

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ PTNT

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM

NGUYỄN QUỐC HUY

NGHIÊN CỨU MỘT SỐ ĐẶC TRƯNG THỦY ĐỘNG LỰC HỌC
CỦA DÒNG NỐI TIẾP HỖN HỢP MẶT - ĐÁY - NGẬP 3 XOÁY
SAU BẬC THỤT

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT XÂY DỰNG CÔNG TRÌNH THỦY

HÀ NỘI, NĂM 2017

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ PTNT

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM

NGUYỄN QUỐC HUY

NGHIÊN CỨU MỘT SỐ ĐẶC TRƯNG THỦY ĐỘNG LỰC HỌC
CỦA DÒNG NỐI TIẾP HỖN HỢP MẶT - ĐÁY - NGẬP 3 XOÁY
SAU BẬC THỤT

CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT XÂY DỰNG CÔNG TRÌNH THỦY

MÃ SỐ: 62580202

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

PGS.TS LÊ VĂN NGHỊ

HÀ NỘI, NĂM 2017

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nghiên cứu được trình bày trong luận án là trung thực, khách quan và chưa từng được bảo vệ ở bất kỳ học vị nào.

Hà Nội, ngày 21 tháng 04 năm 2017

Tác giả luận án

Nguyễn Quốc Huy

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến người hướng dẫn khoa học của luận án PGS.TS Lê Văn Nghị, Phó giám đốc Phòng Thí nghiệm Trọng điểm Quốc gia về Động lực học sông biển (Phòng TNTĐ), Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam đã tận tình giúp đỡ, khuyến khích tôi suốt quá trình nghiên cứu luận án và cung cấp những cơ sở cần thiết để tôi hoàn thành luận án này.

Tôi xin bày tỏ sự cảm ơn đến Ban Giám đốc, các phòng chức năng và đặc biệt là Trung tâm Nghiên cứu Thủy lực thuộc Phòng TNTĐ cùng cộng sự (cs) đã hỗ trợ và tạo điều kiện tốt nhất cho tôi trong suốt quá trình nghiên cứu, thí nghiệm phục vụ luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn Ban Giám đốc, Trung tâm Đào tạo và Hợp tác quốc tế, Ban Tổ chức - Hành chính, các nhà khoa học thuộc Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam đã nhiệt tình giúp đỡ tôi trong quá trình học tập và nghiên cứu.

Tôi xin chân thành cảm ơn Trường Cao đẳng nghề Cơ điện và Xây dựng Bắc Ninh đã hỗ trợ, động viên và tạo điều kiện tốt nhất cho tôi trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Tôi xin bày tỏ sự cảm ơn đến các nhà khoa học thuộc các Bộ, Ngành, các Trường Đại học, Cao đẳng, Viện nghiên cứu trong cả nước đã tham gia góp ý, giúp đỡ, động viên tôi hoàn thành luận án. Tôi xin cảm ơn Thiếu tá, TS. Nguyễn Ngọc Hưng, Viện Khoa học Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng đã tìm và dịch các tài liệu tiếng Nga giúp tôi trích dẫn trong luận án này.

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn tới bố mẹ, người đã sinh thành và chịu nhiều vất vả để nuôi dưỡng tôi nên người; đặc biệt là người vợ, các em gái, các con, các cháu tôi đã luôn động viên, cổ vũ, giúp đỡ tôi về mọi mặt để tôi cố gắng, phấn đấu hoàn thành luận án tiến sĩ kỹ thuật này.

Hà Nội, ngày 21 tháng 04 năm 2017

Tác giả luận án

Nguyễn Quốc Huy

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	I
LỜI CẢM ƠN	II
MỤC LỤC.....	III
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU CHỦ YẾU VÀ TỪ VIẾT TẮT	VII
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ.....	IX
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	XII
DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH	XIII
MỞ ĐẦU.....	1
1. Tính cấp thiết	1
2. Mục đích nghiên cứu	2
3. Nội dung nghiên cứu.....	2
4. Phạm vi nghiên cứu	3
5. Phương pháp nghiên cứu	3
6. Kết quả đạt được	3
7. Các đóng góp mới của luận án.....	4
8. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn	4
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ CÁC NGHIÊN CỨU NỐI TIẾP, TIÊU NĂNG....	5
1.1. Khái niệm chung về nước nhảy, nối tiếp và tiêu năng ở hạ lưu công trình tháo....	5
1.1.1. Nước nhảy.....	5
1.1.2. Nối tiếp ở hạ lưu công trình tháo	6
1.1.3. Tiêu năng ở hạ lưu công trình tháo	7
1.2. Các phương pháp nghiên cứu thủy lực hạ lưu công trình tháo.....	8
1.2.1. Phương pháp nghiên cứu bằng thực nghiệm	8
1.2.2. Phương pháp nghiên cứu bằng giải tích	9
1.2.3. Phương pháp nghiên cứu bằng mô hình số trị	10
1.3. Nối tiếp bằng dòng đa xoáy ở hạ lưu bậc thụt nhỏ - Bồn tiêu năng	10
1.4. Nước nhảy mặt, mặt đáy hỗn hợp và nối tiếp, tiêu năng sau bậc thụt có góc hất nhỏ hơn 15°	15

1.4.1. Khái quát về nước nhảy mặt	15
1.4.2. Các dạng nối tiếp chảy mặt.....	16
1.4.3. Quan hệ cơ bản của nối tiếp hạ lưu bằng nước nhảy mặt.....	18
1.4.4. Độ sâu giới hạn hình thành nước nhảy mặt sau bậc thụt.....	19
1.4.5. Độ cao bậc thụt nhỏ nhất để hình thành nước nhảy mặt	23
1.4.6. Đặc trưng mặt tự do của nước nhảy mặt.....	24
1.4.7. Đặc trưng nội bộ của dòng chảy mặt	26
1.4.8. Ứng dụng tiêu năng dòng mặt ở Việt Nam.....	28
1.5. Nối tiếp và tiêu năng dòng hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt có góc hất lớn hơn 25° (dòng chảy phễu)	29
1.5.1. Các dạng nối tiếp dòng chảy phễu.....	29
1.5.2. Tiêu năng dòng chảy phễu.....	31
1.6. Kết luận chương 1	32
CHƯƠNG 2: CƠ SỞ PHƯƠNG PHÁP PHƯƠNG PHÁP LUẬN NGHIÊN CỨU CÁC ĐẶC TRƯNG THỦY ĐỘNG LỰC HỌC CỦA DÒNG NỐI TIẾP HỖN HỢP MẶT – ĐÁY – NGẬP 3 XOÁY SAU BẬC THỤT.....	35
2.1. Cơ sở lý thuyết tương tự và mô hình hóa.....	35
2.1.1. Lý thuyết thứ nguyên.....	35
2.1.2. Định lý hàm số π	36
2.1.3. Mô hình hóa.....	37
2.2. Lập phương trình nghiên cứu thực nghiệm	39
2.3. Ứng dụng quy hoạch thực nghiệm trong nghiên cứu các đặc trưng thủy động lực học của dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt (dòng chảy phễu).....	43
2.3.1. Xác định các kịch bản thí nghiệm.....	43
2.3.2. Xác định hàm toán mô tả hệ	45
2.3.3. Các thông số đánh giá độ phù hợp của mô hình hồi quy.....	47
2.3.4. Phân tích tương quan	48
2.4. Mô hình thí nghiệm.....	49
2.4.1. Mô hình.....	49

2.4.2. Bố trí mặt cắt, vị trí, thiết bị đo.....	50
2.4.3. Đánh giá sai số thí nghiệm mô hình	53
2.4.4. Các điều kiện giới hạn mô hình	55
2.4.5. Điều kiện áp dụng trong thực tế.....	56
2.4.6. Quy trình thí nghiệm.....	57
2.5. Kết luận chương 2	57
CHƯƠNG 3: ĐẶC TRƯNG THỦY ĐỘNG LỰC HỌC CỦA DÒNG NỐI TIẾP HỖN HỢP MẶT – ĐÁY – NGẬP 3 XOÁY SAU BẬC THỤT	58
3.1. Giới hạn trên và giới hạn dưới hình thành dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập sau bậc thụt (dòng chảy phễu).....	58
3.1.1. Sự chuyển đổi chế độ nối tiếp ở hạ lưu bậc thụt có tỷ lệ $a/P=0,14\div 0,46$ và góc hắt $\theta=25^0\div 51^0$	58
3.1.2. Dòng chảy phễu và trạng thái giới hạn.....	60
3.1.3. Tương quan của độ sâu giới hạn và các biến thực nghiệm.....	63
3.1.4. Độ sâu dòng chảy nhỏ nhất và lớn nhất hình thành dòng chảy phễu	65
3.2. Đặc trưng hình dạng của dòng chảy phễu	74
3.2.1. Chiều cao nước vòng	74
3.2.2. Chiều dài xoáy cuộn	82
3.3. Phân bố lưu tốc, cấu trúc dòng chảy phễu.....	88
3.3.1. Phân bố lưu tốc trung bình theo chiều dài dòng chảy.....	88
3.3.2. Phân bố lưu tốc đáy theo chiều dòng chảy	89
3.3.3. Sự suy giảm lưu tốc của dòng chảy phễu	89
3.4. Sự tiêu hao năng lượng của dòng chảy phễu	93
3.5. Kết luận chương 3	94
CHƯƠNG 4: QUY TRÌNH TÍNH TOÁN LỰA CHỌN KẾT CẤU MŨI HẮT TẠO DÒNG NỐI TIẾP HỖN HỢP MẶT – ĐÁY – NGẬP 3 XOÁY	96
4.1. Lựa chọn kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu	96
4.1.1. Điều kiện hình thành dòng chảy phễu	96
4.1.2. Lựa chọn chiều cao bậc thụt	98
4.1.3. Lựa chọn bán kính mũi hắt	98

4.1.4. Lựa chọn góc hất theo điều kiện lưu tốc đáy lớn nhất.....	99
4.1.5. Điều kiện áp dụng các công thức thực nghiệm.....	100
4.2. Quy trình tính toán lựa chọn kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu	100
4.2.1. Xác định các thông số công trình	100
4.2.2. Tính toán các thông số đặc trưng dòng chảy.....	102
4.2.3. Xác định bán kính mũi hất (R)	102
4.2.4. Xác định chiều cao đáy mũi hất (a_0).....	102
4.2.5. Xác định góc mũi hất (θ)	103
4.2.6. Xác định chiều cao bậc thụt (a)	103
4.2.7. Tính toán chiều sâu hạ lưu giới hạn (h_{\min} và h_{\max}).....	103
4.2.8. Xác định chiều cao nước vòng và chiều dài khu xoáy dòng chảy phễu ...	103
4.2.9. Xác định lưu tốc dòng chảy sau bậc thụt.....	104
4.2.10. Xác định hiệu quả tiêu năng	104
4.3. Tính toán ứng dụng đối với tràn xả lũ Bản Mòng	104
4.3.1. Giới thiệu chung	104
4.3.2. Xác định các thông số công trình nối tiếp tiêu năng dòng chảy phễu	105
4.3.3. Xác định các đặc trưng nối tiếp tiêu năng dòng chảy phễu sau tràn Bản Mòng	106
4.3.4. Tính toán so sánh khả năng xuất hiện dòng chảy phễu ở hạ lưu tràn Bản Mòng với các góc hất và công thức khác nhau.....	107
4.3.5. Giải pháp gia cố bảo vệ lòng dẫn hạ lưu và so sánh tiêu năng dòng chảy phễu với tiêu năng đáy của tràn Bản Mòng.....	110
4.4. Kết luận chương 4	111
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	112
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ.....	115
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	116
PHỤ LỤC.....	1

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU CHỦ YẾU VÀ TỪ VIẾT TẮT

a: Chiều cao bậc thụt, là độ chênh giữa cao trình mũi hất và đáy kênh hạ lưu

a_{\min} : Chiều cao bậc thụt nhỏ nhất xuất hiện nước nhảy mặt

a_0 : Chiều cao đáy mũi hất, là độ chênh giữa cao trình đáy mũi hất và đáy kênh hạ lưu

B: Tổng chiều rộng tràn nước

BTCT: Bê tông cốt thép

b: Chiều rộng kênh có mặt cắt chữ nhật

$D = R(1 - \cos \theta)$: Độ sâu của mũi hất

Dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt gọi tắt là *Dòng chảy phễu*

