

УДК 627.52

# МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДИНАМІКИ ПІЩАНОГО БЕРЕГА ЗА УМОВ ЙОГО ЗАХИСТУ ПОПЕРЕЧНИМИ СПОРУДАМИ З РІЗНИМ СТУПЕНЕМ ПРОНИКНОСТІ

А. Г. МАРЧЕНКО, Л. М. ТЕРЕЩЕНКО

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Отримано 24.09.2008

Представлені результати експериментальних досліджень факторів динаміки прибережного піщаного схилу під впливом вітрових хвиль. Досліди проведені на просторових розмивних моделях. Розглянуті варіанти: вільний берег (у природному стані); берег, захищений системою непроникних бун; берег, захищений системою бун за різним ступенем проникності їх конструкцій. Здійснено аналіз розвитку гідродинамічних процесів (розмив, акумуляція та транзит наносів) на береговому схилі різних умов проведення експерименту. Дана оцінка впливу проникності поперечних споруд на процеси регулювання руху наносів на береговому схилі.

Представлены результаты экспериментальных исследований факторов динамики прибрежного песчаного склона под воздействием ветровых волн. Опыты проведены на пространственных размывных моделях. Рассмотрены варианты: свободный берег (в естественном состоянии); берег, защищенный системой непроницаемых бун; берег, защищенный системой бун с разной степенью проницаемости их конструкций. Сделан анализ развития гидродинамических процессов (размыв, аккумуляция и транзит наносов) на береговом откосе при разных условиях проведения эксперимента. Дана оценка влияния проницаемости поперечных сооружений на процессы регуляции движения наносов на береговом откосе.

The results of experimental researches of factors of dynamics of on-shore sandy slope are presented under act of wind waves. The experiment was conducted on water space dike dam models. The variants are as following: the free shore (natural conditions); coast, protected the system of impenetrable groins; coast, protected the system of groins with the different degree of permeability of their constructions. The analysis of development of hydrodynamic processes (washed out, accumulation and transit of alluviums) on the sand bank in variants. The estimation of influence of permeability of transversal buildings is given on the processes of traffic of alluviums regulation on a shoreface.

## ВСТУП

В спеціальній літературі знайшли достатньо широко відображення результати досліджень переформування берегів морів та водосховищ під дією вітрових хвиль. Арсенал засобів інженерного захисту берегів від хвильової абразії збагатився за рахунок розробки нових типів споруд, створення яких базується на принципі природних аналогів. Проте, традиційні засоби активного впливу на протікання гідродинамічних процесів з метою ефективного захисту берегів не втратили актуальності і на сучасному етапі освоєння прибережної зони природних та штучних водоймищ. Таким чином, модифікація традиційних інженерних берегозахисних споруд з метою оптимізації їхніх наносорегулюючих функцій, а також зниження їхніх матеріалоемності та вартості може трактуватися як одна з важливих задач берегової гідротехніки [1–5]. Метою даної роботи є дослідження особливостей протікання абразивно-акумулятивних процесів на піщаному береговому схилі при використанні для його захисту поперечних споруд (системи бун) та визначення впливу на ці процеси проникності конструкції споруд. Доцільність постанов-

ки такої задачі впливає також з факту відсутності в профільних літературних виданнях відомостей про систематичне вивчення впливу ступені проникності поперечних споруд на їхні наносорегулюючі спроможності [6–8]. Для вивчення процесів взаємодії вітрових хвиль з берегами та характеру розвитку вздовжберегових потоків наносів широко використовують метод гідравлічного моделювання динаміки берегових форм на моделях з розмивом дна. При цьому постає питання гідродинамічної подібності берегових процесів, що відтворюються в лабораторних умовах, їхнім натурним аналогам.

Питанням фізичного моделювання гідравлічних процесів присвячені численні публікації результатів теоретичних та експериментальних досліджень [9–12]. Коротко рекомендації зводяться до таких застережень. Для дослідження подібності просторового переформування берегових схилів за умови використання на моделі натурних наносів (піску) та рідини (води) необхідно дотримуватись такого співвідношення масштабів:

$$M_h = M_\lambda = M_B = M_g^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

де  $M_h$  і  $M_\lambda$  – масштаби висоти та довжини хвилі;  $M_B$  і  $M_g$  – вертикальний та горизонтальний масштаби берега відповідно. Зауважимо, що вітрові хвилі, як і хвилі, що генеруються хвилепродуктором, відносяться до гравітаційних. Тоді, виходячи з закону подібності Фруда, співвідношення для масштабів хвильових швидкостей  $M_v$  та масштабів часу  $M_t$  для хвильових рухів рідини мають вигляд:

$$M_v = M_t = \sqrt{M_B}. \quad (2)$$

У всіх випадках необхідно враховувати такі обмеження:

1) при гідравлічному моделюванні вертикальний лінійний масштаб повинен бути таким, щоб висота хвилі на моделі  $h \geq 4$  см. В такому разі силами поверхневого натягу можна знехтувати;

2) гідравлічна крупність частинок наносів на моделі і в натурі повинна відноситись до однієї і тієї самої області обтікання.

Виходячи з теоретичних посилок та враховуючи досвід фізичного моделювання берегових процесів, а також з можливостей експериментальної бази були визначені геометричні параметри просторової моделі піщаного берегового схилу, схема розміщення системи наносорегулюючих бун та параметри хвильового потоку.

### 1. ГІДРАВЛІЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження динаміки берегового схилу проводились у хвильовому басейні Інституту гідромеханіки НАН України (с. Київ-Лів). Схема моделі прямолінійної ділянки берегового схилу, захищеного системою бун, представлена на (рис. 1, 2).

Тіло моделі берега виготовлено у вигляді плоского схилу з піску з середнім розміром частинок  $d_{cp} = 0.25$  мм. Коефіцієнт закладення укосу  $m = 8$ . Буни виготовлені у вигляді дерев'яних щитів розміром  $170 \times 60 \times 4$  см. При цьому використані чотири модифікації конструкції бун, які різняться тільки ступенем проникності (перфорації) їх тіла. Так, непроникні конструкції бун являють собою суцільний щит. Проникні буни – це ґратчасті конструкції з визначеними розмірами скрізних отворів.

