

NƯỚC NHẢY

§X-1. KHÁI NIỆM CHUNG

Khi xem xét phương trình vi phân của chuyển động ổn định không đều trong lòng dẫn hở, ta gặp :

$$\text{nếu } h \rightarrow h_k \text{ thì } \frac{dh}{dl} \rightarrow \infty.$$

Độ sâu h tiến đến h_k có thể xảy ra dưới 2 dạng :

+ Từ $h > h_k$, h giảm dần dọc theo dòng chảy và đạt đến $h < h_k$, tức là dòng từ trạng thái chảy êm chuyển sang dòng chảy xiết (có thể gặp ở bậc nước) ;

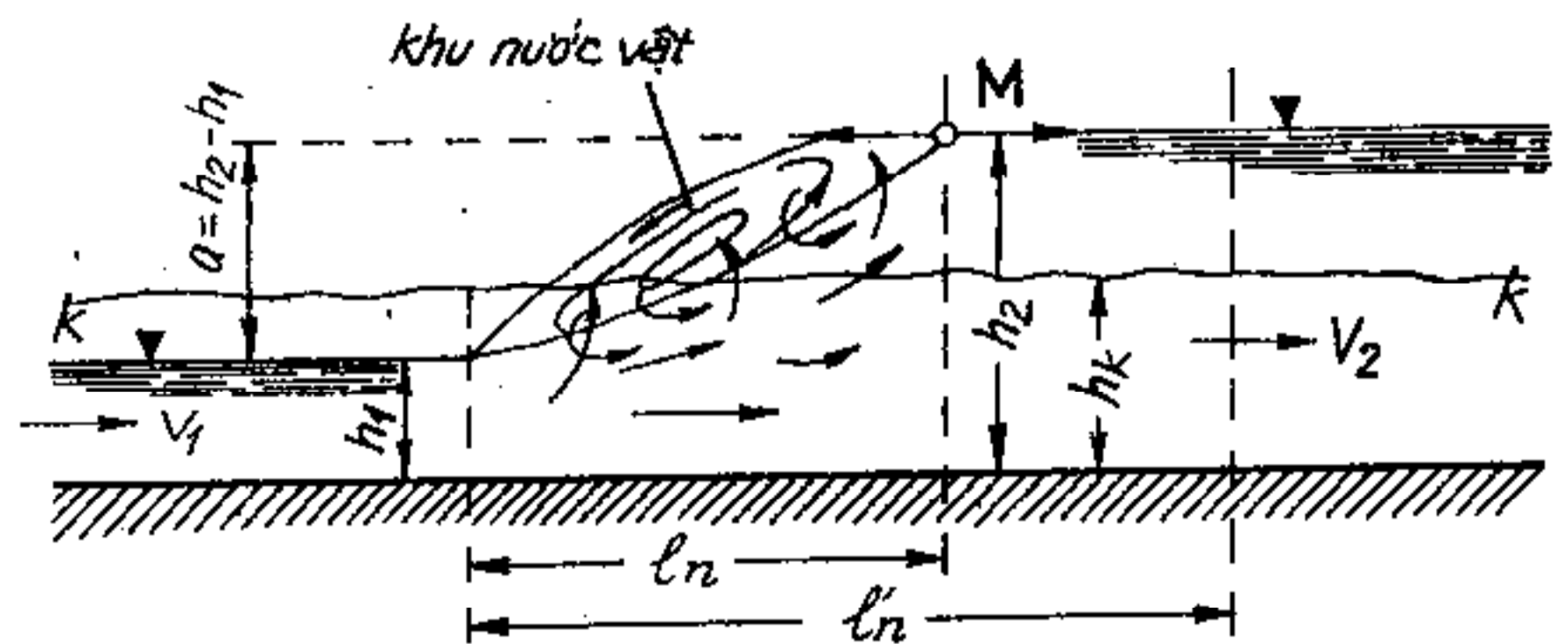
+ Từ $h < h_k$, h tăng dần dọc theo dòng chảy và đạt đến $h > h_k$, tức là dòng chảy từ trạng thái chảy xiết chuyển sang chảy êm. Lúc này đường mặt nước bị gián đoạn mà trong chương chuyển động không đều ta thường biểu thị bằng một đường cong tiếp tuyến với đường thẳng đứng vuông góc với đường K - K.

Hiện tượng thủy lực trong trường hợp thứ 2 khi mặt cắt ướt ngày càng lớn dần dọc theo dòng chảy, đường mặt nước bị gián đoạn trên một đoạn ngắn bởi một khu nước xoáy. Hiện tượng này được gọi là nước nhảy.

Vậy nước nhảy là sự tăng đột ngột của dòng chảy từ độ sâu nhỏ hơn độ sâu phân giới sang độ sâu lớn hơn độ sâu phân giới, đó là hình thức quá độ của dòng chảy từ trạng thái chảy xiết sang trạng thái chảy êm.

Sự chuyển tiếp này kéo theo sự hình thành nước vật mặt mà về hình thức bên ngoài thì giống như sóng lật.

Chiều sâu h_1 và h_2 trước và sau nước nhảy gọi là các chiều sâu liên hiệp - điểm M gọi là điểm phân chia.



Hình chiếu ngang của nước vật gọi là chiều dài của nước nhảy.

Đôi khi chiều dài của nước nhảy được xem là l'_n - khoảng cách từ đầu nước nhảy đến tuyến mặt cắt mà biểu đồ vận tốc đã ổn định.

Hiệu số chiều sâu $h_2 - h_1 = a$ - gọi là chiều cao nước nhảy.

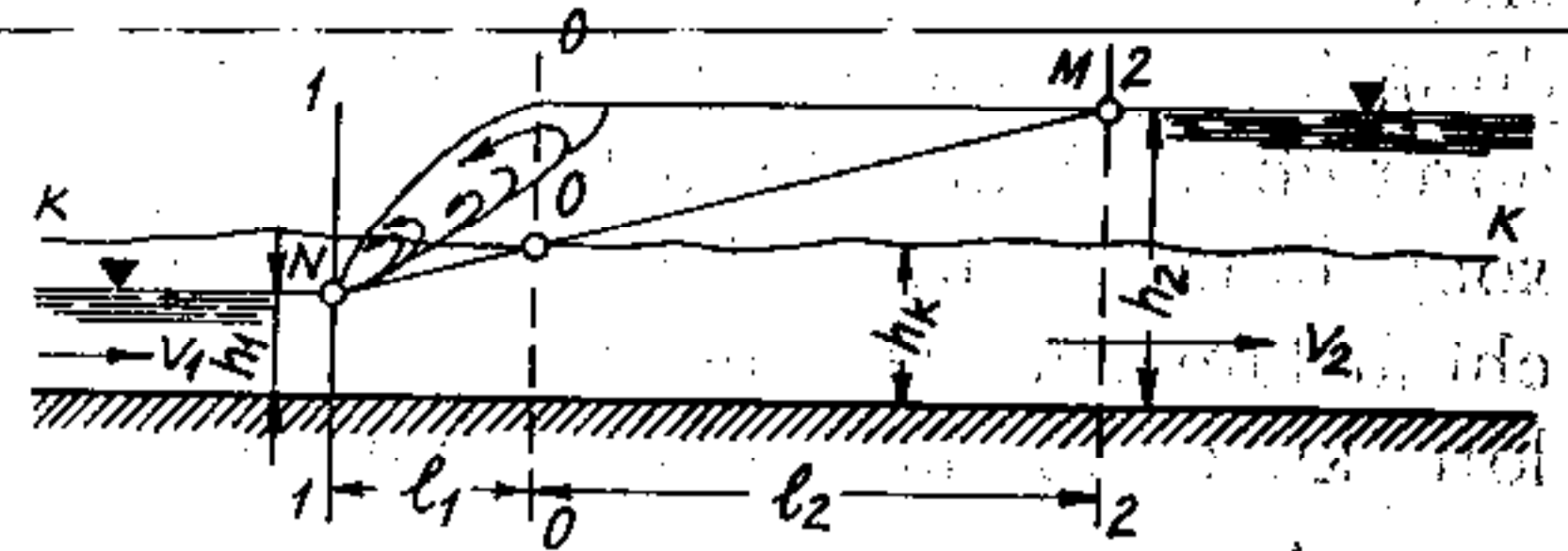
Nguyên nhân phát sinh nước nhảy có thể là : dòng chảy không thể biến đổi dần chiều sâu từ bé hơn h_k sang lớn hơn h_k mà không có sự bổ sung năng lượng từ bên ngoài.

Điều đó được giải thích như sau :

+ Ta có tỉ năng mặt cắt bằng :

$$\Theta = h + \frac{\gamma Q^2}{2g\omega^2}$$

Hàm số này có trị số nhỏ nhất khi $h = h_k$, vì thế nếu dòng chảy thay đổi chiều sâu trên đoạn nằm ngang theo đường NOM, thì trên đoạn từ mặt cắt O-O đến mặt



cắt 2-2 lại có sự tăng năng lượng, đó là điều không thể thực hiện được nếu không có sự bổ sung năng lượng từ bên ngoài.

+ Vì thế sự chuyển tiếp qua chiều sâu phân giới từ dòng xiết sang dòng êm không thể xảy ra từ từ được mà con đường duy nhất là độ sâu phải nhảy vọt từ $h_1 < h_k$ (có $\Theta_1 > \Theta_{min}$) sang $h_2 > h_k$ (có $\Theta_{min} < \Theta_2 < \Theta_1$), tức là qua nước nhảy.

Cấu trúc của nước nhảy : nếu xét về biểu đồ vận tốc thì trong khu vực nước nhảy có 2 phần - phần dòng chảy cơ bản là dòng chảy mở rộng là dòng chủ ; phía trên là khu nước vật mặt : đó là xoáy nước lớn - chứa đầy bọt khí, mạch động áp suất và vận tốc phát triển rất mạnh, luôn luôn co dãn và thay đổi vị trí xung quanh một vị trí trung bình do các bọt nước luôn luôn thay đổi kích thước.

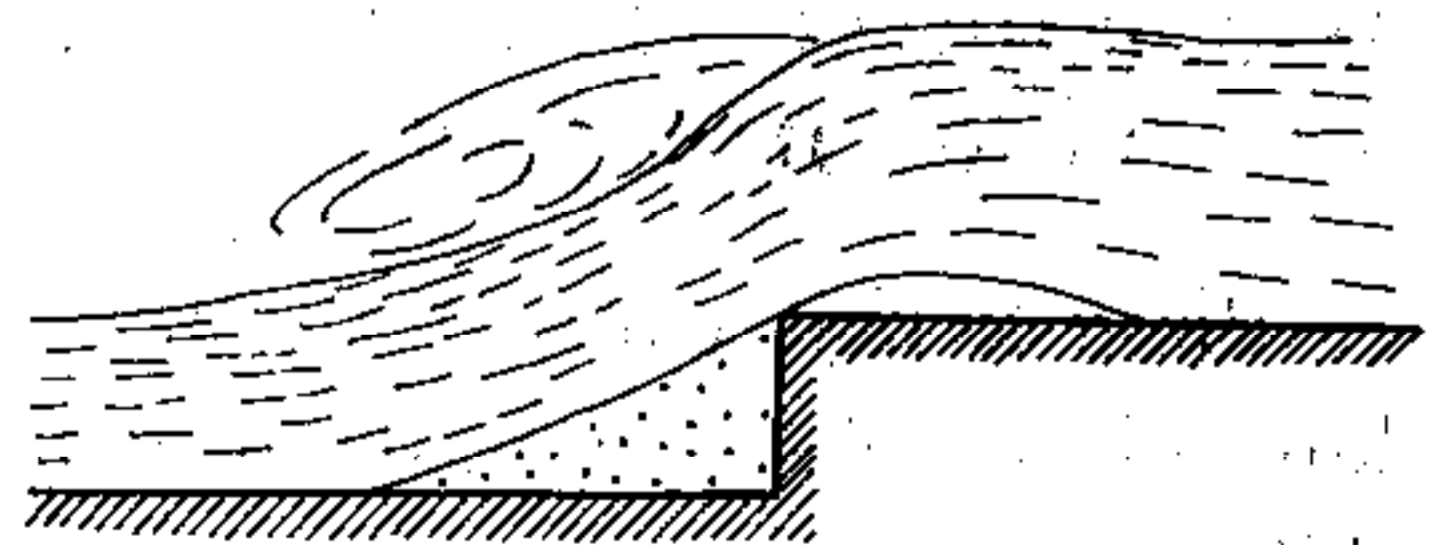
§X-2. CÁC DẠNG NƯỚC NHẢY

Tùy theo các điều kiện biên và tỉ số giữa h_1 và h_2 mà có thể xảy ra các dạng nước nhảy cơ bản sau đây :

