

CÁC DẠNG ĐƯỜNG MẶT NƯỚC TRÊN KÊNH LĂNG TRỤ CÓ LƯU LƯỢNG TĂNG DẦN THEO CHIỀU DÒNG CHẢY

Hoàng Nam Bình

Trường Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội

Lê Văn Nghị

Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về Động lực học sông biển

Tóm tắt: Các kênh dẫn có dạng lăng trụ tiếp nhận liên tục dòng chảy bên gia nhập dọc theo chiều dòng chính là những kênh dẫn có dòng biến lượng. Đó là những loại công trình như rãnh biên, máng thoát nước tràn ở bể bơi, kênh tiêu cát dốc hay những hệ thống công trình thủy lợi có đường tràn ngang ở nơi xung yếu để bảo vệ bờ kênh, chống nước tràn bờ khi có sự cố hoặc những đoạn kênh cắt qua khe, rãnh tự thủy. Đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy trong đoạn kênh có dòng biến lượng rất phức tạp bởi lực tác động của dòng gia nhập vào dòng chính. Yếu tố thủy lực được quan tâm nghiên cứu nhiều nhất là đường mặt nước, bởi đây là thông số thủy lực quan trọng phục vụ công tác thiết kế. Bài báo trình bày kết quả phân tích các dạng đường mặt nước trên kênh lăng trụ có lưu lượng tăng dần theo chiều dòng chảy. Các dạng đường mặt nước được gọi tên cho từng trường hợp chảy êm - xiết; đường nước dâng - hạ tương ứng với các trường hợp đáy kênh dốc thoải, dốc lớn và nằm ngang. Ngoài ra, các chế độ nối tiếp từ đoạn kênh thông thường phía thượng lưu sang đoạn kênh có dòng biến lượng và từ đoạn kênh có dòng biến lượng sang đoạn kênh hạ lưu cũng được mô tả ứng với từng điều kiện cụ thể.

Từ khoá: Dòng biến lượng, Kênh lăng trụ, Đường mặt nước.

Summary: *Water surface profiles for steady flow with increasing discharge in a prismatic channel*
The prismatic channels that receive the lateral flow with increasing discharge are artificial channels with spatially varied flow. This special hydraulic phenomenon may occur in several hydraulic works, such as drainage ditches, swimming pool gutters, roof gutters, and side channels. The hydrodynamic characteristics of spatially varied flow are complicated due to the force of the lateral flow. Water surface profiles are the important characteristic that are very useful for the verification and design of those hydraulic works. This article presents the water surface profiles for steady flow with increasing discharge in a prismatic channel. Types of water surface are named for each case and the different hydraulic regimes are shown with each specific condition.

Keywords: *Spatially varied flow, Prismatic channels, Water surface profile.*

1. GIỚI THIỆU

Dòng biến lượng là thuật ngữ mô tả hiện tượng dòng chảy ổn định hoặc không ổn định có lưu lượng dọc theo chiều dòng chính thay đổi bởi sự gia nhập hoặc phân tán liên tục của dòng chảy bên. Có thể hiểu đơn giản, dòng biến lượng là dòng chảy chuyển động trong lòng dẫn mà lưu lượng thay đổi dọc theo chiều dòng chảy hay còn được gọi là dòng chất lỏng có lưu lượng thay đổi theo không gian [1] [10]. Các

kênh dẫn tiếp nhận liên tục dòng chảy bên gia nhập dọc theo chiều dòng chính là một trường hợp của những kênh dẫn có dòng biến lượng. Các công trình thủy lực dạng này có thể kể đến như rãnh biên (Hình 1), máng thoát nước tràn ở bể bơi (Hình 2), kênh tiêu cát dốc (Hình 3), máng thu nước mưa trên mái nhà (Hình 4), đường tràn ngang trên hệ thống công trình thủy lợi ở nơi xung yếu để bảo vệ bờ kênh, chống nước tràn bờ khi có sự cố hoặc những đoạn

Ngày nhận bài: 03/9/2021

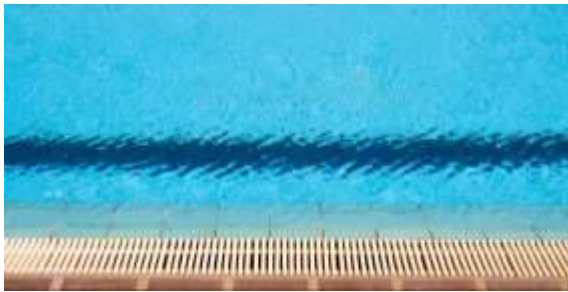
Ngày thông qua phản biện: 10/10/2021

Ngày duyệt đăng: 12/10/2021

kênh cắt qua khe, rãnh tụ thủy (Hình 5) và máng tràn bên tháo lũ của hồ chứa nước (Hình 6). Mặt cắt của kênh có thể có các dạng khác nhau, được thiết kế đối xứng hoặc không đối xứng phù hợp điều kiện địa hình hoặc yêu cầu thiết kế. Các dạng mặt cắt ngang hình chữ nhật và hình thang (Hình 7a, b) hoặc dạng hỗn hợp (Hình 7e) với các hệ số mái (m_1, m_2) là mặt cắt thường gặp đối với máng tràn bên tháo lũ ở các công trình hồ chứa hay các kênh dẫn, rãnh dọc... [2] [3]. Dạng mặt cắt tam giác (Hình 7c) thường được thiết kế với các rãnh thu nước nhỏ và dạng bán nguyệt (Hình 7d, g) thường gặp ở các máng thu nước mưa trên mái nhà. Kênh dẫn hoặc rãnh dọc... thường có dạng lăng trụ ngoại trừ máng tràn bên tháo lũ có thể được thiết kế dạng phi lăng trụ.



Hình 1: Rãnh dọc



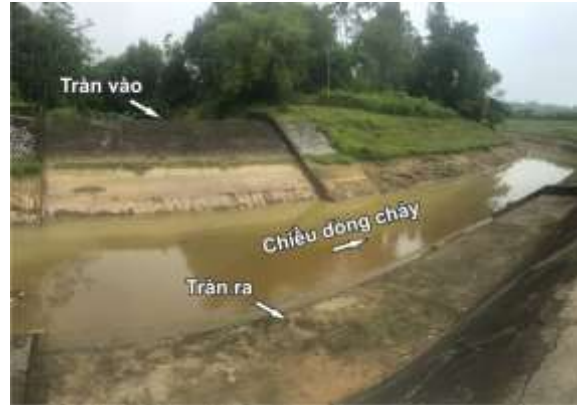
Hình 2: Máng thu nước tràn của bể bơi



Hình 3: Kênh tiêu cắt dốc



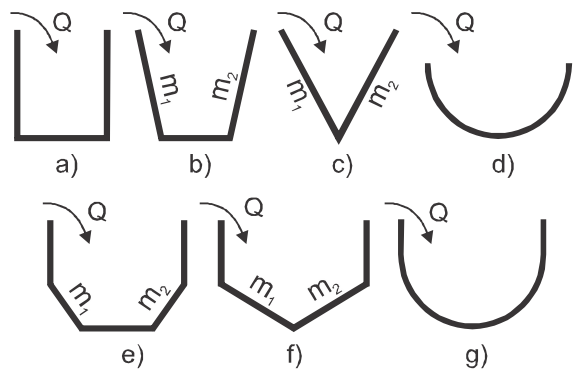
Hình 4: Máng thu nước mưa trên mái nhà



Hình 5: Tràn vào - tràn ra trên kênh chính hệ thống thủy lợi Bắc Nghệ An



Hình 6: Máng bên hồ Việt An, Quảng Nam



Hình 7: Các dạng mặt cắt ngang của kênh

Đường mặt nước là yếu tố thủy lực được quan tâm nghiên cứu nhiều nhất. Đặc trưng này đã

được khảo sát định tính và thực nghiệm một số trường hợp. Các nhà khoa học tiên phong trong việc nghiên cứu đặc trưng này những năm 30-40 của thế kỷ XX như Hinds [16], Beij [2], Konovalov, Patrsev, Petrov, Kiselev [19], Camp [6], Keulegan [17] [18], Marchi [22], Citrini [11], Cung [12] và đến những năm 70-80 có Chow [10], Gill [14], Yen [27], An [1], Hager [15]. Đến nay đã có thêm nhiều nghiên cứu thực nghiệm phục vụ các mục tiêu nghiên cứu cụ thể như Kouchakzadeh và cs. [20], Mohammadi [24], Mariana và cs. [23], Lucas và cs. [21], Gardarsson và cs. [13] Nguyễn Chiến và cs. [8] [9]...

