

УДК 532.59

НАКАТ І ВІДКІТ ПОВЕРХНЕВОЇ ПООДИНОКОЇ ХВИЛІ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ З КРУТИМИ СХИЛАМИ

А. С. КОТЕЛЬНИКОВА, В. І. НІКІШОВ,
Л. М. ТЕРЕЩЕНКО, В. В. ХОМИЦЬКИЙ

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ
вул. Желябова, 8/4, 03680, МСП, Київ-180, Україна
E-mail: vinhim@gmail.com

Одержано 14.05.2014

В даній статті представлено результати експериментальних досліджень взаємодії поверхневих поодиноких хвиль з крутими береговими схилами. Виявлено, що довгі хвилі, які рухаються вгору по схилу (накат хвилі) без руйнування, можуть руйнуватися при відкоті. Визначено величини максимального накату і відкату поодинокі хвилі для крутих схилів. Отримано залежність величини відкату від максимального накату хвилі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: поодинокі хвилі, крутий схил, накат хвилі, відкіт хвилі

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия поверхностных уединенных волн с крутыми береговыми склонами. Обнаружено, что длинные волны, которые двигаются вверх по склону (накат волны) без обрушения, могут разрушаться при откате. Определены величины максимального наката и отката уединенной волны для крутых склонов. Получена зависимость величины отката от максимального наката волны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: уединенная волна, крутой склон, накат волны, откат волны

The results of experimental investigations of the interaction of surface solitary waves with steep slopes are presented. It is found that long wave which move upward (run-up) the slope without breaking may break during rundown. The values of maximum wave run-up and rundown of solitary wave for steep slopes have been obtained. The relation of the value of rundown from maximum wave run-up is found.

KEY WORDS: solitary wave, steep slope, wave run-up, wave rundown

ВСТУП

Дослідження процесів накату і відкату довгих хвиль на берег має велику значимість для зменшення катастрофічних наслідків від дії хвиль цунамі в прибережній зоні. Визначення максимальної висоти накату є важливим критерієм для оцінки стійкості берегів, проектування гідротехнічних споруд, портів та інших конструкцій, пов'язаних з експлуатацією берегової зони морів. Проблеми, пов'язані із взаємодією поверхневих поодиноких хвиль з береговими схилами, продовжує присвячуватись багато робіт. Дослідження ведуться як в теоретичному [1–3], так і в експериментальному напрямках [4–6]. Широко відомі роботи Synolakis С.Е. (1987), Li & Raichlen (2001, 2002, 2003), Pedersen G. & B. Gjevik (1983), Grilli S.T. (1997), Пеліновського Є.Н. (1996) та ін. [7–13]. Аналіз робіт показує, що і наразі існують важливі питання, яким приділено недостатньо уваги. Серед них, наприклад, процес взаємодії поодиноких хвиль з крутими схилами та процес відбиття поодиноких хвиль від таких схилів, а також дослідження характеристик відбитих хвиль. Дані дослід-

ження необхідні для оцінки дисипації і трансформації хвильової енергії поодинокі хвилі при її взаємодії з береговою смугою.

В даній роботі розглянуто взаємодію поверхневої поодинокі хвилі з крутими береговими схилами з кутами нахилу 45° і 30°. Дослідження проводились в лабораторному каналі довжиною 16 м, шириною 0.3 м та висотою 0.7 м. Глибина води складала 11, 14 і 17 см. В одному кінці лотка було встановлено генератор поодиноких хвиль, в іншому – моделі берегових схилів. Докладний опис експериментальної установки представлено в [14].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Хвилі, що формувалися в експерименті, є типовими нелінійними поодинокими хвилями. Теоретичний профіль хвиль описується виразом, який є розв'язком рівняння Кортевега-де Вриза [15]: $\eta = a \operatorname{sech}^2 [(3a/4H^3)^{1/2}x]$, де a – амплітуда поодинокі хвилі, H – незбурена глибина води в лотку.