Проведені такі серії дослідів:

1. Береговий схил в природному стані (незакріплений, вільний берег).
2. Берег, захищений системою 3-х бун.
3. Берег, захищений системою 4-х бун.

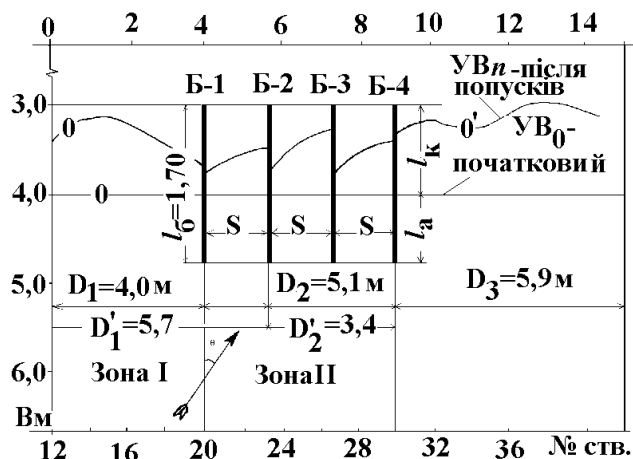


Рис. 1. Схема моделі ділянки берега, захищеного низкою бун

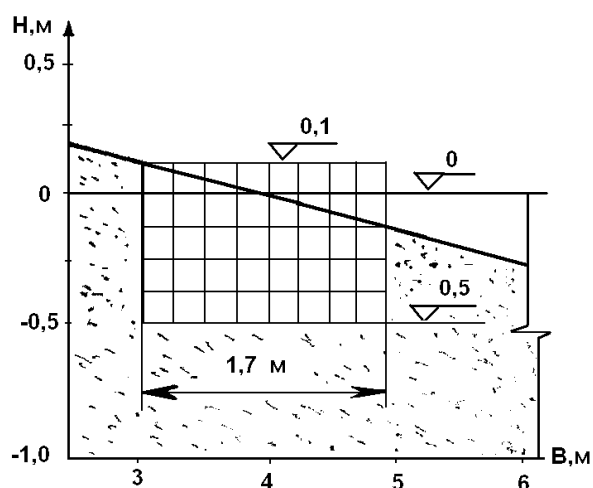


Рис. 2. Поперечний профіль моделі берегового схилу з проникною буною

При цьому, друга та третя серія дослідів включають варіанти використання бун чотирьох ґратчастих ступеню їхньої проникності. Розташування бун у плані та в профілі завжди залишалось постійним. У випадку схеми з 3-х бун вилучалась тільки перша буна, прив'язана до створу стаціонарного поперечника №20 (див. рис. 1).

Всі досліді проводились за умов навскісного підходу хвильового потоку з постійним кутом між променем хвилі і нормаллю до лінії берега  $\theta = 43^\circ$ . Постійними були параметри хвилі:  $h = 0.08 \div 0.1$  м;  $\lambda = 1.35$  м;  $\tau = 0.86 \div 0.87$  с, де  $h, \lambda, \tau$  – висота, довжина та період хвиль відповідно. При цьому глибина наповнення басейну також була постійною  $H = 0.9$  м.

Напрямок хвильового потоку на робочу части-

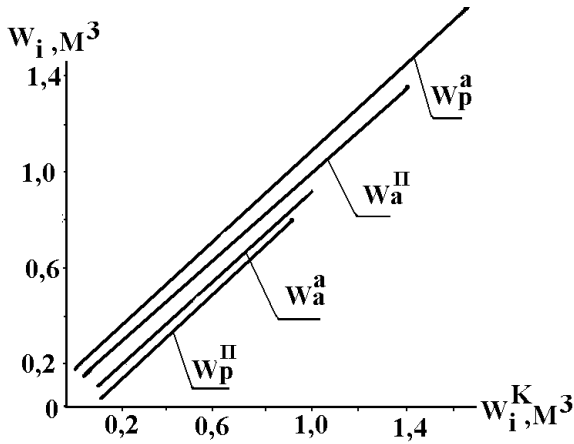


Рис. 3. Тестові результати визначення об'ємів  $W_i$  (аккумуляції  $W_a$  та розмиву  $W_p$ ) різними методами: верхні індекси К, П, А відповідно означають картографічний, поперечних профілів та аналітичний методи

ну моделі берега забезпечувався завдяки створеному хвильовому каналу, вигородженому на акваторії басейну (від хвилепродуктора до берега) вертикальними металевими щитами. З метою виключення впливу хвильового нагону та компенсаційних градієнтних течій на величину швидкості вздовжберегового потоку та витрати наносів спрямовуючі стінки хвильового каналу доводились тільки до границі обрушення хвиль. Таким чином, здійснювалась розгрузка нагінних мас води в застійний простір акваторії з пониженими рівнями води.

Регулярна хвиля генерувалась хвилепродуктором типу "коливний щит".

Вимірювання, реєстрація та контроль параметрів хвиль здійснювались за допомогою апаратури, змонтованої на пульті дистанційного управління експериментом, розташованого біля хвильового басейну.

Деформації поверхні берегового схилу визначались на основі даних нівеліровок з метою визначення об'ємів деформації берегового схилу після фіксованих періодів попусків хвиль. Були використані три підходи:

1. Картографічний метод (накладення деформованого рельєфу схилу на висхідний не відформований рельєф в горизонталях).

2. Метод поперечних профілів берега в стаціонарних створах вимірів.

3. Аналітичний метод визначення об'ємів деформацій за допомогою комп'ютерної програми обчислення даних нівеліровок.

Названі три метода визначення об'ємів деформацій берега дають у цілому узгоджені результа-

ти, проте систематичні розбіжності між ними досягають порядку  $+(1 \div 12\%)$  (рис. 3). Тому при порівняльній оцінці кількісних значень характерних параметрів та їх співвідношень доцільно користуватись результатами обчислень по одному з вибраних методів. У даній роботі за основу прийнято картографічний метод обчислення об'ємів деформацій берегового схилу.