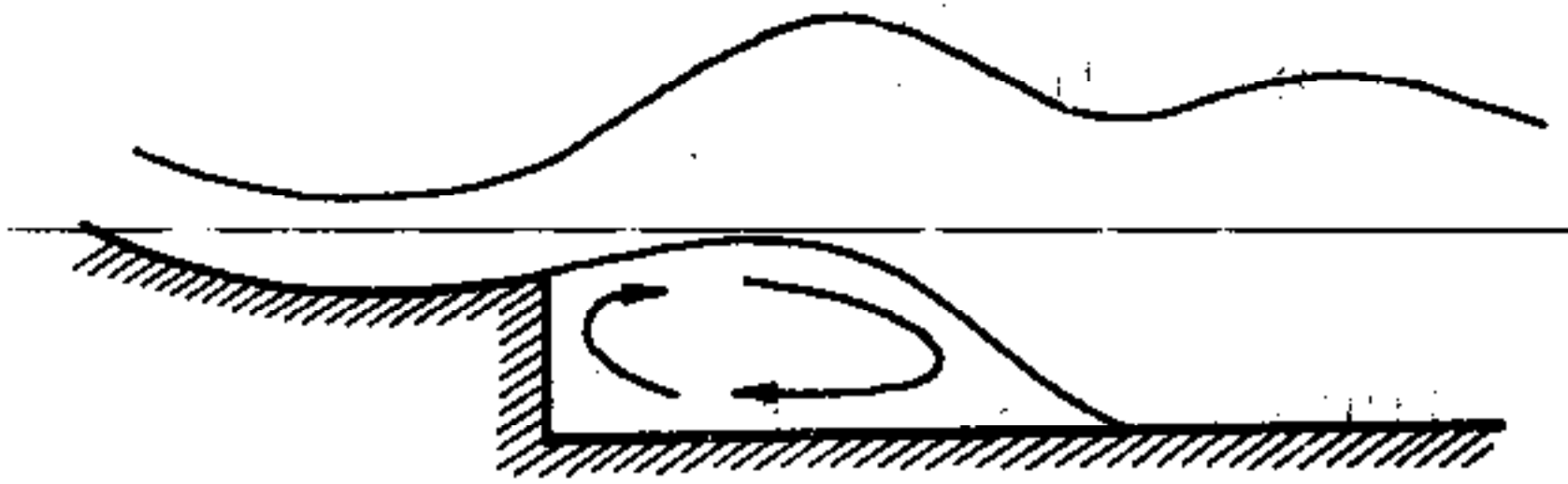
a. *Nước nhảy hoàn chỉnh* : xảy ra ở các lòng dẫn có mặt cắt không đổi, độ dốc không đổi, đáy phẳng, độ nhám thông thường với tỉ số :

$$\frac{h_2}{h_1} \geq 2.$$

b. *Nước nhảy dâng* : cũng là một hình thức nước nhảy hoàn chỉnh, xảy ra khi có một chướng ngại đặt ngang đáy, làm dâng cao mực nước sau nước nhảy tạo nên khu nước xoáy mặt lớn hơn so với nước nhảy hoàn chỉnh đồng thời tạo nên khu nước xoáy nhỏ ở đáy. Hình dạng, cấu tạo của nước nhảy dâng chịu ảnh hưởng của vị trí vật chướng ngại đối với mặt cắt trước nước nhảy và độ cao của vật đó.



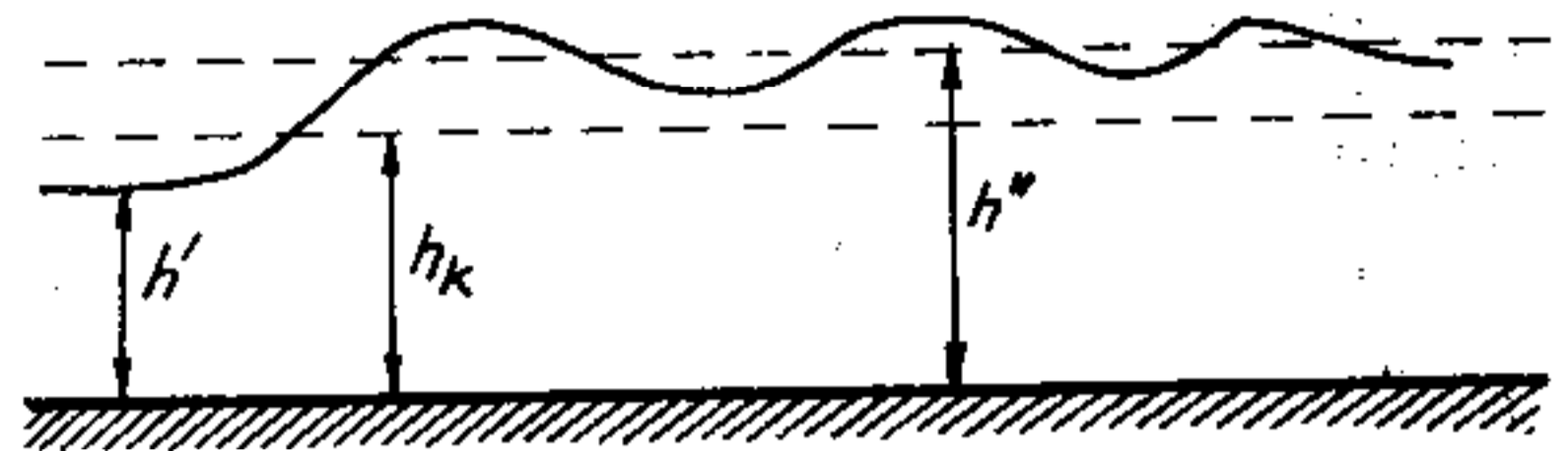
c. *Nước nhảy mặt* : xảy ra khi dòng chảy xiết từ một bậc thềm ở chân đập thoát ra để nối tiếp với dòng êm ; sự mở rộng đột ngột của dòng chảy có đặc điểm là khu nước xoáy hình thành ở dưới khu luồng chính làm cho vận tốc ở mặt tự do lớn (khác với nước nhảy hoàn chỉnh, vận tốc ở đáy lớn).



d. *Nước nhảy sóng* : xảy ra khi độ chênh mực nước của dòng chảy êm và chảy xiết tương đối nhỏ :

$$\frac{h_2}{h_1} < 2.$$

Dòng chảy trong phạm vi nước nhảy sóng không có khu nước xoáy, mặt tự do nhấp nhô có dạng sóng tắt dần.



e. *Nước nhảy ngập* : nếu độ sâu trước nước nhảy h bị ngập, nếu không bị ngập thì nước nhảy gọi là nước nhảy tự do.

Ngoài ra tùy theo cách đặt bài toán, có thể nước nhảy được xét theo bài toán phẳng hoặc không gian ; tùy theo giá trị của số Froud tại mặt cắt ban đầu mà ta có :

Với

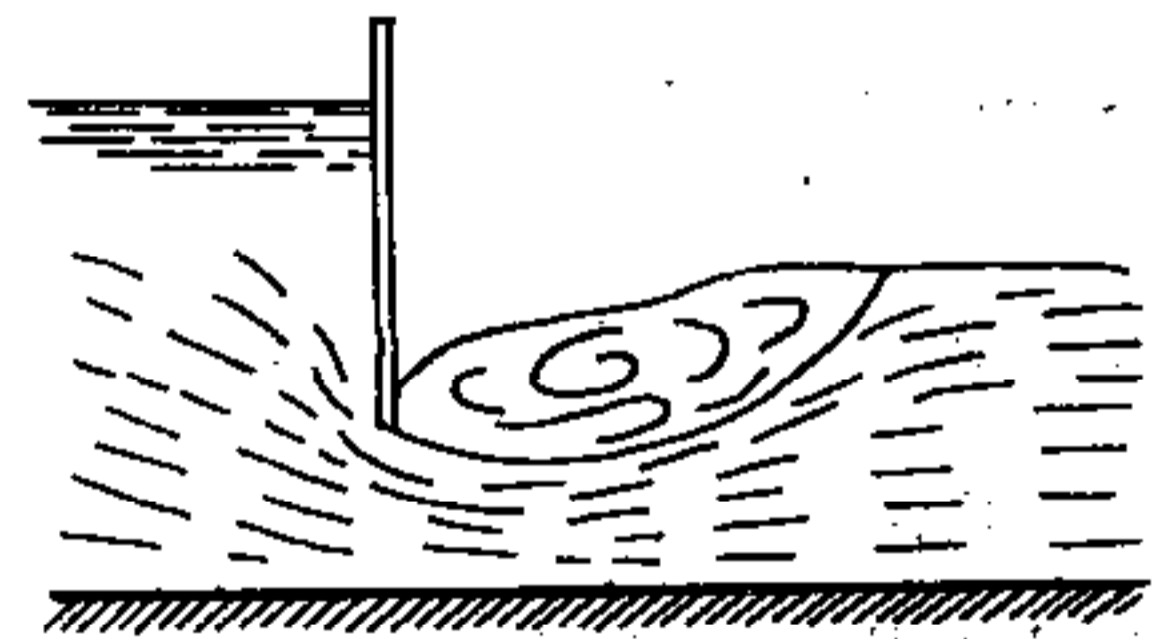
$Fr = 1 - 3$: nước nhảy sóng ;

$Fr = 3 - 6$: nước nhảy yếu ;

$Fr = 6 - 20$: nước nhảy dao động ;

$Fr = 20 - 80$: nước nhảy ổn định, tổn thất năng lượng trong nước nhảy chiếm khoảng 45 - 70% năng lượng trước nước nhảy ;

$Fr > 80$: nước nhảy mạnh, tổn thất năng lượng đạt đến 85% năng lượng trước nước nhảy.

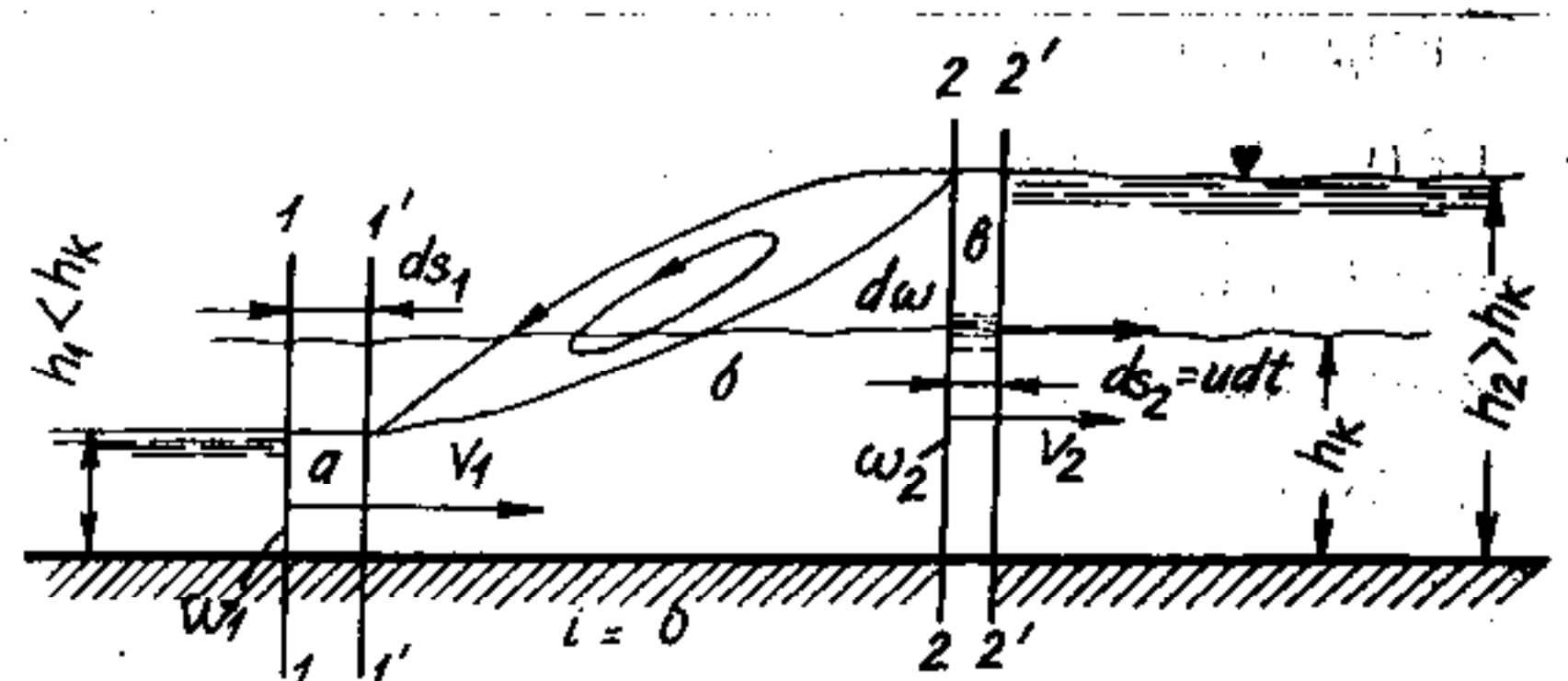


§X-3. PHƯƠNG TRÌNH CƠ BẢN CỦA NƯỚC NHẢY HOÀN CHỈNH TRONG LÒNG DẪN LẮNG TRỤ

Bằng 2 mặt cắt 1-1 và 2-2 tách trong dòng chảy một khối lượng chất lỏng M và viết phương trình biến thiên động lượng cho khối đó

