

UDC 551.435.125; 551.438.5; 627.157

Iryna M. Gorban¹, PhD, Associate professor of the Department of Technical Hydromechanics of the Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine
ORCID ID 0000-0001-9662-2813 *e-mail*: ivgorban@gmail.com

Anna S. Korolova¹, PhD, Researcher of the Department of Technical Hydrodynamics of the Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine
ORCID ID 0000-0003-0693-4552 *e-mail*: kan5nas@gmail.com

Georgiy P. Sokolovskiy¹, Leading engineer of the Department of Technical Hydromechanics of the Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine

Pavlo Y. Romanenko¹, Leading engineer of the Department of Hydrodynamics of Hydroengineering Construction of the Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine

Stepan M. Srebnyyuk², PhD, Professor of the Department of Architecture and Urban construction of the National University «Yuri Kondratyuk Poltava Politechnic»

¹ Institute of Hydromechanics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² National University «Yuri Kondratyuk Poltava Politechnic», Poltava, Ukraine

PHYSICAL SIMULATION OF EROSION OF BOTTOM PITS

Abstract. *The present paper is devoted to research of the erosion of large-scale sand pits in the water flow. The investigations were performed in the hydrodynamic flume with sandy bottom. To provide suitable conditions for sediment transport in the flume, the analysis of the factors leading to the motion of sediments was carried out in accordance with the Shields diagram. It was shown that the flow regime created in the laboratory channel promotes the development of natural bed forms such as ripples. Estimations of the velocity of movement of the ripples were obtained. The experiments with large sand pits on the flume bottom demonstrated that those disturb the balance of sediments and cause the reformatting of the water flow. To assess the influence of the pit configuration on the erosion process, two-dimensional triangular and trapezoidal pits were considered. It was found that the longitudinal profile of the triangular pit changes due to sediment deposition on its upper slope and erosion of the lower slope. The pit upper slope levels out and shifts forward due to the continuous flow of sediment in this region. The depth of the unevenness also decreases owing to deposition of the sediment directly on its bottom. Due to the blow of water jet to the pit lower slope, the zone of maximum erosion of the bottom surface is observed here. The bottom reformatting leads to the displacement of the pit downstream. Studies of the erosion of the trapezoidal pit have shown that its upper slope is first shifted toward the lower slope until the trapezoidal profile turns into a triangular one. The pit erosion causes also the deformation of natural forms of the channel bed and destabilization of sediment discharge. The analysis of the obtained data demonstrated that the reformation of channel bed is a durable process depending of the ratio of pit scales to the volume of sediment. The present study is useful for development of engineering solutions directed to reduction of risks caused by the interaction of sand quarries with hydraulic structures in rivers.*

Key words: *erosion; sediment transport; sand ripples; bottom pits*

І.М. Горбань¹, А.С. Корольова¹, Г.П. Соколовський¹, П.Ю. Романенко¹,
С.М. Срібнюк²

¹ Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

² Національний університет "Полтавський політехнічний інститут ім. Юрія Кондратюка", м. Полтава, Україна

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗМИВУ ДОННИХ ЗАГЛИБЛЕНЬ

***Анотація.** Виконане фізичне моделювання морфологічних процесів, зумовлених розмивом великих донних заглиблень (піщаних кар'єрів) потоком води. Режим течії в лабораторному каналі вибирався таким чином, щоб ініціювати рух наносів на піщаному дні. Показано, що створені умови сприяють появі та розвитку природних форм донної поверхні, а саме – гряд. Заглиблення, що досліджувалися, розташовувалися поперек каналу та мали трикутну і трапецієподібну форми у перерізі. Отримано, що в результаті відкладення наносів на верховому укосі та розмиву низового укосу змінюється поздовжній профіль нерівності та відбувається її переміщення вниз за течією. При цьому мають місце деформація природних форм донної поверхні та дестабілізація стоку наносів. Аналіз показав, що переформування дна при взаємодії потоку рідини з донним заглибленням є досить тривалим процесом, який залежить від співвідношення розмірів і форми заглиблення з обсягом стоку наносів. Дане дослідження може бути основою для розробки інженерних рішень щодо зменшення впливу великих піщаних кар'єрів на еволюцію потоку в природних водоймах та попередження техногенних аварій, зумовлених взаємодією піщаних кар'єрів з гідротехнічними спорудами.*

***Ключові слова:** розмив; транспорт наносів; піщані гряди; донні заглиблення*

Вступ

Річкове русло належить до складних форм рельєфу, що весь час змінюються під впливом течії води. Зазвичай його еволюція залежить від періодичних змін в оточуючому середовищі – пори року, кліматичних умов тощо. Зовнішнє втручання у природний розвиток русла викликає його зворотну, часто негативну, реакцію на порушення факторів формування.

Найнебезпечніші руслові явища виникають через розробку донних кар'єрів. Ці штучні донні утворення мають, як правило, великі глибини і поперечні розміри, завдяки чому істотно впливають як на морфометричні характеристики русла, так і на гідрологічний режим потоку. Морфологічні процеси на донній поверхні, викликані інтенсивною промисловою діяльністю, повністю руйнують природні форми руслового рельєфу і, тим самим, порушують баланс стоку наносів, які формують русло. В умовах інтенсивних антропогенних навантажень природні процеси, спрямовані на відновлення системи, найчастіше не справляються з величезними масштабами видобутку донного матеріалу, що призводить до формування глибоких ям на річковому дні.

Еволюція таких утворень викликає розвиток ерозійних процесів на донній поверхні водойми і, тим самим, ініціює руслові деформації різної спрямованості. Надалі ці явища можуть призвести до зниження стійкості русла та пошкодження гідротехнічних споруд, через що є загроза виникнення екологічно небезпечних ситуацій в оточуючому середовищі. Тому,

дослідження еволюції глибоких донних утворень техногенного характеру є вкрай важливим для отримання повної картини їхньої поведінки та вироблення пропозицій щодо зменшення їх впливу на руслові процеси та річкові технічні споруди.

