

CHƯƠNG III

NƯỚC NHẢY
(*Hydraulic jump*)

3.1. KHÁI NIỆM CHUNG

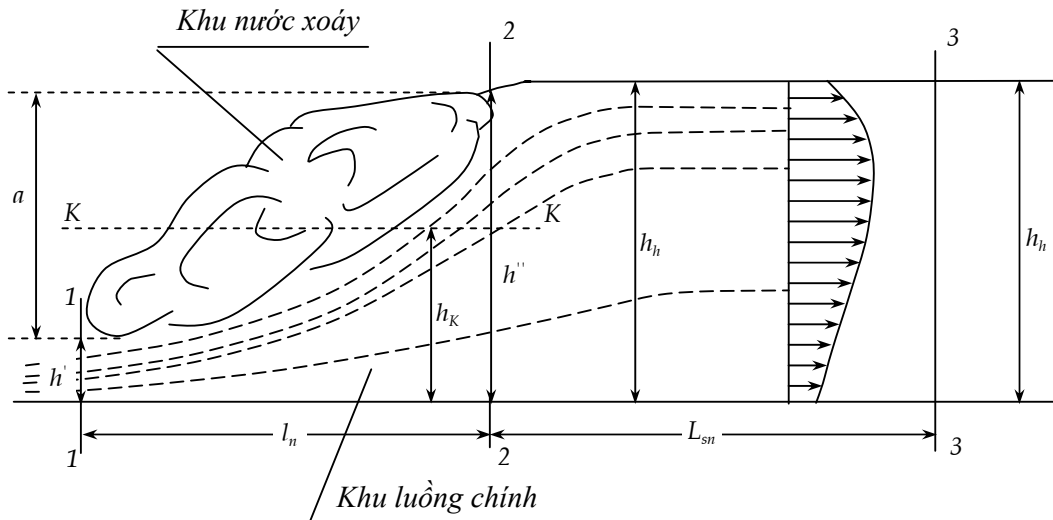
Ta thấy khi h tiến đến h_k thì $\frac{dh}{dl} \rightarrow \infty$, có hai trường hợp:

- Dòng chảy chuyển từ êm sang xiết, tức khi h từ $h > h_k$ nhỏ dần dọc theo dòng chảy chuyển sang $h < h_k$.
- Dòng chảy từ trạng thái xiết sang êm, tức khi $h < h_k$ tăng dần dọc theo dòng chảy chuyển sang $h > h_k$

Xét trường hợp thứ nhất ta thấy dòng chảy liên tục, nhưng trong trường hợp thứ hai dòng chảy mất liên tục, bị gián đoạn trong một đoạn ngắn bởi khu nước xoáy. Hiện tượng thủy lực trong trường hợp thứ hai gọi là nước nhảy.

Như vậy: Nước nhảy là sự mở rộng đột ngột của dòng chảy từ độ sâu nhỏ hơn độ sâu phân giới sang độ sâu lớn hơn độ sâu phân giới.

Ta nghiên cứu dạng xảy ra trong lòng dẫn chữ nhật và độ dốc thuận $i > 0$, gọi là nước nhảy cơ bản. Nước nhảy gồm hai khu: **Hình 3-1**



Hình 3-1

- Khu luồng chính chảy xuôi dòng.
- Khu nước xoáy chuyển động trên mặt khu luồng chính.
- Khoảng cách giữa hai mặt cắt ướt khu nước xoáy, gọi là độ dài nước nhảy L_n .
- h' , h'' gọi là độ sâu trước nước nhảy và sau nước nhảy.
- Gọi độ cao nước nhảy là: $a = h'' - h'$.
- L_{sn} : Từ mặt cắt 2-2 đến mặt cắt 3-3 gọi là sau nước nhảy. Từ mặt cắt 2-2 chảy êm bắt đầu, nhưng phân bố lưu tốc trên chiều sâu và mạch động chưa trở lại bình ổn như dòng chảy ở hạ lưu, từ mặt cắt 3-3 trở đi mới bình ổn.

Tổn thất năng lượng khá lớn ở phạm vi nước nhảy, các nhà nghiên cứu tìm những biện pháp lợi dụng nước nhảy:

- Dùng để tiêu năng cho dòng chảy qua đập tràn.
- Tạo nước nhảy hòa lẫn chất làm sạch nước, khí vào nước để cung cấp khí.

