

УДК 532.59:519.62

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

ВИБІР МЕТОДУ ПОБУДОВИ ПРОФІЛЮ ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ХВИЛЯСТОГО СТРИБКА

В статті розглядаються деякі методи побудови вільної поверхні білякритичних течій, зокрема хвилястого стрибка. Побудовані профілі вільної поверхні для конкретних вихідних даних за наведеними методами.

Ключові слова: білякритичні течії, хвилястий стрибок, самотня хвиля, нойдальні хвилі, крива вільної поверхні.

Вступ. Окрім бурхливого, критичного і спокійного потоків розрізняють окремий клас потоків так званих білякритичних течій. Вони можуть виникати за певних умов в межах різних типів гідротехнічних споруд. При проектуванні безнапірних гідроенергетичних та гідротехнічних споруд існує необхідність передбачити гідравлічні режими та розрахувати обриси вільної поверхні, які можуть виникати при експлуатації згаданих споруд, оскільки від цього залежить висоти огорожувальних дамб, каналів, безнапірних тунелів, труб тощо.

Актуальність проблеми. Хвилястий стрибок відносять до області білякритичних течій рідини, які можуть виникати за наявності відповідних умов в межах різних типів гідротехнічних споруд: в нижніх б'єфах водоскидів, водоспусків гідроелектростанцій, в каналах, тунелях, галереях. Так виникнення білякритичних течій спостерігалось при моделюванні нижнього б'єфу низьконапірної Ризької ГЕС з горизонтальними агрегатами. Результати гідравлічного моделювання роботи цієї ГЕС показали, що висота утворюваних хвиль іноді перевищує 35% від глибини нижнього б'єфу при заданій витраті [1]. Через специфіку ландшафту в Україні теж працюють низьконапірні ГЕС з горизонтальними агрегатами, наприклад Київська ГЕС, на якій працює 20 капсульних агрегатів. Причому натурні дослідження роботи цієї гідроелектростанції засвідчують високу ймовірність формування хвилеподібних білякритичних режимів. Крім того відсутність загальної теорії і надійних методик розрахунків білякритичних течій, невизначеність умов їх існування є причиною того, що білякритичні течії іноді не беруться до уваги в процесі проектування, внаслідок чого відбуваються численні

випадки руйнувань та аварій споруд, що працюють в умовах виникнення білякритичних режимів [1].

Метою роботи є вироблення методики побудови кривих вільної поверхні білякритичних течій та розробка рекомендації щодо побудови профілю вільної поверхні хвилястого стрибка.

Хвилястий стрибок є одним з видів білякритичних течій рідини, який може виникати при переході від бурхливого до спокійного стану потоку. Він характеризується наявністю ряду поступово затухаючих хвиль на вільній поверхні потоку (рис. 1). Таке затухання пояснюється тим, що хвилі розповсюджуються вниз за течією на великі відстані, що може привести до розмивів берегів відвідного русла [2]. Одним з методів побудови профілю вільної поверхні хвилястого стрибка є представлення його як сукупності самотньої та кноїдальних хвиль [3]. Слід зазначити, що висота самотньої хвилі може бути набагато більшою за усереднену висоту потоку.

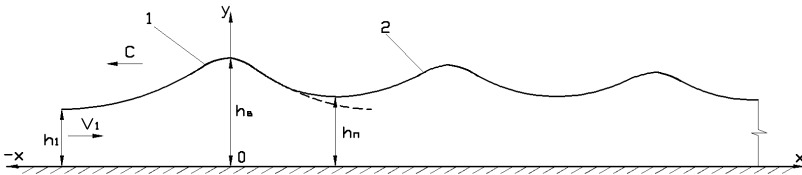


Рис. 1. Розрахункова схема хвилястого стрибка: 1 – самотня хвиля, 2 – кноїдальні хвилі

Існують різноманітні методи побудови профілю хвилястого стрибка. Розглянемо деякі з них.