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ: СКЛАДОВІ БАЛАНСУ НАНОСІВ ТА ЇХ РОЗПОДІЛ ВЗДОВЖ БЕРЕГА

Проведено серії дослідів з метою виявлення особливостей динаміки берегових процесів за різних умов формування вздовжберегового потоку. Характерні відмінності модельних ситуацій відображені в табл. 1.

Табл 1. Характерні відмінності модельних ситуацій

№ досліджу	$K_c$	$K_{II}$	Кількість бун $n$ , одиниць
1	0	1.0	Вільний берег $n = 0$
2	0.2	0.8	Система бун $n = 3$
3	0.5	0.5	Система бун $n = 3$
4	0.8	0.2	Система бун $n = 3$
5	1.0	0	Система бун $n = 3$
6	0.2	0.8	Система бун $n = 4$
7	0.5	0.5	Система бун $n = 4$
8	0.8	0.2	Система бун $n = 4$
9	1.0	0	Система бун $n = 4$

Для характеристики ступенів суцільності чи проникності конструкцій бун використані відповідні коефіцієнти, які можуть бути визначені через співвідношення:

$$K_c = \frac{F_T - F_0}{F_T} = 1 - K_{II}, \quad (3)$$

де  $F_T$  і  $F_0$  – площі профілю тіла споруди та отворів (перфорації) відповідно.

При взаємодії хвиль з береговою відмілиною створюються умови для розвитку процесів розмиву, акумуляції та транспорту наносів вздовж берега. Для аналізу динаміки цих процесів представляється доцільним розглянути різні співвідношення об'ємів складових балансу наносів у фіксованих поперечних створах їх виміру. При цьому важливо брати до уваги період дії хвильового навантаження на берег. Так, ситуація відносної стабілізації процесів на береговому схилі уявляється найбільш привабливою для аналізу впливу різних гі-

дротехнічних факторів (див. табл. 1) на динаміку берега.

Відмінність досліджуваних моделей берега визначається, в першу чергу, наявністю поперечних споруд або їх відсутністю (стан природного берега). Другим рядом факторів, що зумовлює відмінності захисних споруд, є ступінь проникності їхніх конструкцій. Тому, з методологічної точки зору є правомірним вибрати для порівняльних оцінок параметрів берегових процесів в якості базових об'єктів дві моделі: вільний берег і класичний варіант захисту берега непроникними (суцільними) бунами.

Нижче, відповідно до зазначених застережень, представлено різновиди інтерпретацій експериментальних даних у вигляді розподілу вздовж берега відносних величин елементів балансу наносів.

### 2.1. Берег у природному стані

Для адекватного відтворення динамічної картини розвитку берегових процесів на досліджуваній ділянці моделі берега використані різні співвідношення складових балансу наносів. При цьому розглядається перебіг зміни цих величин вздовж берега при різних фіксованих періодах попусків хвиль. Так, на рис. 4 наведені графіки  $\frac{\Delta W_{x,n}}{\Delta W_{x,60}} = f(l)$ , де  $\Delta W$  – дискретні об'єми на послідовних ділянках моделі берега  $\Delta l = 1.0$  м; індекси  $x$  відповідно означають А, Р, Т, тобто відношення цих величин до акумуляції, розмиву та транзитиву наносів;  $n$  – періоди попусків, що відповідають градаціям в 10, 20, 40 та 60 тисяч хвиль. Тут наведені значення А, Р, Т в долях відповідних їм однойменних величин після попуску 60 тисяч хвиль.

Розподіл відносних величин складових балансу наносів у вигляді наростаючих підсумків цих величин для відповідного відрізка моделі берега представлено на рис. 5. Тут в якості масштабу для величин А, Р, Т прийнято об'єми розмиву після попуску 60 тисяч хвиль  $\Delta W_{p,60} = f(l_i)$ .

Характерна картина розподілу вздовж берега відносних підсумкових величин об'ємів акумуляції та транзитиву наносів у долях об'ємів розмиву дна схилу за фіксовані періоди попусків хвиль представлено на рис. 6. Співвідношення між величинами акумуляції та транзитиву наносів за тих же умов показано на рис. 7.

У всіх випадках при розрахунках робоча ділянка моделі берега визначена в межах між стаціонарними створами № 12 та 42 протяжністю  $L = 15$  м. Ці обмеження прийняті з метою виключення кра-

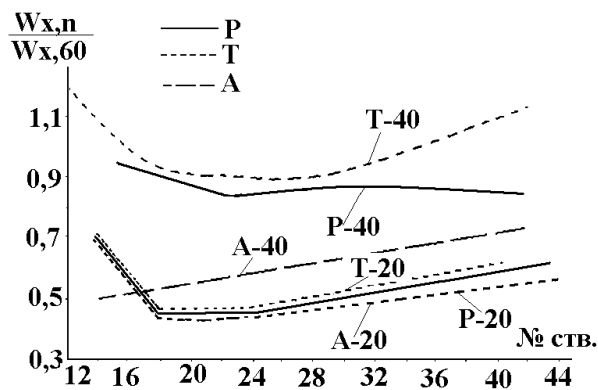


Рис. 4. Розподіл вздовж берега відносних величин дискретних об'ємів складових балансу наносів після різних періодів попуску хвиль (дослід № 1): індекс  $x$  послідовно означає А, Р, Т, тобто: акумуляцію, розмив, транзит;  $n$  – кількість хвиль попуску: 20, 40 та 60 тис. хвиль

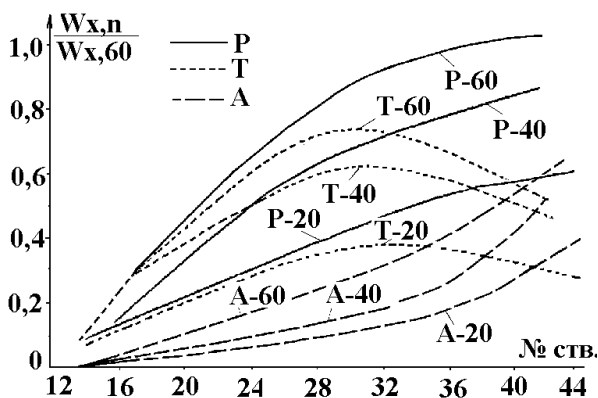


Рис. 5. Розподіл відносних об'ємів складових балансу наносів як підсумків цих величин для відповідного значення  $l_i$ . Дослід № 1. Умовні позначки див. на рис. 4

йових ефектів на кінцевих ділянках моделі.