Більшість робіт, в яких досліджувалися руслові течії, головним чином, були спрямовані на визначення умов щодо початку руху наносів [1–4]. Вони, як відомо, можуть транспортуватися у формі донних наносів або донних та зважених наносів, що залежить від розміру частинок і режиму течії. Найбільш широко застосовуються методи, які ґрунтуються на концепції, що транспорт наносів починається при постійному значенні безрозмірного донно-зсувного напруження або критичної напруги Шільдса, і застосовується підхід, подібний до діаграми Шільдса. Всебічний огляд та систематичний аналіз досліджень щодо початку руху наносів представлений в роботі [5]. Там показано, що в окремих експериментах спостерігалось досить істотне відхилення вимірних критичних зсувних напружень від стандартної кривої Шільдса. Однак, порівняння кривих, запропонованих різними авторами, з доступними даними [6] і методами для передбачення умов початку руху частинок на однорідному піщаному дні [7] показало, що діаграма Шільдса забезпечує простий рівень можливості прогнозувати експериментальні спостереження і дає хороший результат для досягнення інженерних і седиментологічних цілей.

Одним з найбільш ґрунтовних натурних і лабораторних досліджень щодо переносу домішків є робота [1], де представлений метод, який дає можливість обчислити потужність перенесення донного матеріалу, виходячи з висоти стрибка і швидкості частинок, а також концентрації наносів. Також слід відзначити роботи [8–11]. Результати досліджень щодо початку руху осадових частинок на негоризонтальних донних поверхнях наведені в [12–14].

Важливим фактором транспорту донних наносів є утворення й розвиток природних донних форм, таких як ріфелі і дюни. Більшість досліджень в цьому напрямку спрямовані на визначення основних геометричних характеристик цих утворень та вивчення особливостей структури водної течії над ними [15–18]. В цих та інших роботах показано, що розмір і форма донних конфігурацій залежать, головним чином, від швидкості і глибини водної течії, фізичних властивостей рідини і осадових частинок, а також відповідних чисел Фруда та Рейнольдса. Також наголошується, що у випадках, де переважає транспорт донних наносів, дюни часто мають асиметричний профіль з кутом нахилу підвітряного боку, що дорівнює куту природного укусу ($\sim 30^\circ$), а потік над ними характеризується наявністю області постійного поділу біля підвітряного боку (в западині). Щоб зрозуміти вплив донних конфігурацій на поле потоку і наслідки для транспорту наносів, багато дослідників застосовували чисельні методи [17, 19–21]. Когерентні структури, які генеруються в зоні поділу потоку (над дюнами), досить добре прогнозуються за допомогою методу великих вихорів (Large Eddy Simulation) [22, 23].

Представлений огляд охоплює лише малу частину досліджень, присвячених русловим процесам, що зумовлені транспортом наносів. Потрібно відзначити, що роботи, в яких вивчалася еволюція донних ям в незв'язних ґрунтах, які піддаються впливу потоку рідини, залишаються досить нечисленними [24, 25].

В цій роботі виконане фізичне моделювання процесів переносу домішків та переформатування дна, які зумовлені обтіканням донних заглиблень великого

масштабу. Експерименти проводилися у гідродинамічному лотку лабораторного комплексу Інституту гідромеханіки НАН України. Для того, щоб найкраще врахувати співвідношення масштабів реального процесу, було розроблено спеціальну методику виділення тонких фракцій піску, з яких потім формувалося дно експериментального каналу. Заглиблення, що досліджувалися, розташовувалися поперек каналу та мали трикутну і трапецієподібну конфігурації у вертикальному перерізі. Отримано, що в результаті відкладення наносів на верховому укосі та розмиву низового укосу змінюється поздовжній профіль нерівності та відбувається її переміщення вниз за течією. Тривалість переформатування дна за наявності заглиблення залежить від співвідношення його розмірів з обсягом стоку наносів.

Опис експериментальної установки

Експерименти виконувалися у гідродинамічному лотку довжиною 7 м, шириною 0,17 м та висотою 0,22 м (рис. 1). Стінки лотка зроблені з плексигласу товщиною 10 мм. Торцева стінка лотка має форму зрізаної піраміди з розмірами 0,8×0,75×0,9 м.

Вода в лоток подавалася за допомогою насосів через напірний бак (цифра 14 на рис. 1), який одночасно є й баком для відстою води. Об'єм баку складає ~1 м³. Бак з'єднаний з лотком за допомогою трубопроводу. Рівень води і швидкість течії в лотку контролюються за допомогою спеціальних кранів. Один з них встановлений на виході з напірного баку (цифра 13 на рис. 1), інший застосовується для зливання води з лотка (цифра 1 на рис. 1). Робоча частина експериментального каналу шириною 2,3 см розташована на відстані ~3 м від його торця.

Шар наносів на дні складався з піску, що включав фракції розміром 0,3–0,32 мм. Висота насипного дна досягала 10–12 см. Глибина течії підтримувалася на рівні 0,05 м, а її середня швидкість дорівнювала ~ 0,27 м/с.

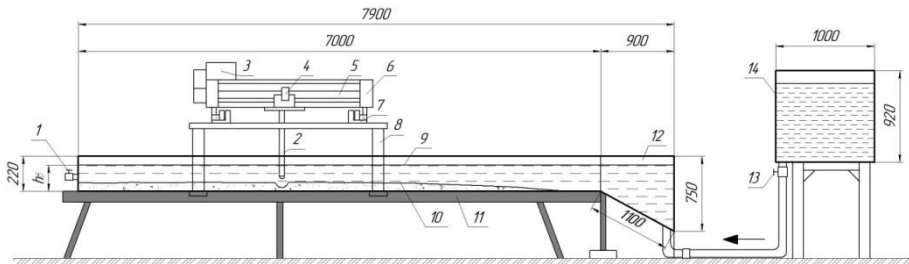


Рис. 1 – Схема лабораторного каналу:

- 1 – зливний кран; 2 – оптичний датчик (зонд); 3 – електромеханічний привід;
- 4 – каретка; 5 – ходовий гвинт; 6 – візок; 7 – поперечні направляючі;
- 8 – рухомий стіл; 9 – вільна поверхня; 10 – піщане дно; 11 – поздовжні направляючі;
- 12 – конфузур; 13 – витратний кран; 14 – напірний бак

Для утворення донного заглиблення застосовувався так званий землесосний спосіб розмиву ґрунту. Він полягає в тому, що під водою, поблизу поверхні ґрунту, що розробляється, розташовується приймальний отвір всмоктувальної трубки землесосу і створюються умови, при яких відбувається всмоктування у

трубку частинок ґрунту разом із водою. При цьому, найважливішим фактором є положення всмоктувальної трубки відносно площини ґрунту – чим ближче до поверхні розташоване її гирло, тим інтенсивніше відбувається всмоктування ґрунту. Крім того, істотний вплив на інтенсивність розмиву має швидкість рідини у всмоктувальній трубці [26].