Метод Турсунова полягає у побудові профілю за знайденими деякими параметрами [3]. Від дна відкладають глибину під вершиною h_b , обчислену за залежністю:

$$\eta_b = \frac{h_b}{h_1} = 1 + \frac{1}{2} Fr_1 \left\{ 1 - \exp \left[-4 \ln \sqrt{Fr_1} \left(1 + \frac{2}{3} \ln \sqrt{Fr_1} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

де h_1 – перша спряжена глибина, h_2 – друга спряжена глибина, $Fr_1 = V_1^2 / gh_1$ – число Фруда в перерізі з глибиною h_1 . Таким чином отримують вершину першої хвилі. Далі від вершини першої хвилі стрибка відкладають в обидва боки віддаль l_0 , обчислену за залежністю:

$$\frac{l_0}{h_1} = \sqrt{\frac{2}{3 \cdot \ln \sqrt{Fr_1}}} \operatorname{arth} \sqrt{\frac{1}{3}} = \frac{0,537}{\sqrt{\ln \sqrt{Fr_1}}}. \quad (2)$$

При відомій першій спряженій глибині h_1 визначають другу спряжену глибину h_2 досконалого стрибка за формулою Беланже:

$$\eta_2 = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1} - 1 \right). \quad (3)$$

В результаті отримують точки перетину другої спряженої глибини з профілем поверхні M_0 та M'_0 (рис. 2). Через ці точки проводять дотичну під кутом α_0 , який обчислюється за залежністю:

$$\alpha_0 = \arctg \left[\frac{2}{3} (\eta_2 - 1) \sqrt{2 \ln \sqrt{Fr_1}} \right]. \quad (4)$$

Від вершини першого гребеня хвилі вверх за течією відкладають віддаль l , обчислену за залежністю:

$$\frac{l}{h_1} = \sqrt{\frac{2}{6 \cdot \ln \sqrt{Fr_1}}} \operatorname{arch} (10 \sqrt{\eta_2 - 1}). \quad (5)$$

Сполучаючи точки N^I , M^0 , B^0 , M^0 плавною кривою і враховуючи кут α_0 , отримують профіль першого гребеня хвилястого стрибка (рис. 2).

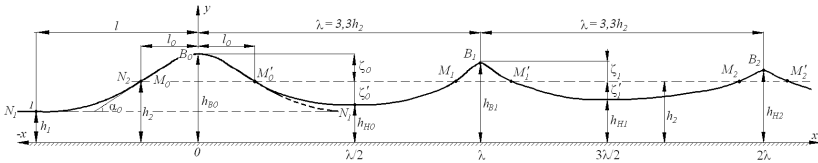


Рис. 2. Профіль хвилястого стрибка, побудований за методом Гурсунова

Для побудови профілю вторинних хвиль нижче самотньої хвилі спочатку визначають довжину λ цих хвиль за розрахунковою номограмою для визначення довжини вторинних хвиль [3]. Потім використовують співвідношення:

$$A = \frac{h_1}{2} \frac{\left(\sqrt{1 + 8 Fr_1} - 3 \right)^3}{\sqrt{2 \left(1 + \frac{m_h}{sh(m_h)} \right)}} \quad (7)$$

$$\zeta_j = \zeta_0 \exp(2j \cdot \ln \sqrt{Fr_2}), \quad j = 0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

де ζ_0 – висота першого гребеня, j – порядковий номер наступних хвиль і впадин, та обраховують амплітуду першої і наступних хвиль. При цьому враховують, що в процесі затухання вторинних хвиль їх довжи-

на λ , а також відстань l_0 від вершин до точок перегину, обчислену по залежності (2), не змінюється, змінюється лише висоти гребенів та глибина впадин, а також кути нахилу в точках перегинів (рис. 2). В результаті такої побудови отримують несиметричні ($\zeta > \zeta'$) затухаючі по довжині вторинні хвилі, близькі до хвиль, що спостерігаються під час експериментів [2].

Аналіз наведеного методу здійснювався шляхом порівняння з експериментальними даними Х.Шансона [3] (рис. 3).