Đường mặt nước tự do trên kênh có dòng biến lượng tăng dần theo chiều dòng chảy có thể có nhiều dạng khác nhau phụ thuộc vào tỷ số định lượng của các lực tác dụng và các điều kiện bên ngoài [19]. Các thông số tác động đến dạng đường mặt nước có thể kể đến gồm [15] [16] [19] [27]: 1) Độ dốc đáy kênh (S_0); 2) Độ nhám của kênh (n); 3) Lưu lượng gia nhập từ đoạn kênh thông thường phía thượng lưu (lưu lượng đầu kênh Q_0); 4) Lưu lượng gia nhập của dòng chảy bên (Q_c); 5) Hình thức nối tiếp sang đoạn kênh thông thường phía hạ lưu; và 6) Cấu tạo hình học của kênh.

Theo Kiselev [19], từ những nghiên cứu ban đầu của Konovalov năm 1937, các nhà khoa học Liên Xô (cũ) đã tiếp tục kế thừa và nghiên cứu chế độ thủy lực trên kênh có lưu lượng thay đổi. Năm 1940, Patrsev nghiên cứu chuyển động trên kênh có lưu lượng thay đổi dọc chiều dòng chảy. Tiếp đó, năm 1942, Kiselev nghiên cứu quy luật thay đổi chiều sâu trong kênh lắng trụ ở đoạn có tràn bên. Năm 1950, Petrov tiếp tục nghiên cứu và chỉ ra các điều kiện chính xác hơn để hình thành các dạng đường cong nước dâng, nước hạ. Dạng đường mặt nước tự do trên kênh có lưu lượng thay đổi có thể có nhiều dạng khác nhau. Các dạng đường mặt nước được Kiselev tập hợp lại có 6 dạng trong đó có 3 dạng chảy êm, 3 dạng chảy xiết ứng với các trường hợp kênh nằm ngang, dốc thoải và dốc lớn. Năm 1941, Marchi [22] áp dụng phương trình dòng biến lượng ổn định để xác định đường mặt nước bằng lý thuyết và

thực nghiệm trên kênh lắng trụ mặt cắt hình chữ nhật cho một số trường hợp. Năm 2004, Nguyễn Chiến và cs. [8] đã khảo sát đường mặt nước trong máng tràn bên của hồ chứa Nước Ngọt tỉnh Ninh Thuận bằng phương trình dòng biến lượng ổn định và chỉ ra kích thước hợp lý của chiều rộng đầu máng và độ dốc máng. Năm 2016, Nguyễn Chiến và cs. [9] nghiên cứu diễn biến mực nước trong máng bên để đánh giá khả năng áp dụng loại công trình này ở Việt Nam và tính toán ứng dụng cho công trình hồ chứa nước Ông Lãnh tỉnh Bình Định. Năm 2015, Lucas và cs. [21] nghiên cứu trên 3 mô hình vật lý Trangslet; Karahnjukar và Lyssbach cho thấy kết quả tính toán phù hợp với thí nghiệm trong trường hợp máng có dạng lắng trụ, tuyến thẳng và không bị ảnh hưởng bởi tác động cục bộ. Năm 2018, Pooja và cs. [25] đã thực hiện nghiên cứu đường mặt nước trên kênh có dòng biến lượng bằng mô hình vật lý, so sánh với kết quả tính toán bằng phương trình khảo sát đường mặt nước đối với kênh lắng trụ thông thường cho thấy sự sai khác lớn giữa kết quả tính toán và thí nghiệm.

Hiện nay, bằng các dạng phương trình dòng biến lượng ổn định có thể dễ dàng tính toán được đường mặt nước bằng phương pháp cộng trực tiếp. Khi tính toán thường giả định trạng thái chảy không đổi để không xảy ra hiện tượng nước nhảy nhưng trên thực tế nước nhảy có thể xảy ra trên các đoạn kênh. Ngoài ra vị trí điểm kiểm soát (điểm biên) làm căn cứ tính toán có thể thay đổi tùy thuộc từng điều kiện cụ thể nhưng chưa được chỉ ra đầy đủ gây khó khăn trong thiết kế. Bằng phương trình dòng biến lượng ổn định của Konovalov viết cho kênh lắng trụ [4] [19] bài báo đã thực hiện phân tích các dạng đường mặt nước trên kênh có lưu lượng gia nhập tăng dần theo chiều dòng chảy, đồng thời chỉ ra các điều kiện hình thành các dạng đường mặt nước và chế độ nối tiếp có thể có trên hệ thống nhằm xác định định tính dạng đường mặt nước trên kênh giúp các kỹ sư tư vấn dễ dàng hơn trong việc thiết kế loại công trình thủy lực này.

2. PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH

Các dạng phương trình mô phỏng đường mặt nước hiện nay hầu hết là phương trình dòng biến lượng ổn định chuyển động một chiều, được các nhà khoa học thiết lập khi chấp nhận một số giả thiết [1] [2] [6] [10] [16] [17] [19] [27]. Các giả thiết được viết theo các cách khác nhau, có thể tổng hợp lại gồm: 1) Dòng chảy chuyển động một chiều và bỏ qua các yếu tố thủy lực biến đổi theo phương ngang; 2) Áp suất dòng chảy trên kênh tuân theo quy luật của áp suất thủy tĩnh; 3) Bỏ qua hiện tượng không khí bị cuốn vào dòng chính trên kênh do dòng xiết từ cạnh bên đổ xuống; 4) Lưu tốc tăng tuyến tính theo chiều dòng chính; 5) Bỏ qua lực của dòng gia nhập tác động lên dòng chính; 6) Dòng chảy trên kênh chuyển động không xuất hiện sóng bề mặt; 7) Tôn thất cột nước dọc theo kênh được mô tả bằng các công thức áp dụng cho chuyển động đều như công thức Chezy - Manning hay Darcy - Weisbach; và 8) Coi phân bố lưu tốc là đồng nhất dọc theo chiều dòng chảy.