E_0 : Năng lượng của dòng chảy ở thượng lưu tính với mặt chuẩn là đáy kênh hạ lưu

E_h : Năng lượng của dòng chảy ở hạ lưu tính với mặt chuẩn là đáy kênh hạ lưu

cs: Cộng sự

$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$: Số Froude

$g = 9,81m/s^2$: Gia tốc trọng trường

HT1, HT3, HT5: Hình thức nối tiếp phóng xạ, hình thức nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy (dòng chảy phễu), hình thức nối tiếp chảy đáy ngập

H, H_0 : Cột nước trên đỉnh tràn, cột nước tràn có kể tới cột nước lưu tốc tới gần

h_1, h_2 : Độ sâu liên hiệp trước và sau nước nhảy đáy

h_a : Cột nước áp suất dưới dòng chảy sau bậc thụt, do áp suất dòng chảy cong gây ra

h_c : Độ sâu dòng chảy tại mặt cắt co hẹp

h_c'' : Độ sâu liên hiệp sau nước nhảy với độ sâu h_c

h_{gh} : Độ sâu phân giới trạng thái nối tiếp bằng nước nhảy sau mũi hất

h_h : Độ sâu dòng chảy ở hạ lưu công trình

h_k : Độ sâu dòng chảy phân giới (độ sâu phân giới)

h_{\min}, h_{\max} : Độ sâu dòng chảy hạ lưu nhỏ nhất, lớn nhất xuất hiện dòng chảy phễu

h_v : Chiều cao nước vòng lớn nhất của dòng chảy phễu, chính là độ sâu dòng chảy liên hiệp của xoáy 2 (h_{22})

KB: Kích bản

i, i_k : Độ dốc đáy kênh, độ dốc phân giới của dòng chảy

P: Chiều cao đập tràn tính với cao trình đáy kênh hạ lưu, $P = z_{ng} - z_{đk}$

Q, q: Lưu lượng và tỷ lưu lượng (lưu lượng đơn vị)

q_m, q_{tt} : Lưu lượng đơn vị trong mô hình, trong nguyên hình

R, R_{min} : Bán kính cong mũi hắt, Bán kính mũi hắt nhỏ nhất

S: Hệ số tương quan bội

SS: Sai số chuẩn

r: Hệ số tương quan của các đại lượng khảo sát

Re, Re_{gh} , Re_m : Số Reynolds, số Reynolds giới hạn, số Reynolds ở mô hình

TT, TT2, TT4: Trạng thái, trạng thái giới hạn dưới, trạng thái giới hạn trên

T_{min} , T_{max} : Độ sâu dòng chảy hạ lưu nhỏ nhất, lớn nhất trong nghiên cứu của Peterka

V_1, \bar{V} : Lưu tốc trung bình trước nước nhảy, lưu tốc trung bình thời gian

V_c : Lưu tốc tại mặt cắt co hẹp

V_h : Lưu tốc kênh đáy bằng sau dòng chảy phễu

$z_{đk}$: Cao trình đáy kênh hạ lưu

z_m : Cao trình mũi hắt

z_{min} , z_{max} : Mực nước hạ lưu nhỏ nhất, lớn nhất xuất hiện dòng chảy phễu

z_{ng} : Cao trình đỉnh ngưỡng tràn

z_{tl} , z_{hl} : Cao trình mực nước thượng lưu, hạ lưu

α : Hệ số sửa chữa động năng

α_0 : Hệ số sửa chữa động lượng

$\lambda_L, \lambda_v, \lambda_a$: Tỷ lệ: hình học, vận tốc, gia tốc

φ : Hệ số lưu tốc

ρ : Khối lượng riêng của nước

θ : Góc hắt của mũi hắt, mũi bậc

v: Hệ số nhớt động học

$\Delta h_{gh} = h_{max} - h_{min}$: Giới hạn hình thành dòng chảy phễu

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Nước nhảy hoàn chỉnh	5
Hình 1.2. Hình dạng dòng chảy phễu sau bậc thụt (Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985)	7
Hình 1.3. Dòng đa xoáy của bồn tiêu năng (Peterka, 1958)	11
Hình 1.4. Dòng chảy trong bồn tiêu năng theo nghiên cứu của Schoklitsch (Hager, 1992).....	11
Hình 1.5. Cấu tạo bồn tiêu năng dạng khối (Hager, 1992)	12
Hình 1.6. Sơ đồ tính toán (Peterka, 1958).....	13
Hình 1.7. Hình dạng nước nhảy xuất hiện trong bồn tiêu năng (Peterka, 1958)	14
Hình 1.8. Các chiều sâu hạ lưu giới hạn T/h_c là hàm của Fr_c (Hager, 1992)	15
Hình 1.9. Sơ đồ tính toán nước nhảy mặt	18
Hình 1.10. Sơ đồ bố trí thiết bị thí nghiệm (Kaverin, 2013).....	22
Hình 1.11. Sơ đồ tính nước nhảy sóng sau bậc thụt (Luu Như Phú, 1986)	24
Hình 1.12. Sơ đồ tác dụng của lực (Kaverin, 2012)	25
Hình 1.13. Quan hệ giữa khoảng xuất hiện chuẩn mạch động lớn nhất ở sau bậc thụt theo Froude của nước nhảy mặt và mặt đáy hỗn hợp (Ivanov, 2004).....	27
Hình 1.14. Quan hệ chuẩn mạch động áp suất lớn nhất ở sau bậc thụt với chiều cao tương đối của bậc (Ivanov, 2004)	28
Hình 1.15. Kết quả thí nghiệm xói – phương án bảo vệ hai đầu đập Thạch Nham (Luu Như Phú và cs, 1987)	29
Hình 1.16. Sơ đồ dòng chảy giới hạn tiêu năng dòng chảy phễu (Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985).....	31
Hình 2.1. Sơ đồ đối tượng nghiên cứu thực nghiệm theo quy hoạch thực nghiệm ..	43
Hình 2.2. Cấu tạo, thông số thủy lực dòng chảy phễu và vị trí mặt cắt đo	44
Hình 2.3. Sơ đồ phương pháp holdout	48
Hình 2.4. Sơ đồ bố trí thí nghiệm.....	49
Hình 3.1. Các dạng nối tiếp ở hạ lưu bậc thụt có tỷ lệ $a/P=0,14\div 0,46$ và góc hắt $\theta=25^0\div 51^0$	60

Hình 3.2. Quan hệ giữa số liệu thí nghiệm và số liệu tính toán h_{\min}	71
Hình 3.3. Quan hệ giữa số liệu thí nghiệm và số liệu tính toán h_{\max}	71
Hình 3.4. Quan hệ đại lượng $h_{\min}/h_k \sim a/H$ thực nghiệm và tính toán	72
Hình 3.5. Quan hệ đại lượng $h_{\max}/h_k \sim a/H$ thực nghiệm và tính toán	72
Hình 3.6. Quan hệ h_{gh}/h_k và a/H của góc hắt nhỏ hơn 15^0 và góc hắt lớn hơn 25^0 ...	73
Hình 3.7. Quan hệ chiều cao nước vòng theo mực nước hạ lưu	77
Hình 3.8. Quan hệ $h_v/h_k - a/H$ các trạng thái dòng chảy	77
Hình 3.9. Quan hệ $h_v/h_k - H/E$ các trạng thái dòng chảy.....	78
Hình 3.10. Quan hệ $Fr_c - h_v/h_k$ của trạng thái giới hạn dưới theo a/P	78
Hình 3.11. Quan hệ $Fr_c - h_v/h_k$ với góc hắt 40 độ theo tỷ lệ a/P	79
Hình 3.12. Quan hệ $Fr_c - h_v/h_k$ theo các góc hắt.....	79
Hình 3.13. Quan hệ L/a và a/h_k trạng thái giới hạn dưới và dòng chảy phễu	85
Hình 3.14. Quan hệ L/a và h_h/h_k	86
Hình 3.15. Quan hệ L/a và h_v/a	86
Hình 3.16. Quan hệ L/a và a/h_k theo a/P	87
Hình 3.17. Quan hệ L/a và a/h_k theo góc hắt	87
Hình 3.18. Quan hệ L/a và a/H theo góc hắt với $a/P=0,32$	88
Hình 3.19. Phân bố lưu tốc trung bình mặt cắt dọc theo dòng chảy.....	90
Hình 3.20. Phân bố lưu tốc đáy ở hạ lưu của dòng chảy phễu các góc hắt.....	90
Hình 3.21. Phân bố lưu tốc đáy ở hạ lưu theo các trạng thái nối tiếp.....	91
Hình 3.22. Độ suy giảm giá trị lưu tốc đáy lớn nhất trên kênh hạ lưu của 3 trạng thái nối tiếp.....	91
Hình 3.23. Phân bố giá trị lưu tốc đáy lớn nhất (U_m) và vị trí xuất hiện (L_u).....	92
Hình 3.24. Phân bố lưu tốc đáy ở hạ lưu bậc thụt của dòng chảy phễu.....	92
Hình 3.25. Xu hướng tiêu hao năng lượng các trạng thái theo a/h_h	93
Hình 3.26. Quan hệ hiệu quả tiêu hao năng lượng $\Delta E\% \sim Fr_c$ theo a/h_h	94
Hình 4.1. Quan hệ giữa $(h_{\max}-h_{\min})/h_k$ với a/E theo các trị số a/P và góc hắt.....	97
Hình 4.2. Quan hệ giữa số a/E và a/P để tồn tại dòng chảy phễu	98
Hình 4.3. Quan hệ giữa số Froud và R/h_c dòng chảy phễu.....	99
Hình 4.4. Quan hệ lưu tốc lớn nhất tương đối và góc hắt theo từng cấp lưu lượng 100	

Hình 4.5. Sơ đồ tính toán lựa chọn kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu.....	101
Hình 4.6. Sơ đồ xác định a_0	103
Hình 4.7. Thông số mũi hắt của tràn Bản Mông.....	106
Hình 4.8. Quan hệ Q-h trường hợp góc hắt 40^0	109
Hình 4.9. Quan hệ giới hạn xuất hiện dòng chảy phễu theo số Froude	109
Hình PL 3.1. Phân bố lưu tốc trạng thái giới hạn dưới, góc hắt 40^0 , $a/P=0,39$, $q=0,18m^3/s$ /.....	2
Hình PL 3.2. Phân bố lưu tốc dòng chảy phễu, góc hắt 40^0 , $a/P=0,39$, $q=0,18m^3/s$ /.3	
Hình PL 3.3. Phân bố lưu tốc trạng thái giới hạn trên, góc hắt 40^0 , $a/P=0,39$, $q=0,18m^3/s$ /.....	4
Hình PL 4.1. Kết cấu tiêu năng sau tràn Bản Mông phương án tiêu năng dòng chảy phễu và tiêu năng đáy.....	5

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. Các dạng nối tiếp chảy mặt sau bậc thụt (Cumin, 1948).....	17
Bảng 1.2. Các dạng nối tiếp của dòng chảy phễu (Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985)	30
Bảng 2.1. Thứ nguyên của một số đại lượng thường gặp	35
Bảng 2.2. Các đại lượng được xem xét và thứ nguyên của chúng.....	40
Bảng 2.3. Các thông số kích bản thí nghiệm	45
Bảng 3.1. Kết quả thí nghiệm sự chuyển đổi các TT2 và TT4 sang HT3	61
Bảng 3.2. Hệ số tương quan giữa các đại lượng thứ nguyên	63
Bảng 3.3. Hệ số tương quan giữa các đại lượng không thứ nguyên	64
Bảng 3.4. Số liệu thí nghiệm và tính toán độ sâu dòng chảy nhỏ nhất và lớn nhất ..	66
Bảng 3.5. Tham số tương quan và hệ số hàm thực nghiệm về độ sâu dòng chảy nhỏ nhất và lớn nhất.....	68
Bảng 3.6. Kết quả thí nghiệm chiều cao cột nước vòng	75
Bảng 3.7. Tham số tương quan và hệ số của hàm thực nghiệm đối với h_v	81
Bảng 3.8. Kết quả thí nghiệm chiều dài khu xoáy L_2, L_3 ở dạng không thứ nguyên	82
Bảng 4.1. Tính toán điều kiện a/E tồn tại dòng chảy phễu	96
Bảng 4.2. Quan hệ Q-Z công trình Bản Mòng (Lê Văn Nghị, 2012a)	104
Bảng 4.3. Kết quả tính toán kiểm tra, so sánh cho tràn Bản Mòng	108

DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH

Ảnh 1.1. Nước nhảy mặt	15
Ảnh 2.1. Mô hình thí nghiệm	49
Ảnh 2.2. Thiết bị đo	51

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết

Công trình tháo giữ một vị trí quan trọng trong hệ thống công trình đầu mối hệ thống thủy lợi – thủy điện, nó đảm bảo cho sự làm việc an toàn của công trình và hạ lưu. Công trình tháo rất phong phú về thể loại và đa dạng về hình thức kết cấu, được quan tâm nhiều của các nhà quản lý, nhà khoa học, nhà thiết kế công trình. Trong công trình tháo, bộ phận quan trọng và tốn nhiều công sức nhất là kết cấu tiêu năng và nối tiếp thượng hạ lưu. Việc nghiên cứu các dạng nước nhảy và đặc trưng thủy động lực học của nó nhằm cải thiện tình hình làm việc của kết cấu công trình tiêu năng cũng như để hạn chế ảnh hưởng bất lợi của dòng chảy qua nó tới các công trình khác và lòng dẫn hạ lưu là những vấn đề khoa học luôn mang tính thời sự, có nội dung khoa học lớn và tính thực tiễn cao.