Після генерації поодинокі хвиля з амплітудою a поширюється в хвильовому каналі в напрямку до схилу, потім рухається вгору по схилу, досягаючи

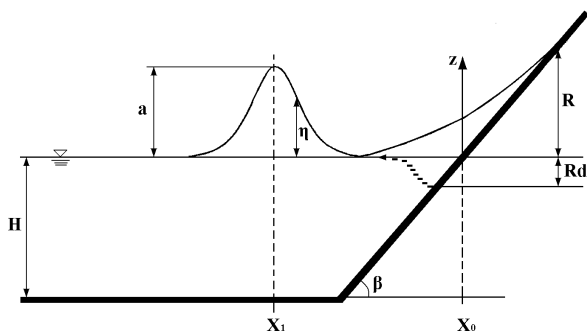


Рис. 1. Схема нахату і відкату поодинокій хвилі:
 H – глибина води; a – амплітуда хвилі; η – поточне збурення вільної поверхні; β – кут нахилу берегового схилу; R – висота нахату поодинокій хвилі на схил; R_d відповідає величині максимального відкату

значення свого максимального нахату R (вертикальна відстань між рівнем вільної поверхні води у стані спокою і відхиленням вільної поверхні при взаємодії хвилі з береговим схилом). Результати дослідження величини нахату в залежності від параметрів поодинокій хвилі і кута нахилу берегового схилу приведено в роботі [14]. Слід відмітити, що в даних дослідженнях діапазон амплітуд генерованих хвиль значно розширився за рахунок зміни початкового положення тіла генератора відносно рівноважного стану вільної поверхні рідини.

При взаємодії поодинокіх хвиль з береговими схилами після досягнення положення максимального нахату починається процес відкату: язик нахату відступає вниз по схилу, і в цей момент починається генерація відбитої хвилі, яка поширюється від берегового схилу. Схема нахату і відкату хвилі представлена на рис. 1.

Результати обробки цифрових фотографій процесів нахату і відкату хвилі [16] показали, що форми кривих вільної поверхні в процесі нахату поодинокій хвилі на вертикальну стінку мало відрізняються від аналогічних форм при відкоті. В процесі відкату профіль відбитої хвилі має форму, близьку до форми падаючої хвилі, різниця амплітуд падаючої та відбитої хвилі не перевищує 5%. Для крутих схилів картина суттєвим чином змінюється. При взаємодії поодинокій хвилі з крутими береговими схилами при відкоті виникає значне локальне пониження вільної поверхні в околі перетину незбуреної вільної поверхні зі схилом, яке обумовлює генерацію хвиль відносно малої довжини, що розповсюджуються від схилу слідом за відбитою хвилею у вигляді хвильового пакету. На рис. 2, а, б представлено результати обробки цифрових фотографій процесу відкату поодинокій хвилі при взаємодії з береговими схилами, вста-

новленими під кутом 45° і 30° відповідно. Відносна висота падаючої хвилі була $a = 0.32H$. Глибина води складала 11 см. Цифрами позначено стадії відкату хвилі. Відмітимо, що для відносно великих амплітуд хвиль може відбуватися їх руйнування при відкоті зі схилу, яке супроводжується аерацією потоку. Це обумовлено тим, що при відкоті частинки рідини захоплюються зворотним потоком, який рухається паралельно схилу. За рахунок гравітаційних сил рух частинок рідини в зворотному потоці прискорюється, рідина проскакує нерухомий рівень вільної поверхні (цифра 1 на рис. 2) і, в кінцевому результаті, досягає точки максимального відкату (цифра 4 на рис. 2). Через нелінійність процесу профіль вільної поверхні при відкоті наближається до вертикального (укручається), і при вторинному нахаті спостерігається руйнування хвилі.

Як буде проходити процес відкату (з руйнуванням чи без руйнування хвилі), можна визначити за допомогою спеціального критерію, який вперше запропоновано в роботі [11] для полусинусоїдальної поодинокій хвилі:

$$a/H \geq 0.48 (\operatorname{tg} \beta)^{10/9}, \quad (1)$$

або уточненого критерію, отриманого в [17]:

$$a/H > 0.5139 s^{10/9}, \quad (2)$$

де β – кут нахилу берегового схилу до горизонту; s – ухил берегового схилу.

Згідно виразу (1), руйнування поодинокій хвилі при відкоті буде відбуватися при $a/H \geq 0.48$ для берегового схилу з кутом нахилу 45° і $a/H \geq 0.26$ – для схилу 30° , що досить добре узгоджується з проведеними експериментальними дослідженнями: на рис. 2, б при $a/H = 0.32$ при відкоті зі схилу 30° спостерігається відрив потоку (лінія позначена цифрою 5), тобто має місце руйнування хвилі, в той час як для схилу 45° (рис. 2, а) профілі відкату показані плавними кривими (руйнування не відбувається). Для прикладу на рис. 3 представлено фотокадри максимального відкату хвилі з берегового схилу з кутом нахилу 30° (рис. 3, а) і подальшого руйнування хвилі (рис. 3, б).

