УДК 532.592:517.9 https://doi.org/10.31713/vt220187

Галич О. О., ст. викладач (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ХВИЛЯСТОГО СТРИБКА

В статті розглядаються особливості визначення параметрів хвилястого стрибка, до яких можна віднести спряжені глибини та максимальну глибину. Наводяться основні класичні залежності для визначення вказаних параметрів, а також залежності, що враховують негідростатику та втрати енергії в початковому перерізі явища. Дається співставлення параметрів хвилястого стрибка, отриманих за теоретичними залежностями, з експериментальними даними.
Ключові слова: **втрати енергії, максимальна глибина, негідростатичність, початковий переріз, спряжені глибини, хвилястий стрибок.**

Вступ. Під час експлуатації різних гідротехнічних та гідроенергетичних споруд досить часто виникає явище хвилястого стрибка. Хвилястий стрибок – це один із видів гідравлічного стрибка, який має хвилеподібну форму вільної поверхні з поступовим затуханням хвиль по довжині, що розповсюджуються на великі відстані. Хвилястий стрибок досить часто виникає в водопостачальних та зрошувальних каналах, естуаріях під час припливів та відливів, на ділянках річок, де виникають сильні течії, при витіканні з-під затвора, в нижньому б'єфі низьконапірних споруд, на берегових водоскидах та в інших випадках [1-3].

До основних параметрів хвилястого стрибка можна віднести спряжені глибини та максимальну глибину.

Перша спряжена глибина вимірюється у початковому перерізі розглядуваного явища. За початковий переріз приймається такий переріз, після якого вільна поверхня води починає різко зростати (рис. 1) [4]. Одним з головних параметрів, що визначає умови формування хвилястого стрибка, є число Фруда в початковому перерізі

$$Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{gh_1^3}}, \qquad (1)$$

де q – питома витрата потоку, g – прискорення вільного падіння, h_1 – перша спряжена глибина.

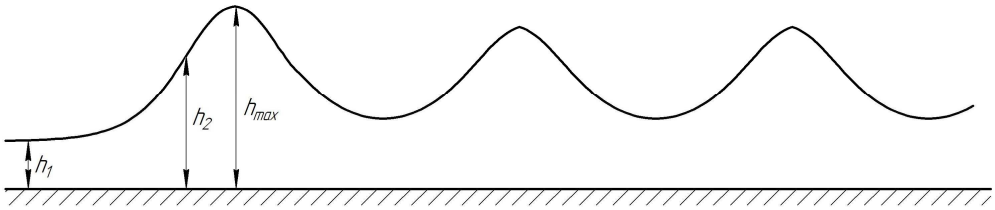

Рис. 1. Схема хвилястого стрибка

Число Фруда вказує на особливості використання залежностей для визначення параметрів хвилястого стрибка [5]. Коли число Фруда Fr_1 =1,0...1,80, необхідно враховувати негідростатичний розподіл тиску в початковому перерізі хвилястого стрибка, а при числах Фруда $Fr_1 \geq 1{,}80$ – втрати енергії в хвилястому стрибку.

Друга спряжена глибина знаходиться в точці зміни кривизни потоку, де розподіл тиску відбувається за гідростатичним законом (рис. 1). Експериментально ця глибина знаходиться в точках перетину кривої вільної поверхні з п'єзометричною лінією. Класичною формулою для визначення цієї глибини є формула Беланже

$$\eta_2 = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8Fr_1} - 1\right). \qquad (2)$$

Формула (2) застосовується для визначення другої спряженої глибини класичного гідравлічного стрибка, проте вона не завжди ефективна для визначення глибини хвилястого стрибка, особливо при числах Фруда $Fr_1 > 1{,}0$.

Для визначення другої спряженої глибини хвилястого стрибка доцільно використовувати формулу Рябенка, що враховує негідростатику в початковому перерізі [4]:

$$\eta_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{t_1 + 2Fr_1}\cos\left\{\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3}\arccos\left[\frac{3\sqrt{3}\alpha_{02}Fr_1}{\sqrt{\left(t_1 + 2Fr_1\right)^3}}\right]\right\}, \qquad (3)$$

де t_1 – коефіцієнт гідродинамічного тиску [4], α_{02} – коефіцієнт кількості руху, який приймається рівним 1,0 – при числах Фруда Fr_1 = 1,0...1,80, 1,05 – при числах Фруда $Fr_1 \geq 1{,}80$ [4].

Співставлення теоретичних результатів, отриманих за залежностями (2) та (3) з експериментальними даними, наведено на рис. 2.