Dạng phương trình được áp dụng phổ biến nhất trong nước cũng như thế giới hiện nay là phương trình của Konovalov [4] [19] được tác giả công bố năm 1937 trong cuốn Dòng chảy có lưu lượng thay đổi (Движение жидкости с переменным расходом). Theo đó, phương trình khảo sát đường mặt nước được thiết lập dựa trên nguyên lý bảo toàn năng lượng. Phương trình là tổ hợp sự biến đổi của cột nước lưu tốc trung bình mặt cắt và tỷ lệ giữa cột nước lưu tốc trung bình đoạn tính toán với chiều dài đoạn tính toán. Phương trình có xét đến ảnh hưởng của hướng dòng chảy gia nhập hay phân tán. Phương trình có dạng:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \frac{kQ}{gA^2} \frac{dQ}{dx} + \frac{\alpha Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial x}}{1 - Fr^2} \quad (1)$$

trong đó: h là chiều sâu dòng chảy (m); x là tọa độ dọc kênh (m); S_0 là độ dốc đáy kênh (m/m), S_f là độ dốc ma sát (m/m); Q là lưu lượng trong kênh (m^3/s); A là diện tích mặt cắt ướt (m^2); Fr là số Froude (-); g là gia tốc trọng trường, $g = 9,81m/s^2$; k là hệ số, $k = 1 + \alpha - n_0$; α là hệ số

hiệu chỉnh động năng; n_0 là tỷ số giữa hình chiếu của lưu tốc toàn phần của khối gia nhập hoặc phân tán lên phương chuyển động v_{tx} và lưu tốc dòng chủ v .

Đối với các bài toán dòng biến lượng trên kênh đều xét với dòng gia nhập vuông góc với trục dòng chính nên $v_{tx} = 0$, do đó $n_0 = 0$. Với phạm vi nghiên cứu là kênh lắng trụ và bỏ qua ảnh hưởng của phân bố lưu tốc (coi $\alpha \approx 1$) [2] [6][8] ÷ [27], khi đó phương trình (1) trở thành:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x}}{1 - Fr^2} \quad (2)$$

Phương trình (2) là phương trình động lực của dòng biến lượng ổn định chuyển động một chiều do Chow đề xuất năm 1969 [10]. Nếu phương trình (2) viết cho kênh lắng trụ mặt cắt hình chữ nhật thì sẽ trở thành phương trình của Keulegan [17][18].

Sử dụng phương trình (2) để phân tích các dạng đường mặt nước trên kênh lắng trụ có dòng biến lượng ổn định với lưu lượng tăng dần theo chiều dòng chảy. Sau đây gọi tắt là "kênh biến lượng" để phân biệt với kênh lắng trụ chảy ổn định có lưu lượng không đổi (kênh thông thường).

$$\text{Đặt } S_\ell = S_f + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (3)$$

khi đó phương trình (2) trở thành:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_0 - S_\ell}{1 - Fr^2} \quad (4)$$

Phương trình (4) có dạng tương tự phương trình khảo sát đường mặt nước trên kênh thông thường. Phương trình cho thấy trên mỗi vi phân đoạn kênh biến lượng, thành phần tử số liên quan đến chiều sâu h_ℓ mà tại đó $dh/dx = 0$ hay $S_\ell = S_0$. Mẫu số của (4) liên quan đến chiều sâu phân giới h_c mà tại đó $dh/dx \rightarrow \infty$ hay $Fr^2 = 1$ [5][7][18][19].

Như vậy, để khảo sát dạng đường mặt nước trên kênh biến lượng, chiều sâu h_ℓ và h_c cần được xác định. Đường đặc trưng h_ℓ và h_c trên kênh biến lượng tăng dần theo chiều dòng chảy

mà không phải là đường thẳng song song đáy kênh như trên kênh thông thường.

Theo giả thiết, tổn thất cột nước dọc theo kênh biến lượng có thể áp dụng công thức Chezy - Manning [7][26]. Từ (3) và (4) xác định được công thức tính chiều sâu h_c trên mỗi đoạn chiều dài Δx của kênh theo (5):

$$S_0 - \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}} - \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

trong đó: R là bán kính thủy lực (m); n là hệ số nhám kênh.

Chiều sâu h_c cũng được xác định cho từng đoạn Δx của kênh nhờ biểu thức [5][7]:

$$Fr^2 = \frac{\alpha Q^2 B}{gA^3} = 1 \Leftrightarrow \frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A^3}{B} \quad (6)$$

trong đó: B là chiều rộng mặt thoáng (m).

Nếu mặt cắt kênh có dạng hình chữ nhật hoặc tam giác thì h_c được tính theo công thức giải tích biến đổi từ biểu thức (6). Nếu mặt cắt kênh có dạng hình thang hoặc bán nguyệt thì h_c có thể xác định theo công thức gần đúng của H.N. Bình [5]:

- Đối với mặt cắt kênh hình bán nguyệt:

$$h_c = 0,5697 \frac{Q^{0,5126}}{D^{0,2815}} \quad (7)$$

- Đối với mặt cắt kênh hình thang:

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2} (c_0 + c_1 \sigma_{CN} + c_2 \sigma_{CN}^2)} \quad (8)$$

trong đó: b là chiều rộng đáy kênh; σ_{CN} là hệ

số không thứ nguyên, $\sigma_{CN} = \frac{m}{b} \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}$; các hệ

số c_0, c_1, c_2 xác định như sau:

+ $c_0 = 1,000$; $c_1 = -1/3$; $c_2 = 0,105$
khi $0 < \sigma_{CN} \leq 1$,

+ $c_0 = 0,939$; $c_1 = -1/5$; $c_2 = 0,031$
khi $1 < \sigma_{CN} \leq 2$,

+ $c_0 = 0,878$; $c_1 = -2/15$; $c_2 = 0,013$

khi $2 < \sigma_{CN} \leq 3$,

+ $c_0 = 0,818$; $c_1 = -2/21$; $c_2 = 0,007$
khi $3 < \sigma_{CN} \leq 4$.

Xét một đoạn kênh có dòng chảy bên gia nhập tự do vào dòng chính. Tập hợp các giá trị h_c và h_c dọc theo kênh thành 2 đường đặc trưng. Chia nửa không gian trên của kênh thành 3 khu vực giới hạn bởi 2 đường đặc trưng nêu trên và đường đáy kênh, được ký hiệu lần lượt là A, B và C. Trong đó, khu vực A: ở trên 2 đường đặc trưng; khu vực B: ở giữa 2 đường đặc trưng; và khu vực C: ở dưới 2 đường đặc trưng.

Dạng đường mặt nước sẽ khác nhau ở các khu vực khác nhau ứng với từng trường hợp độ dốc đáy kênh. Tuy nhiên, kênh có độ dốc nghịch ($S_0 < 0$) không xuất hiện trong thực tế vì làm tăng độ phức tạp của chế độ thủy lực trên kênh và ảnh hưởng đến khả năng tháo. Do đó nghiên cứu chỉ xét các trường hợp kênh có $S_0 \geq 0$.