### 2.2. Берег, захищений поперечними спорудами

З представлених в попередньому підрозділі діаграм на рис. 6 і 7 виявляється, що стадія відносної стабілізації абразивно-акумулятивних процесів на береговому схилі наступає в період між попусками 40 ÷ 60 тис. хвиль. Тому в подальшому для виявлення загальних тенденцій розвитку берегових процесів та впливу на їх перебіг різних гідротехнічних факторів будуть використані експериментальні дані, визначені після попусків  $n = 60$  тис. хвиль. Так, на рис. 8 і 9 відтворені характерні відмінності розподілу складових балансу нано-

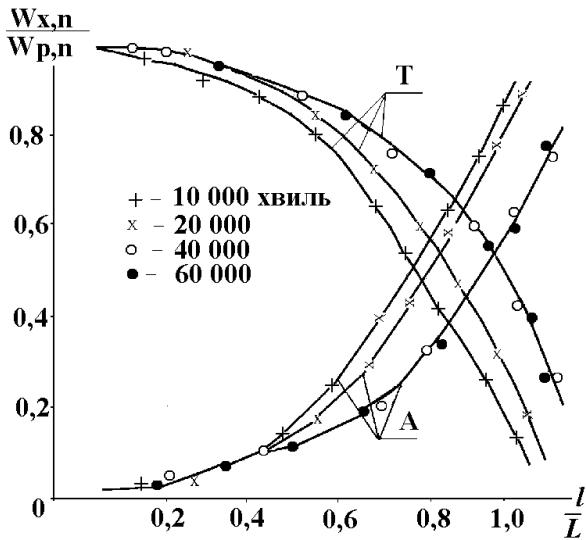


Рис. 6. Характерна картина розподілу об'ємів акумуляції та транзиту наносів в долях відповідних об'ємів розмиву вздовж берега в ході стабілізації цих процесів. Дослід № 1

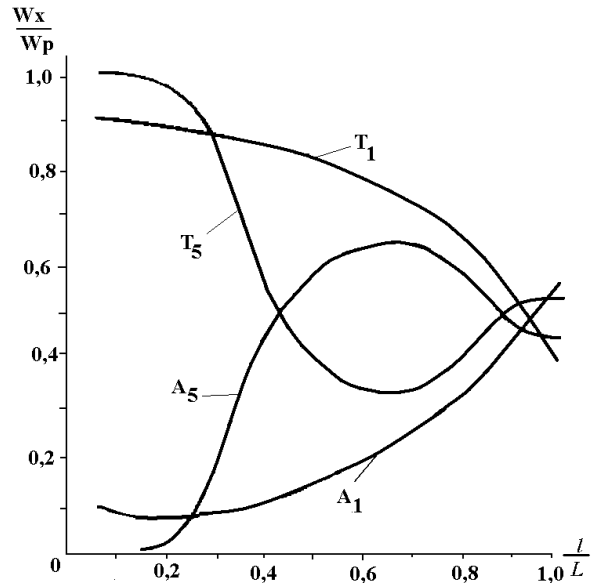


Рис. 8. Характерні особливості розподілу об'ємів акумуляції та транзиту наносів у долях об'ємів розмиву вздовж берега у випадках вільного та захищеного берега. Досліди № 1, 5 при  $n = 60$  тис. хвиль

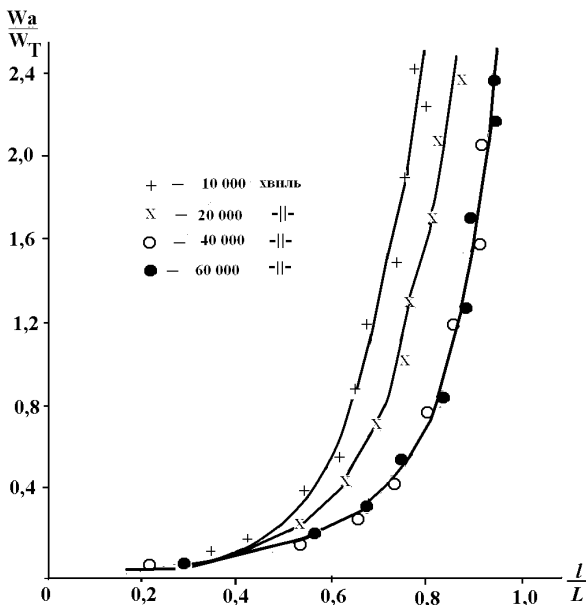


Рис. 7. Інтерпретація експериментальних даних по розподілу об'ємів акумуляції в долях об'ємів транзиту наносів вздовж вільного берега в залежності від періоду попуску хвиль

сів для випадків вільного берега та берега, укріпленого системою 4-х непроникних бун. Як міра величин відповідних інтегральних параметрів використані об'єми розмиву  $W_p$  та об'єми транзиту наносів  $W_T$ . Тут і далі розглядаються підсумкові об'єми ( $W = f(l_i)$ ).

### 2.3. Аналіз експериментальних результатів та їх обміркування

Проведені дослідження відрізняються від попередніх [4, 6–8, 12, 13] тим, що тут систематично і більш детально розглядаються складові балансу наносів, приведені до виду різних співвідношень, їхній розвиток у часі – від започаткування процесу до його стабілізації (див.рис. 4–7). Використання різних характерних масштабів для нормування основних параметрів, якими визначаються особливості переформування берега, дає можливість наглядно і різнобічно відтворити динамічну картину берегових процесів.

Так, вклад дискретних відрізків берега в розвиток процесів акумуляції (А), розмиву (Р) та транзиту (Т) наносів показано на рис. 4. Відносні об'єми складових балансу наносів суттєво збільшуються з ростом хвильового навантаження, а в напрямку вздовж берегового потоку приріст дискретних А, Р, Т повільний і незначний. Тут в ролі масштабів прийнято  $\Delta W$  для однойменних величин при  $n = 60\,000$  хвиль.