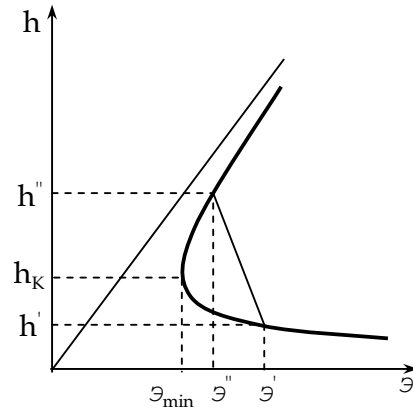
- Tăng lưu lượng qua công bằng cách giữ dòng chảy không ngập.
 - Tăng trọng lượng trên sân tiêu năng để giảm áp lực thấm và áp lực đẩy nổi.
- Xét dòng chảy từ xiết sang êm có bắt buộc qua nước nhảy hay không ?

Ta khảo sát hàm: $\vartheta = f(h)$

Trường hợp $i = 0$, năng lượng đơn vị của mặt cắt trùng với năng lượng đơn vị của toàn dòng chảy. Nên ta có:

$$\Delta E = E'' - E' = \vartheta'' - \vartheta' = \Delta \vartheta$$

Giả sử dòng chảy xiết chuyển từ từ sang dòng chảy êm với sự biến đổi liên tục của chiều sâu từ h' qua h_k sang h'' , ta sẽ thấy năng lượng đơn vị của mặt cắt ϑ từ ϑ' giảm dần cho đến ϑ_{min} , sau đó tăng lên ϑ'' . Trong quá trình biến thiên của ϑ như trên, không thể có được giai đoạn biến thiên liên tục từ đến h'' , vì khi đó không có năng lượng bổ sung, năng lượng đơn vị của mặt cắt ϑ của dòng chảy không thể từ ϑ_{min} tăng lên ϑ'' được. Như vậy dòng chảy xiết không thể từ từ chuyển sang trạng thái chảy êm được, mà còn đường quá độ duy nhất là độ sâu phải nhảy vọt từ $h' < h_k$ có $\vartheta' > \vartheta_{min}$ sang $h'' > h_k$ có $\vartheta'' > \vartheta_{min}$, tức là phải qua hình thức nước nhảy.



Hình 3-2

3.2. CÁC DẠNG NƯỚC NHẢY (Type hydraulic jump)

Tùy theo điều kiện biên giới dòng chảy và tỉ số độ sâu trước nước nhảy và sau nước nhảy, ta có:

- Nước nhảy hoàn chỉnh (Hình 3-1): Xảy ra ở những kênh có mặt cắt không đổi, độ dốc đáy không đổi, độ nhám không đổi và tỉ số: $\frac{h''}{h'} \geq 2$

- Nước nhảy dâng (Hình 3-3): Là một hình thức của nước nhảy hoàn chỉnh xảy ra khi có một vật chướng ngại đặt ngang đáy, làm dâng cao mực nước sau nước nhảy tạo nên khu nước xoáy mặt lớn hơn nước nhảy hoàn chỉnh.

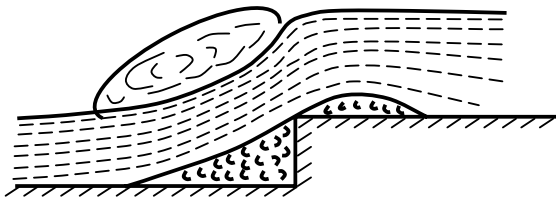
- Nước nhảy mặt (Hình 3-4): Xảy ra khi dòng chảy xiết từ một bậc thềm ở chân đập thoát ra để nối tiếp với dòng chảy êm. Dòng chảy có đặc điểm là khu nước xoáy hình thành ở dưới khu luồng chính, làm cho lưu tốc ở mặt tự do lớn.