Đặc trưng về nối tiếp, tiêu năng ở hạ lưu công trình tháo rất đa dạng, phức tạp. Trong các nghiên cứu về nước nhảy và công trình tiêu năng thì tiêu năng dòng mặt gắn liền với bậc thụt là một khía cạnh phức tạp nhưng rất có ý nghĩa trong việc phát hiện ra các quy luật dòng chảy sau công trình, nhằm khai thác tối đa lợi ích của các dạng nước nhảy, ứng dụng chúng để tiêu hao năng lượng, ổn định lòng dẫn.

Cho đến nay các nghiên cứu về nối tiếp sau bậc thụt mới tập trung vào: (i) bậc thụt phẳng và chiều cao bậc nhỏ, đó là bậc nước trên các kênh dẫn, bậc nước sau đường ống tháo hay bậc nước do bề tiêu năng thường làm sau công... (ii) bậc thụt phẳng hoặc có góc hắt nhỏ hơn 15° và chiều cao bậc thụt tương đối lớn ($a/P=0,25\div 0,35$), đó là dạng nối tiếp chảy mặt hoặc mặt đáy hỗn hợp ở đập tràn; (iii) bậc thụt có góc hắt lớn hơn 15° và chiều cao bậc thụt rất nhỏ ($a=0,05R$), đó là các dạng nối tiếp đa xoáy - bồn tiêu năng ở đập tràn; (iv) bậc thụt có góc hắt lớn hơn 25° và chiều cao bậc rất lớn, đó là dạng nối tiếp phóng xạ ở đập tràn.

Một hình thức nối tiếp còn ít được quan tâm với bậc thụt mũi hắt cong, có góc hắt lớn hơn 25° và chiều cao bậc thụt tương đối lớn, đó là dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy ở sau công trình tháo có bậc thụt.

Dòng chảy nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt tạo cuộn nước hình phễu theo phương ngang xuôi chiều dòng chảy (Hình 1.2). Do vậy, trong luận án

này dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt được gọi tắt là dòng chảy phễu.

Hiện nay, có nhiều công trình thủy lợi, thủy điện với đập không cao lắm được bố trí xây dựng tại khu vực sông có mực nước hạ lưu cao, ổn định và nền địa chất tương đối tốt có thể áp dụng tiêu năng dòng chảy phễu như: tràn Bản Mòng thuộc hồ chứa Bản Mòng, tràn thủy điện Khe Bó, tỉnh Nghệ An; tràn Hồi Xuân thuộc thủy điện Hồi Xuân tỉnh Thanh Hóa...

Chính vì vậy, đề tài luận án “Nghiên cứu một số đặc trưng thủy động lực học của dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt” sẽ làm mở rộng hơn các hiểu biết về nước nhảy mặt, gồm: điều kiện hình thành và đặc trưng thủy động lực học cơ bản của dòng chảy phễu, góp phần làm phong phú hơn các kết quả nghiên cứu thực nghiệm về nối tiếp dòng chảy mặt, từng bước hoàn thiện lý luận, tính toán nước nhảy và tiêu năng ở hạ lưu công trình tháo.

2. Mục đích nghiên cứu

Nghiên cứu điều kiện hình thành và một số đặc trưng thủy động lực học cơ bản của dòng chảy phễu (kích thước hình học các khu xoáy, phân bố vận tốc). Từ đó đề xuất hình thức kết cấu bậc thụt để phát sinh và ổn định dòng chảy phễu sau công trình tháo.

3. Nội dung nghiên cứu

- + Nghiên cứu thực nghiệm trên mô hình vật lý: xử lý, phân tích các số liệu thí nghiệm;
- + Sự chuyển đổi các dạng nối tiếp của dòng chảy ở hạ lưu bậc thụt có tỷ lệ $a/P=0,14\div 0,46$ và góc hắt $\theta=25^0\div 51^0$;
- + Điều kiện hình thành dòng chảy phễu;
- + Một số đặc trưng hình học của dòng chảy phễu: kích thước hình học các khu xoáy theo phương đứng và phương dọc dòng chảy;
- + Các đặc trưng về phân bố lưu tốc lớn nhất, lưu tốc đáy dòng chảy phễu;
- + Các đặc trưng tiêu hao năng lượng của dòng chảy phễu;
- + Quy trình tính toán lựa chọn kết cấu bậc thụt để phát sinh và ổn định dòng chảy phễu sau công trình tháo.

4. Phạm vi nghiên cứu

Dòng chảy nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy (dòng chảy phễu) được nghiên cứu trong phạm vi giới hạn sau:

- + Bài toán phẳng, dòng chảy không đều biến đổi dần;
- + Dòng chảy tự do không điều tiết qua cửa van;
- + Số Froude $Fr=1,35\div 4,5$;
- + Bậc thụt có tỷ lệ chiều cao bậc thụt so với chiều cao đập $a/P=0,14\div 0,46$;
- + Bậc thụt có mũi hắt cong, dạng liên tục (không có rãnh), góc hắt $\theta=25^0\div 51^0$, đỉnh mũi hắt thấp hơn mực nước hạ lưu.

5. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu được áp dụng trong luận án gồm:

- + Điều tra, phân tích hiện trạng, phân tích lý luận để xác định nội dung và hướng nghiên cứu;
- + Thí nghiệm trên mô hình vật lý: sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm và mô hình vật lý để nghiên cứu, xác định các thông số hình học, đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy phễu.
- + Phân tích thứ nguyên: ứng dụng phương pháp Buckingham để xác định các chuỗi thí nghiệm và phương pháp phân tích không thứ nguyên để thiết lập các quan hệ thực nghiệm;
- + Phân tích số liệu thực nghiệm: sử dụng các phần mềm chuyên dụng về xử lý số liệu thực nghiệm nhằm thiết lập các quan hệ từ số liệu thí nghiệm.

6. Kết quả đạt được

- + Phân tích thực trạng hiện nay của vấn đề nghiên cứu;
- + Xác định được sự chuyển đổi các dạng nối tiếp dòng chảy sau bậc thụt có tỷ lệ $a/P=0,14\div 0,46$, mũi hắt cong, góc hắt $\theta=25^0\div 51^0$;
- + Xác định được độ sâu dòng chảy ở hạ lưu là giới hạn xuất hiện dòng chảy phễu;
- + Xác định được một số đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy phễu gồm: kích thước theo phương đứng và phương ngang của các khu xoáy, phân bố lưu tốc đáy lớn nhất, mức độ tiêu hao năng lượng;

+ Xây dựng được các quan hệ thực nghiệm về phân bố lưu tốc, mức độ tiêu hao năng lượng, điều kiện hình thành của dòng chảy phễu;

+ Đề xuất được quy trình tính toán lựa chọn hình thức kết cấu bậc thụt để phát sinh và ổn định dòng chảy phễu sau công trình tháo.

7. Các đóng góp mới của luận án

Qua thực nghiệm trên mô hình vật lý, bằng phương pháp phân tích xử lý số liệu hiện đại, đảm bảo độ tin cậy, luận án đã thu được các kết quả mới sau:

(1) Xây dựng được các công thức thực nghiệm xác định giới hạn trên h_{\max} , giới hạn dưới h_{\min} của cột nước hạ lưu để tạo dòng nối tiếp mặt – đáy – ngập 3 xoáy và chiều cao nước vòng h_v của dòng nối tiếp hỗn hợp sau bậc thụt có mũi hắt cong, góc hắt từ 25^0 đến 51^0 .

(2) Đề xuất được hình dạng và kích thước của bậc thụt, mũi hắt để đảm bảo ổn định chế độ nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt.

(3) Thiết lập được quy trình tính toán lựa chọn kết cấu mũi hắt tạo dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy và xác định các đặc trưng thủy động lực dòng nối tiếp hỗn hợp sau bậc thụt.

8. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Ý nghĩa khoa học: Luận án đã làm sáng tỏ và mở rộng hơn các hiểu biết về nước nhảy mặt, đặc biệt là dòng chảy phễu ở hạ lưu công trình tháo, về điều kiện hình thành và các đặc trưng thủy động lực học cơ bản của nó;

Luận án cũng làm phong phú hơn các kết quả thực nghiệm về dòng chảy phễu, từng bước góp phần hoàn thiện lý luận nghiên cứu, tính toán nước nhảy và tiêu năng dòng chảy ở hạ lưu công trình tháo.

Ý nghĩa thực tiễn: Từ các điều kiện hình thành, tồn tại và các đặc trưng cơ bản của dòng chảy phễu, luận án đã xác định được cơ sở khoa học để thiết kế kết cấu bậc thụt có chiều cao, mũi cong và góc hắt lớn nhằm tạo ra dạng tiêu năng dòng chảy phễu cho hạ lưu công trình, tạo thêm lựa chọn có lợi về kinh tế, kỹ thuật khi thiết kế xây dựng, nâng cấp, sửa chữa, vận hành các công trình tháo.

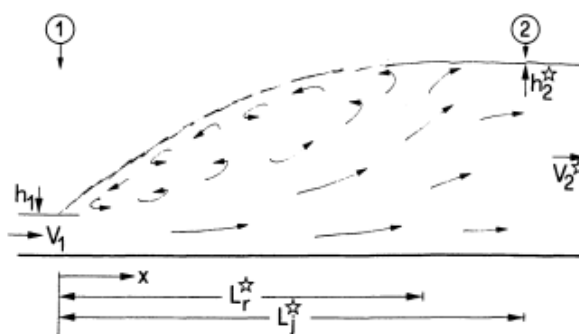
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ CÁC NGHIÊN CỨU NỐI TIẾP, TIÊU NĂNG

1.1. Khái niệm chung về nước nhảy, nối tiếp và tiêu năng ở hạ lưu công trình tháo

1.1.1. Nước nhảy

Nước nhảy là sự mở rộng đột ngột theo phương đứng của dòng chảy từ độ sâu dưới phân giới sang độ sâu trên phân giới. Đó là sự chuyển tiếp của dòng chảy từ trạng thái chảy xiết sang trạng thái chảy êm (Nguyễn Cảnh Cầm và cs, 2006).

Hiện tượng nước nhảy thường gặp ở hạ lưu công trình tháo là hiện tượng đặc trưng nhất của quá trình chuyển đổi xiết – êm. Việc nghiên cứu các đặc trưng của nó có ý nghĩa đặc biệt trong việc thiết kế tiêu năng sau công trình tháo.



Hình 1.1. Nước nhảy hoàn chỉnh

Nước nhảy đã nhận được sự quan tâm nghiên cứu của nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước hàng trăm năm qua bằng nhiều cách tiếp cận và phương pháp khác nhau.