$$\Delta(mv) = \sum P \cos \alpha dt$$

Trong thời đoạn dt khối chất lỏng đã dịch chuyển từ vị trí ban đầu 1-2 đến vị trí 1'-2'.



Gia số động lượng đó bằng hiệu số động lượng của m ở vị trí thứ hai trừ đi động lượng cũng của khối đó ở vị trí thứ nhất, tức là :

$$\Delta(mv) = \{dl(c) + dl(b)\}_{t+dt} - \{dl(a) + dl(b)\}_t \quad (1)$$

Nhưng đối với chuyển động ổn định thì :

$$dl(b)_{t+dt} = dl(b)_t$$

nên ta viết được :

$$\Delta(mv) = dl(c) - dl(a) \quad (2)$$

Ta tính động lượng ở khu vực c :

$$dl(c) = \int_{\omega_2} dm u = \int_{\omega_2} \frac{\gamma}{g} u dt d\omega u = \frac{\gamma}{g} dt \int_{\omega_2} u^2 d\omega = \frac{\gamma \alpha_0}{g} dt v_2^2 \omega_2$$

Cũng vậy đối với khu vực a ta có :

$$dl(a) = \frac{\gamma \alpha_0}{g} dt v_1^2 \omega_1$$

Và gia số động lượng sẽ là :

$$\Delta(mv) = \frac{\gamma \alpha_0}{g} dt (v_2^2 \omega_2 - v_1^2 \omega_1) \quad (3)$$

Tìm xung lực :

+ Áp lực lên 2 đầu khối chất lỏng là P_1 và P_2 - chiếu lên trục giữ nguyên trị số.

+ Lực ma sát có thể bỏ qua vì chiều dài của nước nhảy ngắn.

+ Lực trọng trường tác dụng theo phương thẳng đứng nên chiếu lên trục nằm ngang sẽ bằng không.

Vậy chỉ còn lại áp lực P_1 và P_2 .

Trong mặt cắt 1 và 2 ta giả thiết áp suất phân bố theo thủy tĩnh.

Vậy : $P_1 = \gamma \omega_1 y_1$ và $P_2 = \gamma \omega_2 y_2$

Trong đó y_1, y_2 - chiều sâu trọng tâm của ω_1 và ω_2 .

Tổng số xung lực sẽ bằng :

$$\sum P \cdot dt = \gamma (y_1 \omega_1 - y_2 \omega_2) dt \quad (4)$$

Bây giờ có thể viết phương trình động lượng :

$$\frac{\gamma \alpha_0}{g} dt (v_2^2 \omega_2 - v_1^2 \omega_1) = \gamma (y_1 \omega_1 - y_2 \omega_2) dt$$

hoặc :

$$\frac{\alpha_0 v_1^2 \omega_1}{g} + y_1 \omega_1 = \frac{\alpha_0 v_2^2 \omega_2}{g} + y_2 \omega_2$$

Vì $v_1 = \frac{Q}{\omega_1}$ và $v_2 = \frac{Q}{\omega_2}$ nên có thể viết :

$$\frac{\alpha Q^2}{g \omega_1} + y_1 \omega_1 = \frac{\alpha Q^2}{g \omega_2} + y_2 \omega_2 \quad (5)$$

(với $\alpha_0 = \alpha$).

Đây là phương trình cơ bản của nước nhảy.

Cả 2 vế của (5) đều là hàm số của chiều sâu, tức là :

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega} + y\omega = N(h).$$

$N(h)$ - gọi là hàm số nước nhảy.

Theo (5) ta có hàm số nước nhảy trước và sau nước nhảy bằng nhau nên :

$$N(h_2) = N(h_1) \quad (6)$$

Phân tích hàm số nước nhảy, ta thấy :

+ Nếu $h \rightarrow 0$ thì $y\omega \rightarrow 0$; $N(h) \rightarrow \infty$.

+ Nếu $h \rightarrow \infty$ thì $y\omega \rightarrow \infty$; $N(h) \rightarrow \infty$.

Vì $N(h)$ biến đổi từ $-\infty$ đến $+\infty$ nên bắt buộc đường cong của hàm số nước nhảy phải qua điểm uốn có $N(h)_{\min}$.

Vì thế ta viết được :

$$\frac{dN(h)}{dh} = 0$$

Và :

$$\frac{dN(h)}{dh} = \frac{d}{dh} \frac{\alpha Q^2}{g\omega} + \frac{d(y\omega)}{dh} = -\frac{\alpha Q^2}{g\omega^2} \frac{d\omega}{dh} + \frac{d(y\omega)}{dh} = 0$$

Nhưng $\frac{d\omega}{dh} = B$ còn : $d(y\omega)$ - là vi phân của mô men tĩnh của diện tích

mặt cắt ngang dòng chảy đối với trục đi qua mặt thoáng.

$$d(y\omega) = d(S)$$

Trong đó :

$$dS = S'_o - S_o$$

S'_o - mô men tĩnh của diện tích $\omega' = \omega + d\omega$ đối với trục $O'-O'$.

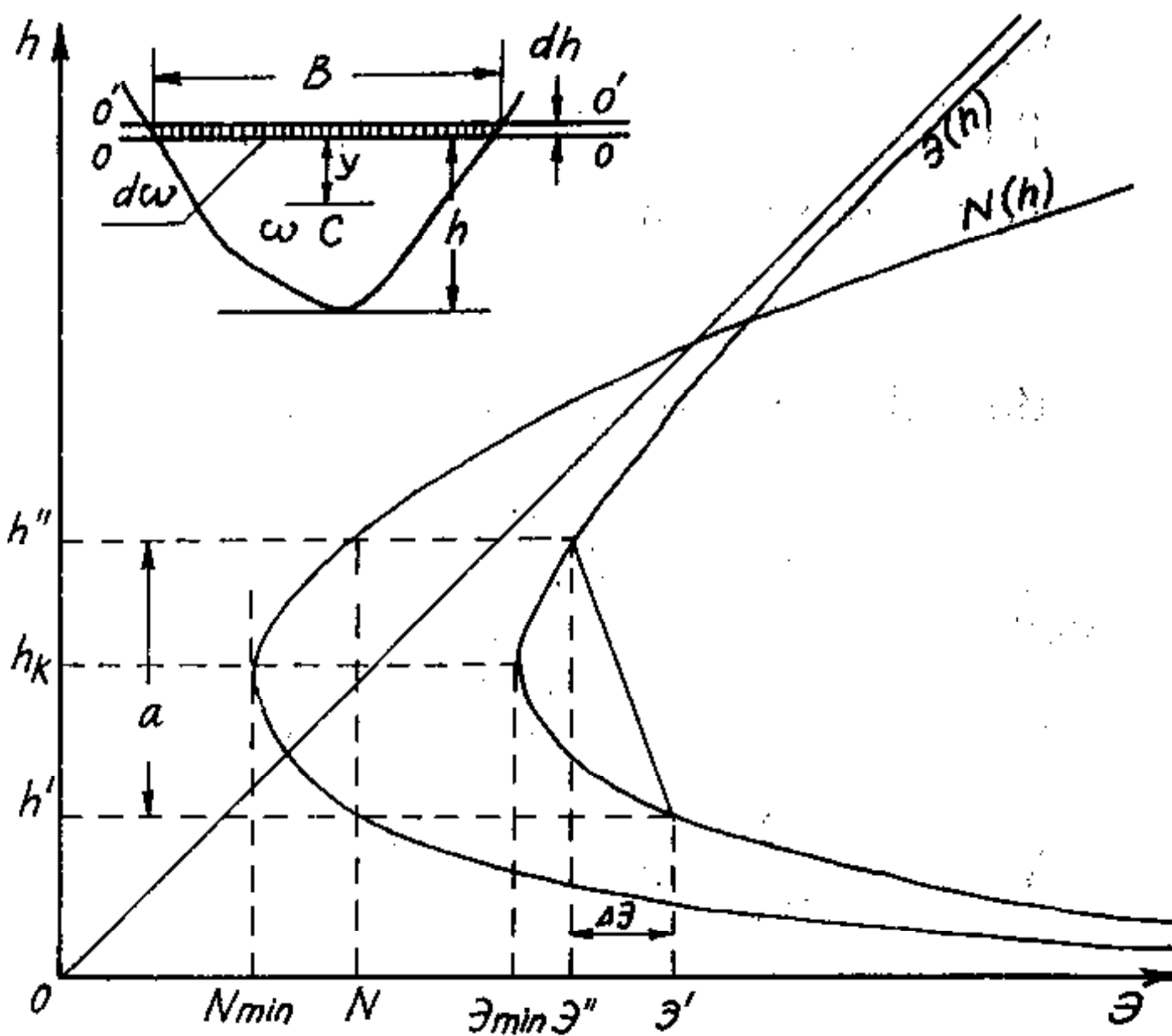
$$S'_o = (y + dy)\omega + \frac{dyd\omega}{2}$$

S_o - mô men tĩnh của ω đối với trục $O-O$,

$$S_o = y\omega.$$

Bỏ qua $dyd\omega/2$ vì nhỏ, ta có :

$$d(y\omega) = S'_o - S_o = y\omega + \omega dy - y\omega = \omega dy$$



Vậy :

$$\frac{dN(h)}{dh} = -\frac{\alpha Q^2}{g\omega^2} B + \frac{\omega dy}{dh} = 0$$

Nhưng $y = h - a$ nên $dy = dh$ và :

$$\frac{dN(h)}{dh} = -\frac{\alpha Q^2}{g\omega^2} B + \omega = 0$$

Chia cho ω ta có :

$$-\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} B + 1 = 0 \quad (7)$$

Đây cũng là phương trình cơ bản để xác định chiều sâu phân giới.

Vì vậy cũng giống như đối với tỉ năng mặt cắt, hàm số nước nhảy $N(h)$ cũng có giá trị min khi $h = h_k$, tức là khi $N(h)$ ứng với chiều sâu phân giới h_k .

Từ biểu đồ quan hệ giữa $\Theta(h)$ và $N(h)$ ta cũng có thể xác định được tổn thất năng lượng của nước nhảy ($\Delta\Theta$) và chiều cao nước nhảy (a).

$$\Delta\Theta = \Theta_1 - \Theta_2 \quad (8)$$

$$\text{và } a = h_2 - h_1 \quad (9)$$

Cần lưu ý là đường cong hàm số nước nhảy nói trên vẽ cho lòng dẫn có hình dạng mặt cắt đã định với lưu lượng cố định.