- Nước nhảy sóng (Hình 3-5): Xảy ra khi độ chênh mực nước dòng chảy êm và chảy xiết tương đối nhỏ $\frac{h''}{h'} < 2$

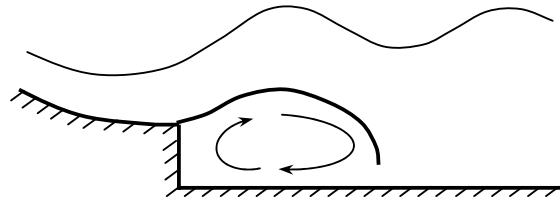
- Nước nhảy phẳng: bề rộng kênh không đổi.
- Nước nhảy không gian: bề rộng thay đổi.
- Nước nhảy ngập (Hình 3-6): khi h' bị ngập.

Ngoài ra người ta còn phân loại nước nhảy theo số Fr (Hình 3-7). Tại mặt cắt ban đầu:

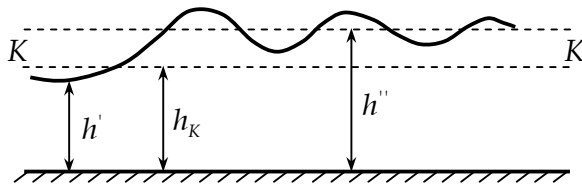
- $Fr = 1 - 3$: Nước nhảy sóng.
- $Fr = 3 - 6$: Nước nhảy yếu.
- $Fr = 6 - 20$: Nước nhảy dao động.
- $Fr = 20 - 80$: Nước nhảy ổn định tổn thất 45% năng lượng.
- $Fr > 80$: Nước nhảy mạnh tổn thất 85% năng lượng.



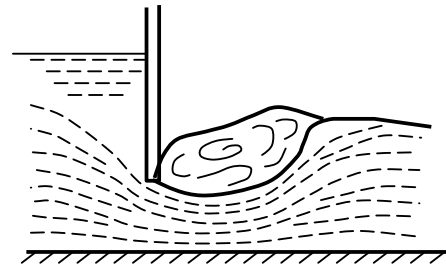
Hình 3-3: Nhảy dâng



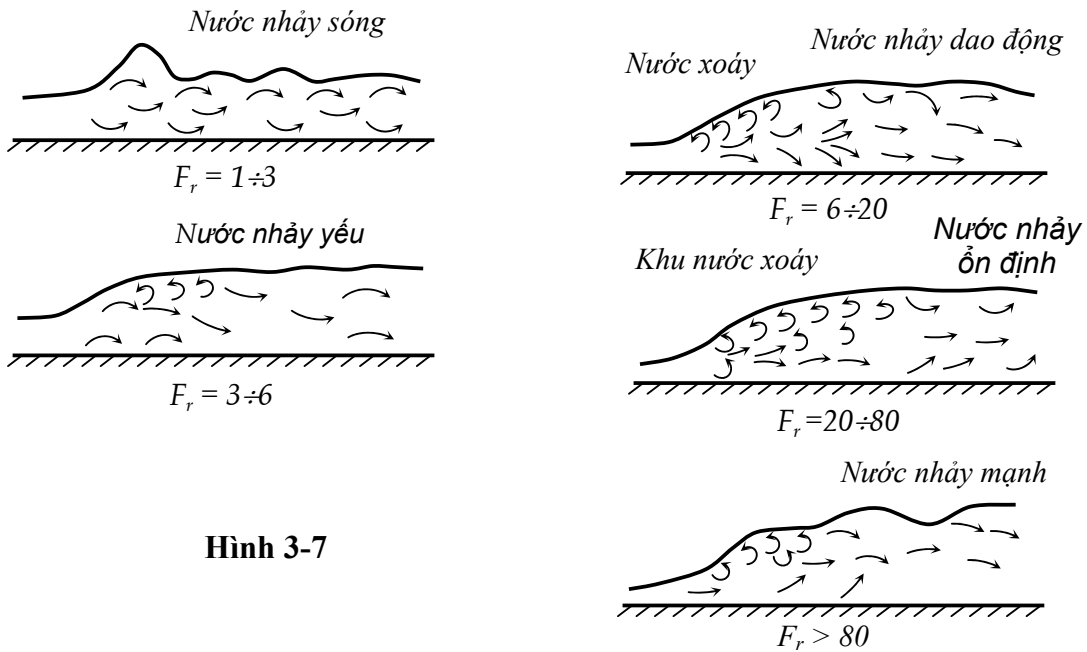
Hình 3-4: Nhảy mặt



Hình 3-5: Nhảy sóng



Hình 3-6: Nhảy ngập



Hình 3-7

3.3. NƯỚC NHẢY HOÀN CHỈNH

3.3.1 Phương trình cơ bản

Ta tìm mối liên hệ trước nước nhảy và sau nước nhảy hay gọi là những độ sâu liên hiệp của nước nhảy.