3. CÁC DẠNG ĐƯỜNG MẶT NƯỚC

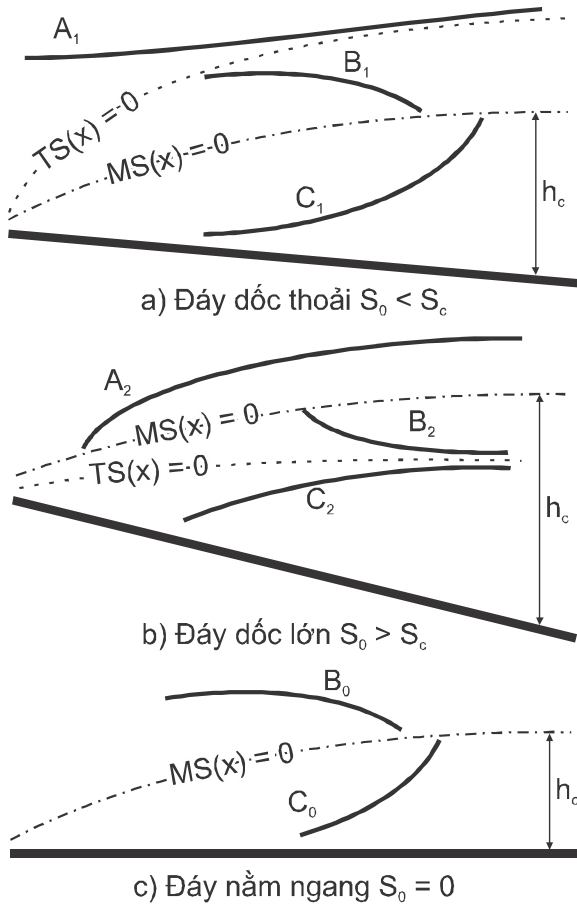
Dạng đường mặt nước trên kênh biến lượng có thể là dâng hoặc hạ phụ thuộc vào dấu của dh/dx . Trạng thái chảy trên kênh là êm hay xiết phụ thuộc vào tương quan giữa chiều sâu dòng chảy (h) với chiều sâu phân giới. Xét từ số (TS) và mẫu số (MS) của (4) như sau:

$$TS(x) = S_0 - S_\ell \quad (9)$$

$$MS(x) = 1 - Fr^2 \quad (10)$$

Trường hợp 1 (đáy dốc thoải - Hình 8a):

- Dòng chảy ở khu vực A_1 : $h > h_\ell > h_c$ thì $S_0 > S_\ell$ nên $TS(x)$ (9) mang dấu "+" và $Fr^2 < 1$ nên $MS(x)$ (10) mang dấu "+", do đó $dh/dx > 0$, hình thành đường nước dâng. Khi $h \rightarrow \infty$ thì $S_\ell \rightarrow 0$ nên $TS(x) \rightarrow S_0$ và $Fr^2 \rightarrow 0$ nên $MS(x) \rightarrow 1$, do đó $dh/dx \rightarrow S_0$. Khi $h \rightarrow h_\ell$ thì $TS(x) \rightarrow 0$ trong khi $MS(x) > 0$ vì $Fr^2 < 1$ ($h > h_c$) nên $dh/dx \rightarrow 0$. Như vậy, đường mặt nước trong khu vực A_1 có bề lõm hướng lên trên, đoạn đầu đường mặt nước có xu thế theo độ dốc đáy kênh và đoạn cuối tăng dần đến tiệm cận đường đặc trưng h_ℓ .



Hình 8: Các dạng đường mặt nước trên kênh lắng trụ có lưu lượng tăng dần theo chiều dòng chảy

- Dòng chảy ở khu vực B₁: $h_\ell > h > h_c$ thì $S_0 < S_\ell$ nên $TS(x)$ mang dấu "-" và $Fr^2 < 1$ nên $MS(x)$ mang dấu "+", do đó $dh/dx < 0$, hình thành đường nước hạ. Khi $h \rightarrow h_c < h_\ell$ thì $S_\ell > S_0$ nên $TS(x) < 0$ và $Fr^2 \rightarrow 1^-$ nên $MS(x) \rightarrow 0^+$, do đó $dh/dx \rightarrow -\infty$. Khi $h \rightarrow h_\ell$ thì $TS(x) \rightarrow 0$ trong khi $MS(x) > 0$ vì $Fr^2 < 1$ ($h > h_c$) nên $dh/dx \rightarrow 0$. Như vậy, đường mặt nước trong khu vực B₁ có bề lõm hướng xuống dưới, đoạn đầu đường mặt nước có xu thế tiệm cận đường đặc trưng h_ℓ và đoạn cuối giảm dần đến h_c , có xu thế tiếp tuyến với phương pháp tuyến của đường đặc trưng h_c .

Bảng 1: Đặc trưng các khu vực đường mặt nước trên kênh bên lắng trụ có dòng biến lượng

Đặc trưng	Khu A	Khu B	Khu C
Đáy kênh có độ dốc thoải ($S_0 < S_c$)			

Đặc trưng	Khu A	Khu B	Khu C
Dấu của $TS(x)$ (9)	"+"	"-"	"-"
Dấu của $MS(x)$ (10)	"+"	"+"	"-"
Dấu của dh/dx (4)	"+"	"-"	"+"
Ký hiệu đường mặt nước	A1	B1	C1
Xu thế đường mặt nước	Dâng	Hạ	Dâng
Trạng thái chảy	Êm	Êm	Xiết
Đáy kênh có độ dốc lớn ($S_0 > S_c$)			
Dấu của $TS(x)$ (9)	"+"	"+"	"-"
Dấu của $MS(x)$ (10)	"+"	"-"	"-"
Dấu của dh/dx (4)	"+"	"-"	"+"
Ký hiệu đường mặt nước	A2	B2	C2
Xu thế đường mặt nước	Dâng	Hạ	Dâng
Trạng thái chảy	Êm	Xiết	Xiết
Đáy kênh nằm ngang ($S_0 = 0$)			
Dấu của $TS(x)$ (9)	Không tồn tại	"-"	"-"
Dấu của $MS(x)$ (10)		"+"	"-"
Dấu của dh/dx (4)	khu A	"-"	"+"
Ký hiệu đường mặt nước	vì không	B0	C0
Xu thế đường mặt nước	tồn tại h_ℓ để	Hạ	Dâng
Trạng thái chảy	$S_\ell = 0$	Êm	Xiết

- Dòng chảy ở khu vực C₁: $h_\ell > h_c > h$ thì $S_0 < S_\ell$ nên $TS(x)$ mang dấu "-" và $Fr^2 > 1$ nên $MS(x)$ cũng mang dấu "-", do đó $dh/dx > 0$, hình thành đường nước dâng. Khi $h \rightarrow h_c < h_\ell$ thì $S_\ell > S_0$ nên $TS(x) < 0$ và $Fr^2 \rightarrow 1^+$ nên $MS(x) \rightarrow 0^-$, do đó $dh/dx \rightarrow \infty$. Như vậy, đường mặt nước trong khu vực C₁ có bề lõm hướng lên trên, đoạn đầu đường mặt nước có xu thế tiệm cận đáy kênh và đoạn cuối tăng dần đến h_c , có xu thế tiếp tuyến với phương pháp tuyến của đường đặc trưng h_c . Trong thực tế

đường mặt nước ở khu vực C₁ khi tới gần h_c sẽ gián đoạn do dòng chảy ở phạm vi phân giới nối tiếp xiết - êm hình thành nước nhảy dọc kênh.

Trường hợp 2 (đáy dốc lớn – Hình 8b) và Trường hợp 3 (đáy nằm ngang – Hình 8c): Thực hiện phân tích sự thay đổi của TS(x) (9) và MS(x) (10) tương tự Trường hợp 1 sẽ nhận được xu thế đường mặt nước trong từng khu vực tương ứng. Bảng 1 thể hiện đặc trưng các khu vực đường mặt nước.

Đường mặt nước trong khu vực A và C là đường nước dâng (dh/dx > 0); khu vực B là đường nước hạ (dh/dx < 0). Dòng chảy trong khu vực A là dòng êm (h > h_c) và khu vực C là dòng xiết. Khu vực B là dòng êm đối với Trường hợp 1, 3 và là dòng xiết đối với Trường hợp 2.

4. ĐƯỜNG MẶT NƯỚC

4.1. Tọa độ điểm giao cắt

Các dạng đường cong mặt nước có thể nối tiếp với nhau. Tại vị trí chuyển tiếp, đường mặt nước có thể cắt qua đường đặc trưng h_ℓ hoặc h_c. Điểm giao cắt là những vị trí quan trọng để khảo sát đường mặt. Tọa độ x_ℓ hoặc x_c có thể tìm được nhờ (4).