Для кожного відрізка  $l_i$  більш характерними величинами є відповідні наростаючі підсумкові значення об'ємів А, Р, Т, приведені на рис. 5, для яких прийнято єдиний масштаб  $W_{p,60} = f(l_i)$ . Спостерігається збільшення об'ємів по плавним кривим ви-

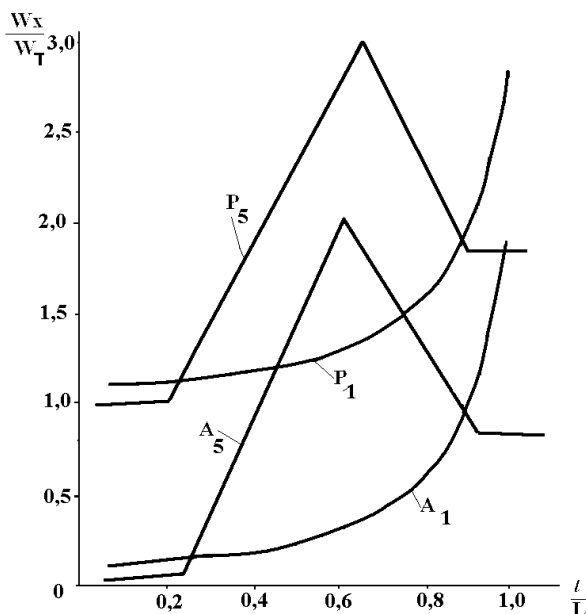


Рис. 9. Відмінності в розподілі об'ємів розмиву та акумуляції на вільному та захищеному березі при нормуванні їх відповідними величинами транзитів наносів. Досліди № 1, 5 при  $n = 60$  тис. хвиль

пуклістю вверх графіка для  $P$  та випуклістю вниз – для  $A$ . Для  $T$  досягається максимум у середині досліджуваної ділянки, а потім піде спад.

У випадку вільного берега інтенсивність розмиву досягає максимуму на початку моделі і плавно убуває в напрямку кінцевої ділянки. Акумуляційні процеси розвиваються в зворотному порядку. В загальній картині деформацій берегового схилу, захищеного системою бун, головна роль відводиться абразійним процесам на ділянках I і III. На укріпленій ділянці II руйнівна дія хвиль різко знижується, а провідна роль передається процесам акумуляції. Це твердження не розходиться з даними літературних джерел [4, 13].

Відображення результатів експерименту в діаграмах на рис. 8 і 9 у наглядній формі демонструють як кількісні показники, так і характерні закономірності розвитку абразивно-акумулятивних процесів і транзитів наносів вздовж берега при наявності поперечних споруд у порівнянні з випадком їх відсутності (вільний пляж). Картина поступової планової зміни інтегральних параметрів уздовж берега, характерна для вільного берега, при наявності поперечних споруд різко змінюється.

Криві  $\frac{W_a}{W_p} = f\left(\frac{l}{L}\right)$  та  $\frac{W_T}{W_p} = f\left(\frac{l}{L}\right)$  для вільного та укріпленого берега визначаються рі-

зними закономірностями, але для будь-якої конкретної ситуації ці криві є дзеркальним відображенням одна одної відносно осі симетрії, паралельної абсцисі  $\frac{l}{L}$ . Це твердження не суперечить висновкам, які витікають з співвідношень балансу наносів.

Криві  $\frac{W_a}{W_T} = f\left(\frac{l}{L}\right)$  та  $\frac{W_p}{W_T} = f\left(\frac{l}{L}\right)$  для вільного та укріпленого берега також описуються різко відмінними закономірностями, але в кожному окремому випадку ці криві як би дублюють себе за умови переміщення їх на певний визначений крок по осі ординат. Це може бути виражено як співвідношення складових балансу наносів у вигляді:

$$\frac{W_a}{W_T} = \frac{W_p}{W_T} - 1. \quad (4)$$

Дослідження, виконані в Інституті гідромеханіки НАН України [3, 4, 13], показують, що процеси переформування профілю підводного берегового схилу та мінливість контуру берегової лінії по зонам формування визначаються переважно характером та інтенсивністю процесів насичення наносами вздовжберегового потоку. Для оцінки цих процесів пропонується використати таку інтегральну характеристику балансу наносів, як коефіцієнт акумуляції. При вирішенні просторової задачі трансформації берегової відмілини з урахуванням переміщення наносів уздовж берега коефіцієнт акумуляції по суті є показником кількісної оцінки вздовжберегового потоку наносів  $Q_{xt}$ , тобто підсумкового об'єму наносів, що транспортується на відстані  $x$  від початку зони насичення за період  $t$ . Тоді для кожного відрізка берега  $l_i$  співвідношення складових балансу приводиться до виду:

$$Q_{xt} = W_T = W_p - W_a = W_p(1 - \Delta_a), \quad (5)$$

де  $\Delta_a = \frac{W_a}{W_p}$  – коефіцієнт акумуляції.

Приймаючи цю логіку міркувань, правомірно ввести поняття коефіцієнту транзитів наносів:

$$\Delta_T = 1 - \Delta_a, \quad (6)$$

де  $\Delta_T$  – коефіцієнт транзитів.

Приведені судження та викладки знаходяться у відповідності з результатами експериментального дослідження, представлених на рис. 6, 8 і 9. Трактовка балансу наносів у формі коефіцієнтів акумуляції та транзитів наносів видається зручним

прийомом для аналізу берегових процесів. Так, це дозволяє чітко розграничити зони, де переважають процеси розмиву, акумуляції чи транзиту наносів, а також дати кількісну оцінку параметрів цих процесів.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОНИКНОСТІ БУН НА ЇХ НАНОСОРЕГУЛЮЮЧІ ФУНКЦІЇ

Пошук узагальнюючих закономірностей розвитку процесів на береговому схилі привів до встановлення нового виду представлення розподілу об'ємів деформацій. На рис. 10 приведені результати всіх серій дослідів. Апроксимація кривих діаграм приведена до виду:

для вільного берега :

$$Y = \frac{0.04}{x^2} + 0.25 \frac{(1-x)^2}{x}; \quad (7)$$

для укріпленого берега:

$$Y = \frac{0.04}{x^2} + 0.25 \frac{(1-x)^2}{x} - 0.25 \frac{(1-x)}{(1+x)}, \quad (8)$$

де  $Y = \frac{W_p}{l^3} 10^2$ ;  $x = \frac{l}{L}$ .