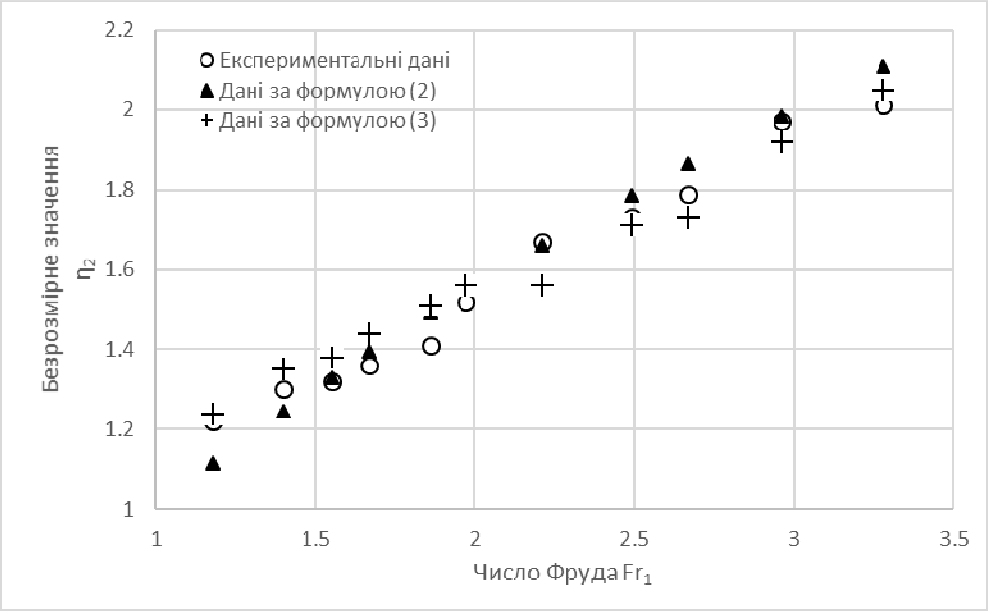

Рис. 2. Співставлення значень другої спряженої глибини, отриманих за теоретичними залежностями з експериментальними даними (Fr_1=1,18-1,86 – експериментальні дані О.А. Рябенка [4], Fr_1=1,97-2,49 – експериментальні дані Х. Шансона [1], Fr_1=2,67-3,38 – експериментальні дані автора)

З рис. 2 видно, що при числах Фруда Fr_1<1,80 для отримання достовірних результатів другої спряженої глибини слід використовувати залежність (3). Дана залежність враховує негідростатичний розподіл тиску в початковому перерізі та дає хорошу збіжність з експериментальними даними. При числах Фруда Fr_1≥1,80 залежності (2) та (3) дають близькі значення до експериментальних даних.

Максимальна глибина, що спостерігається найчастіше під першою вершиною хвилястого стрибка (рис. 1), може набагато перевищувати усереднену висоту всіх наступних хвиль. Тому саме ця глибина визначає відмітки верха бокових дамб каналів, низа прогінних балок мостів, висоту закритих безнапірних водоводів, тощо.

Класичною залежністю для визначення максимальної глибини є формула Рассела, яка не завжди є ефективною для визначення максимальної глибини хвилястого стрибка через неврахування негідростатичного розподілу тиску в початковому перерізі явища при числах Фруда рівних Fr_1 <1,80:

$$\eta_{\max} = \frac{h_{\max}}{h_1} = Fr_1 \ . \qquad (4)$$

Для врахування негідростатичного розподілу тиску в початковому перерізі хвилястого стрибка при визначенні його максимальної

глибини можна застосовувати формулу Рябенка [4]

$$\eta_{\max} = \frac{h_{\max}}{h_1} = \frac{1}{2}\left[t_1 + Fr_1^2 + \sqrt{\left(t_1 + Fr_1^2\right)^2 - 4Fr_1^2}\right]. \qquad (5)$$

Теоретичні дослідження максимальної глибини хвилястого стрибка при числах Фруда $Fr_1 \geq 1{,}80$ показали, що в початковому перерізі розподіл тиску відбувається за гідростатичним законом і дані, отримані за формулою (4) та (5), співпадають між собою, проте є завищеними відносно експериментальних значень глибини (рис. 3).