Аналіз відеоматеріалу та фотокадрів показав, що довгі хвилі, які рухаються вгору по схилу (накат хвилі) без руйнування, можуть руйнуватися при відкоті.

Результати проведених досліджень по величині нахату і відкату для берегових схилів, що розглядаються, в залежності від відносної висоти хвилі представлені на рис. 4 і 5 відповідно. На рис. 4 хрестиками позначено результати, які наведено в ро-

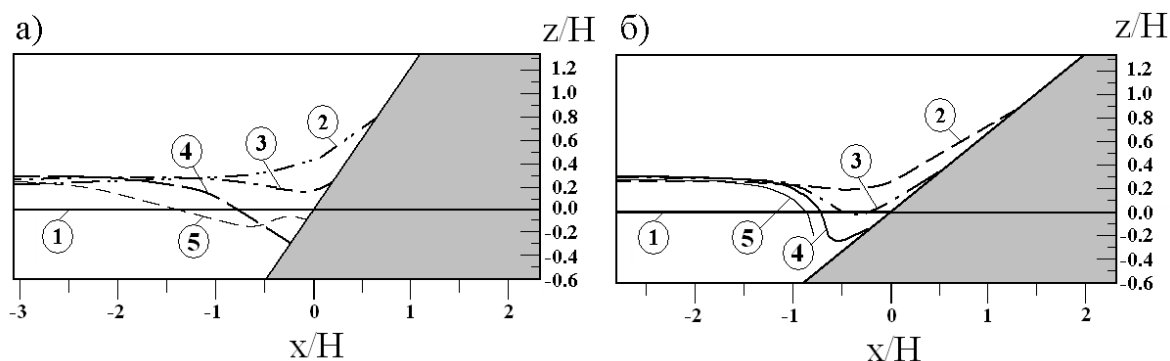


Рис. 2. Профілі відкату поодинокі хвилі при взаємодії з крутими береговими схилами:
а – $\beta = 45^\circ$; б – $\beta = 30^\circ$

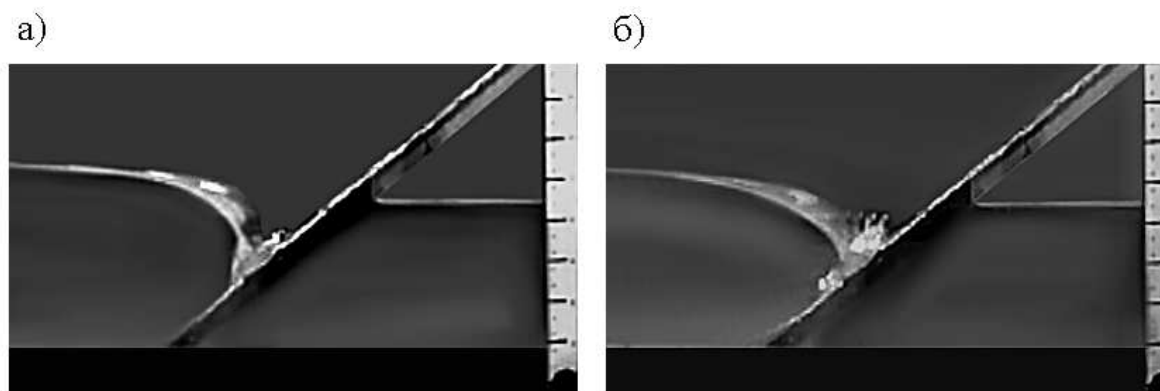


Рис. 3. Фотокадри відкату поодинокі хвилі з берегового схилу 30° при $a/H = 0.32$:
а – максимальний відкіт хвилі; б – руйнування хвилі

боті [14]. Як було сказано раніше, за рахунок удосконалення методу генерації поодинокі хвиль діапазон амплітуд вдалось значно розширити. Нові дані позначено заштрихованими символами. Дані по нахату порівняно з законом нахату Сінолакиса [7] (лінія 1 на рис. 4):

$$\frac{R}{H} = 2.831(\operatorname{ctg} \beta)^{1/2} \left(\frac{a}{H}\right)^{5/4}. \quad (3)$$

Також для порівняння на рис. 4, а наведено чисельні дані Чоу та Оуянга [1], Сінолакиса [18], Гріллі і Свендсена [19], і дані чисельних та експериментальних досліджень Кіма, Лю і Лігетта [20]. На рис. 4, б разом з експериментальними даними, отриманими для 30° , приведено результати експериментів Лі і Рейчлена [8] для 26° , чисельні дані Чоу та Оуянга [1], Гріллі та ін. [21].