Процес розмиву дна реєструвався за допомогою відеокамери та фотоапарату, що дозволяло отримати повну картину зміни профілю заглиблення на донній поверхні та встановити швидкість його переміщення в межах робочої частини лотка. Розглядалися двовимірні заглиблення різної глибини та ширини, що мають трикутну або трапецієвидну конфігурацію у поперечному перерізі.

Представляючи собою штучні негативні форми рельєфу дна, заглиблення постійно знаходяться під дією різних природних факторів, спрямованих на їх вирівнювання. Одним із таких факторів є рух наносів.

Визначення умов початку руху наносів

В більшості досліджень, де розглядається транспортування зважених наносів потоком води, для описання критичних умов щодо початку руху частинки використовується експериментальна крива Шільдса (1936), яка представляє собою залежність безрозмірної критичної зсувної напруги θ_{cr} від критичного числа Рейнольдса частинки $Re_{*,cr}$ (рис. 2 [27]). $Re_{*,cr}$ визначається наступним чином:

$$Re_{*,cr} = u_{cr}^* d_{50} / \nu, \quad (1)$$

де u_{cr}^* – критична швидкість зсуву, [м/с]; d_{50} – середній діаметр донних частинок, [м]; ν – кінематична в'язкість рідини [м²/с].

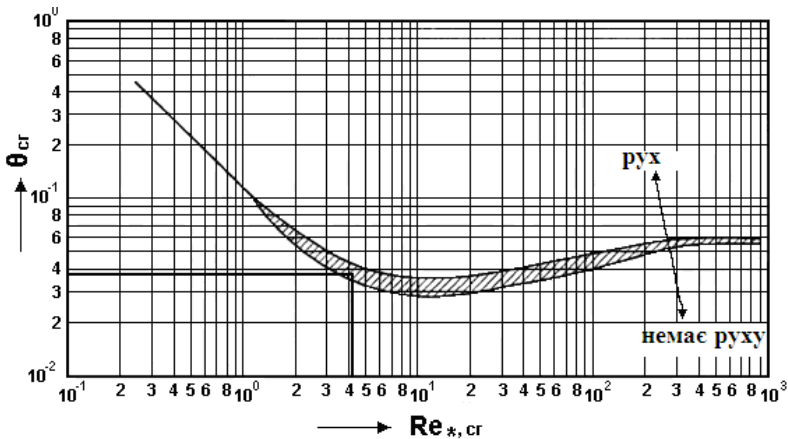


Рис. 2 – Графік Шільдса для визначення початку руху наносів

Крива на рис. 2 відповідає критичним значенням зсувної напруги $\theta = \theta_{cr}$. Рух наносів починається при значеннях зсувної напруги, більших за θ_{cr} . Ці

точки на рис. 2 лежать вище критичної кривої. Якщо $\theta < \theta_{cr}$, донні наноси перебувають у спокої.

Безрозмірне критичне зсувне напруження θ_{cr} (параметр Шильдса) є відношенням сили, яка спонукає частинку рухатися, до сили, що перешкоджає цьому рухові. Воно залежить від гідравлічних умов на донній поверхні, форми частинки, її фізичних властивостей та положення відносно інших частинок:

$$\theta_{cr} = \frac{(u_{cr}^*)^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd_{50}} = \frac{\tau_{b,cr}}{(\rho_s - \rho)gd_{50}}, \quad (2)$$

де $\tau_{b,cr}$ – критичне дотичне напруження на донній поверхні, [Па];

ρ_s – густина наносів [кг/м³] (для кварцу $\rho_s = 2600 \div 2700$ кг/м³);

ρ – густина води [кг/м³] ($\rho = 1000$ кг/м³);

g – прискорення вільного падіння, [м/с²].

Величина θ_{cr} може бути визначена з наступної емпіричної залежності [27]:

$$\theta_{cr} = 0,22\beta + 0,06 \cdot 10^{-7,7\beta}, \quad (3)$$

де $\beta = \left(\frac{1}{v} \sqrt{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) gd^3} \right)^{-0,6}$; γ, γ_s – питома вага рідини і наносів [Н/м³],

відповідно.

Відомі також емпіричні залежності θ_{cr} від безрозмірного параметра частинки D_* [1]:

$$\begin{aligned} \theta_{cr} &= 0,24(D_*)^{-1} && \text{для } D_* \leq 4 \\ \theta_{cr} &= 0,14(D_*)^{-0,64} && \text{для } 4 < D_* \leq 10 \\ \theta_{cr} &= 0,04(D_*)^{-0,10} && \text{для } 10 < D_* \leq 20 \\ \theta_{cr} &= 0,013(D_*)^{0,29} && \text{для } 20 < D_* \leq 150 \\ \theta_{cr} &= 0,055 && \text{для } D_* > 150, \end{aligned} \quad (4)$$

де $D_* = d_{50} \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{-1/3}$, $s = \rho_s/\rho$ – питома щільність наносів.

Як вже наголошувалося, рух частинок донного матеріалу у стійкому потоці виникає, коли безрозмірне зсувне напруження θ (параметр рухливості) перевищує граничне значення θ_{cr} . Величина θ визначається з формули (2), де замість $\tau_{b,cr}$ розглядається дотичне напруження поблизу дна τ_b , яке відповідає стану потоку, що моделюється. В умовах однорідної рівномірної течії τ_b визначається за наступною формулою:

$$\tau_b = \rho g \frac{V^2}{C^2}, \quad (5)$$

де V – середня швидкість течії, [м/с], C – коефіцієнт Шезі. Якщо донне тертя описується формулою Маннінга, то при коефіцієнті шорсткості $n = 0,01$ маємо $C = 45,9$. Емпірична залежність граничного значення зсувного напруження від діаметру частинки представлена на рис. 3 [28].