Giả thiết:

- Độ dốc đáy kênh rất nhỏ.
- Dòng chảy ổn định và thay đổi dần.
- Áp suất phân bố theo qui luật thủy tĩnh.
- Những hệ số: $\alpha_{01} = \alpha_{02} = \alpha_0 = \text{const}$.

- Lực ma sát đáy nhỏ không tính đến.
Viết phương trình động lượng theo hướng dòng chảy.
 $\alpha_0 \cdot \rho \cdot Q \cdot (v_2 - v_1) = P_1 - P_2 + G + T.$

Trong đó:

$$P_1 = \gamma \cdot y_1 \cdot W_1$$

$$P_2 = \gamma \cdot y_2 \cdot W_2$$

y_1, y_2 độ sâu trọng tâm của mặt cắt.

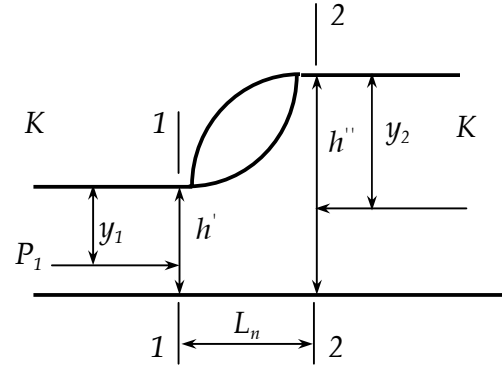
G hình chiếu lên phương dòng chảy, $G = 0.$

T lực ma sát, $T = 0.$

Vậy:

$$\alpha_0 \cdot \rho \cdot Q \left(\frac{Q}{W_2} - \frac{Q}{W_1} \right) = \gamma \cdot y_1 \cdot W_1 - \gamma \cdot y_2 \cdot W_2$$

$$\frac{\alpha_0 \cdot Q^2}{g \cdot W_1} + y_1 \cdot W_1 = \frac{\alpha_0 \cdot Q^2}{g \cdot W_2} + y_2 \cdot W_2 \quad (3-$$



Hình 3-8

1)

Phương trình trên là phương trình cơ bản của nước nhảy hoàn chỉnh.

Hệ số α_0 thường lấy bằng 1 đến 1,1.

3.3.2 Hàm số nước nhảy

Nếu ta đặt: $\theta(h) = y \cdot W + \frac{\alpha_0 \cdot Q^2}{g \cdot W}$ (3-2)

Gọi $\theta(h)$ là hàm số nước nhảy, thì phương trình cơ bản của nước nhảy có thể viết:

$$\theta(h) = \theta(h'')$$
 (3-3)

Từ đó ta thấy rằng nếu biết một trong hai độ sâu liên hiệp thì có thể tìm độ sâu kia. Khảo sát hàm số nước nhảy, ta thấy rằng khi h tiến đến 0 và khi h tiến đến ∞ thì $\theta(h)$ tiến đến ∞ . Như vậy rõ ràng $\theta(h)$ có một giá trị cực tiểu trong phạm vi h biến thiên từ 0 đến ∞ . Để tìm trị số h ứng với θ_{min} ta cần tính:

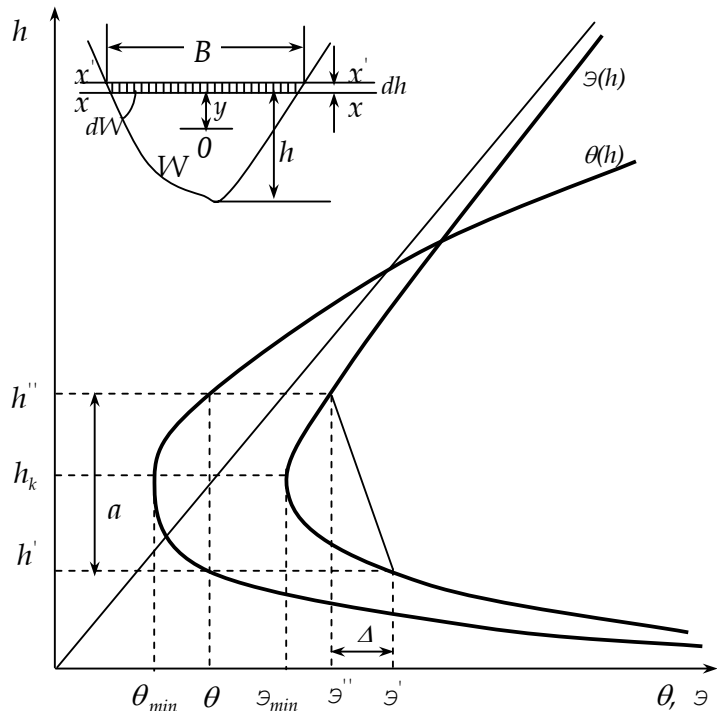
$$\frac{d\theta(h)}{dh} = 0$$

Vậy:

$$\frac{d\theta(h)}{dh} = \frac{\alpha_0 \cdot Q^2}{g \cdot W^2} B + \frac{d(y \cdot W)}{dh} \quad (*)$$

Trong đó:

$$B = \frac{dW}{dh}$$



Hình 3-9

Biểu thức $y \cdot W$ là moment tĩnh của diện tích đối với trục x-x trùng với mặt tự do.

Khi độ sâu tăng lên dh , độ tăng của moment tĩnh như sau:
 $D(y.W) = [(y + dh).W + 0,5.dh.dW] - y.W = W.dh + 0,5.dh.dW = W.dh$
 ở đó xem $dh.dW$ là vô cùng bé bậc cao.

Vậy:
$$\frac{d(y.W)}{dh} = W \quad (**)$$

Thay (**) vào (*), sau khi sắp xếp lại ta được:

$$1 - \frac{\alpha_0 Q^2}{g} \frac{B}{W^3} = 0$$

(3-3)

Nhận xét:

- Phương trình này hoàn toàn giống phương trình xác định độ sâu chảy phân giới. Do đó trị số h làm cho θ_{\min} cũng làm cho ϑ_{\min} . Trị số đó là $h = h_k$.
- Vẽ đồ thị $\theta(h)$ và $\vartheta(h)$ trên cùng đồ thị.
- Dựa vào $\theta(h)$ ta tìm ra độ sâu liên hiệp.
- Nếu kết hợp với đồ thị hàm số $\vartheta(h)$, ta tính được mất năng nước nhảy, xem đồ thị (Hình 3-9).

$$\Delta E = \Delta \vartheta = \vartheta' - \vartheta'' \quad (3-4)$$

3.3.3 Xác định độ sâu liên hiệp trong kênh lăng trụ.

a. Trường hợp mặt cắt bất kỳ

Xác định độ sâu liên hiệp của nước nhảy hoàn đối với mặt cắt kênh bất kỳ có thể giải theo 2 cách sau:

✚ Giải bằng cách đúng dần.

+ Giả thử ta có h' thay vào hàm số nước nhảy (3-2) được:

$$\theta(h') = \text{const}$$

+ Sau đó thay nhiều trị số h'' vào hàm số nước nhảy, ta được:

$$\theta(h'') = \text{biến}$$

+ Cho đến khi nào ta tìm được trị số : $\text{const} \approx \text{biến}$, điều đó có nghĩa là $\theta(h') \approx \theta(h'')$ giá trị h'' tương ứng cần tìm.

✚ Giải bằng đồ thị.

+ Ta vẽ đường cong hàm số $\theta(h)$.

+ Dựa vào đồ thị ta sẽ suy ra giá trị còn lại, như ở (Hình 3-9).

b. Trường hợp mặt cắt chữ nhật có chiều rộng là b

Ta có: $W = b.h$; $y = h/2$; $q = Q/b$.