Видно задовільне узгодження отриманих даних по нахату з теоретичними та експериментальними дослідженнями інших авторів. Залежність (3) для крутих схилів дає занижені дані по величині

максимальних накатів (лінія 1 на рис. 4), оскільки вона отримана при умові $(a/H)^{1/2} \gg 0.288 \operatorname{tg} \beta$ і справедлива для похилих схилів. Для крутих схилів величина нахату достатньо добре описується формулою Холла і Уотса (лінія 2 на рис. 4): $R/H = 3.1(a/H)^{1.15}$ [22]. Також для практичних розрахунків величини нахату поодинокі хвиль на круті схили можна користуватись формулою Сінолакиса з $k = 3.4$ – для 45° і $k = 3.1$ – для 30° . Ці дані нанесено лінією, позначеною цифрою 3 на рис. 4.

За результатами відкату побудовані регресійні криві (лінія 2 на рис. 5), що описуються формулами

$$\frac{R_d}{H} = 2.383 \left(\frac{a}{H}\right)^{2.342} \quad \text{– для } 45^\circ \quad (4)$$

і

$$\frac{R_d}{H} = 1.857 \left(\frac{a}{H}\right)^{1.415} \quad \text{– для } 30^\circ. \quad (5)$$

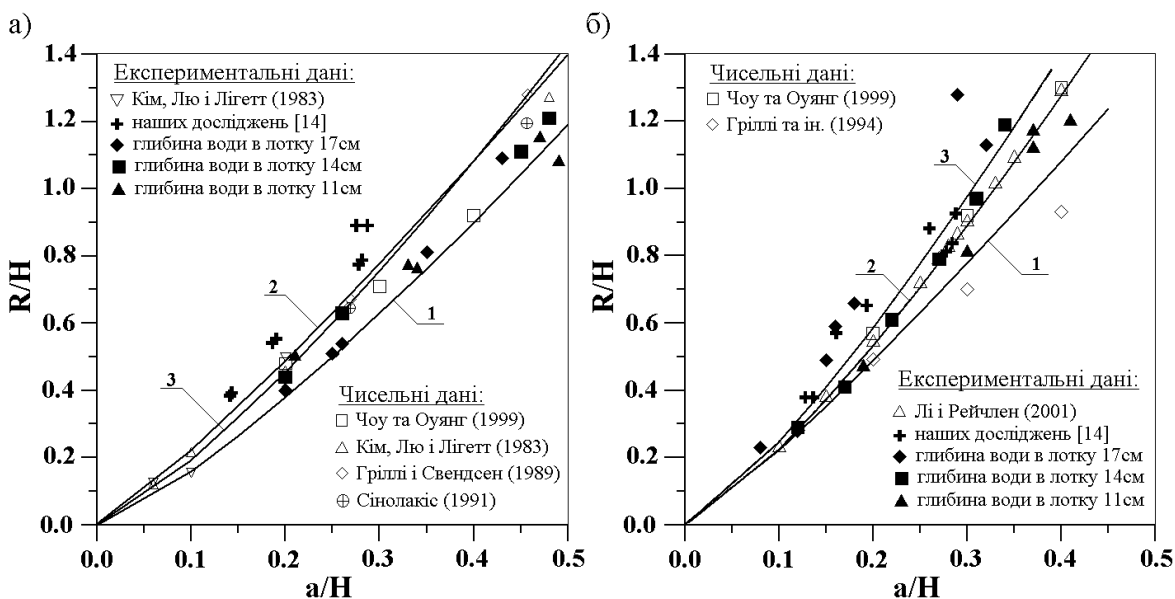


Рис. 4. Залежність величини нахату від відносної висоти хвилі при взаємодії поодинокі хвилі з береговим схилом:

◆, ■, ▲ – результати проведених досліджень для глибин води в лотку 17, 14 і 11 см відповідно;
 1 – наближена нелінійна теорія Сінолакиса [7]; 2 – нелінійна теорія Холла і Уотса [22];
 3 – наближена нелінійна теорія Сінолакиса [7] з $k = 3.4$ для 45° і $k = 3.1$ для 30°
 $a - \beta = 45^\circ$, б - $\beta = 30^\circ$

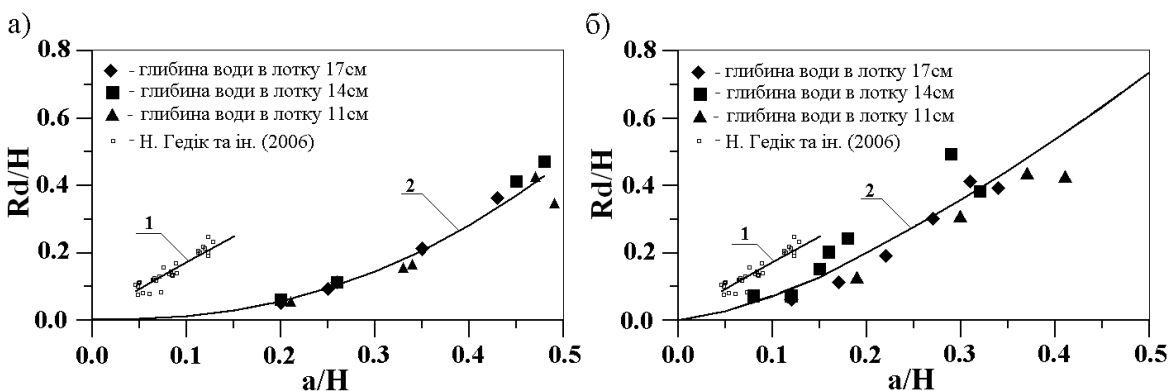


Рис. 5. Залежність величини відкату від відносної висоти хвилі при взаємодії поодинокі хвилі з береговим схилом:

◆, ■, ▲ – результати проведених досліджень для глибин води в лотку 17 см, 14 см і 11 см відповідно;
 □, 1 – експериментальні дослідження для 11° [23];
 2 – крива, побудована за залежністю (4) для 45° і залежністю (5) для 30°
 $a - \beta = 45^\circ$, б - $\beta = 30^\circ$

Результати експериментальних досліджень [23], проведених для берегового схилу 11° , також зображено на рис. 5. Видно, що є різниця між даними, які співставляються, але вона буде меншати при зменшенні кута нахилу схилу, зокрема для кута 30° (див. рис. 5, б).

Аналіз отриманих даних по величині нахату для берегових схилів 45° і 30° (рис. 4) показав, що ве-

личина нахату для берегового схилу з кутом 30° досягає свого максимуму при менших значеннях a/H , ніж для схилу 45° , тобто висота максимального нахату при однакових умовах буде більшою для берегового схилу з кутом 30° , ніж для схилу з кутом 45° . Таким чином, зменшення кута нахилу берегового схилу при однакових умовах призводить до збільшення висоти максимального нахату.

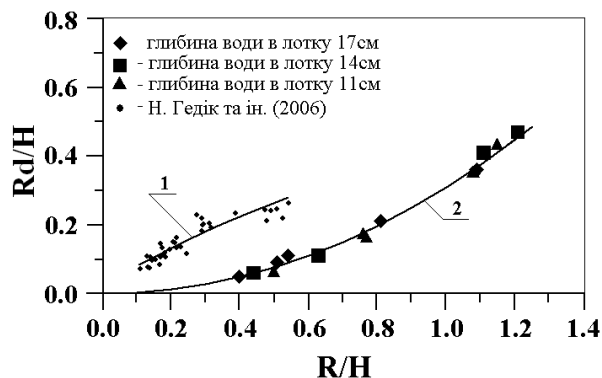


Рис. 6. Залежність величини відкату від висоти нахату для берегового схилу 45° :

- ◆, ■, ▲ – результати проведених досліджень для глибин води в лотку 17 см, 14 см і 11 см відповідно;
- – експериментальні дослідження для 11° [23];
- 1 – крива, побудована за залежністю (6) [23];
- 2 – крива, побудована за залежністю (7)