На основі наведених вище співвідношень був проведений аналіз гідравлічних умов проведеного експерименту. Вимірювання показало, що середній діаметр піщаних частинок, з яких складалося дно експериментального каналу, $d_{50} = 0,3$ мм. З цього отримуємо, що при стандартних фізичних властивостях кварцу і води безрозмірний діаметр частинок $D_* = 7,59$. З (4) випливає, що критичне число Шільдса θ_{cr} , яке відповідає цьому значенню D_* , дорівнює 0,038. При цьому, інші критичні параметри мають наступні значення:

дотичне напруження на дні $\tau_{b,cr} = 0,185$ Па,

швидкість зсуву $u_{cr}^* = \sqrt{\tau_{b,cr} / \rho} = 0,0136$ м/с,

число Рейнольдса зсуву $Re_{*,cr} = 4,08$.

З формули (5) випливає, що дотичне напруження на донній поверхні, що відповідає стану течії, яка моделюється, дорівнює $\tau_b = 0,34$ Па.

Використовуючи це значення, отримуємо, що параметр рухливості $\theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} = 0,07$, швидкість зсуву $u^* = \sqrt{\tau_b / \rho} = 0,0184$ м/с, число

Рейнольдса зсуву $Re_* = u^* d_{50} / \nu = 4,08$. Отримані значення перевищують критичні, тобто, у лабораторному каналі створені умови для транспорту донних наносів (рис. 3 [28]).

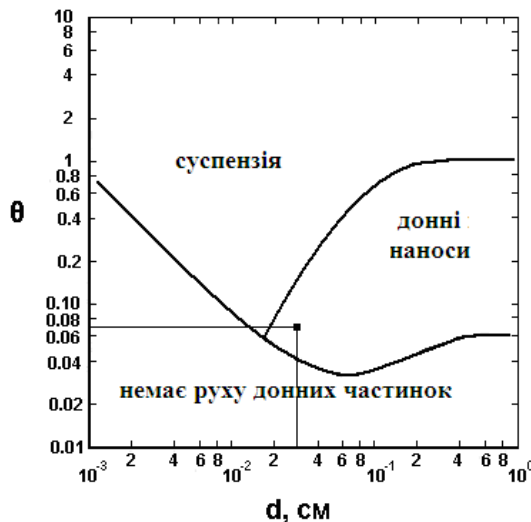


Рис. 3 – Поріг руху і форма транспорту кварцових порід у воді

Дослідження формування донних хвиль

Типовою особливістю переміщення донних наносів є утворення на дні піщаних хвиль, які систематизуються як ріфелі і гряди. Їхні розміри та форма залежать від швидкості течії, енергії і глибини потоку, числа Фруда, фізико-хімічних властивостей наносів і рідини. В алювіальних річках ці відомі руслові форми покривають усю донну поверхню. Дане явище спостерігалось і в дослідженні, що розглядається.

Через деякий час після початку експерименту поверхня дна, яка спочатку була рівною, набувала хвилеподібного вигляду. Аналіз отриманих результатів показав, що на дні сформувалися регулярні гряди висотою $\approx 0,001$ м і довжиною $\approx 0,011 \div 0,012$ м (рис. 4). Зазначимо, що потік на рис. 4 спрямований справа наліво. Згідно з класифікацією, запропонованою в [30], висота гряди визначається як різниця висотної позначки між гребенем та низовою западиною, а довжина – як поздовжня відстань між двома послідовними гребенями або западинами.

Такі утворення є досить масштабними, тому, в цьому випадку, має місце обернений вплив морфологічних процесів на еволюцію водної течії, інтенсивність якого залежить від розміру донних нерівностей [18]. Гряди переміщуються разом із течією, але швидкість їхнього руху є набагато меншою за швидкість води. При підвищенні швидкості потоку збільшуються як швидкість переміщення донних форм, так і їх висота [31]. Відповідно, заглиблення у грядах будуть заповнюватися швидше.

Слід звернути увагу на те, що утворення і розвиток руслових форм відбуваються лише при помірних значеннях швидкості течії. Якщо швидкість води достатньо велика, наноси рухаються суцільним шаром і донні форми не утворюються, а ті, що існували раніше, руйнуються потоком та зникають [32].



Рис. 4 – Картина піщаних гряд на дні гідродинамічного лотка

В експериментах швидкість руху донних форм визначалася за переміщенням характерних точок донного профілю протягом заданого часового проміжку. Отримано, що при середній швидкості течії $\sim 0,27$ м/с і постійному надходженні наносів швидкість переміщення гряд по дну складала від $1,5 \times 10^{-4}$ м/с до $3,2 \times 10^{-4}$ м/с, що залежало від товщини піщаного дна у лотку. Спостереження виявили, що до зменшення швидкості, з якою рухаються донні форми, призводила недостатня кількість наносів в експериментальному каналі.

Отримані результати щодо швидкості переміщення гряд узгоджуються зі значенням, яке впливає з емпіричної формули, запропонованої в [33]:

$$C_{\tilde{A}} = 0,019 \cdot V \cdot Fr^3, \quad (6)$$

де V – середня швидкість потоку води, $Fr = V/\sqrt{gH}$ – число Фруда, H – глибина води. При заданих характеристиках потоку в експериментальному каналі: $V = 0,27$ м/с, $H = 0,05$ м, з (6) отримуємо $C_{\tilde{A}} = 2,95 \cdot 10^{-4}$.

Дослідження еволюції донних заглиблень

Заглиблення, що досліджувалися, розташовувалися поперек каналу та мали трикутну і трапецієподібну форму у перерізі. Область заглиблення обмежена верхнім і низовим укосами (рис. 5). Дослідження показали, що зміна рельєфу дна порушує баланс наносів та призводить до переформатування гідродинамічної течії.