Thay vào $\theta(h') = \theta(h'')$, ta được:

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{g.b.h'} + \frac{1}{2} h' . b . h' = \frac{\alpha_0 Q^2}{g.b.h''} + \frac{1}{2} h'' . b . h''$$

$$\frac{\alpha_0 q^2}{g.h'} + \frac{h'}{2} = \frac{\alpha_0 q^2}{g.h''} + \frac{h''}{2}$$

$$\frac{h_k^3}{h'} + \frac{h'^2}{2} = \frac{h_k^3}{h''} + \frac{h''^2}{2}$$

$$h_k^3 = h' . h'' . h'''$$

(3-

7)

ở đó:
$$h''' = \frac{h' + h''}{2} \quad (3-8)$$

Ta có thể viết dưới dạng:
$$h''^2 + h'.h''' - 2\frac{h_k^3}{h'} = 0$$

Giải phương trình đối với h'' , ta được:

$$h'' = \frac{h'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2h_k}{h'}\right)^3} - 1 \right] \quad (3-9)$$

Giải phương trình đối với h' , ta được:

$$h' = \frac{h''}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2h_k}{h''}\right)^3} - 1 \right] \quad (3-10)$$

Tính h' và h'' theo hệ số Fr, ta xét:

$$Fr_1 = \frac{\alpha.Q^2}{g.w_1^3} B = \frac{\alpha.Q^2}{g.b^3 h'^3} b = \frac{\alpha.q^2}{g.h'^3} = \left(\frac{h_k}{h'}\right)^3 \quad (3-11)$$

$$Fr_2 = \frac{\alpha.Q^2}{g.w_2^3} B = \frac{\alpha.Q^2}{g.b^3 h''^3} b = \frac{\alpha.q^2}{g.h''^3} = \left(\frac{h_k}{h''}\right)^3 \quad (3-12)$$

Ta được:

$$h' = \frac{h''}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1} - 1 \right] \quad (3-13)$$

$$h'' = \frac{h'}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_2} - 1 \right] \quad (3-14)$$

Từ (3-13) và (3-14), ta thấy điều kiện tồn tại nước nhảy hoàn chỉnh là: $\frac{h'}{h''} \geq 2$, sẽ thỏa mãn với $Fr_1 \geq 3$ và $Fr_2 \leq 0,375$

b. Mặt cắt hình thang.

Đối với mặt cắt hình thang cách giải như mặt cắt bất kỳ, tuy nhiên cần chú ý công thức xác định độ sâu trọng tâm mặt cắt:

$$y = \frac{h}{3} \frac{B + 2b}{B + b} = \frac{h}{3} \frac{3b + 2mh}{2b + 2mh} \quad (3-15)$$

Ngoài ra có thể áp dụng công thức gần đúng của A.N. Ra-kho-ma-nốp.

$$\xi'_k = \frac{1.2}{\xi''_k} - 0.2 \quad (3-16)$$

$$\xi''_k = \frac{6}{1 + 5.\xi'_k} \quad (3-17)$$

Ở đó:
$$\xi'_k = \frac{h'}{h_k}; \quad \xi''_k = \frac{h''}{h_k}$$

3.3.4 Tổn thất năng lượng (energy loss)

Tổn thất năng lượng trong kênh đáy bằng ($i = 0$), tính theo phương trình Bernoulli cho mặt cắt (1-1) và (2-2). Ta được:

$$h_w = \left(h' + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2.g} \right) - \left(h'' + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2.g} \right) \quad (3-18)$$

Đối với mặt cắt chữ nhật, ta có:

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2.g} = \frac{\alpha_1 q^2}{2.g.h'^2} = \frac{h_k^3}{2.h'^2} = \frac{h''}{4.h'}.(h' + h'')$$

$$\frac{\alpha_2 v_2^2}{2.g} = \frac{\alpha_2 q^2}{2.g.h''^2} = \frac{h_k^3}{2.h''^2} = \frac{h'}{4.h''}.(h' + h'')$$

Do đó:
$$h_w = \frac{(h''-h')^3}{4h'h''} = \frac{a^3}{4h'h''} \tag{3-19}$$

Vậy tổn thất năng lượng tỉ lệ bậc ba với độ cao nước nhảy.

3.3.5 Chiều dài nước nhảy (length of jump)

Chiều dài nước nhảy, khoảng cách giữa hai mặt cắt ứ đọng trước và sau nước nhảy, được xác định bằng nhiều công thức thực nghiệm hay kinh nghiệm.