Hình 1.1 thể hiện đặc điểm cơ bản của nước nhảy. Dòng chảy đến được đặc trưng bởi độ sâu dòng chảy h_1 và lưu tốc trung bình $V_1 = Q/(bh_1)$, khi số Froude $Fr_1 = (V_1/\sqrt{gh_1}) > 1$ tại vị trí chân nước nhảy hay đầu nước nhảy ($x=x_1$), là dòng chảy xiết. Xa dần về phía hạ lưu, dòng xiết bị xáo động mạnh bởi nước nhảy và có thiên hướng vòng lên về phía bề mặt, nước và khí trong khu nước nhảy chảy ngược lại, hình thành một vùng xoáy cuộn. Vùng nước xoáy cuộn được giới hạn trong phạm vi chiều dài của dòng xoáy cuộn L_r . Xa hơn nữa về phía hạ lưu, dòng chảy trở nên êm hơn ($Fr_1 < 1$) và bọt khí được thoát ra ngoài. Vị trí kết thúc nước nhảy là vị trí ($x=x_2$) và chiều dài nước nhảy có giá trị $L_j = x_2 - x_1$.

Khi nghiên cứu về nước nhảy, các vấn đề được quan tâm có liên quan đến quá trình chuyển đổi từ trạng thái chảy xiết sang trạng thái chảy êm như sau:

+ Đặc trưng hình dạng của nước nhảy: chiều cao, chiều dài xoáy cuộn (Hager, et al, 1990; Hager, 1989; Pavlov, 1987; Peterka, 1958; ...);

- + Dòng chảy cuộn sóng cao với vận tốc và thành phần áp suất đáng kể (Hager, 1992; Long, et al, 1990);
- + Mạch động của áp suất, vận tốc và phát triển sóng hạ lưu của nước nhảy (Ivanov and Ivanova, 2015; Ivanov, 2004);
- + Dòng chảy hai pha do cuốn theo không khí trong nước nhảy (Skladnev, 1956; Levý, 1955);
- + Xói mòn lòng dẫn do phát triển các phễu xoáy (Hoàng Tur An, 2012);
- + Tiêu hao năng lượng là kết quả của sự xáo trộn mãnh liệt trong xoáy cuộn (Hager, 1992; Peterka, 1958);
- + Nước nhảy trong các điều kiện biên cụ thể như: trên kênh dốc (Mikhalev & Hoàng Tur An, 1976; Rajaratnam, 1967), kênh mở rộng dần (Hoàng Văn Quý, 1979), kênh mở rộng đột ngột (Lê Thị Việt Hà, 2013; Hager & Sinniger, 1985), trên kênh nhám...
- + Và cho các công trình cụ thể (Lê Văn Nghị và cs 2012a, 2012b, 2015b; Trần Quốc Thương và cs 2009; Hager, 1989).

1.1.2. Nối tiếp ở hạ lưu công trình tháo

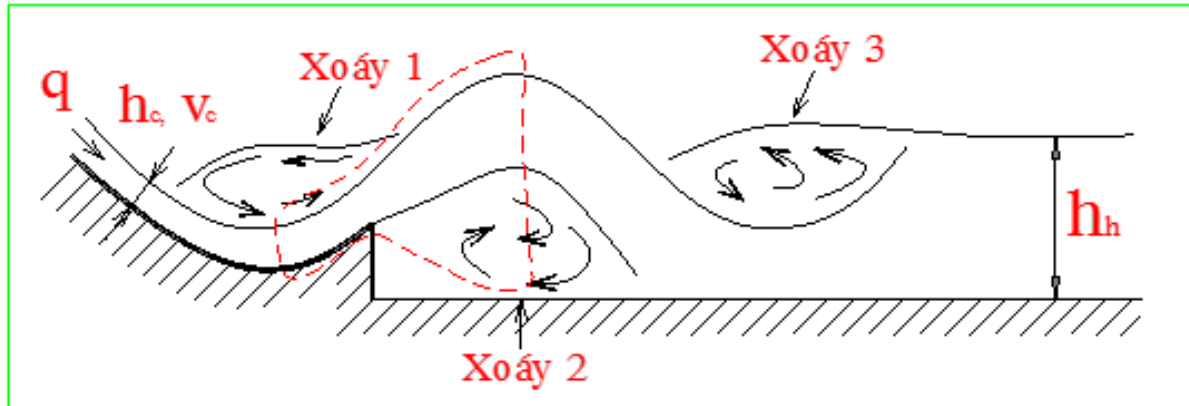
Sự nối tiếp của dòng chảy ở hạ lưu công trình tháo có nhiều dạng khác nhau, có dạng nối tiếp không qua nước nhảy nếu độ dốc đáy kênh hạ lưu lớn hơn độ dốc phân giới ($i > i_k$) hay độ sâu dòng chảy nhỏ hơn độ sâu phân giới ($h_h < h_k$).

Hình thức nối tiếp ở đây chủ yếu nói về trạng thái chuyển đổi xiết - êm thủy lực chứ không phải là hình thức các công trình nối tiếp.

Thông thường, nối tiếp ở hạ lưu công trình tháo có $h_h > h_k$ là hình thức nối tiếp hầu như thông qua nước nhảy. Các hình thức nối tiếp ở hạ lưu đa phần được gắn với sự hình thành nước nhảy bao gồm: nối tiếp chảy đáy - gắn liền với nước nhảy đáy; nối tiếp chảy mặt, gắn liền với nước nhảy mặt; ngoài ra còn có những dạng nối tiếp khác không qua nước nhảy như nối tiếp qua dòng phun tự do (Nguyễn Cảnh Cầm và cs, 2006; Phạm Ngọc Quý, 2003b; Nguyễn Văn Mạo, 2001).

Nối tiếp chảy mặt có nhiều trạng thái chuyển tiếp khác nhau, nó phụ thuộc vào kết cấu bậc thụt và mực nước hạ lưu. Khi chiều cao bậc thụt nhỏ, góc hát lớn hơn 16^0 , nối tiếp dòng đa xoáy sau đập tràn là các nghiên cứu về bồn tiêu năng (Rajan et al, 1982;

Rajan & Shivashanakara Rao, 1980; Peterka, 1958). Khi chiều cao bậc thụt tương đối lớn, góc hất lớn hơn 25° , mực nước hạ lưu ngập mũi hất khiến cho dòng chảy có lưu tốc cao sinh ra dòng xoáy cuộn ở bề mặt và sóng dâng cao ở phía sau bậc thụt tác dụng tương hỗ với dòng xoáy ở mặt, đáy hình thành 3 xoáy (Hình 1.2), đó là nối tiếp dòng chảy phễu (Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985).



Hình 1.2. Hình dạng dòng chảy phễu sau bậc thụt (Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985)

1.1.3. Tiêu năng ở hạ lưu công trình tháo

Dòng chảy sau khi qua đập tràn, xuống hạ lưu có năng lượng rất lớn, nếu không có giải pháp tiêu hao hữu hiệu thì sẽ gây xói lở nghiêm trọng ảnh hưởng đến an toàn công trình.

Công trình tiêu năng là giải pháp công trình được xây dựng nhằm ổn định một hình thức nước nhảy, nối tiếp xiết - êm mong muốn xảy ra và mang lại hiệu quả tiêu năng cao trong từng trường hợp, nhằm đảm bảo an toàn công trình, chống xói lở cục bộ sau công trình, phá hủy lòng dẫn (Nguyễn Văn Cung và cs, 2005; Phạm Ngọc Quý, 2003b; Nguyễn Văn Mạo, 2001).

Dòng chảy ở hạ lưu công trình tháo trong khu vực tiêu năng có các đặc điểm bất lợi như:

- + Lưu tốc lớn, phân bố không đều trên mặt cắt ngang;
- + Khoảng làm việc với mực nước hạ lưu có thay đổi;
- + Mạch động vận tốc và mạch động áp suất dòng chảy xảy ra với mức độ cao;
- + Xuất hiện dòng chảy ngoằn ngoèo, dòng xiên, nước nhảy sóng;

Những đặc điểm trên giải thích vì sao ở hạ lưu công trình tháo thường xảy ra hiện tượng xói cục bộ, mài mòn, xâm thực... Do đó việc giải quyết vấn đề tiêu năng ở hạ lưu công trình tháo là một công việc quan trọng bậc nhất của công trình thủy lợi.

Các hình thức tiêu năng thường được áp dụng ở hạ lưu công trình tháo là:

- + Tiêu năng phóng xa (gắn liền với mũi phun tự do);
- + Tiêu năng đáy (gắn liền với bề tiêu năng và nước nhảy đáy);
- + Tiêu năng mặt (gắn liền với bậc thụt và nước nhảy mặt, mặt đáy hỗn hợp);
- + Và các hình thức tiêu năng đặc biệt khác như tiêu năng dòng phễu, bồn tiêu năng...

Nguyên lý cơ bản của các hình thức tiêu năng là năng lượng thừa được tiêu tán bằng nội ma sát hoặc được tiêu tán bằng xáo trộn với không khí, khuếch tán theo phương đứng và phương ngang.

Các hình thức tiêu năng có liên quan lẫn nhau, khi mực nước hạ lưu thay đổi các hình thức đó có thể chuyển hóa lẫn nhau.

1.2. Các phương pháp nghiên cứu thủy lực hạ lưu công trình tháo

Vấn đề thủy lực công trình, đặc biệt thủy lực ở hạ lưu là một vấn đề phức tạp và vô cùng lý thú. Nó đã, đang và sẽ thu hút nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu, với mục đích tìm hiểu các đặc trưng về hình thức, nội bộ, trạng thái dòng chảy. Từ trước tới nay, có các phương pháp sau được sử dụng: + Nghiên cứu bằng thực nghiệm; + Nghiên cứu bằng giải tích (giải tích toán học và giải tích số) hay được gọi là nghiên cứu lý thuyết; + Nghiên cứu bằng các mô hình số trị, mô hình toán; + Nghiên cứu bằng bán thực nghiệm (kết hợp giữa nghiên cứu bằng thực nghiệm và giải tích).

1.2.1. Phương pháp nghiên cứu bằng thực nghiệm

Nghiên cứu bằng thực nghiệm là tiến hành xây dựng các mô hình của công trình với tỷ lệ nhỏ hơn thực tế theo các luật tương tự và trên đó đo đạc các đại lượng thủy lực (Nguyễn Cảnh Cầm và cs, 2006; Phạm Ngọc Quý, 2003a), hoặc đo đạc tại hiện trường. Phương pháp nghiên cứu này có ưu điểm là nhìn nhận dòng chảy một cách trực quan, sinh động và kết quả của nó được tổng quát hoá thành các công thức thực nghiệm. Mô hình vật lý là công cụ thực nghiệm nhằm phát hiện các đặc tính, quy luật mới của các

hiện tượng tự nhiên và dòng chảy. Nó cho phép tái diễn sinh động trực quan và mở rộng phạm vi các hiện tượng xảy ra trong thiên nhiên mà không cho phép đo đạc nghiên cứu tại hiện trường.

Cùng với sự phát triển của công nghệ đo lường, các thiết bị điện tử, quang học và kỹ thuật số đã giúp cho công tác đo đạc đạt được độ chính xác cao và đo được nhiều đại lượng quan tâm (Sun J. H, J. Kuang and C.T. Hsu, 2003). Trong những năm gần đây, các nghiên cứu thực nghiệm thường đi theo hướng nghiên cứu các đặc trưng thủy lực gắn với đặc trưng rối của dòng chảy, các đặc trưng nội bộ của dòng chảy như phân bố vận tốc, áp lực (Wu S. and Rajaratnam N. 1995), trong những điều kiện cụ thể với biên địa hình đơn giản, thường trong trường hợp bài toán phẳng...

Các công thức thực nghiệm đưa ra chỉ đúng trong một phạm vi nhất định về hình thức công trình, trạng thái chảy và các chỉ số động học của dòng chảy. Các công thức thực nghiệm cho biết các đặc trưng hình học của các hiện tượng thủy lực hạ lưu.

1.2.2. Phương pháp nghiên cứu bằng giải tích

Phương pháp nghiên cứu đặc trưng thủy động lực học bằng giải tích là xuất phát từ hệ phương trình Reynolds hai chiều đứng viết cho chất lỏng nhớt không nén được, với việc bỏ qua các số hạng bé, bằng cách tích phân hệ phương trình vi phân trên toàn dòng chảy thu được phương trình tích phân Karman, phương trình động lượng và phương trình năng lượng.

Trong điều kiện biên địa hình đơn giản, với các giả thiết về phân bố vận tốc (bỏ qua vận tốc theo phương đứng), áp suất (phân bố theo qui luật thủy tĩnh), ma sát đáy (nhấn lý tưởng hoặc độ nhám đều) và các điều kiện biên tại mặt cắt đầu đoạn dòng chảy nghiên cứu, giải phương trình tích phân thu được các biểu thức giải tích hoặc lời giải số các đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy ở hạ lưu công trình tháo (Hoàng Tu An, 2012).