Така форма відтворення розвитку розмиву берега до деякої міри заглублена, але чітко виявляє тенденції процесу і дає можливість математичного опису закономірності. Тут досить виразно просліджується вплив поперечних споруд, але затушовується роль проникності їх конструкцій. Аналогічними діаграмами може бути представлений розподіл підсумкових об'ємів акумуляції та транзиту наносів та їхнє аналітичне відтворення.

Для виявлення ролі проникності поперечних споруд на розвиток абразивно-аккумулятивних процесів недостатньо зосереджуватись тільки на ступені їх проникності, тут не можуть бути залишені поза увагою як геометричні параметри гідротехнічного захисту ділянки берега, так і зони насичення наносами вздовжберегового потоку. Так, на рис. 11 представлені співвідношення підсумкових об'ємів акумуляції та розмиву на границях зон I, II, III (див. рис. 1) при різних ступенях суцільності бун до відповідних їм об'ємів у випадку вільного берега, тобто при  $K_c = 0$ . Наведені діаграми свідчать, що у всіх випадках розмив берегового схилу зменшується в співвідношенні з вільним берегом. При цьому незначно змінюються об'єми розмиву в зоні III, а в зоні II – знижуються найбільш суттєво (до 40%). Інтенсивність акумуляційних процесів занижена в кінцевій зоні III, а на захищеній

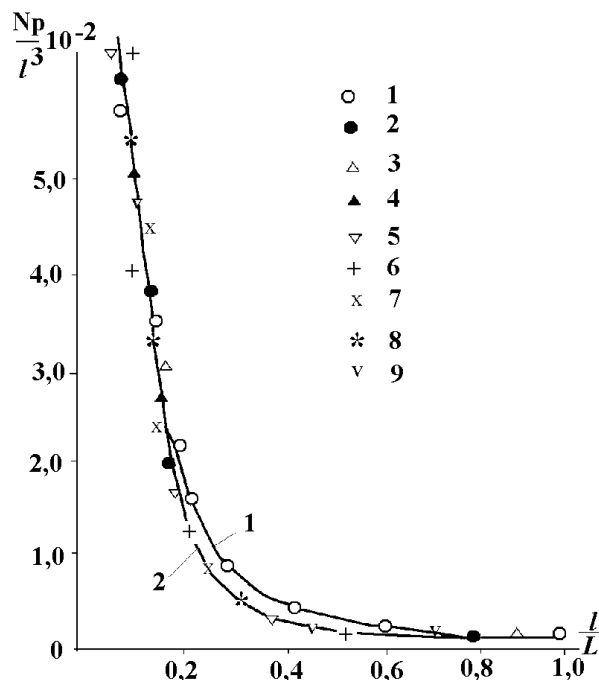


Рис. 10. Узагальнена закономірність розвитку абразивних процесів на досліджуваній ділянці вільного (I) та захищеного берега системами бун (II): 1...9 – нумерація дослідів

ділянці II – суттєво вища, ніж на вільному березі, і збільшується з ростом значень коефіцієнтів  $K_c$ . Тут просліджується неоднозначна залежність відносних об'ємів трансформації схилу як від ступеню перфорації тіла поперечних споруд, так і від кількості їх у системі захисту берега.

Тепер розглянемо варіант зміни відносних величин об'ємів акумуляції та розмиву на границях виділених зон при нормуванні їх відповідними об'ємами деформацій у випадку непроникних бун, тобто при  $K_c = 1$  (рис. 12). З метою узагальнення розподілу експериментальних результатів вводиться множник, що визначається як коефіцієнт  $\eta$ :

$$\eta = \frac{K_c}{m(K_{II} + 1)} = \frac{(1 - K_{II})}{m(K_{II} + 1)}, \quad (9)$$

де  $m = \frac{D}{l_b}$  (позначки див. на рис. 1).

В нашому випадку  $S = l_b$ .

На рис. 12 дається більш упорядкована картина зміни відносних об'ємів деформацій берега в залежності від коефіцієнтів перфорації споруд  $K_c$ . При цьому спостерігається певна ступінь сепарації цих величин по зонам для випадку захисту берега системою 4-х бун, при 3-х бунах результати практи-

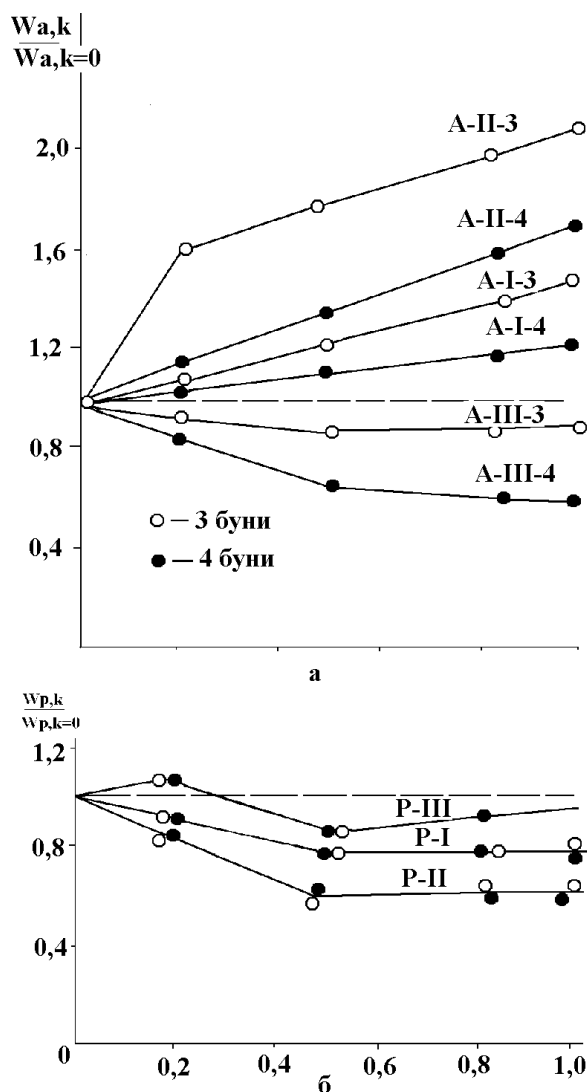


Рис. 11. Розподіл відносних об'ємів розмиву та акумуляції захищеного берега при нормуванні їх відповідними об'ємами вільного берега в зонах I, II, III в залежності від ступені суцільності бун