Thay Q = qx vào (5) và (6), phương trình (4) được biến đổi thành:

$$\left(1 - \frac{\alpha q^2 x^2 B}{gA^3}\right) dh = \left(S_0 - \frac{n^2 q^2 x^2}{A^2 R^{4/3}} - \frac{2q^2 x}{gA^2}\right) dx \quad (11)$$

Xét kênh biến lượng có chiều dài L, lưu lượng cuối kênh là Q = qL. Khi đường mặt nước chuyển tiếp cắt qua đường đặc trưng h_ℓ hoặc h_c thì dh luôn khác 0, do đó tọa độ vị trí x_ℓ hoặc x_c được xác định như sau:

- Ứng chiều sâu h_c được xác định từ (6) hoặc (7), (8), vế trái của (11) bằng 0, do đó vế phải của (11) là:

$$S_0 - \frac{nq^2 x^2}{A^2 R^{4/3}} - \frac{2q^2 x}{gA^2} = 0$$

$$\frac{n}{R^{4/3}} x^2 + \frac{2}{g} x - \frac{A^2}{q^2} S_0 = 0 \quad (12)$$

Vì n, g, q, A, R là những đại lượng luôn dương

nên $-\frac{n}{R^{4/3}} \frac{A^2}{q^2} S_0 < 0$, do đó phương trình

(12) là dạng phương trình bậc 2 có 2 nghiệm phân biệt trái dấu. Nghiệm dương của (12) được xác định theo (13) là tọa độ x_c cần tìm.

$$x_c = \frac{R^{4/3}}{n} \left(\sqrt{\frac{1}{g} + \frac{nA^2 S_0}{R^{4/3} q^2}} - \frac{1}{g} \right) \quad (13)$$

- Ứng chiều sâu h_ℓ được xác định từ (5), vế phải của (11) bằng 0, do đó vế trái của (11) cũng bằng 0. Tọa độ x_ℓ xác định theo (14).

$$x_\ell = \sqrt{\frac{gA^3}{\alpha q^2 B}} \quad (14)$$

4.2. Đường mặt nước trên kênh có cùng độ dốc với kênh chuyển tiếp

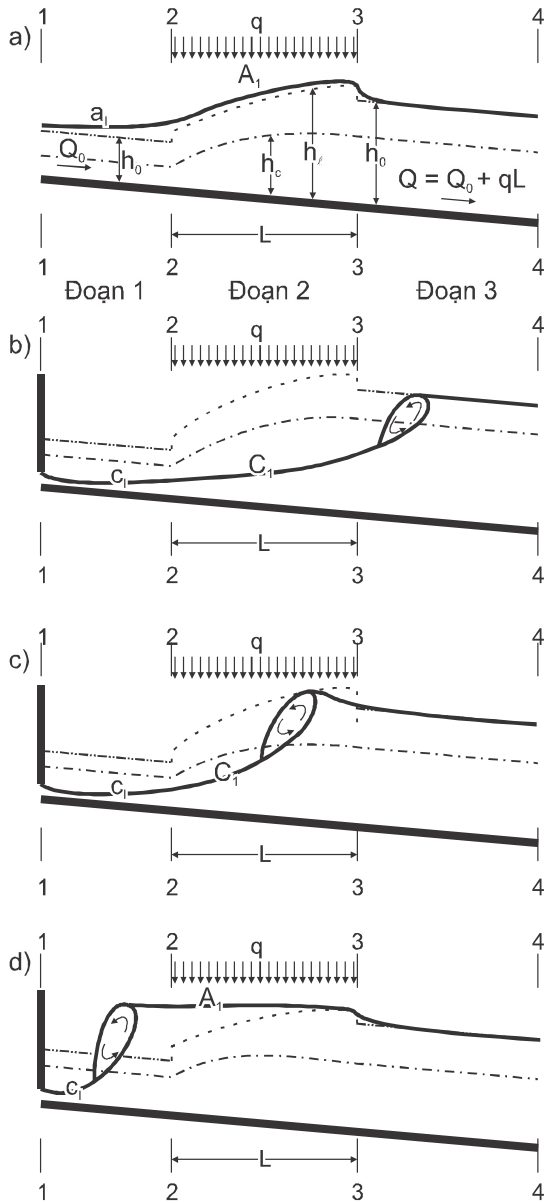
4.2.1. Kênh có dòng biến lượng với lưu lượng gia nhập từ mặt cắt đầu (Q₀ > 0)

Xét kênh lăng trụ có một độ dốc được chia thành 3 đoạn (Hình 9, Hình 10). Đoạn 1 là đoạn kênh thông thường đủ dài phía thượng lưu thượng lưu có lưu lượng ban đầu là Q₀; Đoạn 2 là đoạn kênh biến lượng có dòng gia nhập từ cạnh bên với lưu lượng đơn vị q, chiều dài đoạn là L và Đoạn 3 là đoạn kênh thông thường đủ dài phía hạ lưu. Về mặt định tính có thể có những dạng đường mặt nước như sau:

a. Kênh có độ dốc thoải (S₀ < S_c)

- Trường hợp 1: Khi Đoạn 3 không bị điều tiết thì dòng chảy trên Đoạn 3 là đều ứng với tổng lưu lượng tháo Q = Q₀ + qL. Dòng chảy đều h₀ trên Đoạn 3 là êm và là điều kiện biên để xác định đường mặt nước trên kênh. Mặt khác, lưu lượng trong Đoạn 2 có thể coi là hàm số của h, đường mặt nước thay đổi chậm, phụ thuộc mức độ giảm của đường mặt

nước trên Đoạn 3. Đường mặt nước trên Đoạn 2 là sự nối tiếp từ đường a_1 trên Đoạn 1 sang A_1 và chuyển tiếp dần đến h_0 trên Đoạn 3 (Hình 9a) (a_1 là ký hiệu đường nước dâng chảy êm trên kênh thông thường có $S_0 < S_c$ [7]).



Ghi chú:

- Đường h_0 trên kênh thông thường
- Đường h_c trên kênh thông thường
- Đường $TS(x) = 0$ trên kênh biến lượng
- Đường $MS(x) = 0$ trên kênh biến lượng

Hình 9: Đường mặt nước kênh dốc thoải có dòng biến lượng với lưu lượng gia nhập từ mặt cắt đầu

- Trường hợp 2: Khi dòng chảy trên Đoạn 1 bị điều tiết (như dòng chảy dưới cửa van) thì lưu tốc phía thượng lưu Đoạn 2 lớn kết hợp độ dốc kênh nhỏ hình thành hiện tượng nước dâng. Dòng chảy trong Đoạn 2 là dòng xiết kết hợp dòng êm trên Đoạn 3 hình thành hiện tượng nối tiếp bằng nước nhảy. Đường mặt nước trên Đoạn 2 có dạng C_1 (Hình 9b).