Hướng nghiên cứu này chỉ áp dụng cho từng đoạn của công trình cụ thể, không cho phép tìm lời giải một cách tổng thể, khi nghiên cứu tương tác của các đoạn khác nhau lên dòng chảy hạ lưu, cũng như chỉ thực hiện được với điều kiện biên địa hình ít phức tạp.

1.2.3. Phương pháp nghiên cứu bằng mô hình số trị

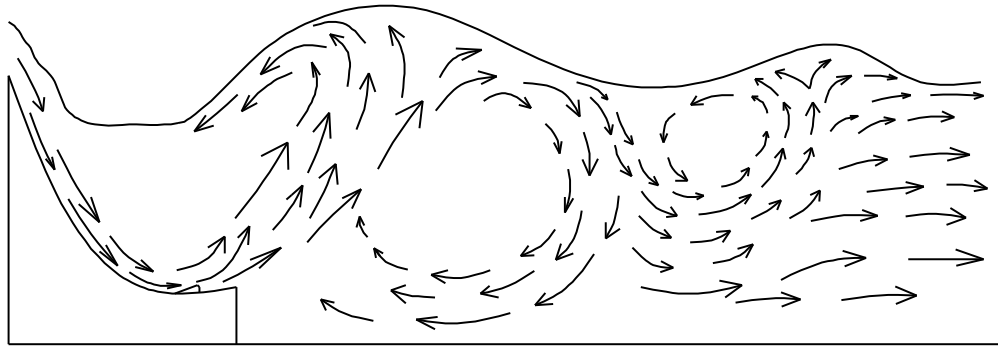
Bên cạnh các phương pháp nghiên cứu truyền thống như đã trình bày ở trên, ngày nay, với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ máy tính, kéo theo các phương pháp số cũng có những bước tiến vượt bậc và trở thành phương pháp nghiên cứu hiện đại trong các ngành cơ học nói chung và cơ học chất lỏng nói riêng. Nhiều mô hình thủy động lực học đã ra đời, cho phép phân tích đặc trưng dòng chảy một cách thuận lợi và hiệu quả xuất phát từ các hệ phương trình vi phân đạo hàm riêng mô phỏng các chuyển động của chất lỏng. Nó tạo bước phát triển mạnh mẽ trong nghiên cứu các vấn đề về thủy động lực học dòng chảy.

Ngày nay phương pháp số đã cho ra đời các phần mềm nổi tiếng để tính toán thủy lực cho nhiều bài toán trong kỹ thuật như Flow 3D (Flow Science, Inc, 2012), Fluend, MIKE, Telemac,.. Đặc biệt Flow 3D đã mô phỏng được mọi đối tượng của thủy lực, được sử dụng để phân tích tương tác thủy lực và vật rắn rất hữu hiệu cho các bài toán đơn xoáy và đa xoáy. Nhưng để có lời giải tương đối tốt thì cần có kết quả từ mô hình vật lý để hiệu chỉnh và kiểm định mô hình, cùng với siêu máy tính. Giá thành mô phỏng 3D ngày nay cũng là một vấn đề với người nghiên cứu, cùng thời gian tính toán một trường hợp lên đến hơn vài ngày đã làm cho mô phỏng toán học không còn có lợi thế kinh tế so với mô hình vật lý.

Mô hình toán học và mô hình vật lý đã bổ sung, hỗ trợ nhau trong nghiên cứu thủy động lực học và thu được nhiều kết quả to lớn. Mô hình toán học tìm ra các trường hợp bất lợi và định hướng cho nghiên cứu thực nghiệm bằng mô hình vật lý. Ngược lại, mô hình vật lý cung cấp các số liệu để kiểm chứng và hiệu chỉnh mô hình toán học, cũng như hoàn chỉnh các công thức, phương trình biểu diễn chuyển động tạo cho mô hình toán khả năng mô phỏng chính xác hơn (Lê Văn Nghị, 2005).

1.3. Nối tiếp bằng dòng đa xoáy ở hạ lưu bậc thực nhỏ - Bồn tiêu năng

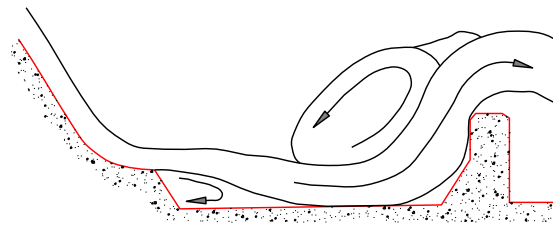
Bồn tiêu năng là kết cấu mũi hắt có góc hắt lớn hơn 16^0 đặt ở chân phía hạ lưu của đập tràn với chiều cao bậc thực rất nhỏ, có tác dụng hắt dòng chảy lên mặt hình thành dòng chảy đa xoáy đứng ở hạ lưu công trình tháo (Hình 1.3).



Hình 1.3. Dòng đa xoáy của bồn tiêu năng (Peterka, 1958)

Năm 1932, Schoklitsch công bố kết quả nghiên cứu về bồn tiêu năng (Hager, 1992). Với nghiên cứu của mình, ông đã tích hợp một ngưỡng cong vào một máng dốc và một bể ngập nước mà theo đó một phần của dòng chảy bị ép thành dòng chảy ngược cản trở dòng chảy chính. Schoklitsch đã giải thích một chu trình mà các bộ phận của dòng chảy được hình thành đối với loại công trình bồn tiêu năng.

Ứng với giá trị lưu lượng dòng chảy lớn nhất (Hình 1.4), dòng chảy chính phóng xa và vùng dòng chảy cuộn tròn trên mặt không xuất hiện. Khi đó có thể nói rằng quá trình tiêu tán năng lượng dòng chảy là không đáng kể.



Hình 1.4. Dòng chảy trong bồn tiêu năng theo nghiên cứu của Schoklitsch (Hager, 1992)

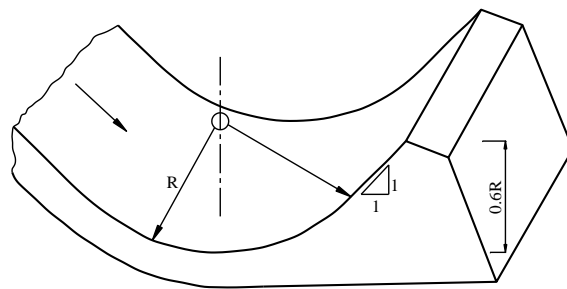
Kết quả cho thấy loại công trình tiêu năng dạng này có những hạn chế nhất định khi áp dụng.

Năm 1955, Gandolfo & Cotta đã công bố kết quả nghiên cứu về ảnh hưởng của mức độ ngập đến khả năng làm việc của công trình bồn tiêu năng (Hager, 1992). Các tác giả cho rằng hiệu quả tiêu năng của công trình và khả năng xói lở phụ thuộc rất nhiều vào mực nước hạ lưu.

Một nghiên cứu khác được thực hiện bởi McPherson & Karr với mục tiêu phát triển về hình dạng của bồn tiêu năng, cụ thể là một vòm cong tròn nối tiếp giữa đường tràn và ngưỡng bể tiêu năng đã được đề xuất (Hager, 1992). Một số thông số chính xác được đưa ra để thiết kế như: + độ sâu mực nước hạ lưu; + mối quan hệ giữa dòng chảy

đến và độ sâu mực nước hạ lưu ứng với chiều cao mũi hất, chiều cao của ngưỡng mũi hất cho bồn tiêu năng dạng khối có mũi hất cong (Hình 1.5).

Elevatorsky chỉ ra rằng bán kính nhỏ nhất R_{\min} của mũi hất cong ứng với độ sâu nối tiếp h_1 chỉ phụ thuộc vào số Froude. Năm 1957, Thomas đã tiến hành phân tích về trường lưu tốc, khả năng xói và phân bố áp suất dọc theo vòm cong tròn trong mô hình thí nghiệm đập Grand Coulee với ba tỷ lệ khác nhau.

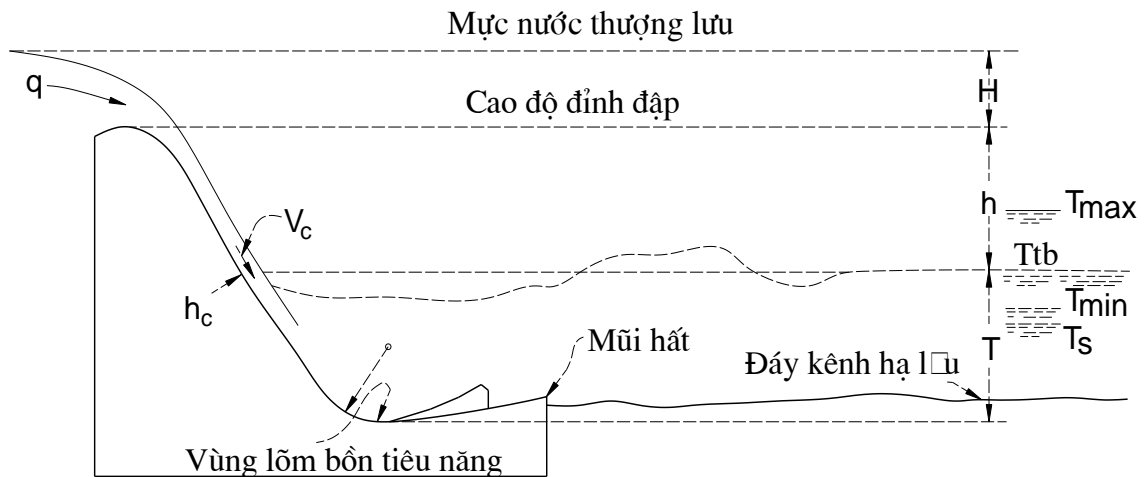


Hình 1.5. Cấu tạo bồn tiêu năng dạng khối (Hager, 1992)

Kết quả thí nghiệm cho thấy lưu tốc và phân bố áp suất đáy có quan hệ đồng nhất với nhau ở các mô hình có tỷ lệ 1: 15 và 1: 40. Trong khi đó với mô hình tỷ lệ 1: 20, mối quan hệ giữa hai đại lượng này xuất hiện một vài giá trị sai lệch (Hager, 1992). Kết quả thí nghiệm về xói chịu sự ảnh hưởng rất lớn bởi tác động của tường bên và vì vậy không có sự so sánh nào được đưa ra giữa các mô hình.

Rajan & Shivashanakara Rao (1980); Rajan *et al* (1982) đã tổng hợp nguyên lý thiết kế cho các loại bồn tiêu năng dạng khối. Độ dốc của máng nối tiếp nên trong khoảng $(25^{\circ} \div 55^{\circ})$. Mũi hất nên có hình dạng cung tròn cho dù các hình dạng khác vẫn chưa được phân tích, đánh giá một cách có hệ thống. Bán kính cung tròn có thể được xác định từ công thức (1-1). Góc của ngưỡng mũi phun nên trong khoảng giá trị $(30^{\circ} \div 45^{\circ})$ và độ dày của ngưỡng thường nhỏ hơn 10% giá trị bán kính cong của bồn tiêu năng. Ngoài ra, độ dốc của ngưỡng nên được chọn với giá trị là 10%.

Cao độ đáy vòm phụ thuộc rất nhiều vào trạng thái mực nước hạ lưu. Thông thường cao độ của đáy vòm dạng mũi phun và dạng bẻ là bằng nhau. Giá trị nhỏ nhất tương ứng 110% hoặc thậm chí là 130% giá trị độ sâu nối tiếp liên quan đến nước nhảy hoàn chỉnh khuyến cáo được bố trí. Cột nước áp suất bổ sung trên mũi phun gây ra bởi lực ly tâm có thể xấp xỉ giá trị: $\frac{\Delta P}{(\rho g h_c)} = \frac{h_c}{R} Fr_c$. Độ cao của các tường hướng dòng nên cao hơn độ sâu mực nước hạ lưu ít nhất là 10%. Các nghiên cứu mô hình được khuyến cáo sử dụng khi giá trị lưu lượng đơn vị lớn hơn $45 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ hoặc lưu tốc đến gần V_c có giá trị lớn hơn 20m/s.