чно співпадають – відхилення в межах точності експерименту. При такому визначенні відносних величин об'ємів акумуляції та розмиву спостерігається явна тенденція їх зменшення відносно до випадку захисту непроникними бунами. Можна констатувати, що з певною мірою загрублення розподіл об'ємів акумуляції та розмиву по величині коефіцієнтів описується однією закономірністю для визначеної системи захисту берега. Відмінності такої закономірності залежать тільки від кількості споруд у системі захисту.

Далі зосередим увагу на захищеній ділянці – зона II. Варіант пошуку відображення зв'язку між параметрами абразивно-акумулятивних процесів

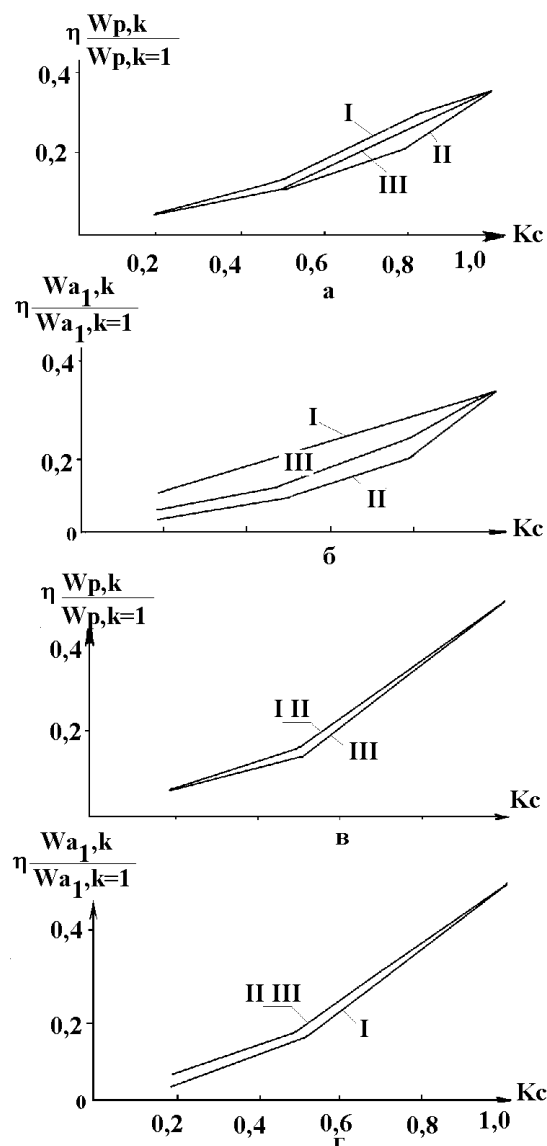


Рис. 12. Варіант представлення експериментальних результатів для виявлення впливу ступеню перфорації бун на процеси деформації берега в зонах I, II, III; об'єми розмиву та акумуляції дані в долях відповідних їм величин при захисті берега глухими бунами: а, б – при 4-х бунах; в, г – при 3-х бунах

та коефіцієнтами проникності бун, з урахуванням параметрів системи укріплення берега, представлено на рис. 13. Тут для характеристики деформацій берега використовуються такі параметри:

$$\overline{W}_p = \frac{\Delta W_{p2}}{(\Delta W_{p1} + \Delta W_{p2})} = \frac{\Delta W_{p2}}{W_{p2}}, \quad (10)$$

$$\overline{W}_a = \frac{\Delta W_{a2}}{(\Delta W_{a1} + \Delta W_{a2})} = \frac{\Delta W_{a2}}{W_{a2}}, \quad (11)$$

де  $\Delta W$  – дискретні об'єми деформацій на окре-



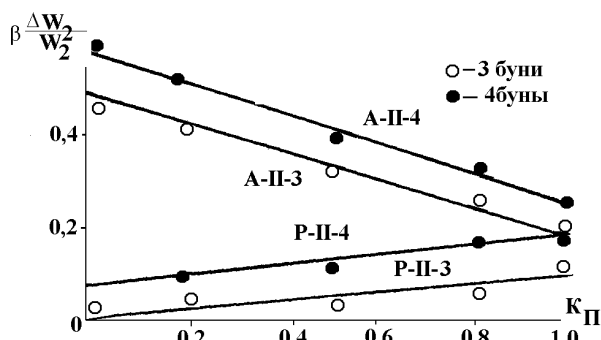


Рис. 13. Вплив проникності бун на процеси розмиву та акумуляції на захищеній ділянці берега (зона II)

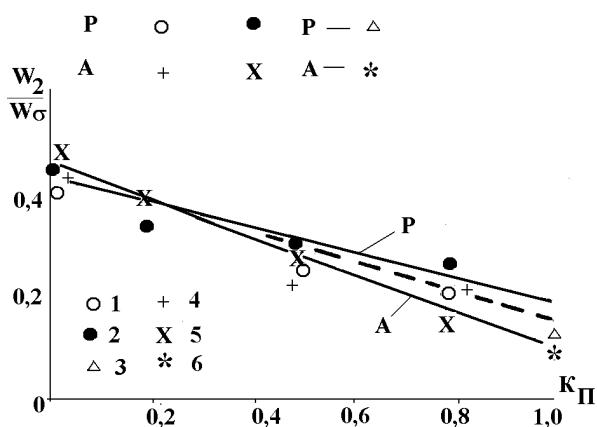


Рис. 14. Узагальнена залежність розподілу відносних об'ємів деформацій берегового схилу від ступені проникності поперечних споруд: 1...3 – розмив; 4...6 – акумуляція, а в нижньому ряді послідовно: 3 буні, 4 буні, вільний берег

мій ділянці;  $W_i$  – підсумкові об'єми деформацій на кінцевій границі визначеної ділянки (зони); індекси 1, 2 – нумерація зон (див. рис. 1).