§X-4. CÁC CHIỀU SÂU LIÊN HIỆP CỦA LÒNG DẪN CHỮ NHẬT

Đối với lòng dẫn chữ nhật ta có :

$$\omega = Bh.$$

Từ phương trình hàm số nước nhảy :

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega_1} + y_1\omega_1 = \frac{\alpha Q^2}{g\omega_2} + y_2\omega_2,$$

sau khi thay ω bằng Bh ta có :

$$\frac{\alpha Q^2}{gBh_1} + \frac{h_1}{2} Bh_1 = \frac{\alpha Q^2}{gBh_2} + \frac{h_2}{2} Bh_2,$$

hoặc chia cho B

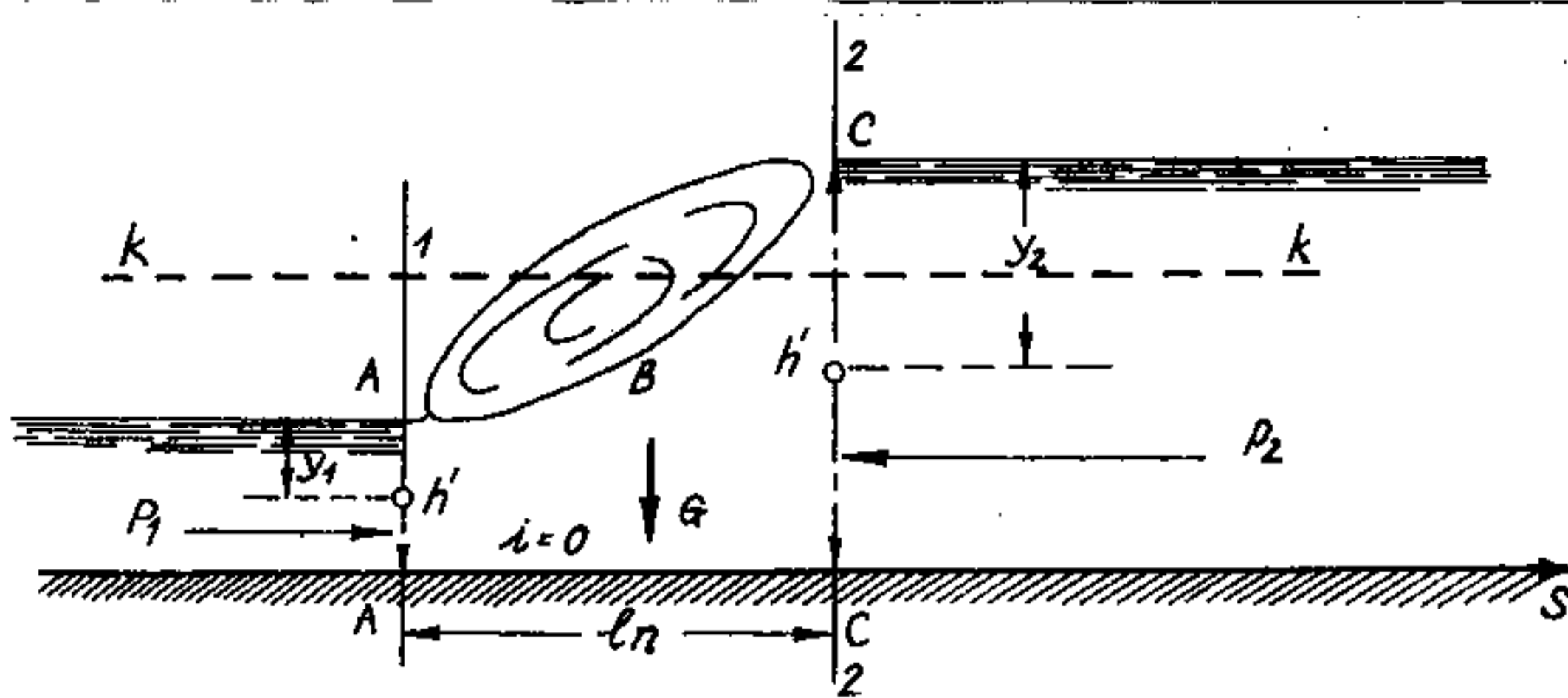
$$\frac{\alpha Q^2}{gB^2h_1} + \frac{h_1^2}{2} = \frac{\alpha Q^2}{gB^2h_2} + \frac{h_2^2}{2},$$

vì $\frac{Q}{B} = q$ (tỉ lưu lượng) nên :

$$\frac{\alpha q^2}{gh_1} + \frac{h_1^2}{2} = \frac{\alpha q^2}{gh_2} + \frac{h_2^2}{2},$$

$$\text{hoặc : } h_1^2 - h_2^2 = \frac{2\alpha q^2}{g} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right)$$

hoặc :
$$(h_1 - h_2)(h_1 + h_2) = \frac{2\alpha q^2}{g} \frac{(h_1 - h_2)}{h_1 h_2}$$



Ước lượng cho $(h_1 - h_2)$ ta sẽ có :

$$h_2 h_1^2 + h_1 h_2^2 - \frac{2\alpha q^2}{g} = 0$$

Đây là phương trình đối xứng đối với h_2 và h_1 :

$$h_1 = \frac{h_2}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \frac{q^2}{gh_2^3}} - 1 \right]$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \frac{q^2}{gh_1^3}} - 1 \right] \quad (10)$$

Các công thức này có thể viết cách khác nếu chú ý đến :

$$\frac{\alpha q^2}{g} = h_k^3$$

$$h_1 = \frac{h_2}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_2} \right)^3} - 1 \right] \quad (11)$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_1} \right)^3} - 1 \right]$$

Nếu lòng dẫn chữ nhật, chiều sâu liên hiệp xác định bằng một trong 2 công thức (10) và (11).

Nếu lòng dẫn không phải chữ nhật, chiều sâu xác định theo phương trình cơ bản của nước nhảy như sau :

+ Theo một chiều sâu đã cho (ví dụ h_2), trước hết xác định giá trị bằng số của hàm số nước nhảy :

$$N(h_2) = \frac{Q^2}{g\omega_2} + y_2\omega_2 = A$$

Vì $N(h_2) = N(h_1)$, nên ta có :

$$\frac{Q^2}{g\omega_1} + y_1\omega_1 = A$$

Phương trình cuối cùng được giải bằng thử dần.

§X-5. CHIỀU DÀI NƯỚC NHẢY VÀ TỔN THẤT NĂNG LƯỢNG TRONG NƯỚC NHẢY

1. Chiều dài nước nhảy

Chiều dài nước nhảy chưa thể tính bằng lí thuyết mà trên thực tế vẫn phải sử dụng các công thức thực nghiệm.

Trong số đó, công thức được sử dụng rộng rãi nhất là công thức của M.D. Tsetouxop.

$$l_n = 10,3 h_1 \left[\sqrt{\left(\frac{h_k}{h_1}\right)^3} - 1 \right]^{0,81} \quad (12)$$

Có thể dùng quan hệ

$$\frac{l_n}{h_1} = f\left(\frac{h_k}{h_1}\right)^3 = f(\lambda) \quad (13)$$

Trong tính toán sơ bộ có thể lấy :

$$l_n = (4 - 5)(h_2 - h_1)$$

2. Tổn thất năng lượng

Kết quả thí nghiệm chứng tỏ trong nước nhảy, tổn thất năng lượng rất lớn. Có thể xác định tổn thất này bằng cách sau đây :

+ Viết phương trình Bécnuì cho 2 mặt cắt 1 và 2 :

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_w$$

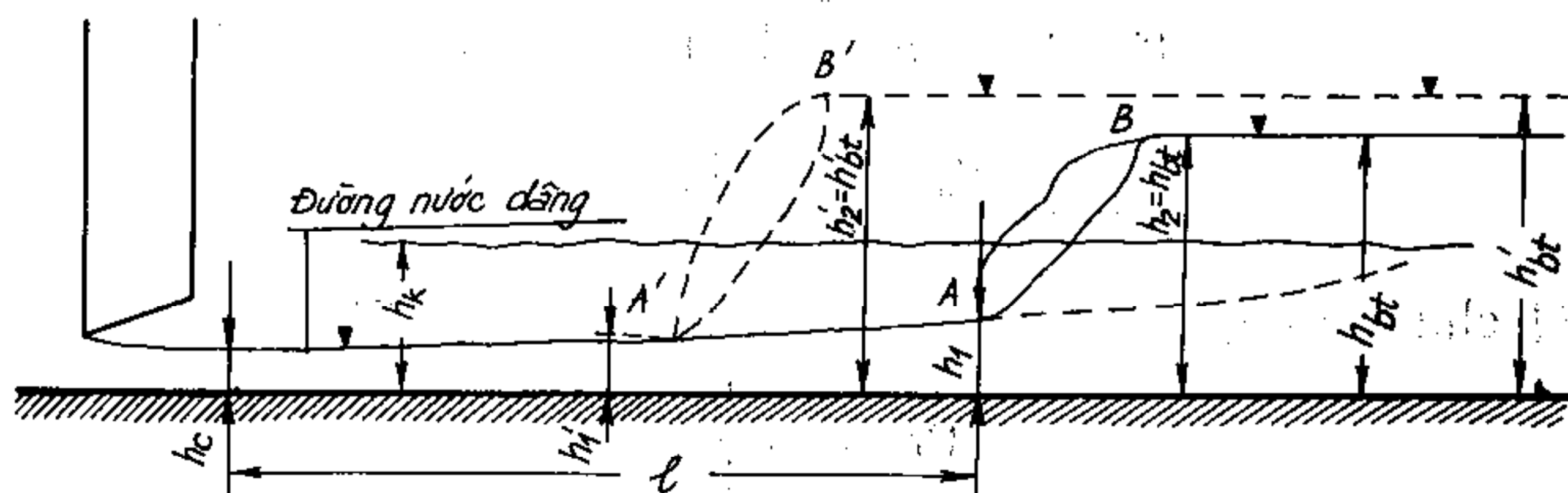
+ Sau khi biến đổi ta được :

$$h_w = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2} = \frac{a^3}{4h_1 h_2} \quad (14)$$

h_w theo (14) bé hơn tổn thất do mở rộng đột ngột tính theo công thức Boócda.

§X-6. SỰ DI CHUYỂN VỊ TRÍ NƯỚC NHẢY KHI CHIỀU SÂU HẠ LƯU THAY ĐỔI

Ta xét một trường hợp cụ thể :



+ h_1 liên hiệp với h_2 để có nước nhảy AB ;

+ $h_2 = h_{bt}$.

Nếu với các điều kiện như trước, tăng h_{bt} lên h'_{bt} thì chiều sâu sau nước nhảy h_2 sẽ tăng lên h'_2 vì thế nước nhảy cũng phải thay đổi vị trí vì để có chiều sâu liên hiệp với h'_2 phải có h'_1 chứ không còn là h_1 nữa.