При вивченні взаємодії потоку із заглибленням умовно можна виділити три ділянки: I – вище заглиблення; II – в межах заглиблення; III – нижче заглиблення. В межах кожної з цих ділянок параметри потоку і русла змінюються по-різному. На I ділянці відбувається транспортування наносів, які потім відкладаються на II ділянці. На III ділянці має місце розмив донної поверхні, викликаний ударом потоку води об низовий укіс. Вплив заглиблення проявляється також в тому, що на I і III ділянках відбувається трансформація донних форм, які спостерігалися на плоскому дні. По мірі надходження наносів верховий укіс неперервно зміщується до низового, внаслідок чого заглиблення заповнюється. Глибина нерівності зменшується також через те, що частина наносів відкладається безпосередньо на її дно. Зона максимального розмиву донної поверхні спостерігається в районі низового укосу (початок ділянки III). При віддаленні від нерівності інтенсивність розмиву зменшується.

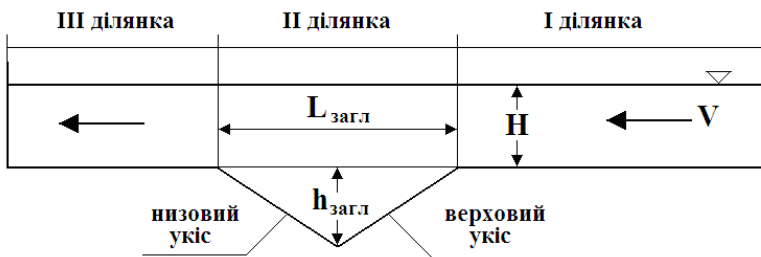


Рис. 5 – Схема заглиблення

Нижче представлені фотокадри з експерименту, на яких зображена еволюція трикутного піщаного заглиблення.

Профіль заглиблення в початковий момент часу в спокійній воді показаний на кадрі 1. Після створення течії починається переміщення частинок піску, яке приводить до формування гряд на донній поверхні, що добре видно на кадрі 2. Підходячи до заглиблення, наноси скочуються по верховому укосі, частково відкладаючись на стінці, через що її нахил зменшується. В той же час, удар потоку води об низовий укіс викликає його розмив, внаслідок чого збільшується діаметр заглиблення. Ці процеси відображено на кадрах 3–4. Крім того, що в процесі розмиву змінюється поперечний профіль заглиблення,

воно ще й рухається вниз по потоку. Його зміщення можна визначити, слідкуючи за характерними точками профілю. Фотокадри 5–8 на рис. 6 відповідають кінцевій стадії переформатування донної поверхні при обтіканні потоком води заглиблення трикутної форми.

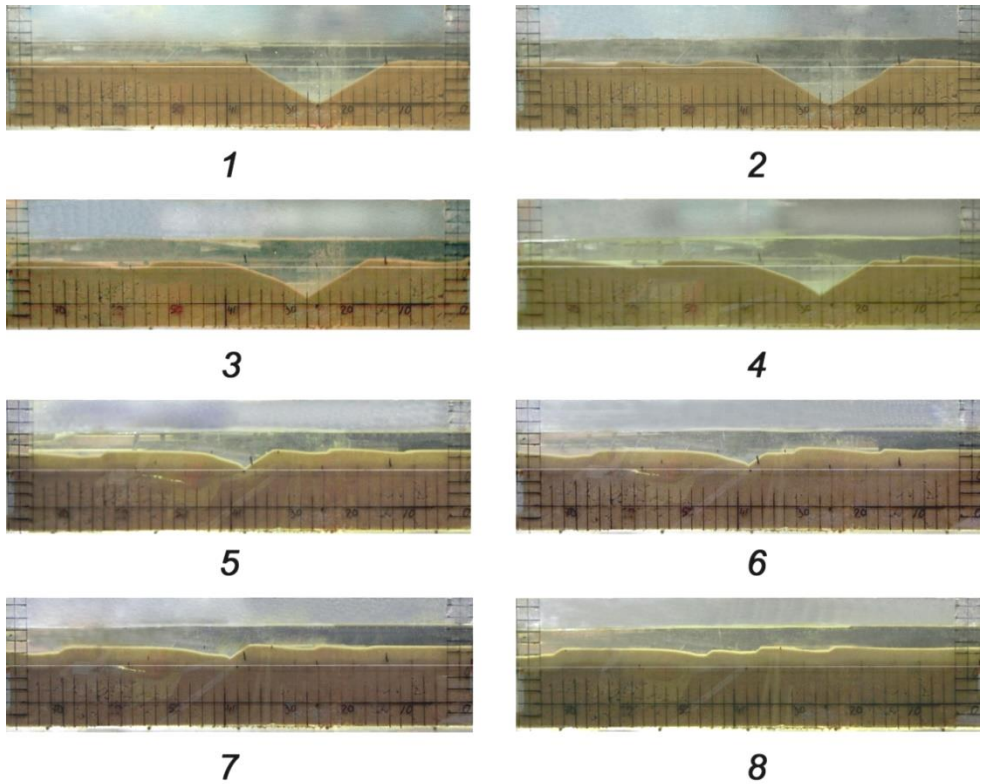


Рис. 6 – Послідовні фотокадри обтікання течією трикутного донного заглиблення

Схема деформації заглиблення при його частковому занесенні зображена на рис. 7. Її побудовано по фотокадрах 1–4 з рис. 6. Зона відкладення наносів (верховий укіс) і зона максимального розмиву (низовий укіс) заштриховані. Вихідні параметри заглиблення, що розглядалося, показані на рисунку. Видно, що при зміщенні кут нахилу верхового укоса по відношенню до горизонту практично не змінюється. Розмив низового укосу і прилеглої до нього області відбувається досить повільно.