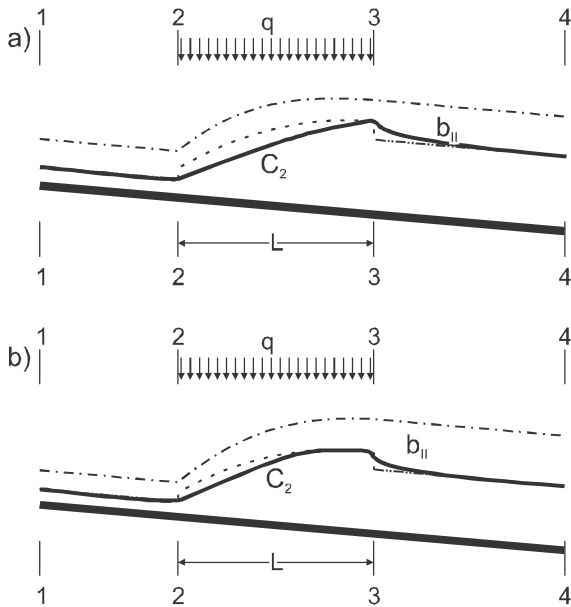
- Trường hợp 3: Khi dòng chảy phía thượng lưu cũng bị điều tiết như trường hợp 2 nhưng thế năng dòng chảy phía hạ lưu lớn nên hiện tượng nước nhảy xảy ra ngay trên Đoạn 2. Đường mặt nước ở Đoạn 2 là C_1 và chuyển tiếp đến h_0 trên Đoạn 3 (Hình 9c).

- Trường hợp 4: Tương tự trường hợp 3 nhưng dòng gia nhập lớn kết hợp mực nước hạ lưu cao, đẩy khu xoáy về Đoạn 1. Đường mặt nước sau khu xoáy có dạng tương tự trường hợp 1 (Hình 9d).

b. Kênh có độ dốc lớn ($S_0 > S_c$)

- Trường hợp 1: Vì kênh có độ dốc lớn nên không xuất hiện hiện tượng nước nhảy. Dòng chảy trên 3 đoạn kênh là dòng xiết. Chiều sâu dòng xiết trên Đoạn 1 được hình thành từ Q_0 và duy trì đến đầu Đoạn 2. Vì độ dốc và hình dạng mặt cắt kênh không đổi nên đường mặt nước trong Đoạn 2 tăng dần đến cuối đoạn (mặt cắt 3-3) với $h_c > h_h > h_0$. Đường mặt nước ở Đoạn 2 là đường nước dâng chảy xiết C_2 nối với đường mặt nước b_{II} trên Đoạn 3 (Hình 10a) (b_{II} là ký hiệu đường mặt nước trên kênh thông thường có $S_0 > S_c$ [7]). Trường hợp này, tọa độ x_l tìm được từ (14) gần mặt cắt (3-3).

- Trường hợp 2: Tương tự trường hợp 1, tuy nhiên tọa độ x_l được tìm từ (14) nằm trong phạm vi Đoạn 2 (Hình 10b) nên từ vị trí x_l đường mặt nước bám theo đường đặc trưng h_l đến mặt cắt (3-3) thì nối tiếp với Đoạn 3 bằng đường nước hạ b_{II} để tiếp cận dòng chảy đều h_0 .



Hình 10: Đường mặt nước kênh dốc lớn có dòng biến lượng với lưu lượng gia nhập từ mặt cắt đầu

4.2.2. Kênh không có lưu lượng gia nhập từ mặt cắt đầu ($Q_0 = 0$)

Xét kênh lắng trụ có một độ dốc, được chia làm 2 đoạn (Hình 11, Hình 12). Đoạn đầu là kênh biến lượng với chiều dài L có lưu lượng đơn vị gia nhập là q (Đoạn 1). Đoạn kênh hạ lưu nối tiếp Đoạn 1 là đoạn kênh thông thường có chiều dài đủ lớn (Đoạn 2).

a. Kênh có độ dốc thoải ($S_0 < S_c$)

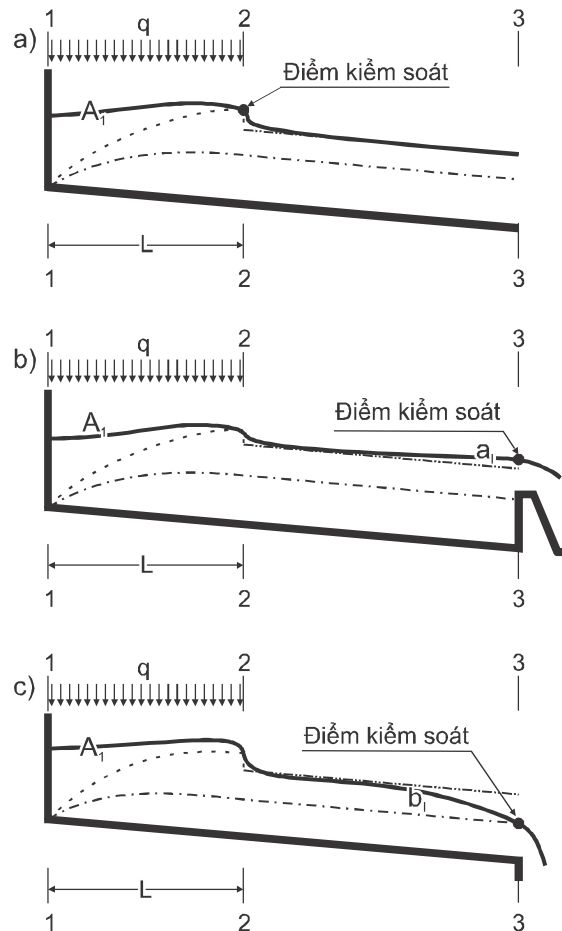
Khi kênh có độ dốc thoải, dòng chảy trên Đoạn 1 là êm. Do đó, để khảo sát đường mặt nước cần xác định chiều sâu dòng chảy tại mặt cắt kiểm soát. Đường mặt nước có thể có các trường hợp sau:

- Trường hợp 1: Đoạn 2 có chiều dài đủ để xuất hiện dòng chảy đều, khi đó mặt cắt kiểm soát của Đoạn 1 có chiều sâu bằng chiều sâu h_c . Tọa độ x_c của điểm kiểm soát được xác định theo (14). Đường mặt nước trên Đoạn 1 là A_1 (Hình 11a).

- Trường hợp 2: Cuối Đoạn 2 có công trình điều tiết dạng ngưỡng tràn, đường mặt nước trên Đoạn 2 là a_1 . Mặt cắt kiểm soát được xác định tại mặt cắt (3-3). Chiều sâu dòng chảy tại mặt cắt kiểm soát lớn hơn h_0 trên Đoạn 2 và được xác định theo công thức đập tràn. Đường

mặt nước trên Đoạn 1 là A_1 . Vị trí giao cắt với đường đặc trưng h_c trên Đoạn 1 được tìm theo (14). (Hình 11b).

- Trường hợp 3: Cuối Đoạn 2 có công trình dạng bậc nước, mặt cắt kiểm soát được xác định là mặt cắt (3-3) với chiều sâu lấy gần đúng bằng h_c trên Đoạn 2. Chiều sâu dòng chảy tại mặt cắt (2-2) được tính từ mặt cắt (3-3) lên như với kênh thông thường. Vị trí giao cắt với đường đặc trưng h_c trên Đoạn 1 được tìm theo (14). Đường mặt nước trên Đoạn 1 là A_1 và trên Đoạn 2 là b_1 (Hình 11c).



