буде проведено обґрунтування технічних рішень для мінімізації розмиву під час будівництва та експлуатації річкового судового ходу та безпеки річкових переходів, зокрема, дюкерного переходу Бортничської системи.

Вперше в інституті розроблена методика дослідження розмивних гідравлічних моделей та виконано моделювання розмиву опор існуючого залізничного Дарницького мосту і прогнозування впливу нового мостового переходу, що будується поруч,

на стійкість проти розмиву опор на найбільш небезпечній ділянці, визначеній за матеріалами натурних спостережень. Проведено теоретичне обґрунтування гідравлічної моделі розмиву русла річки Дніпро на ділянці мостових переходів Київ-Московський – Дарниця. Базуючись на цих матеріалах та зважаючи на можливість технічної бази гідравлічної лабораторії ІГМ НАН України, визначені основні параметри гідравлічної моделі з розмивним дном. Для дослідження процесів розмиву вибрано характерний фрагмент ділянки старого і нового мостових переходів через правий рукав Дніпра, що включає мостові опори № 3 ... 5 (відповідно правого берега в межах Телицької протоки).

Як зазначено в роботах [1, 12], гідравлічні моделі з розмивним руслом відносяться до розряду найскладніших в теоретичній постановці задачі і в експериментальному забезпеченні відповідності модельних результатів натурним даним. У таких моделях умови подібності різних процесів можуть настільки суперечити одне одному, що потребує певних компромісів при проведенні експериментів та подальшому аналізі їх результатів. Так, часто вимушена необхідність використання річкового піску для формування моделі ложа призводить до невідповідності критеріїв подібності щодо щільності та крупності наносів. Багато дослідників у цих

випадках нехтують точним виконанням основного критерію подібності по числу Фруда заради отримання гідроморфодинамічної подібності¹.

В деяких лабораторіях використовують малі і навіть дуже малі розміри моделей. Інтерпретація результатів у таких випадках вимагає великої обережності, досвіду і, можливо, обмежень. Якісні дані, отримані в таких випадках, часто усе-таки можуть бути цінними, наприклад, при порівнянні варіантів споруд (див. [9]), ґрунтуючись на подібності рифелів на моделі грядам в натурі. Показано, що навіть при використанні малих моделей, а також при спотворенні горизонтальних та вертикальних масштабів можуть бути отримані якісно подібні результати, що мають практичну та теоретичну цінність, особливо корисну при якісному порівнянні варіантів розмиву споруд та заходів по зменшенню замулюваності русел та каналів. Для позитивного вирішення задачі відповідності результатів експерименту натурним даним необхідно проводити серійні досліді. Тільки на основі аналізу їх результатів виявиться можливість внесення відповідних корекцій проектних параметрів споруд.

Для обґрунтування отриманих результатів проведено комплекс дослідів на спеціально обладнаному стенді гідравлічної лабораторії при різних гідравлічних режимах руслового потоку. Це дало можливість досягти відповідності параметрів руслових процесів, отриманих на моделі і в натурних умовах. У відповідності до зазначених вище умов серія дослідів, зважаючи на їх самоцінність, про-

¹Тут дуже слушно навести зауваження, висловлені відомим експериментатором Г. Глазіком (1997) "...Ми не вимагаємо дотримуватися виконання закону Фруда. ...Цим законом часто нехтують заради більшої морфологічної подібності (руслових морфологічних процесів), корегуючи масштабний ефект шляхом компенсації (наприклад, спотворення глибини, кута укосу, діаметра часток), яка не конформна з законом Фруда. Подібне натурі формування річкового дна моделі повинно бути виправдане шляхом порівняння топографічних утворень спостережених в натурі (прототипі) і на моделі, можливі відхилення мають бути скореговані при настроюванні моделі. По суті, задача полягає в тому, аби річкові форми (дюни, рифлі) на моделі і в натурі були подібними. Ця процедура означає, що модель повинна бути калібрована і перевірена шляхом порівняння з польовими вимірюваннями. Моделі річок з деформованим дном, виконані таким чином, не є подібними у точному розумінні, а вважаються подібними у так званій наближеній подібності. Що є не теоретичним, а напівемпіричним підходом. Моделювання річок з деформованим руслом у практиці річкової гідротехніки з позитивним результатом вирішення відповідних проблем може бути знайдене, наприклад, в ряді публікацій в останні роки, де дані також рекомендації з практичного виготовлення моделей і проведення дослідів. Як необхідна умова збігу моделі з натурою при русловому моделюванні з деформованим дном повинен дотримуватися певний мінімум абсолютних розмірностей!"