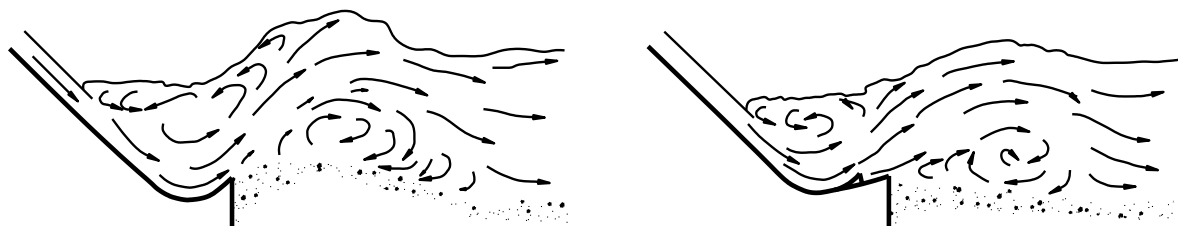


Hình 1.6. Sơ đồ tính toán (Peterka, 1958)

Một đóng góp quan trọng cho nghiên cứu về bồn tiêu năng dạng mũi phun là của Beichley và Peterka, thông qua công trình tiêu năng được gọi là bể VII (Peterka, 1958). Ông nghiên cứu trên mô hình mặt cắt trong máng dài 13,26m, rộng 60,96cm; với 7 mẫu thiết kế (kịch bản) có góc mũi hút từ $8^{\circ} \div 16^{\circ}$, các răng phân tán được bố trí ở các vị trí khác nhau với vòng cung của bán kính răng từ $45^{\circ} \div 90^{\circ}$, bán kính đoạn cong là: 15,24cm, 22,86cm, 30,48cm và 45,72cm. Mỗi mũi hút được thí nghiệm với một loạt các lưu lượng và chiều sâu hạ lưu khác nhau. Tuy nhiên trong điều kiện thí nghiệm, ông giới hạn chiều cao mũi hút rất nhỏ so với đáy lòng dẫn hạ lưu $a=0,05R$. Ông đã khái quát hóa các thông số thiết kế (Hình 1.6) của một bồn tiêu năng từ các dữ liệu thực nghiệm, trên cơ sở đó xác định mối quan hệ giữa các biến không thứ nguyên.

Với bồn tiêu năng dạng liên tục, tất cả dòng chảy được hướng lên phía trên bởi mũi phun liên tục theo phương ngang (Hình 1.7a). Phểu nước xoáy được hình thành trên bề mặt và dòng chảy có thể phóng xuống phía đáy hình thành vùng dòng chảy mạnh cuộn tròn phía dưới đáy. Cường độ của vùng dòng chảy xoáy bề mặt và vùng dòng chảy cuộn tròn phía đáy phụ thuộc vào mực nước hạ lưu. Vận hành của loại tràn xả lũ không đối xứng có thể gây ra xói mòn trầm trọng hơn bởi loại vật liệu xây mũi phun không thích hợp. Khi lòng dẫn bị xói lở đáng kể bởi dòng nước phóng xa, vùng dòng chảy cuộn tròn phía đáy được hình thành để đẩy dòng chảy từ ngưỡng mũi phun lên bề mặt nước. Vùng dòng chảy cuộn tròn cuốn các vật cặn lắng ở đáy về phía thượng lưu cho đến khi cao độ đáy xấp xỉ bằng với ngưỡng mũi phun. Cường độ của vùng dòng chảy cuộn tròn dưới đáy đồng thời giảm đi cho đến khi không còn khả năng đẩy dòng chảy và khi đó

dòng chảy chính lại bắt đầu phóng xa để bắt đầu một chu kỳ mới. Mô tả này cho thấy rõ giới hạn trên và dưới của quá trình vận hành.



a) Bồn tiêu năng dạng liên tục

b) Bồn tiêu năng dạng rãnh

Hình 1.7. Hình dạng nước nhảy xuất hiện trong bồn tiêu năng (Peterka, 1958)

Hình 1.6 thể hiện sơ đồ cơ bản của loại công trình bồn tiêu năng với h_c là độ sâu dòng chảy đến, T là độ sâu lớp nước mũi phun, và $Fr_c = V_c/\sqrt{gh_c}$ là số Froude của dòng chảy đến gần. Peterka (1958) đề xuất các nguyên tắc thiết kế bồn tiêu năng như sau:

+ Giá trị nhỏ nhất liên quan đến bán kính mũi phun R_{min}/h_c chỉ phụ thuộc vào số Froude tại mặt cắt trước bồn (Fr_c). Từ số liệu thí nghiệm ứng với lưu lượng dòng chảy lớn nhất thu được công thức:

$$\frac{R_{min}}{h_c} = 4(Fr_c)^{1,5}[1 + (0,5)Fr_c^2] \cong 2,2Fr_c^{0,5} \quad (1-1)$$

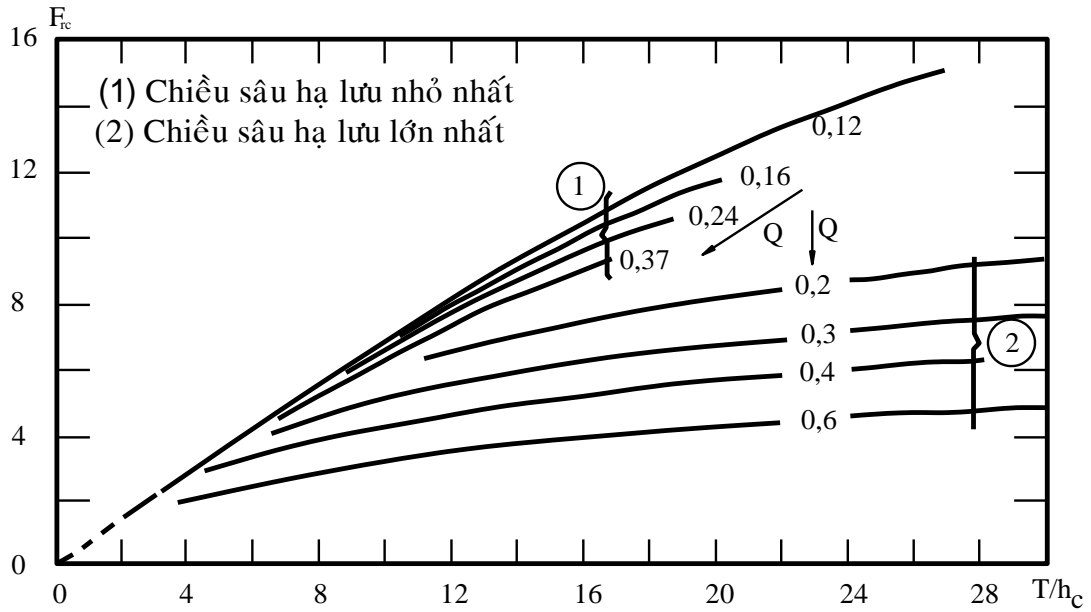
Công thức (1-1) thể hiện rằng bán kính mũi phun sẽ tăng khi giá trị h_c và Fr_c tăng. Công thức này áp dụng cho phạm vi Froude trong khoảng từ (3÷10) và đã kể đến hệ số an toàn. Nếu bán kính R nhỏ hơn giá trị R_{min} thì dòng chảy biến động và các điều kiện dòng chảy không phù hợp sẽ xuất hiện. Ngược lại, nếu giá trị bán kính quá lớn sẽ làm cho thiết kế trở nên tốn kém.

+ Chiều sâu hạ lưu nhỏ nhất (T_{min}) và lớn nhất (T_{max}) phụ thuộc vào trạng thái dòng chảy đến (Fr_c và h_c) và bán kính mũi phun R (Hình 1.8).

Ở đây $H_1 = h_c + V_c^2/2g = h_c(1 + Fr_c^2/2)$ là năng lượng của dòng chảy tại mặt cắt 1. Thiết kế bồn tiêu năng phải được đảm bảo rằng các chiều sâu hạ lưu (T) ứng với tất cả các giá trị lưu lượng phải nằm trong khoảng giá trị $T_{min} < T < T_{max}$.

Viện Nghiên cứu Thủy lợi Tây Bắc, Trung Quốc đã xây dựng được mối quan hệ để tính toán mực nước hạ lưu giới hạn cho dòng chảy trong bồn tiêu năng (Nguyễn Văn Mạo, 2001), theo công thức:

$$\frac{h_h}{h_1 Fr_1} = 1,5 + 0,3 \frac{R(1 - \cos \theta)}{h_0} \quad (1-2)$$

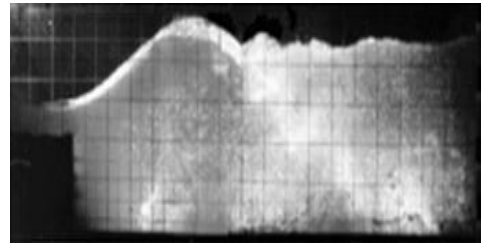


Hình 1.8. Các chiều sâu hạ lưu giới hạn T/h_c là hàm của Fr_c (Hager, 1992)

1.4. Nước nhảy mặt, mặt đáy hỗn hợp và nối tiếp, tiêu năng sau bậc thụt có góc hất nhỏ hơn 15°

1.4.1. Khái quát về nước nhảy mặt

Nước nhảy mặt được phát hiện bởi nhà khoa học Liên Xô là giáo sư A.A. Sabaneyev trong nửa đầu những năm 20 của thế kỷ XX và lần đầu tiên được ứng dụng tại đập nhà máy thủy điện Vol-khov (Ivanov, 2004).



Ảnh 1.1. Nước nhảy mặt

Nước nhảy mặt là nước nhảy trong nối tiếp chảy mặt, tạo ra sau một bậc thẳng đứng được bố trí ở cuối ngưỡng tràn (Ảnh 1.1). Nước nhảy mặt có khả năng tiêu hao năng lượng lớn qua khu xoáy cuộn ở đáy và ở mặt, lưu tốc đáy bé, ít gây xói lở nên giảm bớt các yêu cầu gia cố hạ lưu. Ngoài ra, dòng chảy mặt còn thuận lợi cho việc xả các vật nổi. Nhưng vì dạng nối tiếp dòng chảy mặt luôn biến đổi trạng thái chảy, rất nhạy cảm với mực nước hạ lưu, hay chuyển hóa sang các trạng thái chảy không mong muốn. Mặt

khác, dòng chủ lưu trên mặt sẽ gây ra sóng lớn, ảnh hưởng xấu đến ổn định bờ ở phạm vi lớn cách xa công trình. Vì vậy nó ít được ứng dụng hơn so với nước nhảy đáy.

1.4.2. Các dạng nối tiếp chảy mặt

Vấn đề xác định các chế độ nối tiếp sau đập tràn có bậc thụt và các giới hạn của chúng đã được nghiên cứu tương đối kỹ và được ứng dụng thực tiễn, có thể kể đến các công trình nghiên cứu của: D.I. Cumin (1948), M.D. Chertousov (1952), Rozovsky (1952), S.M. Slissky (1952), T.N. Astaficheva (1952, 1954), Preobrazensky (1954), I.I. Levý (1955), M.F. Skladnev (1956), M.S. Fomichev (1959), N.N. Belyashevsky (1973), N.V. Shragin (1965), O.F. Vasiliev & V.I. Boukreev (1966), N.V. Khalturina (1966), E.P. Kudryavtsev (1967), G.A. Yuditskii (1968), M.A. Mikhalev (1971), A.A. Ivoylov (1981), A.A. Isaev (1982), S.A. Kuzmin & B.M. Ivanov (1982), L.V. Moshkov (1982), A.K. Khanayeva (1982), B.M. Ivanov (2004), Nguyễn Cảnh Cầm và cs (2006), Kaverin (2013)... Phân loại đầy đủ nhất các chế độ nối tiếp sau bậc thụt được đưa ra bởi D.I. Cumin (1948), đa số các số liệu thực nghiệm mà ông nhận được trong mô hình đập tràn có bậc thụt phẳng tiếp tục được sử dụng bởi các nhà nghiên cứu sau này. Trên cơ sở xem xét vị trí của dòng chủ lưu tại hạ lưu theo chiều sâu ở phần nối tiếp có thể là chế độ chảy đáy (vận tốc lớn nằm ở đáy) hoặc chảy mặt (vận tốc lớn tại bề mặt). Tuy nhiên, vẫn có khả năng có các trường hợp đan xen nhau.