Подібні висновки можна зробити і по величині відкату. Як видно з рис. 5, *a*, *б*, величина відкату також залежить від відносної висоти хвилі і кута нахилу берегового схилу. Збільшення відносної висоти хвилі і зменшення кута нахилу берегового схилу призводить до збільшення висоти максимального нахату і, відповідно, до збільшення величини максимального відкату. Іншими словами, величина відкату залежить від величини нахату. Дана залежність представлена на рис. 6 і 7. Суцільна лінія, що позначена цифрою 1 на рис. 6 і 7, відповідає залежності, яка була отримана в роботі [23] при експериментальному дослідженні взаємодії поодинокі хвилі з неармованим береговим схилом ($s = 1/5$ або $\beta \approx 11^\circ$):

$$\frac{R_d}{H} = 0.4564 \left(\frac{R}{H} \right)^{0.7652}. \quad (6)$$

Коефіцієнт кореляції цього рівняння дорівнює 0.92. Лінія, що позначена цифрою 2 на рис. 6 і 7, побудована за результатами даних досліджень. Для $\beta=45^\circ$ (рис. 6) вона описується рівнянням (коефіцієнт кореляції дорівнює 0.98):

$$\frac{R_d}{H} = 0.31 \left(\frac{R}{H} \right)^{2.026}. \quad (7)$$

Видно, що дані по величині відкату в проведених експериментальних дослідженнях (лінія 2 на рис. 6), мають менші значення, ніж за залежністю (6) (лінія 1) [23]. Це і зрозуміло, оскільки дана залежність описує результати відкату, отримані для схилу 11° . При зменшенні кута нахилу берегового схилу різниця між даними меншає (див. рис. 7). У

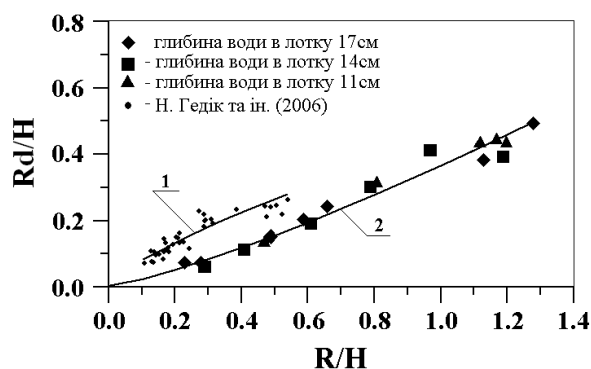


Рис. 7. Залежність величини відкату від висоти нахату для берегового схилу 30° :

- ◆, ■, ▲ – результати проведених досліджень для глибин води в лотку 17 см, 14 см і 11 см відповідно;
- – експериментальні дослідження для 11° [23];
- 1 – крива, побудована за залежністю (6) [23];
- 2 – крива, побудована за залежністю (8)

випадку $\beta=30^\circ$ вираз, що описує залежність між величиною відкату та висотою нахату, має вигляд:

$$\frac{R_d}{H} = 0.363 \left(\frac{R}{H} \right)^{1.258}. \quad (8)$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює 0.975.

Слід відмітити, що в будь-якому випадку величина максимального нахату (R/H) поодинокі хвилі значно перевищує відкіт хвилі (R_d/H).

ВИСНОВКИ

В результаті обробки експериментальних даних і цифрових фотографій процесу нахату хвиль на круті схили 45° і 30° і подальшого відкату було виявлено, що довгі хвилі, які рухаються вгору по схилу (накат хвилі) без руйнування, можуть руйнуватися при відкоті. Це залежить як від відносної висоти падаючої хвилі, так і від кута нахилу берегового схилу. Визначено величини максимальних відкотів і показано, що величина відкату, як і величина нахату, залежить від відносної висоти хвилі і кута нахилу берегового схилу. Збільшення відносної висоти хвилі і зменшення кута нахилу берегового схилу призводить до збільшення висоти максимального нахату і, відповідно, до збільшення величини максимального відкату. Тобто можна зробити висновок, що величина відкату залежить від величини нахату. Але в будь-якому випадку, R/H (накат хвилі) значно перевищує R_d/H (відкіт хвилі).