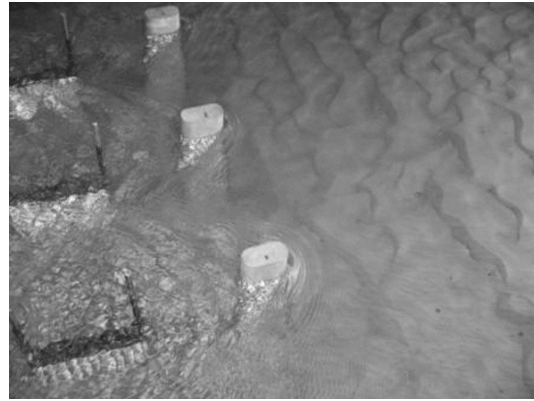


Рис. 8. Модель під час проведення досліді

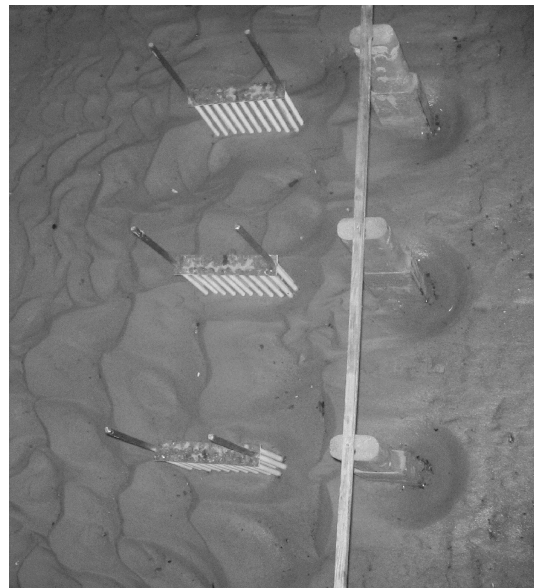


Рис. 9. Модель після проведення досліді

довжена серією масштабно та динамічно змінених моделей різних руслових форм. Створена гідравлічна руслова модель для дослідження розмивів під мостами (рис. 8 та 9). Розроблено і апробовано в ході проведення дослідів блок контрольно-вимірювальної апаратури, який включає систему збору, обробки та аналізу експериментальних результатів. Проведені досліді дозволили виявити можливість виникнення при визначених умовах ефекту негативного впливу на розмив мостових опор Дарницького мосту послідовного та близького розташування опор мостового переходу, що будується. У той же час вплив існуючого мосту на умови роботи нижнього мосту виявився позитивним, що спостерігається на моделі (рис. 9) після проведення цикла розмиву. Запропоновано заходи



Рис. 10. Результати математичного моделювання деформування барової ділянки устя рукава Бистрого (розрахунок виконано по морфометрії 2003 р.)

для попередження можливих негативних наслідків.

В останні роки в зв'язку з відновленням судового ходу українською ділянкою дельти Дунаю значна увага приділена питанням формування дельтових та барових утворень при впадінні до водосховищ та неприливних морів [11] та розробці методів математичного і фізичного моделювання та дослідження процесів деформування цих елементів дельтових структур (в тому числі з врахуванням техногенного впливу) із застосуванням елементів геоінформаційних технологій.

Утворення специфічних донних та берегових форм на гирлових ділянках річок суттєво залежить від умов взаємодії річкових та хвильових процесів. В якості граничних умов для барової ділянки раціонально прийняти гирловий умовно стійкий перетин і перетин за гребенем бару, де русловий струмінь набуває уповільненого руху. Наближено швидкість течії за гребенем бару після

устя борознини визначаємо за формулою гашення інерційного струменя на узмор'ї. Введення умовного розгалуження на баровій частині дозволяє врахувати різні умови течії на барі та на борознині (каналі).

Тут наведемо результати розрахунку деформацій дна устевої та барової ділянок, які виконано з урахуванням даних гранулометричного і мінералогічного складу донних відкладів за розрахунковий період, що складає 1 тиждень. Результати розрахунку деформацій наведені на фоні космічного знімку та проектних креслень (рис. 10). Аналіз чисельних результатів деформації барової частини свідчить, що розвиток річкового схилу бара відбувається у вигляді гряд. Найбільший намів – замулення – відбувається за гребенем з подальшим переміщенням вздовжбереговою течією у бік морської коси. В той же час в районі річкового схилу північної борознини, що періодично промиває гребінь лівобережної коси, помічено утворення зо-

ни ерозії з перевідкладенням матеріалів на гребінь бару. Цей ефект підтверджено також аналізом натурних вимірів і дозволяє пояснити утворення затопленої коси чи осередків на лівому березі устя. Ще одне суттєве випадіння наносів помічено в районі південної борознини, яке інтенсифікується після прокладки каналу та під час повеней, аж до перекриття матеріалами замулювання траси каналу.

1. Розовский И. Л. Движение воды на повороте открытого русла.– К.: Изд. АН УССР, 1957.– 187 с.
2. Розовский И. Л., Базилевич В. А., Еременко Е. В. Неустановившееся движение водного потока.– К.: Наукова думка, 1967.– 267 с.
3. Базилевич В. А., Ткаченко В. А. Плановое распределение скоростей в слабоизвилистых каналах // Гидротехника и мелиорация.– 1982.– № 10.– С. 27–29.
4. Базилевич В. А., Козицкий В. В. Методика расчета пространственных деформаций дна в руслах равнинных рек // В кн.: Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах.– М.: Наука.– 1985.– С. 115–121.
5. Basilevich V. A. alt. Prediction of long-term evolution of lowland river channels // IHP-V Technical documents in hydrology. UNESCO, Paris.– 1997.– № 10.– P. 354–360.
6. Гришанин К. В. Теория руслового процесса.– М.: Транспорт, 1972.– 216 с.
7. Дейнека В. И. Экспериментальные исследования крупного бесплотинного водозабора из равнинной реки // Гидромеханика.– 1984.– № 49.– С. 63–66.
8. Базилевич В. А. Экспериментальные исследования расходов влекомых наносов // Водные ресурсы.– 1984.– № 1.– С. 10–19.
9. Сنيщенко Б. Ф. О связи высоты песчаных гряд с параметрами речного потока и русла // Метеорология и гидрология.– 1980.– № 6.– С. 84–91.
10. Снищенко Б. Ф. Закономерности руслового процесса и принципы прогнозов русловых деформаций.– Автореферат докторской диссертации. ИВП АН СССР: М., 1983.– 34 с.
11. Островерх Б. Н., Хомицкий В. В. Моделирование заносимости морского подходного канала на баровых участках устьев рек бесприливного моря // Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геоэкология.– Калининград.– 2004.– С. 275–278.
12. Glazik G. A perspective of mobil bed river modeling // IHP-V Technical documents in hydrology. UNESCO, Paris.– 1997.– № 10.– P. 380–393.