Đối với nước nhảy mặt, dạng nước nhảy không phân loại theo số Froude mà khảo sát sự chuyển đổi hình dạng thông qua sự thay đổi mực nước hạ lưu. Bảng 1.1 thể hiện các trạng thái nước nhảy mặt sau bậc thụt phẳng ($\theta=0^0$) khi mực nước hạ lưu tăng dần.







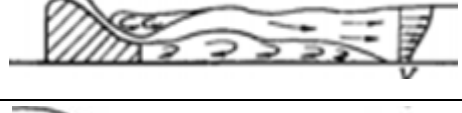

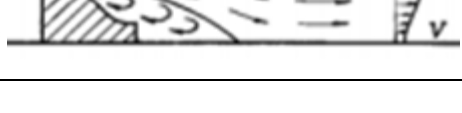
Khi độ sâu dòng chảy hạ lưu còn thấp sẽ xảy ra hiện tượng nước nhảy đáy.

Nếu ở hạ lưu công trình có nước nhảy đáy ngập, thì khi tăng dần độ sâu dòng chảy hạ lưu đến một giới hạn giá trị nào đó sẽ xuất hiện nước nhảy mặt, độ sâu đó gọi là độ sâu phân giới thứ nhất. Nước nhảy mặt hình thành những dạng sóng xuất hiện sau bậc, khu xoáy mặt khi đó sẽ biến mất và tia dòng ở gần công trình sẽ bị tách khỏi đáy và tạo thành một khu xoáy lớn.

Tăng dần độ sâu dòng chảy hạ lưu sẽ thấy xuất hiện dạng nối tiếp bằng nước nhảy mặt ngập. Đặc tính chung của dạng nối tiếp này là hình thành các khu xoáy mặt ở ngay trên bậc thụt công trình. Với một độ sâu tương đối lớn nào đó, tia dòng mặt phóng ra

trên đỉnh sóng, giảm dần lưu tốc và bắt đầu làm ngập khu vực giữa công trình và sóng sau bậc. Độ sâu đó ở hạ lưu làm xuất hiện xoáy mặt, gọi là độ sâu phân giới thứ hai.

Bảng 1.1. Các dạng nối tiếp chảy mặt sau bậc thụt (Cumin, 1948)

TT	Các dạng nối tiếp	Chế độ chảy
1		Chảy đáy
2		Chảy đáy tới hạn
3		Chảy đáy ngập
4		Chảy mặt
5		Chảy mặt đáy hỗn hợp
6		Chảy hỗn hợp mặt đáy ngập
7		Chảy mặt ngập
8		Chảy đáy hồi phục
9		Chảy tràn

Dạng nối tiếp bằng nước nhảy mặt ngập giữ nguyên trong biên độ thay đổi rất rộng của độ sâu dòng chảy hạ lưu. Nhưng khi độ sâu dòng chảy hạ lưu rất lớn, nước nhảy mặt ngập có thể một lần nữa chuyển thành nước nhảy đáy ngập sau bậc. Đặc trưng

đó của dạng nối tiếp là sự xuất hiện xoáy mặt rất lớn so với khu xoáy ở đáy. Dạng nối tiếp này gọi là nước nhảy đáy hồi phục.

Tăng độ sâu dòng chảy hạ lưu sẽ bắt đầu dạng nối tiếp bằng nước nhảy mặt không ngập, tiếp tục tăng độ sâu dòng chảy hạ lưu sẽ xuất hiện nước nhảy mặt – đáy không ngập. Đặc trưng của dạng nối tiếp này là tia nước tràn bị dốc khi ra khỏi bậc, lao xuống đáy hạ lưu ở một khoảng cách nào đó và nối với dòng chảy hạ lưu ở dạng nước nhảy đáy. Trạng thái dòng chảy ở hạ lưu lúc chuyển từ nước nhảy mặt không ngập sang nước nhảy mặt - đáy ngập gọi là trạng thái phân giới thứ ba.

Tiếp tục tăng độ sâu dòng chảy hạ lưu sẽ quan sát được trạng thái nước nhảy mặt – đáy ngập mà đặc trưng của nó là sự xuất hiện khu xoáy mặt thứ hai. Dạng nối tiếp đó gọi là nối tiếp bằng nước nhảy mặt – đáy ngập.

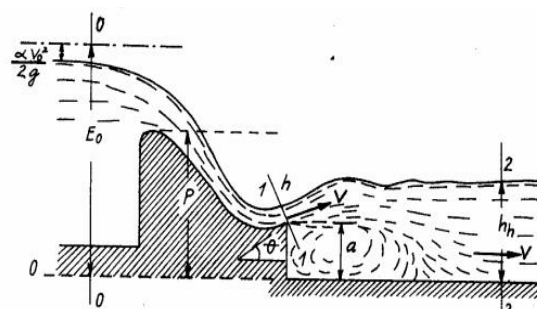
Tiếp theo là dạng nối tiếp bằng nước nhảy mặt ngập và được gọi là nối tiếp bằng nước nhảy mặt ngập hồi phục.

Khi tăng độ sâu mực nước hạ lưu lên cao nữa thì dạng nối tiếp đó có thể chuyển thành nối tiếp bằng nước nhảy đáy ngập trên bậc.

Với độ sâu mực nước hạ lưu rất lớn thì bậc công trình không còn ảnh hưởng đến sự nối tiếp dòng chảy ở hạ lưu. Lúc đó dòng chảy qua công trình là dòng chảy ngập hoàn toàn và do tác dụng của đỉnh đập mà hình thành dòng chảy mặt ở hạ lưu, dạng nối tiếp này gọi là chảy tràn.

1.4.3. Quan hệ cơ bản của nối tiếp hạ lưu bằng nước nhảy mặt

Nghiên cứu nước nhảy mặt trong điều kiện bài toán phẳng, sau bậc thụt có dòng chảy không đều biến đổi dần. Giả thiết rằng, bậc của công trình có mũi cong lên, tiếp tuyến của đường cong tại vị trí dòng chảy đi ra khỏi mũi lập thành với mặt phẳng nằm ngang



Hình 1.9. Sơ đồ tính toán nước nhảy mặt

một góc θ , bậc thẳng đứng, kênh nằm ngang có độ nhám rất nhỏ có thể bỏ qua ma sát (Nguyễn Cảnh Cầm và cs, 2006).

Với giả thiết áp suất ở mặt cắt (1-1), (2-2) và dọc theo chiều cao của bậc công trình phân bố theo quy luật đường thẳng. Phương trình động lượng được viết là:

$$\frac{2\alpha_0 q^2}{ghh_h} (h - h_h \cos \theta) = h_a (h \cos \theta + 2a) + (ah \cos \theta + a^2) - h_h^2 \quad (1-3)$$

Viết phương trình Bernoulli cho mặt cắt (0-0) ở thượng lưu công trình và mặt cắt (1-1) tại mũi bậc, lấy đáy hạ lưu công trình làm mặt chuẩn, thu được phương trình:

$$E_0 - a = h \cos \theta + \frac{1}{2} h_a + \frac{q^2}{2g\varphi^2 h^2} \quad (1-4)$$

Trong đó: h là độ sâu của dòng trên mũi bậc; h_a là cột nước áp suất dưới dòng chảy do áp suất dòng chảy cong gây ra; a là chiều cao bậc thực; φ là hệ số lưu tốc; ξ là hệ số tổn thất cột nước.

$$\varphi = 1/\sqrt{(\alpha + \sum \xi)}.$$

Giải phương trình (1-3) và (1-4) với phương trình bổ sung thứ ba cho phép ta xác định các trạng thái phân giới. Tuy nhiên phương trình (1-3) và (1-4) chỉ áp dụng cho các trường hợp nối tiếp mà dòng chảy trên bậc công trình là tự do, tức là khi nó không bị bao phủ bởi khu nước vật trên mặt. Đối với phương trình thứ ba thường là qui luật phân bố áp suất thu được từ thực nghiệm tại mũi bậc của mỗi trạng thái. T.N. Astaficheva đề nghị sử dụng phương trình thực nghiệm làm phương trình thứ ba như sau:

+ Đối với trạng thái phân giới thứ nhất:

$$h_a = 0,31h_h - 0,5a \quad (1-5)$$

+ Đối với trạng thái phân giới thứ hai:

$$h_a = 0,59 (h_h - a) \quad (1-6)$$

Theo cách này cần dùng các công thức lý thuyết kết hợp với các công thức thực nghiệm để xác định các trạng thái phân giới của nước nhảy mặt.

Rõ ràng rằng, để xác định các chế độ chảy mặt điều quan trọng là phải có các điều kiện bổ trợ, tốt nhất là sử dụng các phương trình thực nghiệm.

1.4.4. Độ sâu giới hạn hình thành nước nhảy mặt sau bậc thực

M.D. Chertousov trên cơ sở phương trình biến thiên động lượng và tài liệu thực nghiệm đã tìm được các trạng thái phân giới trong điều kiện bài toán phẳng bằng quan hệ thực nghiệm (Hoàng Tư An, 2012):

$$\left(\frac{h_h}{h_k}\right)^2 = \frac{a}{h_k} \left(\frac{a}{h_k} + A\right) + 2 \sqrt{2 \frac{E_0}{h_k}} \quad (1-7)$$

Trong đó: A là hệ số thỏa mãn các trạng thái phân giới.

Kết quả nghiên cứu của M.N. Belyashevsky được biểu diễn bằng phương trình:

$$\xi' = \frac{1}{2\Psi_d} \frac{\varepsilon_1^2}{\lambda^2} \left[\frac{4\lambda^2}{\varepsilon_1^2} + \varepsilon_1^2 - \left(\frac{4\lambda^2}{\varepsilon_1} + \varepsilon_1^2 \right) \right] - \frac{\Psi_d \varepsilon_1^2}{2\lambda^2} - \frac{\varepsilon_2^2}{\lambda^2} \quad (1-8)$$

Trong đó: $\varepsilon_1 = \frac{h_1}{E_0}$; $\lambda = \frac{q}{E_0 \sqrt{2gE_0}}$; $\Psi_d = \frac{a}{E_0}$; $\varepsilon_2 = \frac{h_h}{E_0}$

Thông số ξ' xác định được bằng các quan hệ sau:

$$+ \text{Đối với trạng thái phân giới thứ nhất: } \xi'_1 = \frac{0,29}{1+0,085 \frac{\lambda^2}{\varepsilon_1^3}} \quad (1-9)$$

$$+ \text{Đối với trạng thái phân giới thứ hai: } \xi'_2 = \frac{0,43}{1+0,05 \frac{\lambda^2}{\varepsilon_1^3}} \quad (1-10)$$

Giải phương trình (1-8) có thể tìm được quan hệ ở dạng $\varepsilon_2 = f(\lambda, \Psi_d)$.

Bằng lý thuyết lớp biên và dòng tia rời, M.A.Mikhailiev đã tìm được các biểu thức (Hoàng Tư An, 2012) :

+ Đối với trạng thái phân giới thứ nhất:

$$\left(\frac{h_h}{h_1}\right)^3 - \frac{h_h}{h_1} \left(\frac{d}{h_1}\right)^2 + 2\alpha_{02} Fr_1^2 = 0 \quad (1-11)$$

+ Đối với trạng thái phân giới thứ hai:

$$\left(\frac{h_h}{h_1}\right)^3 - \frac{h_h}{h_1} \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^2 + 2\alpha_{02} Fr_1^2 = 0 \quad (1-12)$$

+ Đối với trạng thái phân giới thứ ba:

$$\frac{h_h}{h_1} = \varepsilon_r + \sqrt{\frac{h_0^2}{h_1^2} \xi_2 + \varepsilon_r (1 - \varepsilon_r)} \quad (1-13)$$

Trong đó:

$$d = h_1 \sqrt{2Fr_1^2 + \frac{h_0^2}{h_1^2} \xi_2}; \xi_2 = 1 + 2\varepsilon_r \frac{a}{h_1} \frac{h_1^2}{h_0^2}; \varepsilon_r = Fr_1^2 \ln \left(1 + \frac{h_1}{h_h - h_0} \right); h_0 = a + h_1$$

Tài liệu thí nghiệm của M.F.Skladnev trùng hợp với công thức lý thuyết của M.A.Mikhailiev.