Kí hiệu: L_n

Dưới đây nêu một số công thức thường sử dụng trong tính toán thiết kế.

a. Đối với kênh hình chữ nhật

- Công thức Pavolópski:
$$L_n = 2,5(1,9h'' - h') \tag{3-20}$$

- Công thức tréctôn-xôp:
$$L_n = 10,3h'(\sqrt{Fr_1} - 1)^{0,81} \tag{3-21}$$

- Công thức Saphoranet:
$$L_n = 4,5h'' \tag{3-22}$$

- Công thức Picalôp:
$$L_n = 4h' \sqrt{1 + 2Fr_1} \tag{3-23}$$

Những công thức trên đều tìm ra với những thí nghiệm tiến hành trong phạm vi $Fr_1 > 10$.

Công thức O.M.Aivadian: $3 < Fr_1 < 400$

$$L_n = \frac{8(10 + \sqrt{Fr_1})}{Fr_1} \frac{h'' - h'}{4h'h''} \tag{3-24}$$

Công thức lý thuyết của M.A.Mikhalép:

$$L_n = 2.3a_0 \lg \frac{(a_0 + h'')(a_0 - h')}{(a_0 - h'')(a_0 + h')} \tag{3-25}$$

Với
$$a_0 = h' \sqrt{1 + 2Fr_1}$$

c. Đối với kênh hình thang

Công thức thường dùng cho hình thang là:

$$L_n = 5h''(1 + 4\sqrt{\frac{B_2 - B_1}{B_1}}) \tag{3-26}$$

Trong đó: B_1 và B_2 là bề rộng mặt thoáng trước nước nhảy và sau nước nhảy.

3.3.6 Chiều dài đoạn sau nước nhảy

Độ dài sau nước nhảy, tính từ mặt cắt sau nước nhảy đến mặt cắt ở đó mạch động lưu tốc lại có những trị số thường thấy ở dòng chảy đều.

Kí hiệu: L_{sn}

Dưới đây là một số công thức thường dùng.

- Công thức Vudơgô:
$$L_{sn} = \frac{0,4}{n} h_h \tag{3-27}$$

trong đó : n là hệ số và h_h là độ sâu thường xuyên ở hạ lưu.

• Công thức Trectôxôp: $L_{sn} = (2,5 \div 3)L_{mn}$ (3-28)

• Công thức Cumin: $L_{sn} = 32,5h_h - L_n$ (3-29)

Chú ý: Những công thức trên về độ dài saunước nhảy đều dùng với những đáy kênh không bị xói.

3.3.7 Vị trí sau nước nhảy

Khi dòng chảy có sự thay đổi độ dốc hay qua đập tràn, mà ở đó dòng chảy từ xiết sang êm (từ động năng sang thế năng), sinh ra hiện tượng nước nhảy. Vấn đề là chúng ta cần phải biết hiện tượng nước nhảy xảy ra ở đâu:

- Trên độ dốc phía trên; phía dưới hay tại vị trí thay đổi độ dốc
- Còn đối với đập tràn tại trên đập tràn; tại ngay cuối ngưỡng tràn hay là cách xa ngưỡng tràn bao xa.

Để giải vấn đề vừa nêu chúng ta gọi là *biện luận vị trí nước nhảy*.

Ví dụ như đối với đập tràn, sau khi dòng chảy qua đập có vị trí co hẹp, gọi là h_c .

Thực hiện các bước tính toán như sau:

- Giả định độ sâu trước nước nhảy bằng với độ sâu co hẹp ($h' = h_c$), sau đó áp dụng công thức độ sâu liên hiệp tính ra h_c'' . Tùy theo h_c'' ta có:
- $h_c'' > h_h$: Nước nhảy phóng xa, lúc này vị trí nước nhảy không ở ngay vị trí co hẹp h_c mà cách xa đó một đoạn lùi về phía sau hạ lưu, gọi là *đoạn phóng xa*. Trong trường hợp này, dòng chảy thượng lưu không thể tiêu hao hết năng lượng thừa bằng cách nhảy tại chỗ, nên phải tiêu hao một phần bằng tổn thất dọc đường nước dâng kiểu c. Khi đó xem một cách gần đúng độ sâu hạ lưu bằng độ sâu sau nước nhảy, tức là:

$$h'' = h_h$$

Theo công thức độ sâu liên hiệp xác định độ sâu trước nước nhảy. Dựa vào độ sâu co hẹp và độ sâu trước nước nhảy, đường nước dâng dạng c, áp dụng phương trình vi phân dòng chảy không đều tính ra đoạn phóng xa.