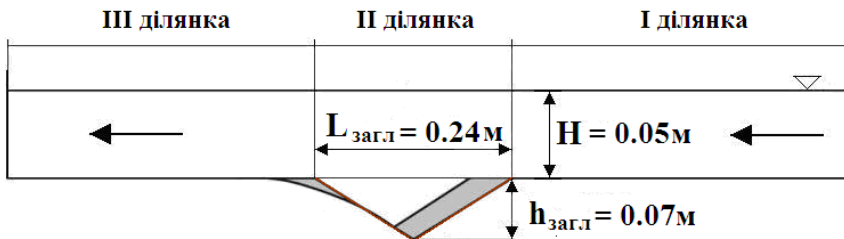


Рис. 7 – Схема деформації заглиблення трикутної форми при його обтіканні потоком води

Дослідження розмиву донного заглиблення трапецієподібної форми показали, що його еволюція відрізняється від попередніх результатів тим, що, в цьому разі, спочатку відбувається зміщення верхового укосу у бік низового. Воно продовжується до тих пір, поки трапецієподібний профіль не перетвориться у трикутний. Таким чином, тривалість процесів, пов'язаних з переформуванням дна, збільшується. Отримано, що швидкість переміщення верхового укосу по дну заглиблення складає $\approx 2,9 \cdot 10^{-6}$ м/с. Фотокадри обтікання донного заглиблення трапецієподібної форми і схема зміни обрисів поздовжнього профілю цього заглиблення представлені на рис. 8 і 9, відповідно.

Результати виконаних досліджень свідчать про те, що переформування дна при взаємодії потоку рідини з донним заглибленням є досить тривалим процесом, який закінчується тоді, коли досягається рівновага між живою силою потоку і потужністю потоку донних наносів.

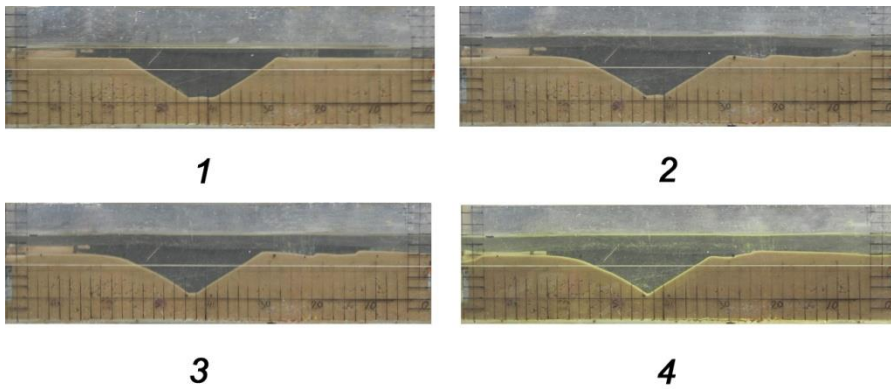


Рис. 8 – Послідовні фотокадри обтікання потоком донного заглиблення трапецієподібної форми

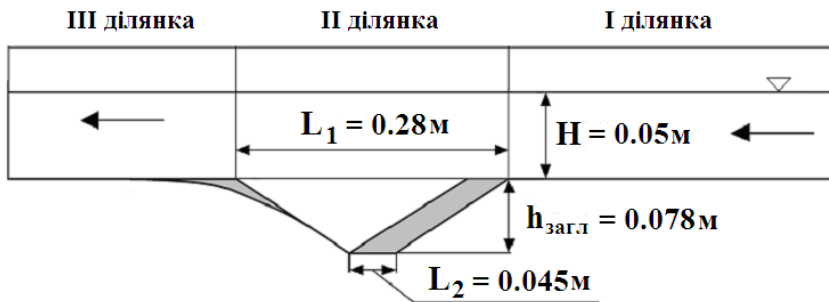


Рис. 9 – Схема деформації заглиблення трапецієподібної форми

Висновки

Виконане фізичне моделювання процесу переносу домішків при обтіканні водою великих кар'єрів, утворених на піщаному дні. Отримано якісну картину розмиву двовимірних заглиблень трикутної та трапецієвидної форми у перерізі, яка показує, що в результаті відкладення наносів на верховому укосі та розмиву низового укосу змінюється поздовжній профіль нерівності та відбувається її переміщення вниз за течією. Крім того, наявність кар'єру

призводить до дестабілізації природних форм донної поверхні – гряд, які розвиваються на плоскому дні. Тривалість переформатування дна залежить від співвідношення розмірів кар'єру з обсягом стоку наносів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. van Rijn L. C. Sediment transport, Part I: Bed load transport / L. C. van Rijn // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1984. – Vol. 110, No. 10. – P. 1431–1456.
2. Wiberg P. L. Calculation of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments / P. L. Wiberg, J. D. Smith // *Water Resources Research*. – 1987. – Vol. 23, No. 8. – P. 1471–1480.
3. Papista E. Direct numerical simulation of incipient sediment motion and hydraulic conveying / E. Papista, D. Dimitrakakis, S. G. Yiantsios // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2011. – 50. – P. 630–638. <https://doi.org/10.1021/ie1000828>
4. Simões F. J. M. Shear velocity criterion for incipient motion of sediment / F. J. M. Simões // *Water Science and Engineering*. – 2014. – 7(2). – P. 183–193. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.006>
5. Buffington J. M. A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers / J. M. Buffington, D. R. Montgomery // *Water resources research*. – 1997. – Vol. 33, No. 8. – P. 1993–2029.
6. Beheshti A. A. Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement / A.A. Beheshti, B. Ataie-Ashtiani // *Coastal Engineering*. – 2008. – 55. – P. 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.01.003>
7. Marsh N. A. Comparison of methods for predicting incipient motion for sand beds / N. A. Marsh, A. W. Western, R. B. Grayson // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 2004. – Vol. 130, No. 7. – P. 616–621.
8. Cheng N. S. Analysis of bedload transport in laminar flows / N. S. Cheng // *Advances in Water Resources*. – 2004. – 27(9). – P. 937–942. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.05.010>
9. Camenen B. A general formula for non-cohesive bed load sediment transport / B. Camenen, M. Larson // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2005. – 63. – P. 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.10.019>
10. Ouriemi M. Determination of the critical Shields number for particle erosion in laminar flow / M. Ouriemi, P. Aussillous, M. Medale, Y. Peysson, E. Guazzelli // *Physics of Fluids*. – 2007. – 19, 061706. – P. 1–4. DOI:10.1063/1.2747677
11. Talukdar S. Predictive capability of bedload equations using flume data / S. Talukdar, B. Kumar, S. Dutta // *J. Hydrol. Hydromech.* – 2012. – 60. – P. 45–56. <https://doi.org/10.2478/v10098-012-0004-5>
12. Chiew Y.-M. Incipient sediment motion on nonhorizontal slopes / Y.-M. Chiew, G. Parker // *Journal of Hydraulic Research*. – 1994. – Vol. 32, No. 5. – P. 649–660. <https://doi.org/10.1080/00221689409498706>
13. Dey S. Influence of streamwise bed slope on sediment threshold under stream flow / S. Dey, K. Debnath // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. – 2000. – Vol. 126, No. 4. – P. 255–263. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(255\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(255))
14. Emadzadeh A. Effect of accelerating and decelerating flows on incipient motion in sand bed streams / A. Emadzadeh, Y.-M. Chiew, H. Afzalimehr // *Advances in Water Resources*. – 2010. – 33. – P. 1094–1104. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.06.014>
15. Talebbeydokhti N. Experimental modeling of dune bed form in a sand-bed channel / N. Talebbeydokhti, A. A. Hekmatza Deh, G. R. Rakhshandehroo // *Iranian Journal of Science & Technology*. – 2006. – Vol. 30, No. B4. – P. 503–516.
16. Langlois V. Initiation and evolution of current ripples on a flat sand bed under turbulent water flow / V. Langlois, A. Valance // *Eur. Phys. J.* – 2007. – 22. – P. 201–208. <https://doi.org/10.1140/epje/e2007-00023-0>