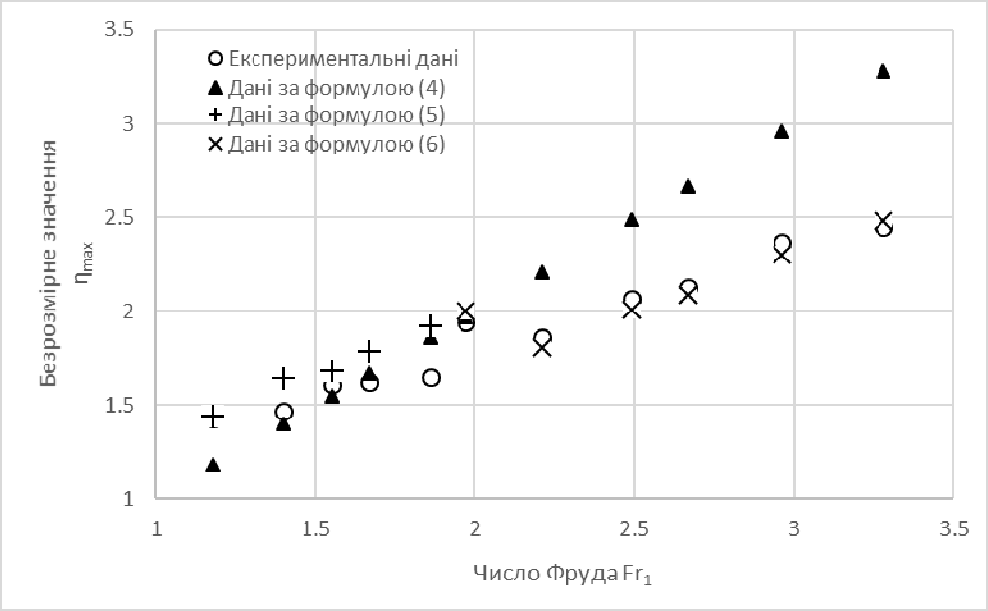

Рис. 3. Співставлення значень максимальної глибини, отриманих за теоретичними залежностями з експериментальними даними (Fr1=1,18-1,86 – експериментальні дані О.А. Рябенка [4], Fr1=1,97-2,49 – експериментальні дані Х. Шансона [1], Fr1=2,67-3,38 – експериментальні дані автора)

Якщо число Фруда $Fr_1 \geq 1{,}80$, то необхідно враховувати втрати енергії в хвилястому стрибку, а максимальну глибину можна визначити за залежністю (6)

$$\eta_в = \frac{2}{3}\left[\left(\frac{E_1}{h_1} - \frac{h_w}{h_1}\right) + \sqrt{4\left(\frac{E_1}{h_1} - \frac{h_w}{h_1}\right)^2 - 3\left(2\frac{E_1}{h_1} + Fr_1 - 1\right)}\right], \qquad (6)$$

де $\frac{E_1}{h_1}$ – питома енергія в початковому перерізі, $\frac{h_w}{h_1}$ – втрати енергії в хвилястому стрибку [6]. Дані параметри визначаються за залежностями (7) та (8) відповідно:

$$\frac{E_1}{h_1} = \beta_1 + \frac{Fr_1}{2}, \quad (7)$$

$$\frac{h_w}{h_1} = \beta_1 - \eta_2 + \frac{Fr_1}{2}\left(1 - \frac{\alpha_2}{\eta_2^2}\right), \quad (8)$$

β_1 – коефіцієнт потенціальної енергії в початковому перерізі хвилястого стрибка, α_2 – коефіцієнт кінетичної енергії.

З рисунка 3 видно, що при невеликих числах Фруда, слід враховувати негідростатичний розподіл тиску в початковому перерізі та використовувати залежність (5). Зі збільшенням числа Фруда, вплив негідростатичності зменшується, а формули (4) та (5) є близькими між собою та до експериментальних даних. При великих числах Фруда залежності (4) та (5) дають завищені результати, тому слід використовувати формулу (7).

Висновки

1. При роботі різних гідроенергетичних та гідротехнічних споруд існує імовірність утворення хвилястого стрибка.

2. При числах Фруда Fr_1=1,0-1,80 необхідно враховувати негідростатичність в початковому переріз явища та використовувати формули (3) і (5) для визначення його основних глибин.

3. При числах Фруда $Fr_1 \geq 1{,}80$ слід враховувати втрати енергії в хвилястому стрибку та використовувати формули (3) та (6) для визначення основних глибин хвилястого стрибка.

1. Chanson H. (1995) Flow characteristics of undular hydraulic jumps. Comparison with near-critical flows. *Report CH 45/95*. The University of Queensland, Australia. P. 202. **2.** Gotoh H., Yasuda Y., Ohtsu I. (2005). Effect of channel slope on flow characteristics of undular hydraulic jumps. *WIT Trans. Ecology Envir.* Vol. 83, 33–43. **3.** Riabenko A. A., Chernyuk V. V., Klyuha O. A., Halych O. A., Poplavskiy D. M. Mathematical and hydraulic modelling of undular jump. Czasopismo Inżynierii lądowej, środowiska i architektury. *Journal of civil engineering, environment and architecture*. T. XXXII, z. 62 (3/II/15), lipiec-wrzesień 2015. 379–391. **4.** Рябенко О. А. Теоретичні основи і методи розрахунків білякритичних течій рідини з вільною поверхнею. Дис. ... д-р тех. наук : 05.23.16. Рівне, 2003. 393 с. **5.** Halych O. Calculations of undular jump's main depths. *Conference proceedings of the IWA 9th Eastern European Young Water Professionals Conference.* Budapest, Hungary, 24–27 May 2017. P. 107–112. **6.** Рябенко О. А., Клюха О. О., Галич О. О., Поплавський Д. М. Розрахунки режимів роботи нижнього б'єфа низьконапірних гідроелектростанцій при утворенні хвилястого стрибка. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні* : VIII Міжнародна науково-прктична конференція. Львів, 2015. С. 204–207.