1. *Chou C.-R., Ouyang K.* The Deformation of solitary waves on steep slopes // *Journal of the Chinese Institute of Engineers.*– 1999.– **22**, No. 6.– P. 805–812.
2. *Carrier G. F., Wu T. T., Yeh H.* Tsunami run-up and draw-down on a plane beach // *J. Fluid Mech.*– 2003.– **475**.– P. 79–99.
3. *Kim N. H., Ko H. S.* Numerical simulation on solitary wave propagation and run-up by SPH method // *KSCE Journal of Civil Engineering.*– 2008.– **12**, N 4.– P. 221–226.
4. *Chang Y.-H., Hwung H.-H.* Experiments on the run-up of solitary waves over sloping bottoms // *Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering National Cheng Kung University.*– November 8–16, 2006.– Tainan.– P. 359–372.
5. *Jensen A., Pedersen G. K., Wood D. J.* An experimental study of wave run-up at a steep beach // *J. Fluid Mech.*– 2003.– **486**.– P. 161–188.
6. *Lynett P. J., Wu T.-R., Liu P. L.-F.* Modeling wave runup with depth-integrated equations // *Coastal Engineering.*– 2002.– **46**.– P. 89–107.
7. *Synolakis C. E.* The run-up of solitary waves // *J. Fluid Mech.*– 1987.– **185**.– P. 523–545.
8. *Ying Li, Fredric Raichlen* Solitary wave runup on plane slopes // *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.*– 2001.– **127**, N 1.– P. 33–44.
9. *Ying Li, Fredric Raichlen* Non-breaking and breaking solitary wave run-up // *J. Fluid Mech.*– 2002.– **456**.– P. 295–318.
10. *Ying Li, Fredric Raichlen* Energy balance model for breaking solitary wave runup // *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.*– 2003.– **47**.– P. 47–59.
11. *Pedersen G. and Gjevic B.* Run-up of solitary waves // *J. Fluid Mech.*– 1983.– **135**.– P. 283–299.
12. *Grilli S. T., Svendsen I. A., Subramanya R.* Breaking criterion and characteristics for solitary waves on slopes // *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.*– 1997.– **123**, N 3.– P. 102–112.
13. *Пелиновский Е. Н.* Гидродинамика волн цунами.– Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996.– 276 с.
14. *Городецький О. В., Котельнікова А. С., Нікішов В. І.* [та ін.] Генерація, розповсюдження та накат відокремлених хвиль на берегові схили // *Прикладна гідромеханіка.*– 2010.– **12**, N 1.– С. 40–48.
15. *Hammack J. L., Segur H.* The Korteweg-de Vries equation and water waves. Part 2. Comparison with experiments // *J. Fluid Mech.*– 1974.– **65**.– P. 289–314.
16. *Котельнікова А. С., Нікішов В. І., Олександров В. В., Сребнюк С. М.* Распространение и взаимодействие уединенных волн с береговыми склонами // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Механіка».*– 2011.– N 5, Вип. 15, том 1.– С. 10–21.
17. *Madsen P. A., Schäffer H. A.* Analytical solutions for tsunami runup on a plane beach: single waves, N-waves and transient waves // *J. Fluid Mech.*– 2010.– **645**.– P. 27–57.
18. *Synolakis C. E.* Tsunami run up on steep slopes: how good linear theory really is // *Natural Hazards.*– 1991.– **4**.– P. 221–234.
19. *Grilli S., Svendsen I. A.* Computation of nonlinear wave kinematics during propagation and runup on a slope // *Water Wave Kinematics.*– 1989.– P. 387–412.
20. *Kim S. K., Liu P. L.-F., Liggett J. A.* Boundary integral equation solutions for solitary wave generation, propagation and runup // *Coastal Engineering.*– 1983.– **7**.– P. 299–317.
21. *Grilli S. T., Losada M. A., Martin F.* Characteristics of solitary wave breaking induced by breakwaters // *Journal of Waterway, Port and Coastal Engineering.*– 1994.– **120**, N 1.– P. 74–91.
22. *Hall J. V., Watts J. W.* Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes // *Technical Memorandum 33, Beach Erosion Board, Office of the Chief of Engineers, U.S. Army Corps of Engineers.*–1953.– P. 12.
23. *Gedik N., Irtem E., Kabdasli M. S.* Experimental investigation on solitary wave run-down and its effects on armor units // *Coastal Engineering Journal.*– 2006.– **48**, N 4.– P. 337–353.