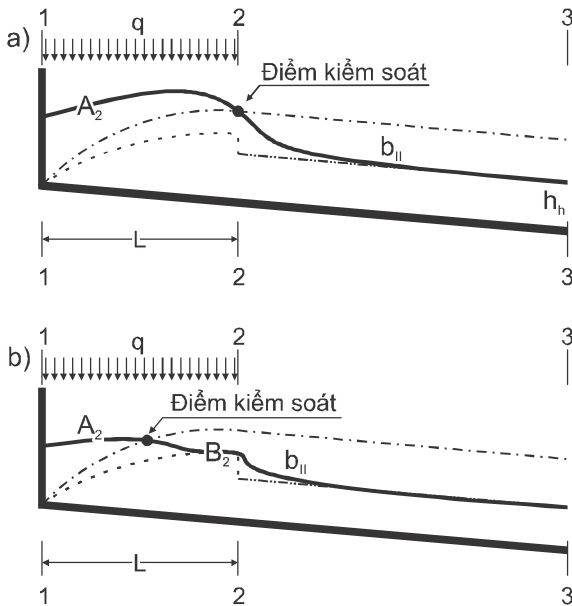
Hình 11: Đường mặt nước trên kênh dốc thoải không có lưu lượng ban đầu

b. Kênh có độ dốc lớn ($S_0 > S_c$)

Khi kênh có độ dốc lớn, kết hợp lưu lượng tăng dần từ đầu Đoạn 1 ($Q = 0$ tại $x = 0$) đến cuối đoạn ($Q = qL$ tại $x = L$) hình thành trạng thái chuyển tiếp từ dòng êm sang dòng xiết. Tại vị trí $x = x_c$ xác định theo (13) dòng chảy có $h = h_c$ được coi là mặt cắt khống chế để xác định

đường mặt nước trên Đoạn 1. Vị trí mặt cắt kiểm soát có thể là mặt cắt cuối hoặc gần cuối ($x_c \leq L$) Đoạn 1. Vì đến cuối Đoạn 1 lưu lượng không gia tăng nên vị trí mặt cắt kiểm soát luôn nằm trong phạm vi Đoạn 1, do đó nếu $x_c > L$ thì coi $x_c = L$. Đường mặt nước có thể có các trường hợp sau:

- Trường hợp 1: Khi $x_c = L$ thì dòng chảy ở trạng thái êm ứng với đường nước dâng A_2 và nối tiếp với đường b_{II} trên Đoạn 2 (Hình 12a).

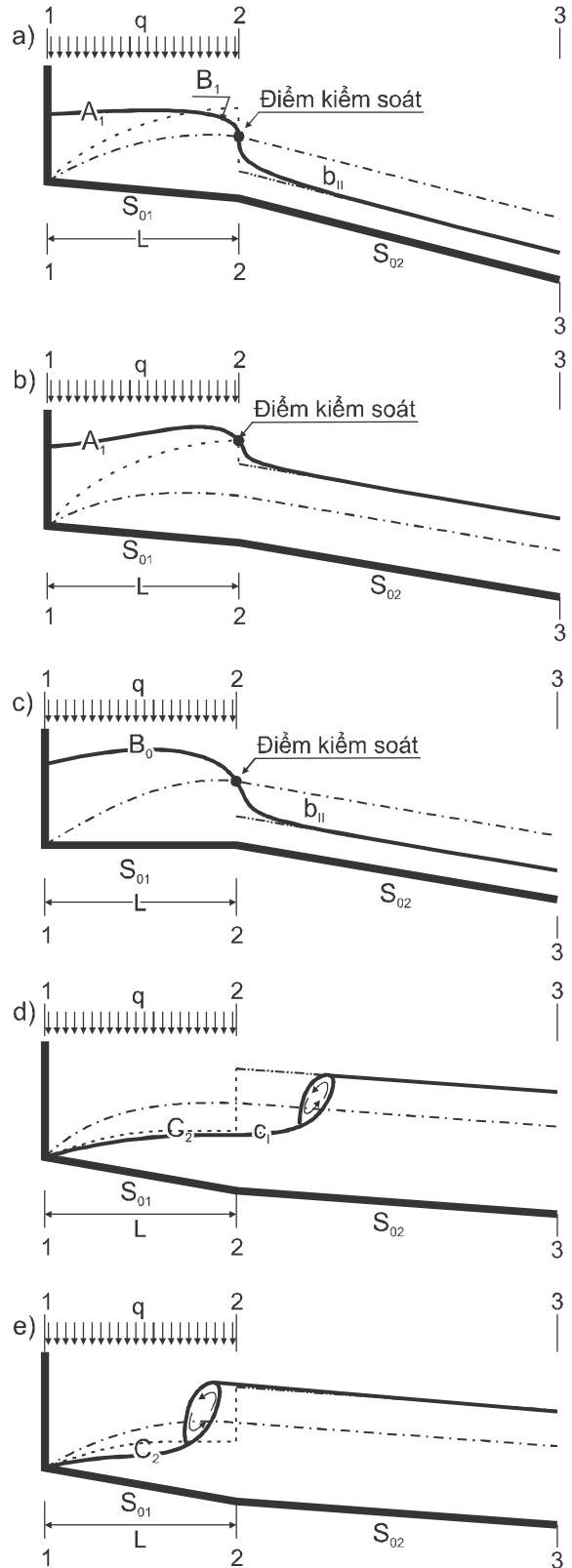


Hình 12: Đường mặt nước trên kênh dốc lớn không có lưu lượng ban đầu

- Trường hợp 2: Khi $x_c < L$ và chiều sâu dòng chảy tại mặt cắt (2-2) lớn hơn h_0 trên Đoạn 2 thì dòng chảy trên Đoạn 1 phía thượng lưu điểm kiểm soát là dòng chảy êm ứng với đường nước dâng A_2 , phía hạ lưu điểm kiểm soát là dòng chảy xiết ứng với đường nước hạ B_2 và nối tiếp với Đoạn 2 bằng đường b_{II} . (Hình 12b).

4.3. Đường mặt nước trên kênh có độ dốc khác kênh chuyển tiếp

Xét đoạn kênh đầu là kênh biến lượng có độ dốc S_{01} (Đoạn 1) và đoạn kênh chuyển tiếp là kênh thông thường có chiều dài đủ lớn với độ dốc S_{02} (Đoạn 2). Trạng thái chuyển tiếp từ Đoạn 1 sang Đoạn 2 có thể là êm - êm, êm - xiết, xiết - êm hoặc xiết - xiết. Một số dạng đường mặt nước điển hình như sau:



Hình 13: Đường mặt nước trên kênh có hai độ dốc

- Trường hợp Đoạn 1 có độ dốc thoải ($S_{01} < S_c$) và Đoạn 2 có độ dốc lớn ($S_{02} > S_c$) là trường hợp thường gặp trong thiết kế. Đường mặt

nước trên Đoạn 1 là đường nước dâng chảy êm A_1 chuyển tiếp sang đường nước hạ chảy êm B_1 trước khi nối tiếp với Đoạn 2 bằng đường b_{II} (Hình 13a). Đường mặt nước cắt 2 đường đặc trưng với tọa độ x_c và x_ℓ tìm từ (13), (14).

- Trường hợp Đoạn 1 và 2 cùng có độ dốc thoải (S_{01} và $S_{02} < S_c$), đường mặt nước trong Đoạn 1 và 2 tương tự trường hợp kênh có cùng độ dốc thoải với kênh hạ lưu (Hình 11a). Tuy nhiên đường mặt nước có thể xuất hiện đường B_1 trước khi chuyển sang dòng chảy đều trên Đoạn 2 nếu $S_{01} > S_{02}$ (Hình 13b). Nếu x_ℓ tìm từ (14) lớn hơn L thì đường mặt nước trong Đoạn 1 không cắt đường đặc trưng h_ℓ .

- Trường hợp Đoạn 1 có đáy nằm ngang ($S_{01} = 0$) và Đoạn 2 có độ dốc lớn ($S_{02} > S_c$), đường mặt nước trên Đoạn 1 là đường B_0 và nối tiếp với kênh hạ lưu bằng đường b_{II} (Hình 13c). Đường B_0 là đường nước hạ chảy êm, tuy nhiên đường mặt nước đoạn đầu có xu thế tăng. Tọa độ x_c của điểm kiểm soát tìm từ (13).