17. Tjerry S. Calculation of dune morphology / S. Tjerry, J. Fredsøe // *Journal of Geophysical Research*. – 2005. – Vol. 110, F04013. – P. 1–13. <https://doi.org/10.1029/2004JF000171>
18. Sukhodolov A. N. Structure of flow over alluvial bedforms: an experiment on linking field and laboratory methods / A.N. Sukhodolov, J.J. Fedele, B.L. Rhoads // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 31. – 2006. – P. 1292–1310. <https://doi.org/10.1002/esp.1330>
19. Giri S. Numerical computation of sand dune migration with free surface flow / S. Giri, Y. Shimizu // *Water Resources Research*. – 2006. – Vol. 42, W10422. – P. 1–19. <https://doi.org/10.1029/2005WR004588>
20. Paarlberg A. J. Modeling river dune evolution using a parameterization of flow separation / A. J. Paarlberg, C. Marjolein Dohmen-Janssen, S. J. M. H. Hulscher, P. Termes // *Journal of Geophysical Research*. – 2009. – Vol. 114, F01014. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1029/2007JF000910>
21. Nabi M. Detailed simulation of morphodynamics: 3. Ripples and dunes / M. Nabi, H. J. de Vriend, E. Mosselman, C. J. Sloff, Y. Shimizu // *Water Resources Research*. – 2013. – Vol. 49. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20457>
22. Grigoriadis D. G. E. Large-eddy simulations of unidirectional water flow over dunes / D. G. E. Grigoriadis, E. Balaras, A. A. Dimas // *Journal of Geophysical Research*. – 2009. – Vol. 114, F02022. – P. 1–19. <https://doi.org/10.1029/2008JF001014>
23. Chang K. Coherent structures in flow over two-dimensional dunes / K. Chang, G. Constantinescu // *Water Resources Research*. – 2013. – Vol. 49. – P. 2446–2460. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20239>
24. Jensen J. H. Sediment transport and backfilling of trenches in oscillatory flow / J. H. Jensen // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. – 2001. – Vol. 127, No. 5. – P. 272–281. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2001\)127:5\(272\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2001)127:5(272))
25. Горбань І.М. Чисельне моделювання еволюції нерівностей великого масштабу на річковому дні / І.М. Горбань // *Прикладна гідромеханіка*. – 2015. – Т. 17 (89).
26. Юфин А. П. Гидромеханизация / А. П. Юфин. – М.: Стройиздат, 1974. – 223 с.
27. USACE Sedimentation investigations of rivers and reservoirs / Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers, 1995. – EM 1110-2-4000. – 268 p.
28. Chanson H. *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction* / H. Chanson. – Oxford, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 585 p.
29. Allen J. R. L. *Physical processes of sedimentation* / J. R. L. Allen. – London: George Allen & Unwin Ltd, 1970. – 248 p.
30. Kleinhans M. G. Sorting in grain flows at the lee side of dunes / M. G. Kleinhans // *Earth-Science Reviews*. – 2004. – 65. – P. 75–102. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00081-3)
31. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков / В. Н. Гончаров. – Ленинград: Гидрометеорологическое изд-во, 1962. – 368 с.
32. Боровков В. С. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях / В. С. Боровков. – Ленинград, Гидрометеоздат, 1989. – 286 с.
33. Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров: СТО 52.08.31–2012. – Санкт-Петербург: Изд-во «Глобус», 2012. – 140 с. – (Стандарт организации). – <http://www.twirpx.com/file/890305/>.

Стаття надійшла до редакції 23.06.2020 і прийнята до друку після рецензування 04.09.2020

REFERENCES

1. van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, Part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (10), 1431-1456.
2. Wiberg, P. L., & Smith, J. D. (1987). Calculation of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research*, 23 (8), 1471-1480.