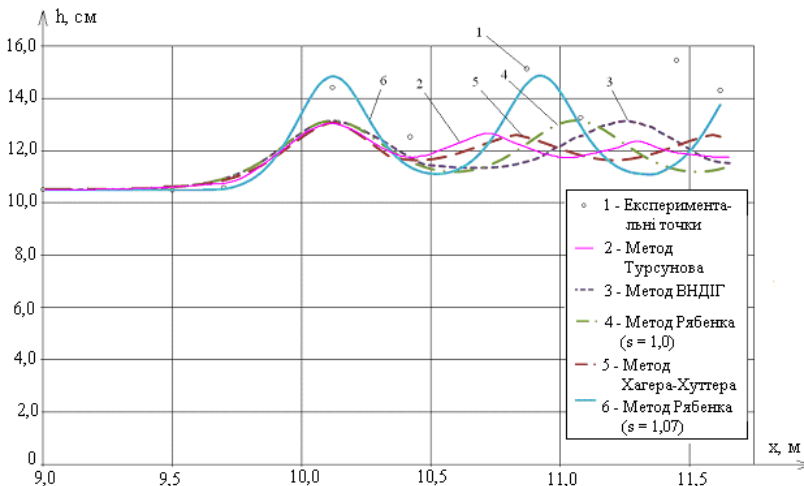


Рис. 3. Профілі вільної поверхні хвилястого стрибка ($Q = 29,8 \text{ м}^3/\text{с}$, $h_1 = 10,5 \text{ см}$, $Fr_1 = 1,25$)

Метод ВНДІГ розробили в Всеросійському науково-дослідному інституті гідротехніки ім. Веденєєва (Санкт-Петербург). Цей метод полягає в наступному. Вільна поверхня потоку до вершини першого гребеня хвилі описується рівнянням самотньої хвилі [4]:

$$\eta = \frac{h}{h_1} = 1 + (Fr_1^2 - 1) sch^2 \left(\frac{1}{2} \frac{x}{h_1} \sqrt{3 \frac{Fr_1^2 - 1}{Fr_1^2}} \right) \quad (9)$$

А нижче за течією профіль вільної поверхні описується рівнянням кноїдальних хвиль (рис. 1) [4]:

$$\eta = \frac{h}{h_1} = \eta_n + (\eta_6 - \eta_n) cn^2 \left(\frac{x}{\lambda}, k \right), \quad (10)$$

де h – змінна глибина потоку на деякій відстані від вершини хвилі, η_6 , η_n – відносні глибини під вершиною першого гребеня і під підшовою

першої впадини хвилі, λ – довжина кноїдальних хвиль, k – еліптичний інтеграл другого роду, $\operatorname{sch}(\gamma)$ і $\operatorname{cn}(\gamma)$ – функція гіперболічного секаса і еліптична функція Якобі відповідно [4].

Глибина h_b під вершиною самотньої хвилі визначається при $x = 0$ і $\operatorname{sch}(0) = 1$ з рівняння (1):

$$\eta_0 = \frac{h_0}{h_1} = Fr_1^2. \quad (11)$$

Глибина води у підшві хвилі визначається:

$$\eta_m = \frac{h_m}{h_1} = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} + Fr_1^2 \right)}, \quad (12)$$

$$\eta_2 = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right). \quad (13)$$

Зробивши відповідні обрахунки, знаходимо величину A :

$$A = \lambda^2 \frac{(h_0 - h_m)}{h_2^3} \quad (14)$$

З залежності (14) легко знаходимо довжину хвилі λ . Знаючи всі необхідні параметри для знаходження еліптичних функцій Якобі, будуть профіль вільної поверхні (рис. 3).

У **методі Рябенка** для побудови кривих вільної поверхні використовуються наступну систему рівнянь [5]:

$$\left. \begin{aligned} h_c &= \frac{h_1}{2} \left[\frac{4s_1 - 1}{3} + Fr_1 + \sqrt{\left(\frac{4s_1 - 1}{3} + Fr_1 \right)^2 - 4Fr_1} \right], \\ h &= h_1 \left[1 + (\eta_c - 1) \cdot \operatorname{cn}^2 \left(\frac{x}{\Delta}, k \right) \right], \\ \Delta &= 2 \cdot h_1 \sqrt{\frac{\eta_c \cdot Fr_1}{3 \cdot (\eta_c^2 - Fr_1)}}, \\ k &= \sqrt{\frac{\eta_c(\eta_c - 1)}{\eta_c^2 - Fr_1}}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де s_1 – коефіцієнт негідростатичності. Розв'язавши систему рівнянь (15), отримують профіль вільної поверхні (рис. 3).