- Trường hợp Đoạn 1 và 2 cùng có độ dốc lớn (S_{01} và $S_{02} > S_c$), đường mặt nước tương tự trường hợp kênh có cùng độ dốc lớn với kênh hạ lưu (Hình 12a).

- Trường hợp Đoạn 1 có độ dốc lớn ($S_{01} > S_c$) và Đoạn 2 có độ dốc thoải ($S_{02} < S_c$) hoặc nằm ngang ($S_{02} = 0$), đường mặt nước trong Đoạn 1 là đường nước dâng chảy xiết C_2 nối tiếp với

dòng chảy êm trên Đoạn 2. Chế độ nối tiếp xiết - êm sẽ hình thành nước nhảy trên Đoạn 2 (Hình 13d) hoặc Đoạn 1 (Hình 13e) phụ thuộc điều kiện thủy lực trên 2 đoạn.

5. KẾT LUẬN

Bằng phương trình động lực (2) viết cho dòng biến lượng ổn định, các dạng đường mặt nước trên kênh lắng trụ có dòng chảy ổn định với lưu lượng tăng dần theo chiều dòng chảy được phân tích. Các dạng đường mặt nước có thể có 8 dạng ứng với trường hợp độ dốc đáy kênh là thoải, dốc lớn hoặc nằm ngang như thể hiện trên Hình 8 và Bảng 1. Đường mặt nước trên kênh có dòng biến lượng có thể tồn tại các dạng chảy êm, chảy xiết kết hợp chế độ chuyển tiếp êm - êm, êm - xiết, xiết - xiết hoặc xiết - êm hình thành nước nhảy dọc kênh phụ thuộc điều kiện thủy lực cụ thể của từng trường hợp như thể hiện trên các Hình 9 đến Hình 13. Thông thường, dòng chảy trong kênh có dòng biến lượng là dòng êm với dạng đường nước dâng hoặc hạ. Tuy nhiên nếu dòng gia nhập phía đầu kênh là dòng chảy xiết như dòng chảy sau cửa van điều tiết thì đường mặt nước có thể có dạng nước dâng chảy xiết.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2021-CT-026.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hoàng Tư An và cs. (2004), *Dòng chảy không gian không ổn định trong hệ thống kênh dẫn hồ của trạm Thủy điện*, Tạp chí Thủy lợi và Môi trường, số 5.
- [2] Beij K. H. (1934), *Flow in roof gutters*, U.S. Dept. of Commerce, Bureau of Standards: Research Paper RP644, Bureau of Standards J. Res., 12, 193–213.
- [3] Hoàng Nam Bình (2019), *Một số nghiên cứu tiêu biểu về dòng biến lượng và máng tràn bên*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ thủy lợi, số 52.
- [4] Hoàng Nam Bình và Nguyễn Quốc Huy (2020), *Thiết lập phương trình dòng biến lượng trong lòng dẫn hồ bằng nguyên lý bảo toàn động lượng*, Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, số 14.
- [5] Hoang Nam Binh (2020), *An approximate formula to calculate the critical depth in circular culvert*, Transport and Communications Science Journal, vol. 71(7), <http://doi.org/10.25073/tcsj.71.7.9>.
- [6] Camp, T. R., (1940), *Lateral spillway channels*, Trans. ASCE, vol. 105, p. 606-637.

- [7] Nguyễn Cảnh Cầm và nnk. (2006), *Thủy lực, Tập 1 + 2*, NXB. Nông nghiệp, Hà Nội.
- [8] Nguyễn Chiến và Lê Thanh Hùng (2004), *Nghiên cứu quy trình tính toán thủy lực và hợp lý hóa các thông số bố trí máng bên của đường tràn ngang*, Tạp chí Thủy lợi và Môi trường, số 7C.
- [9] Nguyễn Chiến và Hoàng Đình Giáp (2016), *Nghiên cứu bố trí hợp lý máng tràn bên của đường tràn ngang ở hồ chứa nước*, Tuyển tập Hội nghị Khoa học thường niên năm 2016, Trường Đại học Thủy lợi, NXB. Xây dựng, Hà Nội.
- [10] Chow V.T. (1969), *Spatially varied flow equations*, Water resources research, University of Illinois, Urbana, Illinois 61801, Vol. 5, No. 5, p.1124-1128;
- [11] Citrini D. (1942), *Canali rettangolari con portata e larghezza gradualmente variabili (Rectangular channels with gradually-varied discharge and width)*. L'Energia Elettrica 19(5), 254-262; 19(6), 297-301 [in Italian].
- [12] Nguyễn Văn Cung và cs. (1964), *Dòng biến lượng và đập tràn ngang*, Tạp chí Khoa học Kỹ thuật, số 18;
- [13] Gardarsson S.M. et al. (2015), *Karahnjukar dam spillway: Comparison of operational data and results from hydraulic modelling*, Hydro, Bordeaux, France, No. 22.05.
- [14] Gill M.K. (1977), *Perturbation solution of spatially varied flow in open channels*, Journal of Hydraulic Research, 15:4, 337-350, DOI:10.1080/00221687709499639.
- [15] Hager W. H. (1983), *Open channel hydraulics of flows with increasing discharge*, Journal of Hydraulic Research, 21:3, 177-193, DOI: 10.1080/00221688309499413.
- [16] Hinds, J. (1926), *Side channel spillways: Hydraulic theory, economic factors, and experimental determination of losses*. Trans. ASCE, vol. 89, p. 881-939.
- [17] Keulegan G. H. (1944), *Spatially variable discharge over a sloping plane*. Trans. AGU 6, 956-959.
- [18] Keulegan G. H. (1952), *Determination of critical depth in spatially variable flow*, Proc. 2nd Mid-western Conf. Fluid Mechanics, Ohio State University, 67-80.
- [19] Kiselev K. G. và nnk., (1984), *Sổ tay tính toán thủy lực (bản dịch tiếng Việt)*, NXB. Nông nghiệp.
- [20] Kouchakzadeh S., Vatankhah A.R. (2002), *Spatially varied flow in non-prismatic channels - I: Dynamic equation*, Irrigation and Drainage, John Wiley & Sons, Ltd., 51: 41-50, DOI: 10.1002/ird.36.
- [21] Lucas J. et al. (2015), *Side-Channel Flow: Physical Model Studies*, Journal of Hydraulic Engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001029.
- [22] De Marchi G. (1941), *Canali con portata progressivamente crescente (Channels with progressively increasing discharge)*, L'Energia Elettrica, 18(6), 351-360 (in Italian).
- [23] Maradjieva M. and Kazakov B. (2007), *Hydraulic research on side-channel spillways based on physical modeling and optimization*, University of Architecture, Bulgaria.
- [24] Mohammadi M. (2005), *Spatially Varied Flow in a Side-Channel*, International Journal of Engineering, Vol. 18, No. 4, p.391-400.
- [25] Pooja A., Kulkarni D.R., Vipin C. (2018), *Physical model study of side channel spillway*, International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol 9, Issue 7, pp. 774-782.
- [26] Viện Khoa học Thủy lợi, (2005), *Sổ tay Kỹ thuật thủy lợi, Phần 2 - Công trình thủy lợi, Tập 2 - B. Công trình tháo lũ*, NXB. Nông nghiệp.
- [27] Yen et al. (1971), *Spatially varied open channel flow equations*, Office of Water Resources Research, Washington D.C., USA.