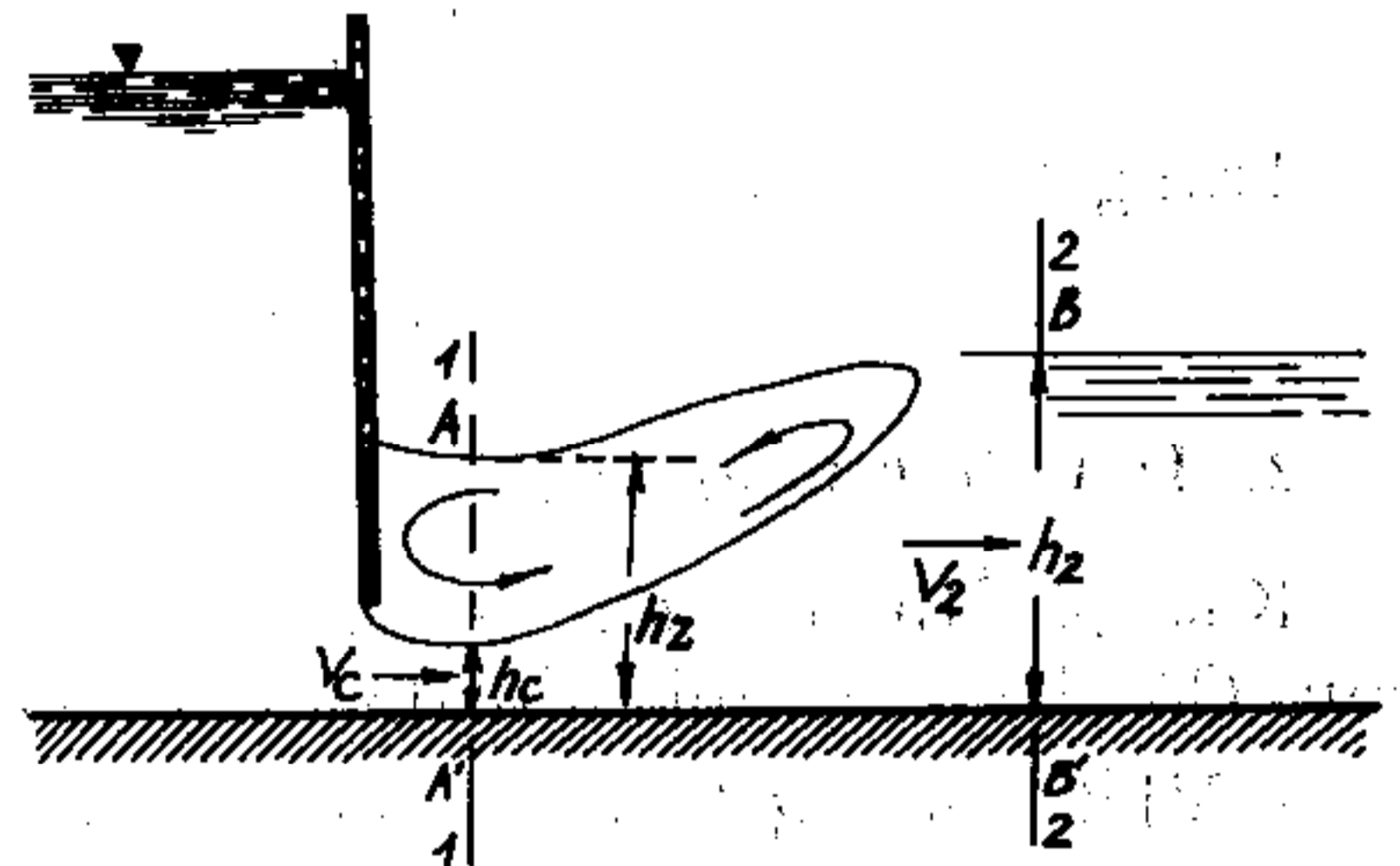
Từ đó nước nhảy phải chuyển về bên trái từ AB đến A'B', tức là ngược chiều chảy.

Như vậy ta đi đến kết luận : khi tăng chiều sâu bình thường sau nước nhảy thì nước nhảy sẽ dịch chuyển lên ngược chiều chảy và ngược lại khi giảm chiều sâu bình thường, nước nhảy chuyển xuống theo chiều chảy.

§X-7. NƯỚC NHẢY NGẬP

Khi mặt cắt trước của nước nhảy hoàn chỉnh bị ngập thì ta có nước nhảy ngập.

Giả thiết rằng áp suất tại mặt cắt co hẹp phân bố theo quy luật thủy tĩnh và lực ma sát đáy không đáng kể, viết phương trình động lượng cho đoạn nước nhảy ngập AA'-BB', ta có :



$$\rho \alpha_{02} \cdot q \cdot v_2 - \rho \alpha_{01} \cdot q \cdot v_c = \frac{1}{2} \gamma h_2^2 - \frac{1}{2} \gamma h_h^2$$

hoặc coi $\alpha_{02} = \alpha_{01} = \alpha_0$

$$\frac{\gamma \cdot \alpha_0 \cdot q^2}{g h_h} - \frac{\gamma \cdot \alpha_0 \cdot q^2}{g h_c} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot h_h^2$$

Coi $\alpha_0 \approx \alpha$, ta viết được :

$$\frac{h_k^3}{h_h} - \frac{h_k^3}{h_c} = \frac{1}{2} h_2^2 - \frac{1}{2} h_h^2$$

Chia 2 vế cho h_c , ta có :

$$\frac{h_k^3}{h_c} \cdot \frac{h_c}{h_h} - \frac{h_k^3}{h_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_2^2}{h_c} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h_h^2}{h_c}$$

Đặt :

$$S = \frac{h_h}{h_c} ; K = \frac{h_2}{h_c} \tag{15}$$

đồng thời chú ý rằng :

$$Fr_c = \left(\frac{h_k}{h_c} \right)^3$$

ta viết được :

$$K^2 = S^2 - 2Fr_c \left(1 - \frac{1}{S} \right) \quad (16)$$

Công thức (16) đúng cho nước nhảy ngập trong điều kiện bài toán phẳng. Các kết quả nghiên cứu của Bunsu, Smêta, Govinh-Đarao, Ragiaratman đều đi đến công thức (16) và đều chứng tỏ (16) phù hợp với thực tế.

Nếu trong (16) ta đặt :

$K = 1$, tức là $h_2 = h_c$, ta sẽ có :

$$S = 0,5(\sqrt{1 + 8Fr_c} - 1)$$

tức là

$$h_h = 0,5 h_c (\sqrt{1 + 8Fr_c} - 1)$$

tức là ta trở lại công thức để tìm độ sâu liên hiệp $h_2 = h_h$ của nước nhảy tự do, hoàn chỉnh.

Vậy phương trình của nước nhảy tự do là trường hợp riêng của nước nhảy ngập.

Hệ số ngập của nước nhảy được xác định bởi :

$$\sigma = \frac{h_h}{h''_c} \quad (17)$$

Trong đó : h''_c là độ sâu liên hiệp của h_c trong nước nhảy tự do.

* Chiều dài của nước nhảy ngập

Ta đặt

$$L_{n.ng} = \frac{l_{n.ng}}{h_c} \quad (18)$$

Ta có một số công thức kinh nghiệm sau đây :

+ Của Smêta :

$$L_{n.ng} = 6(S - 1) \quad (19)$$

+ Của Rakhmanôp :

$$\text{Với } S < 12,5 \quad L_{n.ng} = 6,5(S - 1,3) \quad (20)$$

$$\text{Với } S > 12,5 \quad L_{n.ng} = 3,5(S + 8,3) \quad (21)$$

+ Của Lêvi :

$$L_{n.ng} = 4,2 \cdot S \cdot \lg \left(\frac{2}{\pi} \cdot S^2 \cdot \sin \frac{\pi}{S} \right) \quad (22)$$

* Tổn thất năng lượng trong nước nhảy ngập

Bằng cách viết phương trình Becnui cho 2 mặt cắt 1-1 và 2-2 của nước nhảy ngập và dùng cách viết không thứ nguyên ta được :

$$\frac{h_w}{h_c} = \frac{q^2}{2gh_c^3} - \frac{q^2}{2gh_h h_c} - \left(\frac{h_h}{h_c} - \frac{h_z}{h_c} \right) \quad (23)$$

Dùng các kí hiệu S và K như trên ta được biểu thức không thứ nguyên của tổn thất năng lượng trong nước nhảy ngập phẳng như sau :

$$\frac{h_w}{h_c} = \frac{Fr_c}{2} \left(1 - \frac{1}{S^2} \right) - (S - K) \quad (24)$$

trong đó :

$$Fr_c = \frac{q^2}{gh_c^3} = \left(\frac{h_c}{h_k} \right)^3$$

Nếu lấy $K = 1$ ($h_2 = h_c$) ta trở về công thức của nước nhảy tự do :

$$\frac{h_w}{h_c} = \frac{Fr_c}{2} \left(1 - \frac{1}{S^2} \right) - (S - 1) \quad (25)$$

So sánh (24) và (25) thì thấy rõ với các điều kiện như nhau, tổn thất năng lượng trong nước nhảy tự do lớn hơn trong nước nhảy ngập.

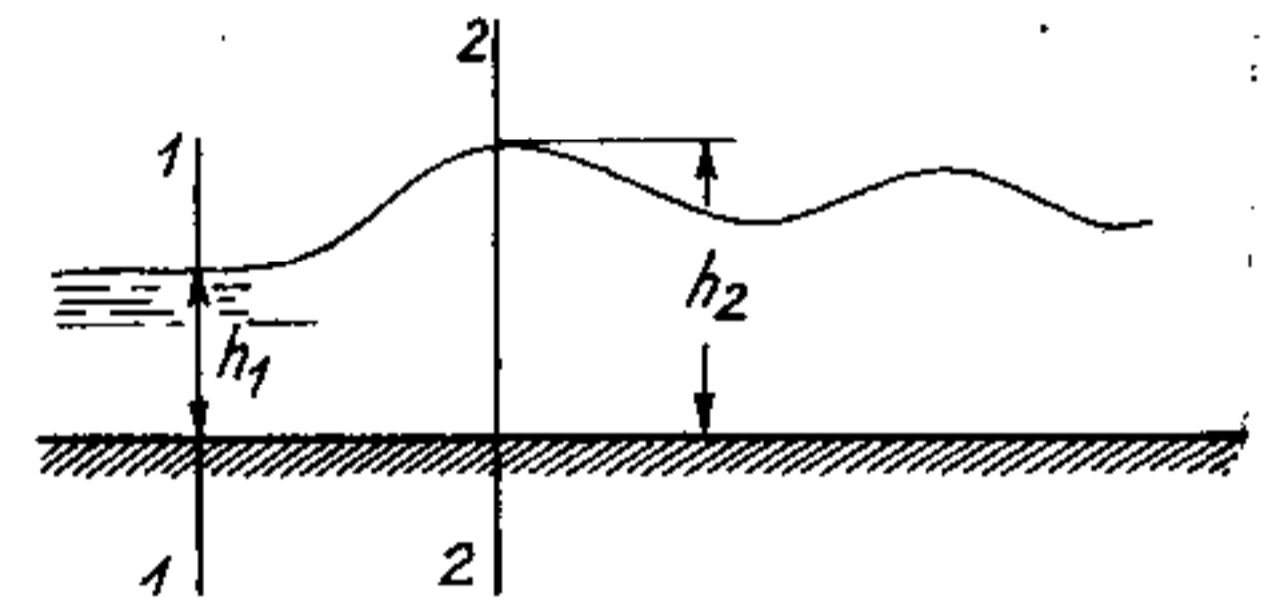
Nếu tiếp tục biến đổi (24) với $K = 1$ ta sẽ được công thức của tổn thất năng lượng trong nước chảy tự do :

$$\frac{h_w}{h_c} = \frac{(S - 1)^3}{4S} = \frac{(h''_c - h_c^3)}{4h''_c h_c}$$

Như vậy một lần nữa công thức tính tổn thất năng lượng trong nước nhảy tự do phẳng là trường hợp riêng của nước nhảy ngập phẳng.

§X-8. NƯỚC NHẢY SÓNG

Thí nghiệm chứng tỏ rằng với $Fr_1 < 3$ (hoặc $Fr_2 > 0,375$), nước nhảy có dạng những loạt sóng tắt dần, mà ta gọi là nước nhảy sóng. Đặc điểm của nước nhảy sóng là không có khu vực nước xoáy, mà chỉ có những dao động tắt dần của sóng.



Sau đây là một số kết quả nghiên cứu về nước nhảy sóng.