3. Papista, E., Dimitrakis, D., & Yiantsios, S. G. (2011). Direct numerical simulation of incipient sediment motion and hydraulic conveying. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50, 630-638. <https://doi.org/10.1021/ie1000828>
4. Simões, F. J. M. (2014). Shear velocity criterion for incipient motion of sediment. *Water Science and Engineering*, 7(2), 183–193. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.006>
5. Buffington, J. M., & Montgomery, D. R. (1997). A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water resources research*, 33 (8), 1993-2029.
6. Beheshti, A. A., & Ataie-Ashtiani, B. (2008). Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement. *Coastal Engineering*, (55), 423-430. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.01.003>
7. Marsh, N. A., Western, A. W., & Grayson, R. B. (2004). Comparison of methods for predicting incipient motion for sand beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (7), 616-621.
8. Cheng, N. S. (2004). Analysis of bedload transport in laminar flows. *Advances in Water Resources*, 27 (9), 937-942. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.05.010>
9. Camenen, B., & Larson, M. (2005). A general formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63, 249-260. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.10.019>
10. Ouriemi, M., Aussillous, P., Medale, M., Peysson, Y., & Guazzelli, E. (2007). Determination of the critical Shields number for particle erosion in laminar flow. *Physics of Fluids*, 19, 061706, 1-4. DOI:10.1063/1.2747677
11. Talukdar, S., Kumar, B., & Dutta, S. (2012). Predictive capability of bedload equations using flume data. *J. Hydrol. Hydromech.*, 60, 45-56. <https://doi.org/10.2478/v10098-012-0004-5>
12. Chiew, Y.-M., & Parker, G. (1994). Incipient sediment motion on nonhorizontal slopes. *Journal of Hydraulic Research*, 32 (5), 649-660. <https://doi.org/10.1080/00221689409498706>
13. Dey, S., & Debnath, K. (2000). Influence of streamwise bed slope on sediment threshold under stream flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126 (4), 255-263. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(255\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(255))
14. Emadzadeh, A., Chiew, Y.-M., & Afzalimehr, H. (2010). Effect of accelerating and decelerating flows on incipient motion in sand bed streams. *Advances in Water Resources*, 33, 1094-1104. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.06.014>
15. Talebbeydokhti, N., Hekmatza Deh, A. A., & Rakhshandehroo, G. R. (2006). Experimental modeling of dune bed form in a sand-bed channel. *Iranian Journal of Science & Technology*, 30 (B4), 503-516.
16. Langlois, V., & Valance, A. (2007). Initiation and evolution of current ripples on a flat sand bed under turbulent water flow. *Eur. Phys. J.*, 22, 201-208. <https://doi.org/10.1140/epje/e2007-00023-0>
17. Tjerry, S., & Fredsøe, J. (2005). Calculation of dune morphology. *Journal of Geophysical Research*, 110, F04013, 1-13. <https://doi.org/10.1029/2004JF000171>
18. Sukhodolov, A.N., Fedele, J.J., & Rhoads, B.L. (2006). Structure of flow over alluvial bedforms: an experiment on linking field and laboratory methods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1292-1310. <https://doi.org/10.1002/esp.1330>
19. Giri, S., & Shimizu, Y. (2006). Numerical computation of sand dune migration with free surface flow. *Water Resources Research*, 42, W10422, 1-19. <https://doi.org/10.1029/2005WR004588>
20. Paarlberg, A. J., Marjolein Dohmen-Janssen, C., Hulscher, S. J. M. H., & Termes, P. (2009). Modeling river dune evolution using a parameterization of flow separation. *Journal of Geophysical Research*, 114, F01014, 1-17. <https://doi.org/10.1029/2007JF000910>

21. Nabi, M., de Vriend, H. J., Mosselman, E., Sloff, C. J., & Shimizu, Y. (2013). Detailed simulation of morphodynamics: 3. Ripples and dunes. *Water Resources Research*, 49, 1-14. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20457>
22. Grigoriadis, D. G. E., Balaras, E., & Dimas, A. A. (2009). Large-eddy simulations of unidirectional water flow over dunes. *Journal of Geophysical Research*, 114, F02022, 1-19. <https://doi.org/10.1029/2008JF001014>
23. Chang, K., & Constantinescu, G. (2013). Coherent structures in flow over two-dimensional dunes. *Water Resources Research*, 49, 2446-2460. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20239>
24. Jensen, J. H. (2001). Sediment transport and backfilling of trenches in oscillatory flow. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 127 (5), 272-281. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2001\)127:5\(272\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2001)127:5(272))
25. Horban, I.M. (2015). Numerical modeling of the evolution of large-scale inequalities on the river bottom. *Прыкладна гидромеханіка*, 17 (89). (in Ukrainian)
26. Jufin, A. P. (1974). *Hydromechanization*. M.: Strojizdat. (in Russian)
27. USACE Sedimentation investigations of rivers and reservoirs. (1995). Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers. EM 1110-2-4000.
28. Chanson, H. (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction*. Oxford, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann.
29. Allen, J. R. L. (1970). *Physical processes of sedimentation*. London: George Allen & Unwin Ltd.
30. Kleinhans, M. G. (2004). Sorting in grain flows at the lee side of dunes. *Earth-Science Reviews*, 65, 75-102. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00081-3)
31. Goncharov, V.N. (1962). *Dynamics of channel flows*. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izd-vo. (in Russian)
32. Borovkov, V.S. (1989). *Channel processes and dynamics of river flows in urban areas*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
33. Dobycha nerudnyh stroitel'nyh materialov v vodnyh ob'ektah. Uchet ruslovogo processa i rekomendacii po proektirovaniyu i jekspluatacii ruslovyh kar'erov. (2012). *STO 52.08.31–2012. (Standart organizacii)*. Sankt-Peterburg: Izd-vo «Globus». Retrieved from <http://www.twirpx.com/file/890305/>. (in Russian)

The article was received 23.06.2020 and was accepted after revision 04.09.2020

Горбань Ірина Миколаївна

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу технічної гідромеханіки Інституту гідромеханіки НАН України
Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 8/4
ORCID ID 0000-0001-9662-2813 **e-mail:** ivgorban@gmail.com

Корольова Анна Сергіївна

кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник відділу технічної гідромеханіки Інституту гідромеханіки НАН України
Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 8/4
ORCID ID 0000-0003-0693-4552 **e-mail:** kan5nas@gmail.com

Соколовський Георгій Павлович

головний інженер-механік відділу технічної гідромеханіки Інституту гідромеханіки НАН України
Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

Романенко Павло Юрійович

головний інженер-гідротехнік відділу гідродинаміки гідротехнічних споруд Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

Срібнюк Степан Михайлович

кандидат технічних наук, професор кафедри архітектури і міського будівництва Національного університету «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка»

Адреса робоча: 36011, Україна, м. Полтава, Первомайський проспект, 24