В основі **метода Хагера-Хутгера** лежить рівняння усталеного руху [6]:

$$H = h + z + \frac{q^2}{2gh^2} \left(1 + \frac{2hh'' - h'^2}{3} + hz'' - h'z' - z'^2 \right), \quad (4)$$

де H – напір, h – глибина, z – перепад, q – питома витрата, g – прискорення вільного падіння, h' , h'' – відповідно перша та друга похідні від глибини (перша похідна від глибини дає похил вільної поверхні, а друга похідна – кривизну струминок потоку), z' , z'' – відповідно перша та друга похідні від z .

Після деяких перетворень отримують диференціальне рівняння

$$\left(\frac{dh}{dx}\right)^2 = \frac{3}{Fr_1} \left[-\frac{h^3}{h_1^3} + (2 + Fr_1 - Fr_1\gamma) \frac{h^2}{h_1^2} - (1 + 2Fr_1 - 2Fr_1\gamma) \frac{h}{h_1} + Fr_1 \right]. \quad (5)$$

Вільну поверхню потоку отримують, інтегруючи дане рівняння (рис. 3).

Співставлення теоретичних і експериментальних профілів вільної поверхні хвилястого стрибка показало наступне. Розглядувані методи дають близькі між собою профілі самотньої хвилі. Профілі кноїдальних хвиль, які побудовані за цими методами, відрізняються довжиною хвиль, причому різниця цих довжин збільшується при зростанні числа Фруда. Метод Хагера-Хутгера передбачає, що висота кноїдальних хвиль буде меншою, ніж висота самотньої хвилі, а метод Турсунова передбачає поступове затухання хвиль. Для дослідів з негідростатичним розподілом тиску по глибині у початковому перерізі хвилястого стрибка всі методи, що не враховують цей фактор, дають занижені результати. Метод Рябенка передбачає врахування можливої негідростатики у зазначеному перерізі і дає задовільну збіжність з експериментальними даними.

Висновки. 1. Для України є характерним будівництво та експлуатації низьконапірних ГЕС з капсульними агрегатами, при роботі яких існує велика імовірність виникнення хвилястого стрибка.

2. Для побудови вільної поверхні хвилястого стрибка при проектуванні гідроенергетичних та гідротехнічних споруд можна рекомендувати метод Рябенка, що враховує негідростатику в початковому перерізі.

1. Рябенко О. А. Особливості гідравлічних режимів ГЕС в умовах утворення білякритичних течій. Вісник НУВГП. Випуск 3. Рівне. – 2009. – С. 449-455.
2. Турсунов А. А. Околокритическое состояние безнапорных потоков воды. Известие ВНИИГ, Т. 90, 1969. – С. 201-224.
3. Chanson H. Flow characteristics of undular hydraulic jumps. Comparison with near-critical flows. Report CH 45/95. Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia. 1995. – 202 ps.
4. Гидравлические расчеты конструкций, управляющих бурными потоками. Рекомендации для проектирования. Под общей редакцией Ф. Г. Гунько. – „Энергия” Ленинградское отделение, 1974. – 110 с.
5. Рябенко О. А. Профіль

вільної поверхні хвилеподібних біякритичній течій та солі тонні розв'язки деяких диференціальних рівнянь. Прикладна гідромеханіка. – НАН України, Інститут гідромеханіки. – Т.1 (73) № 4, 1999. – С. 26-41. 6. Hager W. H., Hutter K. On pseudo-uniform flow in open channel hydraulics. Acta mechanica 53, 1984. – Pp. 183-200.

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

Galych O. O., Assistant (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

SELECTION OF CONSTRUCTION METHOD OF FREE SURFACE PROFILE UNDULAR JUMP

The article considers the problem of some methods of calculations free-surface of near-critical flows, in particular undular jump. The profiles of undular jump free-surface are calculated by these methods for particular initial conditions.

Key words: near-critical flows, undular jump, solitary wave, cnoidal waves, curve of free surface.

Галыч О. А., ассистент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ВЫБОР МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ ПРОФИЛЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛНИСТОГО ПРЫЖКА

В статье рассматриваются некоторые методы построения свободной поверхности околоскритических течений, в частности волнистого прыжка. Построены профили свободной поверхности для конкретных исходных данных за приведенными методами.

Ключевые слова: околоскритические течения, волнистый прыжок, уединённая волна, кноидальные волны, кривая свободной поверхности.