REFERENCES:

1. Chanson H. (1995) Flow characteristics of undular hydraulic jumps. Comparison with near-critical flows. Report CH 45/95. The University of Queensland, Australia, p. 202. **2.** Gotoh H., Yasuda Y., Ohtsu I. (2005). Effect of channel slope on flow characteristics of undular hydraulic jumps. *WIT Trans. Ecology Envir.* Vol. 83, 33–43. **3.** Riabenko A. A., Chernyuk V. V., Klyuha O. A., Ha-lych O. A., Poplavskiy D. M. Mathematical and hydraulic modelling of undular jump. Czasopismo Inżynierii lądowej, środowiska i architektury. *Journal of civil engineering, environment and architecture.* T. XXXII, z. 62 (3/II/15), lipiec-wrzesień 2015. 379–391. **4.** Riabenko O. A. Teoretychni osnovy i metody rozra-khunkiv biliakrytychnykh techii ridyny z vilnoiu poverkhneiu. Dys. ... d-r tekh. nauk : 05.23.16. Rivne, 2003. 393 s. **5.** Halych O. Calculations of undular jumps main depths. *Conference proceedings of the IWA 9th Eastern European Young Water Professionals Conference.* Budapest, Hungary, 24–27 May 2017. P. 107–112. **6.** Riabenko O. A., Kliukha O. O., Halych O. O., Poplavskyi D. M. Rozrakhunky rezhymiv roboty nyzhnoho biefu nyzkonapirnykh hidroelektrostantsii pry utvorenni khvyliastoho strybka. *Netradytsiini i ponovliuvani dzherela enerhii yak alternatyvni pervynnym dzherelam enerhii v rehioni* : VIII Mizhnarodna naukovo-prktychna konferentsiia. Lviv, 2015. S. 204–207.

Рецензент: д.т.н., професор Рябенко О. А. (НУВГП)

Halych O. O., Senior Lecturer (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

PARTICULARITIES OF UNDULAR JUMP MAIN PARAMETERS DETERMINING

During operating of different hydrotechnical and hydropower constructions, very often the phenomenon of undular hydraulic jump can occur. The main parameters of this phenomenon should be taken into account during designing, operating and reconstruction of mentioned constructions. The article considers the particularities of determination of the main parameters of undular jump, i.e. first and second conjugated depths and maximum depth. The first conjugated depth can be measured at the initial cross-section of considered phenomenon, that is cross-section where the free-surface flow stars arise sharply. The first conjugated depth influences on value of Froude number, which is one of the important flow characteristics and determines the conditions of undular jump formation. The second conjugated depth can be measured at the point of flow curvature change, moreover at this point the pressure distributes according to

hydrostatic low. This depth also characterizes the average flow depth in the tail water. The maximum depth can be measured under first or second wave crests of undular jump and the value of height of this wave can exceed the average height of other waves. This depth determines the level of upper part of side canals dikes, the level of lower part of bridge beams, the height of free-flow tunnels, waterway etc. The article gives general classic equations for determining the mentioned parameters, furthermore equations that take into account the non-hydrostatic pressure distribution and energy losses at the initial cross-section of phenomenon. The aim of the article is to make the comparison between data of main parameters of undular jump, that were received by theoretical equations, with experimental data. In consequence of compering of undular jump parameters the recommendations of usage of considered formulas depending on Froude number at the initial cross-section of undular jump are given. When Froude number is Fr_1=1,0-1,80 it is needed to take into account non-hydrostatics at the initial cross-section and when Froude number is Fr_1≥1,80 it is needed to take into account the energy losses in undular jump.
Keywords: **energy losses, the maximum depth, non-hydrostatics, initial section, conjugated depths, undular jump.**

Галич О. А., ст. преподаватель (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНИСТОГО ПРЫЖКА

В статье рассматриваются особенности определения параметров волнистого прыжка, к которым относят сопряженные глубины и максимальная. Приводиться основные классические зависимости для определения указанных параметров, а также зависимости, которые учитывают негидростатичность и потери энергии в начальном сечении явления. Приводиться сопоставления параметров волнистого прыжка, полученных за теоретическими зависимостями, с экспериментальными данными.
Ключевые слова: **потери энергии, максимальная глубина, негидростатичность, начальное сечение, сопряженные глубины, волнистый прыжок.**