+ Modalépxki đề nghị công thức kinh nghiệm :

$$\frac{h_2}{h_1} = 0,553 Fr_1 + 0,663 \quad (26)$$

+ Smutxlóp đề nghị :

$$h_2 = 0,58 h_1 (\sqrt{1 + 8Fr_1} - 1) \quad (27)$$

Độ dài của nước nhảy sóng theo Đimitrep thì có thể xem như độ dài của hố xói do nước nhảy sóng gây ra và đề nghị lấy bằng :

$$l_n = 10,6 h_1 (Fr_1 - 1) \quad (28)$$

Tổn thất năng lượng trong nước nhảy sóng tính theo công thức (11V) +

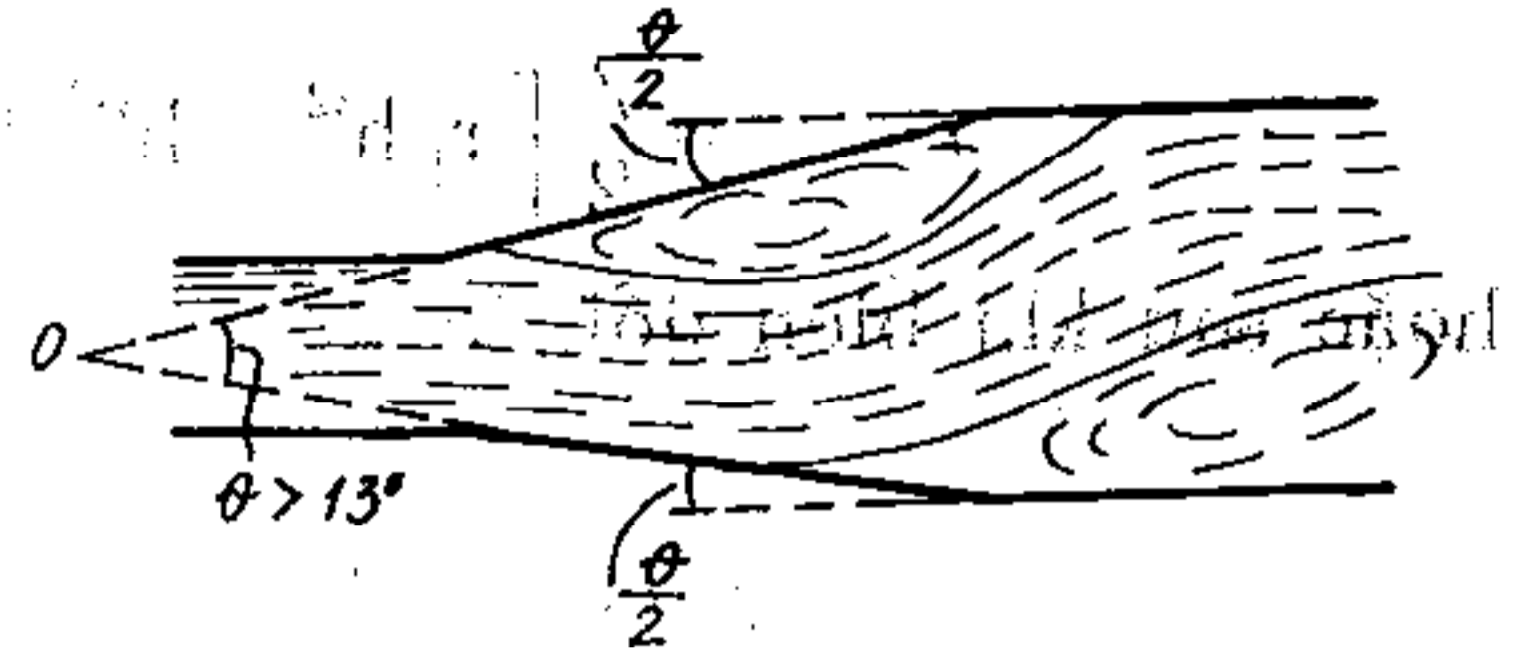
$$h_w = h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} - \left(h_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \right)$$

§X-9. NƯỚC NHẢY KHÔNG GIAN

Khi kênh không phải lắng trụ thì sự nối tiếp giữa dòng xiết và dòng êm xảy ra trong điều kiện không gian.

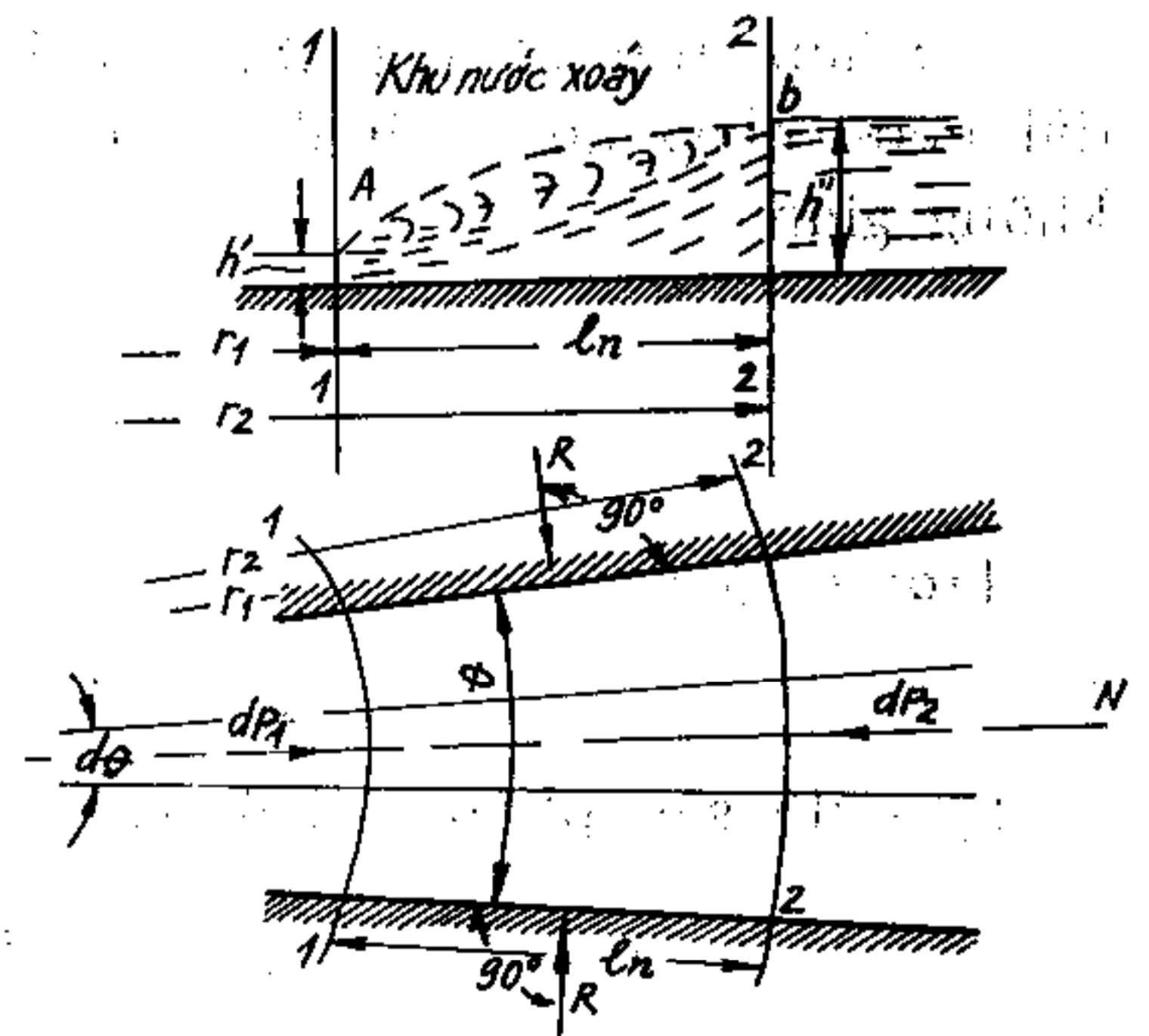
Trong điều kiện không gian, hình thức nối tiếp phức tạp hơn trong điều kiện mặt phẳng.

Dạng nước chảy hoàn chỉnh có thể quan sát thấy ở kênh có mặt cắt hình chữ nhật, mở rộng với góc θ nhỏ ($\theta \leq 13^\circ$).



1. Lòng kênh chữ nhật mở rộng với góc θ nhỏ ($\theta \leq 13^\circ$)

Kết quả nghiên cứu của Vaxilep về nước chảy hoàn chỉnh trong kênh hình chữ nhật mở rộng với góc θ nhỏ ($\theta \leq 13^\circ$), đáy bằng ($i = 0$) cho thấy rằng dòng chảy vừa mở rộng theo chiều sâu, vừa mở rộng trên mặt bằng. Nước nhảy hoàn chỉnh xuất hiện trên mặt bằng theo một tuyến không phải là đường thẳng mà có thể coi là một tuyến hình cung tròn, có bán kính r_1 (mặt cắt trước nước nhảy) và r_2 (mặt cắt sau nước nhảy).



Dùng phương trình động lượng viết cho 2 mặt cắt trước và sau nước nhảy ta có lần lượt :

$$+ \sum XL = \frac{\gamma}{2} \left(r_1 h'^2 - r_2 h''^2 + \beta \frac{h'^2 + h'h'' + h''^2}{3} \cdot l_n \right) d\theta \quad (29)$$

Trong đó : $l_n = r_2 - r_1$.

+ Biến thiên động lượng :

$$\Delta K = \frac{\gamma}{g} \alpha_o \left(\frac{Q}{\theta} \right)^2 \left(\frac{1}{h'' \cdot r_2} - \frac{1}{h' \cdot r_1} \right) d\theta \quad (30)$$

+ Viết phương trình động lượng :

$$\Delta K = \sum XL \quad (31)$$

trong đó $\sum XL$, ΔK tính theo (29) và (30), ta được :

$$\begin{aligned} & \frac{\gamma}{g} \alpha_o \left(\frac{Q}{\theta} \right)^2 \left(\frac{1}{h'' \cdot r_2} - \frac{1}{h' \cdot r_1} \right) = \\ & = \frac{\gamma}{2} \left[r_1 h'^2 - h''^2 + \frac{h'^2 + h'h'' + h''^2}{3} \times (r_2 - r_1) \right] \end{aligned} \quad (32)$$

hoặc sau khi biến đổi, ta được :

$$\begin{aligned} & \frac{2\alpha_o}{gr_1 \cdot h'} \cdot \left(\frac{Q}{\theta} \right)^2 + r_1 \cdot h'^2 = \\ & = \frac{2\alpha_o}{gr_2 h''} \cdot \left(\frac{Q}{\theta} \right)^2 + r_2 \cdot h''^2 - \beta \frac{h'^2 + h'h'' + h''^2}{3} (r_2 - r_1) \end{aligned} \quad (33)$$

Trong đó : θ tính bằng radiăng.

(33) là phương trình nước nhảy trong lòng dẫn chữ nhật mở rộng dần của Vaxiliep.

Vaxiliep trên cơ sở phân tích thứ nguyên và tận dụng công thức về chiều dài nước nhảy hoàn chỉnh đã đề nghị công thức cho chiều dài nước nhảy không gian :

$$l_n = \frac{10,3 h (\sqrt{Fr_1} - 1)^{0,81}}{1 + 0,54 \frac{h'}{r_1} (\sqrt{Fr_1} - 1)^{0,81}} \quad (34)$$

Trong đó :

$$Fr_1 = \left(\frac{h_k}{h_1} \right)^3$$

h_k - độ sâu phân giới ở mặt cắt trước nước nhảy bằng :

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha}{g} \left(\frac{Q}{r_1 \cdot \theta} \right)^2} \quad (35)$$

Khi $r_1 \rightarrow \infty$ ta thấy (34) lại trở thành công thức xác định chiều dài nước nhảy hoàn chỉnh. Trong (33) để tính r_2 cần lấy $\beta = 0,9$.

2. Lòng dẫn chữ nhật mở rộng đột ngột

Khi lòng dẫn chữ nhật mở rộng đột ngột, đáy bằng, Svácsơ và một số người khác đã đưa ra sơ đồ nước nhảy hoàn chỉnh, tự do và đối xứng. Nhưng nhiều thí nghiệm chứng tỏ rằng nước nhảy theo sơ đồ trên có thể xảy ra trong một số ít trường hợp và không bền vững.

Trên thực tế, dòng chảy xiết thường nối tiếp với dòng chảy êm trong điều kiện không gian dưới dạng chảy xiên, tức là dòng chảy hướng lệch về

một trong 2 bờ và giới hạn bởi các xoáy nước (theo Linxepxki, Gunco, Etscando v.v...).

Viết phương trình động lượng cho đoạn dòng chảy giới hạn bởi mặt cắt O-O đi qua mặt cắt co hẹp và mặt cắt 2-2 với giả thiết là có thể bỏ qua được lực ma sát đáy, ta có :

$$\frac{\gamma}{g} \frac{Q^2}{Bh_2} - \frac{\gamma}{g} \frac{Q^2}{bh_c} = \frac{1}{2} \gamma B h_2^2 - \frac{1}{2} \gamma b h_c^2 \quad (36)$$

Trong đó : h_2 - độ sâu tại mặt cắt (O-O).