В даному випадку для виявлення чітких закономірностей розподілу об'ємів деформацій в ролі множника запропоновано коефіцієнт  $\beta$ , як комплексний параметр, що враховує в певній мірі як умови захисту берега, так і ступінь проникності поперечних споруд:

$$\beta = \frac{n}{(n+1)(K_{II} + 1)}, \quad (12)$$

де  $n = \frac{D}{S}$ .

Більш узагальнююча картина розподілу параметрів деформацій берегового схилу показана на рис. 14 у формі залежності:

$$\beta \frac{W_2}{W_\sigma} = f(K_{II}), \quad (13)$$

де  $W_2$  та  $W_\sigma$  – підсумкові об'єми деформацій на границях зони II та всієї досліджуваної ділянки берега, тобто  $W_\sigma = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \Delta W_3$ .

Такий вид інтерпретації експериментальних даних дозволяє зробити висновок, що взаємозв'язок між параметрами деформації берега та ступенем проникності споруд може бути зведений до однієї залежності, загальної як для процесів розмиву, так і акумуляції. Здається, що в межах точності експерименту, такий висновок у цілому допустимий. В той же час, як показано на графіках (рис. 13), незначні розходження в розподілі параметрів розмиву та акумуляції існують.

## ВИСНОВКИ

В статті приведені результати експериментальних досліджень розвитку абразивно-акумуляційних процесів на гідравлічній моделі піщаного берегового схилу при скісному підході хвиль. Розглянуті ситуації, що відповідають умовам природного стану берега та умовам захисту берега системою бун. Серії дослідів проведені для варіантів інженерного захисту низкою 3-х та 4-х бун при різних ступенях проникності конструкцій споруд.

Дана оригінальна інтерпретація експериментальних результатів для характерних співвідношень складових балансу наносів. Проведено детальний аналіз стабілізації абразивно-акумулятивних процесів у часі, впливу техногенних факторів на перерозподіл об'ємів розмиву, акумуляції та транзиту наносів вздовж берега, ролі впливу проникності поперечних споруд на їх наносорегулюючі функції. Результати дослідження дозволяють констатувати:

1. Стабілізація абразивно-акумулятивних процесів досягається після попусків 40...60 тисяч хвиль.

2. Розвиток абразивно-акумулятивних процесів уздовж берега різко змінює свій характер при наявності поперечних споруд. Максимум цих змін припадає на захищену ділянку (зона II). Тут інтенсивність розмиву знижується до 40 %, а акумуляції – виростає в 1.4 ÷ 2 рази в порівнянні з вільним берегом. В зонах I, III ці відмінності значно менші.

3. Вплив проникності поперечних споруд на їхні наносорегулюючі функції проявляється неоднозначно. Так, при коефіцієнтах проникності  $K_{II}=0...0,5$  параметри розмиву залишаються незмінними та рівними їх значенням для глухих (супільних) бун; далі в діапазоні  $K_{II}=0,5...1,0$  вони поступово наближаються до величини параметрів

розмиву, відповідних для вільного берега. В той же час, параметри об'ємів акумуляції досягають свого максимуму при варіанті захисту глухими бунами і монотонно падають до їх значень для вільного берега. Більш того, йде розшарування цих величин у залежності від кількості бун у системі захисту, тоді як вплив цього фактору на показниках розмиву не відбивається.

4. Запропонований підхід до аналізу процесів переформування берегового схилу дозволив наблизитись до узагальнюючих закономірностей розподілу складових балансу наносів уздовж берега та впливу проникності споруд, з урахуванням їх кількості в системі захисту, на їхні наносорегулюючі спроможності.

1. *Иванов В. А.* Природопользование на Черноморском побережье западного Крыма: современное состояние и перспективы развития.– Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2006.– 324 с.
2. *Инженерний захист та освоєння територій. Довідник:* Під редакцією Ніщука В. С.– К.: Основа, 2000.– 344 с.
3. *Сокольников Ю. Н.* Инженерная морфодинамика берегов и ее приложения.– К.: Наукова думка, 1976.– 228 с.
4. *Хомицкий В. В.* Природоохранные аспекты береговой гидротехники.– К.: Наукова думка, 1983.– 276 с.
5. *Мишин А. В.* Волнозащита акваторий и берегов.– ООО УИПК: “ЕксОб”, 2003.– 176 с.
6. *Arved J. Raudrivi* Permeable Pile Groins // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean engineering.– 1996.– N 6.– P. 267–272.
7. *Mark B. Gravens, Nikolas C. Kraus* Representation of Croins in numerical models of shoreline Reponse // IAHR. XIII Congress.– Ottawa, Canada, 1989.– P. 515–552.
8. *Petras Zemlys, Peter Frohle, Saulius Gulbinsras, Lina Davuliene* Near - shore evolution model for Palanga area feasibility study of beach erosion management // Geologija.– 1996.– **Vilnins № 57**, – P. 45–54.
9. *Максимчук В. Л.* Моделирование процессов пространственного переформирования песчаных пляжей. Исследования по прикладной гидродинамике.– К.: Наукова думка, 1965.– 5 с.
10. Рекомендации по гидравлическому моделированию волнения и его воздействия на песчаные побережья морей и водохранилище.– М.: ЦНИИС, 1987.– 83 с.
11. *Шарп Д.* Гидравлическое моделирование.– М.: Мир, 1984.– 279 с.
12. *Марченко А. Г., Нищук В. С., Пустовойт В. Ф.* Натурные исследования динамики элементов искусственных пляжей // Гидромеханика.– 1976.– Вып. 33.– С. 56–61.
13. *Цайтц Е. С., Хомицкий В. В.* Изменение коэффициента аккумуляции по длине абразионно-аккумулятивного берега // Гидромеханика.– 1978.– вып. 33.– С. 66–70.