- $h_c'' = h_h$: Nước nhảy tại chỗ.
- $h_c'' < h_h$: Nước nhảy ngập.

3.4. Nước nhảy ngập

3.4.1. Độ sâu liên hiệp

Viết phương trình động lượng cho hai mặt cắt (1-1) và (2-2), chiếu lên phương dòng chảy (**Hình 3-10**) với các giả thiết:

- Bỏ qua lực ma sát đáy.
- Áp suất phân bố theo qui luật thủy tĩnh.
- $\alpha_{01} = \alpha_{02} = \alpha_0 = \text{const}$

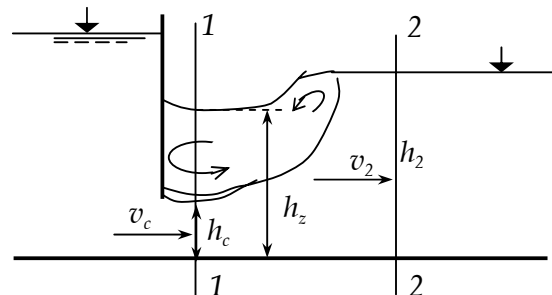
Ta có:

$$\rho\alpha_{02}.q.v_2 - \rho\alpha_{01}.q.v_c = 0.5.\gamma.h_z^2 - 0.5.\gamma.h_h^2$$

Chia hai vế cho γ , đồng thời thay $v_2 = \frac{q}{h_h}$

và $v_c = \frac{q}{h_c}$, ta được:

$$\frac{\alpha_0.q^2}{g.h_h} - \frac{\alpha_0.q^2}{g.h_c} = 0.5.h_z^2 - 0.5.h_h^2$$



Hình 3-10

Ta có :
$$h^3 = \frac{\alpha \cdot q^2}{g}$$

Nên:

$$\frac{h_k^3}{h_h} - \frac{h_k^3}{h_c} = 0.5 \cdot (h_z^2 - h_h^2)$$

Chia hai vế cho h_c , ta được:

$$\frac{h_k^3}{h_h \cdot h_c^2} - \frac{h_k^3}{h_c^3} = \frac{1}{2} \left(\frac{h_z^2}{h_c^2} - \frac{h_h^2}{h_c^2} \right)$$

Đặt: $S = \frac{h_h}{h_c}$; $K = \frac{h_z}{h_c}$; $Fr_c = \left(\frac{h_k}{h_c} \right)^3$

Như vậy ta được:

$$Fr_c \cdot \frac{1}{S} - Fr_c = 0.5 \cdot (K^2 - S^2)$$

hay
$$K^2 = S^2 - 2Fr_c \left(1 - \frac{1}{S} \right) \tag{3-30}$$

Nếu đặt $K = 1$ thì $h_z = h_c$. Ta có công thức giống nước nhảy hoàn chỉnh.

Như vậy phương trình cơ bản của nước nhảy hoàn chỉnh tự do là trường hợp riêng của phương trình nước nhảy ngập.

Hệ số ngập của nước nhảy được xác định xác định bởi:

$$\sigma = \frac{h_h}{h_c} \tag{3-31}$$

trong đó h_c '' là độ sâu liên hiệp của h_c trong nước nhảy tự do.

3.4.2. Chiều dài nước nhảy ngập

Chiều dài nước nhảy ngập, kí hiệu: L_{ng}

Đặt:
$$\lambda_{ng} = \frac{L_{ng}}{h_c} \tag{3-32}$$

Công thức J.Smêtana:

$$\lambda_{ng} = 6(S - 1) \tag{3-33}$$

Công thức kinh nghiệm A.N.Rakhomanôp:

Với $S < 12.5$ thì
$$\lambda_{ng} = 6,5(S - 1,3) \tag{3-34}$$

Với $S > 12.5$ thì
$$\lambda_{ng} = 3,5(S + 8,3) \tag{3-35}$$

Công thức lý luận Lêvi:

$$\lambda_{ng} = 4,2 \cdot S \cdot \lg \left(\frac{2}{\pi} \cdot S^2 \cdot \sin \frac{\pi}{S} \right) \tag{3-36}$$