Nhân cả 2 vế với $\frac{1}{Bh_c^2}$, sau khi thu gọn, ta được :

$$\frac{Q^2}{gb^2 \cdot h_c^3} \cdot \frac{b^2}{B^2} \cdot \frac{h_c}{h_2} - \frac{Q^2}{gb^2 \cdot h_c^3} \cdot \frac{b}{B} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h_2}{h_c}\right)^3 - \frac{1}{2} \left(\frac{b_2}{h_c}\right)^2 \quad (37)$$

Đặt $K = \frac{h_2}{h_c}$; $S = \frac{b_2}{h_c}$; $\beta = \frac{B}{b}$ (38)

và $q = \frac{Q}{b}$; $\frac{q^2}{gh_c^3} = Fr_c$

ta được :

$$\frac{Fr_c}{\beta^2 \cdot S} - \frac{Fr_c}{\beta} = \frac{1}{2} K^2 - \frac{1}{2} S^2$$

hoặc :

$$K^2 = S^2 - \frac{2 \cdot Fr_c}{\beta^2} \left(\beta - \frac{1}{S} \right) \quad (39)$$

Đó là phương trình cơ bản của nước nhảy không gian.

Tổn thất năng lượng $\Delta \Theta$ trong nước nhảy ngập không gian có thể tìm được bằng cách viết phương trình Becnui cho 2 mặt cắt O-O và 2-2 :

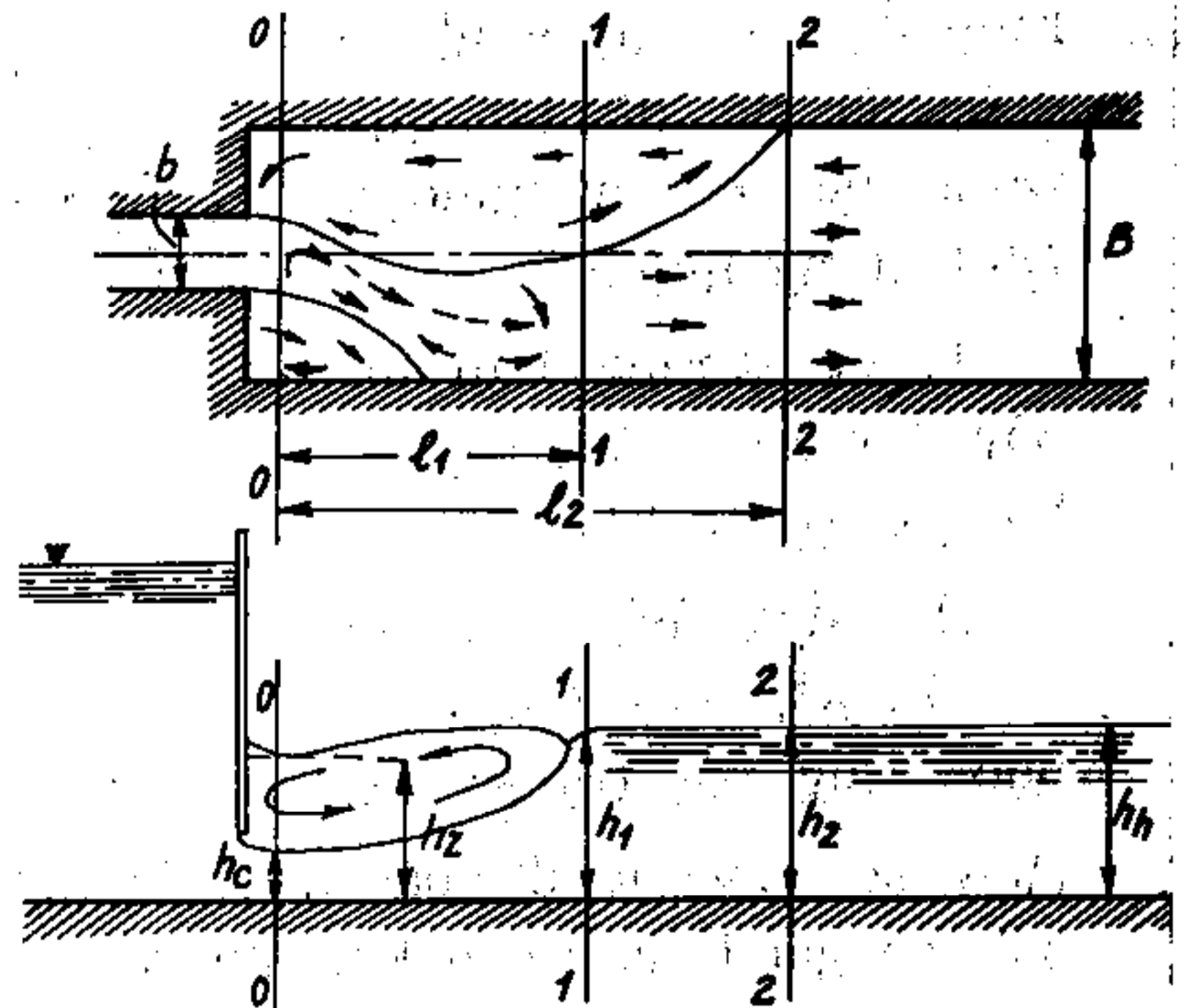
$$\frac{\Delta \Theta}{h_c} = \frac{Fr_c}{2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 S^2} \right) - (S - K) \quad (40)$$

Trong trường hợp mặt phẳng, $\beta = 1$, công thức (40) trở thành :

$$\frac{\Delta \Theta}{h_c} = \frac{Fr_c}{2} \left(1 - \frac{1}{S^2} \right) - (S - K) \quad (41)$$

Với $K = 1$, công thức (41) sẽ biến đổi được về công thức tính tổn thất năng lượng của nước nhảy hoàn chỉnh.

Chiều dài nước nhảy không gian có 2 loại : chiều dài l_1 , tính từ (O-O) đến (1-1) tức là chiều dài của đoạn mở rộng về chiều sâu ; chiều dài l_2 ,



tính từ (O-O) đến (2-2) tức là chiều dài của đoạn mở rộng về bề ngang.
 Kết quả thí nghiệm cho thấy :

+ Trong trường hợp cửa cống ở giữa :

$$l_{1(\text{giữa})} = 6(S - 1)h_c \quad (42)$$

$$l_{2(\text{giữa})} = (4,1 - 0,4\beta)(\beta S - 1)h_c \quad (43)$$

+ Trong trường hợp cửa cống ở bên, với $\beta = 2 \div 6$, ta có :

$$l_{1(\text{bên})} = (1,5 - 1,8)l_{2(\text{giữa})} \quad (44)$$

$$l_{2(\text{bên})} = 2l_{2(\text{giữa})} \quad (45)$$

§X-10. NƯỚC NHẢY TRONG LÒNG DẪN CHỮ NHẬT CÓ ĐỘ DỐC ĐÁY LỚN

Trong lúc chứng minh phương trình cơ bản của nước nhảy ta đã giả thiết rằng độ dốc đáy kênh là nhỏ, do đó đã bỏ qua trọng lực khi viết phương trình động lượng.

Trong trường hợp độ dốc đáy lớn ta không thể bỏ qua trọng lực.

Độ dốc đáy lớn là $i > i_k$. Khi đó đường mặt nước ứng với trạng thái

chảy êm phải là đường nước dâng a_{II} . Hiện tượng này đòi hỏi phải dùng một số giả thiết thích hợp đối với mặt cắt sau nước nhảy.

Dùng phương trình động lượng viết cho 2 mặt cắt 1-1 và 2-2 ta có kết quả sau đây :

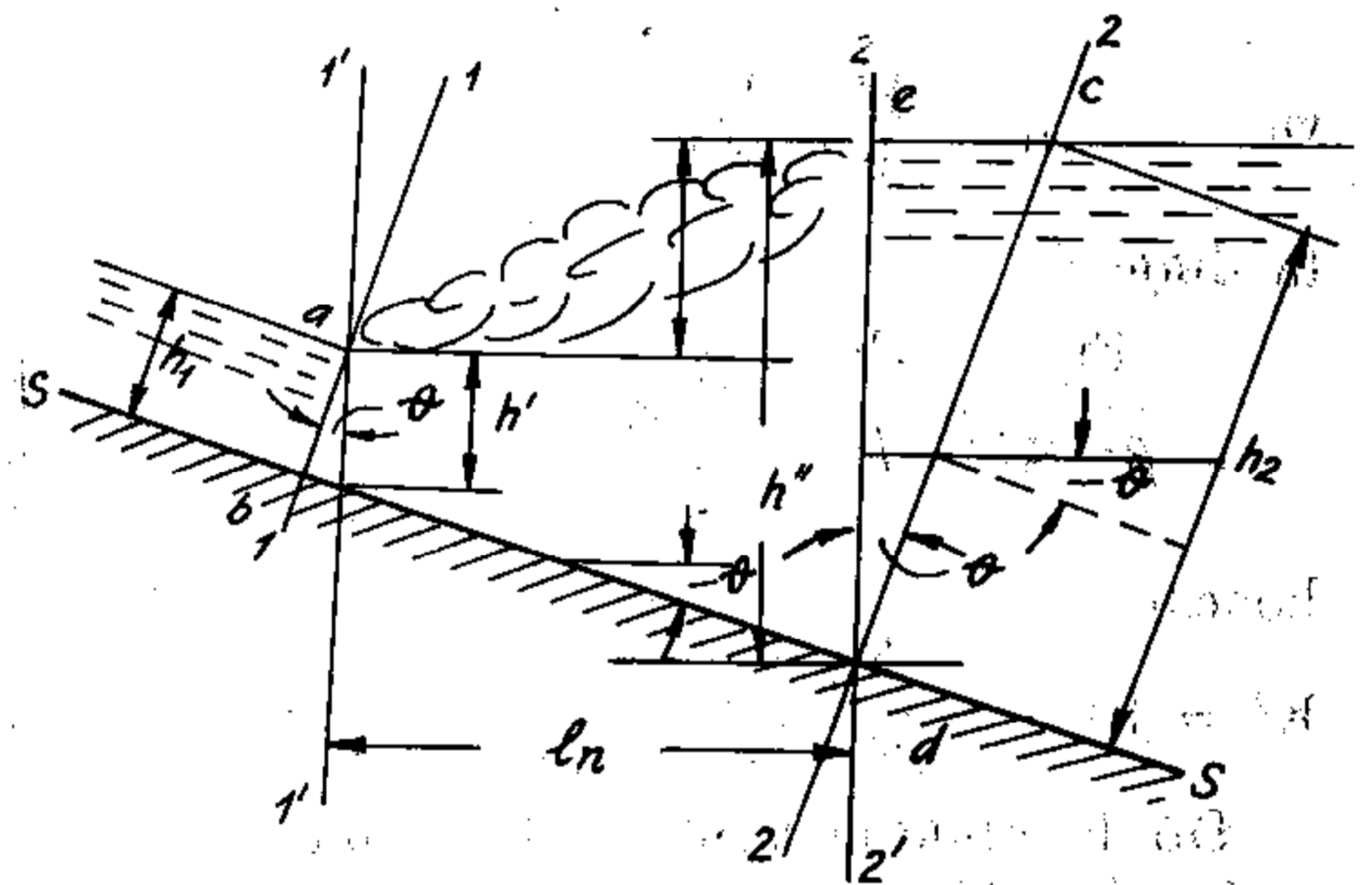
$$\eta^3 - \eta' \left(\cos^3\theta + \frac{2Fr'_1}{\cos\theta} + \frac{2S\sin}{h'^2} \right) + 2Fr'_1 \cos^2\frac{\theta}{2} = 0 \quad (46)$$

trong đó :

$$\eta' = \frac{h''}{h'} ; Fr' = \frac{\alpha_0 v_1^2}{gh'}$$

S - diện tích hình abcd.

Phương trình (46) là phương trình nước nhảy trong lòng dẫn hình chữ nhật có độ dốc đáy lớn.



Có thể dùng công thức kinh nghiệm của Bakhmechep với $i \leq 0,07$ và $6,5 \leq Fr'_1 \leq 38,1$:

$$\eta' = \eta + ki \quad (47)$$

Trong đó :

η - tỉ số những độ sâu liên hiệp có cùng một trị số Fr , nhưng ở trong lòng dẫn nằm ngang ;

i - độ dốc đáy lòng dẫn ;

k - hệ số kinh nghiệm .

Độ cao nước nhảy theo Koxiacôva bằng :

$$a' = a(1 - 1,75i) \quad (48)$$

Trong đó :

a - chiều cao nước nhảy có cùng số Fr ở trong kênh nằm ngang

Chiều sâu h'' sau nước nhảy có thể tìm theo :

$$h'' = a + h' + l'_n \operatorname{tg} \theta \quad (49)$$

Trong đó : l'_n - chiều dài nước nhảy.

Theo Koxiacôva với $i \leq 1/3$ chiều dài nước nhảy bằng :

$$l'_n = l_n(1 + 3i) \quad (50)$$

Trong đó : l_n - chiều dài nước nhảy có cùng một trị số Fr , nhưng kênh nằm ngang.

Ví dụ X-1 :

Xác định độ sâu liên hiệp h_1 của nước nhảy trong kênh hình thang $b = 5\text{m}$, $Q = 22 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_2 = 1,5\text{m}$, $m = 1$.

Giải :

Phương trình cơ bản của nước nhảy

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega_1} + y_1\omega_1 = \frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega_2} + y_2\omega_2$$

Gọi $N(h) = \frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega} + y\omega$ là hàm số nước nhảy xác định theo h_1 và h_2 khi $h = h_1$

$$N(h_1) = \frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega_1} + y_1\omega_1$$

$$h = h_2$$

$$N(h_2) = \frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega_2} + y_2\omega_2$$

$h_2 = 1,5$ ta tính $N(h_2)$

$$\omega_2 = (b + mh_2)h_2 = (5 + 1,5 \times 1) \times 1,5 = 9,75\text{m}^2$$

$$y_2 = \frac{B_2 + 2b}{B_2 + b} \cdot \frac{h_2}{3} = \frac{b + 2mh_2 + 2b}{b + 2mh_2 + b} \times \frac{h_2}{3}$$

$$= \frac{15 + 3}{10 + 3} \cdot 0,5 = 0,69\text{m}$$

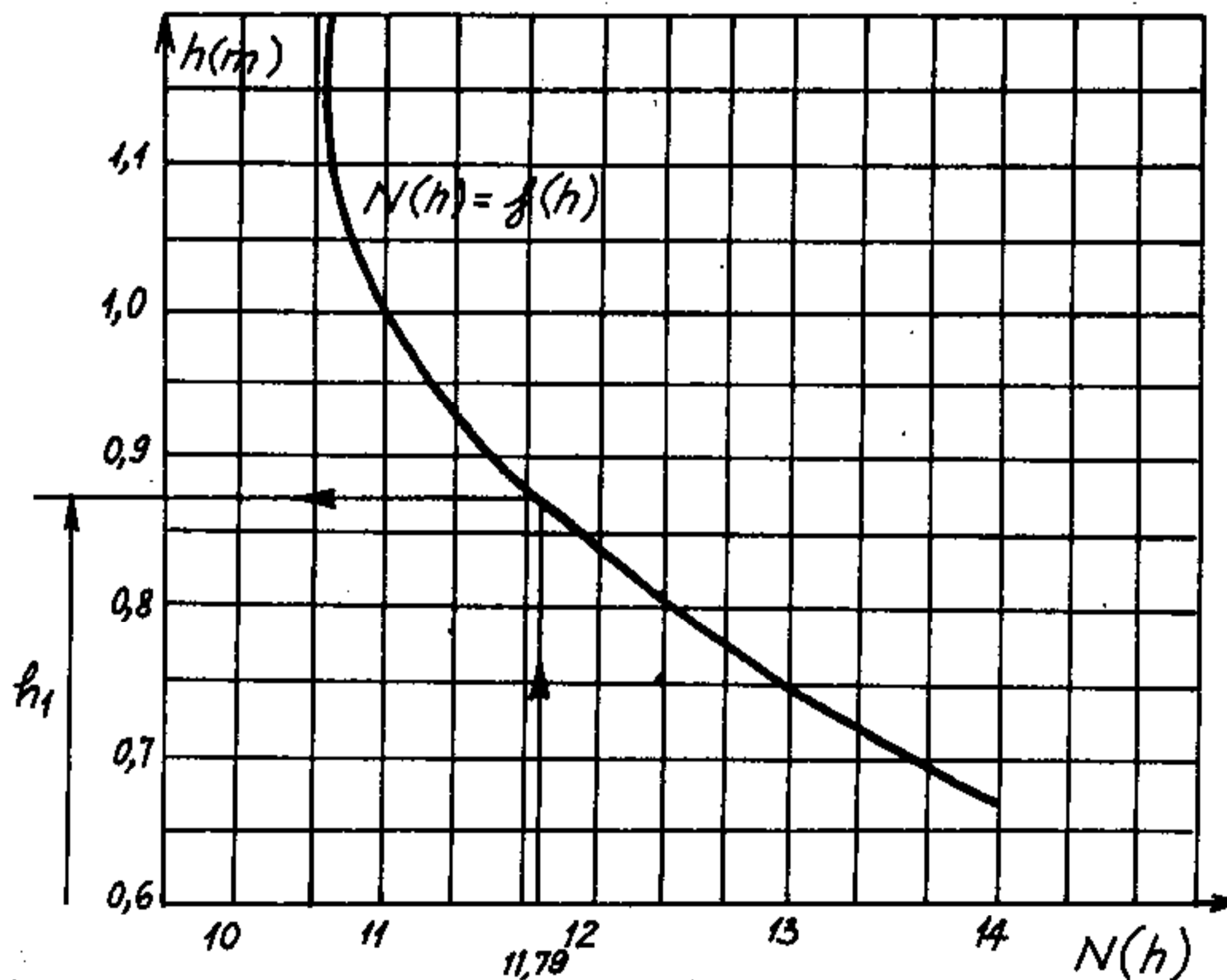
$$N(h_2) = \frac{22^2}{9,81 \times 9,75} + 0,69 \times 9,75 = 11,79\text{m}^3$$

Cho các giá trị h để tính

$$N(h) = \frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega} + y\omega$$

Trình tự tính và kết quả được ghi ở bảng sau :

h (m)	$\omega(\text{m}^2)$	m(m)	y ω	$\frac{\alpha_0 Q^2}{g\omega}$	N(h)
1,2					
1,1	7,44	0,5	4,17	6,64	10,81
1,0	6,7	0,517	3,47	7,37	10,84
0,9	6,0	0,47	2,82	8,2	11,05
0,8	5,3	0,43	2,26	9,3	11,56
0,75	4,64	0,38	1,77	10,65	12,46
0,7	4,3	0,36	1,54	11,47	13,03
0,6	4,0	0,34	1,56	12,25	13,01
	3,36	0,29	0,972	14,7	15,67



Ví dụ X-2 :

Kênh mặt cắt hình chữ nhật $b = 3\text{m}$, $Q = 6,8 \text{ m}^3/\text{s}$, biết chiều sâu liên hiệp thứ nhất của nước nhảy $h_1 = 0,55\text{m}$. Tính chiều sâu liên hiệp thứ hai và chiều dài nước nhảy.

Giải :
 Tính $h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{1 \times 6,8^2}{3^2 \times 9,81}} = 0,806\text{m}$

$$Fr_1 = \frac{\alpha Q^2}{g h_1^3 b^2} = \frac{1 \times 6,8^2}{9,81 \times 3^2 \times 0,55^2} = 3,2 > 3$$

Vì $Fr_1 > 3$ nên dạng nước nhảy là chính quy.

$$\begin{aligned} h_2 &= \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_1} \right)^3} - 1 \right] \\ &= \frac{0,55}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{0,806}{0,55} \right)^3} - 1 \right] = 1,132\text{m} \end{aligned}$$

Chiều dài nước nhảy :

$$\begin{aligned} l_{nn} &= (4 \div 5)(h_2 - h_1) = 5(1,132 - 0,55) \\ &= 2,91\text{m}. \end{aligned}$$

Ví dụ X-3 :

Nước chảy qua đập tràn xuống hạ lưu qua kênh chữ nhật có $n = 0,017$, $q = 8 \text{ m}^3/\text{sm}$, $h_n = 3,6\text{m}$, chiều sâu tại mặt cắt co hẹp $h_c = 0,7\text{m}$, $i = 0$. Xác định vị trí nước nhảy.

Giải :

Tính chiều sâu phân giới :

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{8^2}{9,81}} = 1,87\text{m}$$

Độ sâu liên hiệp thứ hai của nước nhảy

$$h''_c = \frac{h_c}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_c} \right)^3} - 1 \right] = 0,35 \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{1,87}{0,7} \right)^3} - 1 \right] = 4\text{m}$$

nhảy tại vị trí sau mặt cắt co hẹp.

Vị trí nước nhảy

Nước nhảy xảy ra tại vị trí ở đó độ sâu dòng chảy h_1 là độ sâu liên hiệp thứ hai của nước nhảy $h_2 = h_n$.

$$h_1 = \frac{h_n}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_n} \right)^3} - 1 \right] = 1,8 \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{1,87}{3,6} \right)^3} - 1 \right] = 0,82\text{m}.$$

Sau khi qua mặt cắt co hẹp c-c là đường nước dâng c_0 , từ c-c đến 1-1 có $h_1 = 0,82\text{m}$. Nước nhảy xảy ra tại mặt cắt 1-1 với $h' = h_1$ và $h'' = h_n$. Chiều dài đoạn nước dâng l_{c1} xác định bằng công thức :

$$l_{c1} = \frac{\Delta \vartheta}{i - J} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_c}{y - J}$$

Trong đó :

$$\vartheta_1 = h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = 0,82 + 485 = 5,64\text{m}$$

$$\vartheta_c = h_c + \frac{\alpha v_c^2}{2g} = 0,7 + 6,65 = 7,36\text{m.}$$

$$\bar{J} = \frac{J_c + J_1}{2} \text{ với } J = \frac{Q^2}{K^2}$$

$$K_c = \omega_c \cdot C_c \quad R_c = 0,7 \times 46,9 = 32,86 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$K_1 = \omega_1 \cdot C_1 \quad R_1 = 0,82 \times 51,88 = 42,54 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$J_c = \frac{8^2}{32,86^2} = 0,059 \quad J_1 = \frac{8^2}{(42,54)^2} = 0,035$$

$$\bar{J} = \frac{J_c + J_1}{2} = \frac{0,059 + 0,035}{2} = 0,047$$

$$l_{c-1} = \frac{5,64 - 7,36}{-0,047} = 36,6\text{m.}$$

Nước nhảy xảy ra cách mặt cắt c-c một khoảng cách $l_{c-1} = 36,6\text{m}$.

Ví dụ X-4 :

Tính chiều sâu liên hiệp thứ nhất của nước nhảy trong kênh có mặt cắt hình chữ nhật khi biết $Q = 27 \text{ m}^3/\text{s}$, $b = 10,8\text{m}$, $h_2 = 2,2\text{m}$.

Đáp số : $h_1 = 0,237\text{m}$

Ví dụ X-5 :

Tính chiều sâu liên hiệp thứ hai sau nước nhảy của kênh mặt cắt hình chữ nhật có $Q = 36 \text{ m}^3/\text{s}$, $b = 10\text{m}$, $h'_1 = 0,7\text{m}$. Xác định chiều dài nước nhảy, tổn thất năng lượng của nước nhảy.

Đáp số : $h_2 = 1,63\text{m}$

$l_{nn} = 4,65\text{m}$

$h_w = 0,18\text{m}$

Ví dụ X-6 :

Nước nhảy qua cống hạ lưu với lưu lượng $q = 6 \text{ m}^2/\text{s}$. Kênh hạ lưu có mặt cắt ngang hình chữ nhật $b = 8\text{m}$, $n = 0,02$, $i = 0,0001$ chiều sâu tại mặt cắt co hẹp $h_c = 0,6\text{m}$, chiều sâu dòng chảy hạ lưu $h_n = 2,8\text{m}$. Xác định vị trí nước nhảy.

Đáp số : Nước nhảy cách mặt cắt co hẹp c-c một đoạn $l = 23,88\text{m}$.