T.N.Astaficheva bằng thực nghiệm, xây dựng được công thức tính toán độ sâu giới hạn ở hạ lưu để hình thành các trạng thái chảy sau bậc thụt đối với đập tràn chảy tự do, cột nước tràn trên đỉnh đập $H \leq \frac{2}{3}P$, góc hất thay đổi từ 0^0 đến 15^0 (Astaficheva, 1952; Nguyễn Văn Cung và cs, 2005):

+ Trạng thái phân giới thứ nhất

$$\frac{h_{gh1}}{h_k} = 0,82 \frac{a}{h_k} - 2 \frac{a}{P} + 2,44 \quad (1-14)$$

+ Trạng thái phân giới thứ hai

$$\frac{h_{gh2}}{h_k} = 1,22 \frac{a}{h_k} - 2,55 \frac{a}{P} + 2,50 \quad (1-15)$$

Biểu thức (1-14) chỉ sử dụng với điều kiện $\frac{a}{P} \geq 0,2$.

Nếu $\frac{a}{P} < 0,2$, T.N.Astaficheva đề nghị dùng biểu thức:

$$\frac{h_{gh1}}{h_k} = 0,82 \frac{a}{h_k} - 7 \frac{a}{P} + 3,44 \quad (1-16)$$

Viện Nghiên cứu Thủy lực Nam Kinh, Trung Quốc, trên cơ sở thu thập các nghiên cứu đã có và tài liệu thí nghiệm của thủy điện Tây Tân đã đề xuất công thức thực nghiệm xác định độ sâu giới hạn h_{gh} ở hạ lưu để hình thành các trạng thái chảy mặt sau bậc thụt (Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985):

+ Trạng thái phân giới thứ nhất: thể hiện từ dạng chảy đáy chuyển sang trạng thái chảy mặt tới hạn.

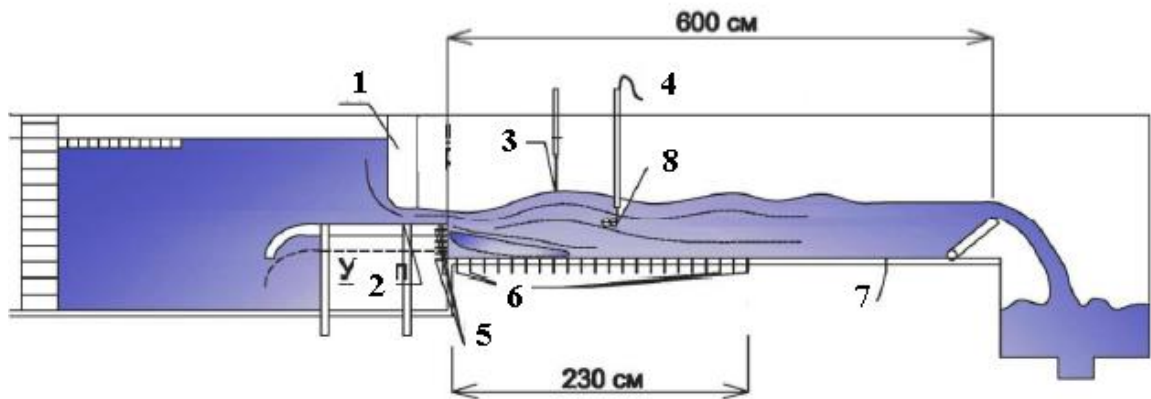
$$\frac{h_{gh1}}{h_k} = 0,84 \frac{a}{h_k} - 1,48 \frac{a}{P} + 2,24 \quad (1-17)$$

+ Trạng thái phân giới thứ hai: thể hiện từ chảy mặt hoặc chảy mặt hỗn hợp chuyển sang trạng thái chảy mặt ngập tới hạn.

$$\frac{h_{gh2}}{h_k} = 1,16 \frac{a}{h_k} - 1,81 \frac{a}{P} + 2,38 \quad (1-18)$$

+ Trạng thái phân giới thứ ba: thể hiện từ trạng thái chảy hỗn hợp ngập sang trạng thái chảy đáy hồi phục.

$$\frac{h_{gh3}}{h_k} = \left(4,33 - 4,0 \frac{a}{P}\right) \frac{a}{h_k} + 0,99 \quad (1-19)$$



- 1-Cửa xả, 2-Bậc thụt; 3-Đo mực nước; 4-Đo tần số; 5-Đo áp lực tại bậc thụt;
6-Đo áp lực tại đáy; 7-Đo áp lực tại phần cuối; 8-Đầu đo.

Hình 1.10. Sơ đồ bố trí thiết bị thí nghiệm (Kaverin, 2013)

Một nghiên cứu gần đây về chế độ chảy mặt sau bậc thụt có độ cao thấp (Kaverin, 2013), tác giả đã tiến hành thí nghiệm trên máng kính với độ dày của dòng ra từ bậc thụt là 8, 10, 12 cm; chiều cao bậc thụt từ (6 ÷ 32) cm, tại phòng thí nghiệm của đại học Saint Petersburg. Các thí nghiệm được tiến hành để xác định giới hạn thay đổi trạng thái chảy, áp lực đáy sau bậc thụt, sự phân bố áp suất theo chiều dài của dòng chảy sau bậc thụt (Hình 1.10). Với hơn 70 thí nghiệm đã được thực hiện trong điều kiện: $0,67 \leq \frac{a}{h_1} \leq 4$ và $1,1 \leq Fr_1 \leq 3$, thu được các quan hệ thực nghiệm xác định mực nước giới hạn xuất hiện nước nhảy mặt như sau:

+ Chiều sâu tương ứng với giới hạn dưới hình thành chế độ chảy mặt:

$$\frac{h_{\min}}{h_1} = A_1 \left[\frac{a}{h_1} + \frac{1}{2} \left(\sqrt{8Fr_1^2 + 1} - 1 \right) \right] + B_1 \quad (1-20)$$

Trong đó: $A_1 = -0,01448 \frac{a}{h_1} + 0,79371$; $B_1 = 0,22256 \frac{a}{h_1} + 0,45$

+ Chiều sâu tương ứng với giới hạn trên hình thành chế độ chảy mặt:

$$\frac{h_{\max}}{h_1} = 1 + \frac{a}{h_1} + A_2 Fr_1^2 + B_2 \quad (1-21)$$

Trong đó: $A_2 = -0,02486 \frac{a}{h_1} + 0,26648$; $B_2 = 0,03539 \left(\frac{a}{h_1} \right)^2 - 0,34711 \frac{a}{h_1} - 0,245$

Tác giả so sánh kết quả tính toán từ các quan hệ thực nghiệm (1-20) và (1-21) với nghiên cứu trước đây của G.P.Skrebkov cho thấy khá trùng khớp.

Có thể nói, các kết quả nghiên cứu xác định giới hạn sự chuyển đổi các dạng nổi tiếp chảy mặt chủ yếu thu được từ phương pháp nghiên cứu thực nghiệm, các nghiên cứu lý thuyết hầu như không có.

1.4.5. Độ cao bậc thụt nhỏ nhất để hình thành nước nhảy mặt

Thực nghiệm chỉ ra rằng, nếu độ cao bậc thụt thấp thì khi tăng mực nước hạ lưu chế độ chảy mặt không thể hình thành. Độ cao đó được gọi là giới hạn độ cao tối thiểu.

Lần đầu tiên khái niệm này được đưa ra trong công trình nghiên cứu của D.I. Cumin (1948). Kết quả thực nghiệm trong phạm vi $0,3 \leq \frac{a}{h_1} \leq 16$ và $2,24 \leq Fr \leq 7,75$ đã đưa ra công thức kinh nghiệm xác định chiều cao bậc thụt nhỏ nhất như ông gọi là “Ranh giới chế độ chảy mặt ổn định”:

$$\frac{a_{\min}}{h_1} = \sqrt[3]{Fr_1^2} - 1 \quad (1-22)$$

Đã có nhiều tác giả nghiên cứu và đưa ra công thức thực nghiệm xác định chiều cao bậc thụt nhỏ nhất tạo ra trạng thái chảy mặt (Hoàng Tư An, 2012) như sau:

$$+ \text{ Theo M.D. Chertousov: } a_{\min} = 0,4h_k \sqrt{\frac{E_0}{h_k} - 1,5} \quad (1-23)$$

$$+ \text{ Theo M.F. Skladnev: } \frac{a_{\min}}{h_k} = 2,7 \left(\sqrt[3]{Fr_1^2} - 1,6 \right) \quad (1-24)$$

+ Theo M.A. Mikhaliev:

$$\frac{a_{\min}}{h_k} = 0,5 \left(\sqrt{1 + 2,4Fr_1^2} - 1 \right) \text{ khi } 9 > \frac{a}{h_1} > 2$$

$$\frac{a_{\min}}{h_k} = 0,5 \left(\sqrt{1 + 4,1Fr_1^2} - 1 \right) \text{ khi } \frac{a}{h_1} > 9 \quad (1-25)$$

$$\frac{a_{\min}}{h_k} = 0,12Fr_1^2 \text{ khi } \frac{a}{h_1} < 2$$

$$+ \text{ Theo P.M. Stepanov: } \frac{a_{\min}}{h_k} = 4,65 \sqrt[3]{Fr_1^2} - (0,4\theta + 8,4) \quad (1-26)$$

Kaverin (2013) cũng đưa ra mối quan hệ chiều cao nhỏ nhất của bậc thụt đảm bảo tạo ra chế độ chảy mặt:

$$\frac{a_{\min}}{h_1} = \frac{(B_4 - \sqrt{B_4^2 - 4A_4C_4})}{2A_4} \quad (1-27)$$

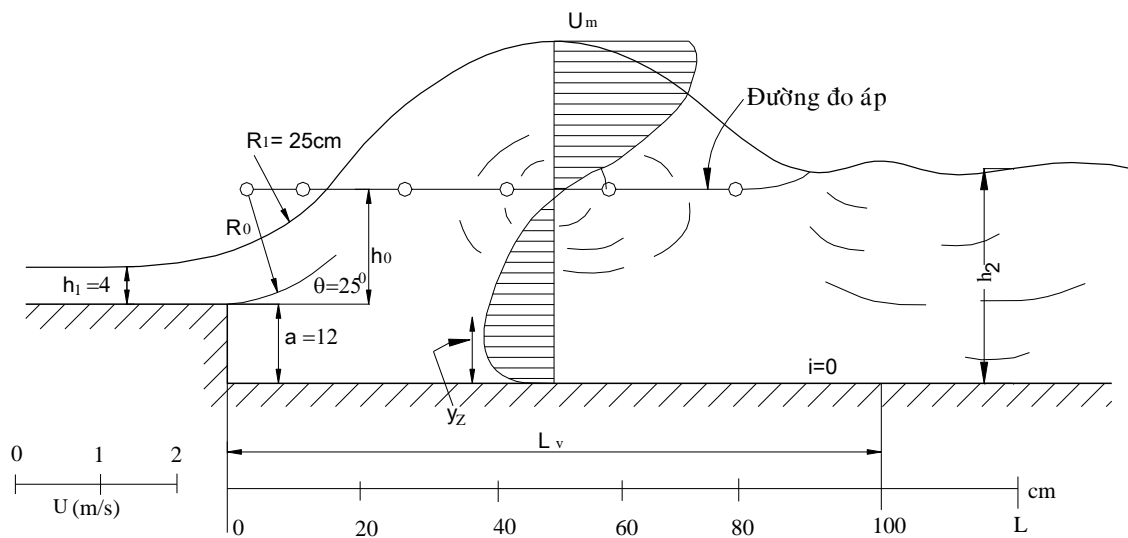
Trong đó: $A_4 = 0,04987$; $B_4 = 0,3706 + 0,02486Fr_1^2 - 0,00724\sqrt{8Fr_1^2 + 1}$;
 $C_4 = 1,182 + 0,2665Fr_1^2 - 0,38686\sqrt{8Fr_1^2 + 1}$

Các công thức trên cho kết quả xác định a_{\min} có sự sai lệch. Chỉ có một số kết quả là gần giống nhau, như các công thức của D.I.Cumin, M.F.Skladnev, A.A.Kaverin và M.A.Mikhailiev.

1.4.6. Đặc trưng mặt tự do của nước nhảy mặt

Lưu Như Phú (1986) đã nghiên cứu chế độ nổi tiếp của dòng xiết với dòng êm hạ lưu công trình có bậc thấp, xác lập công thức tính thủy lực nước nhảy sóng sau bậc thấp.

Trên cơ sở lý thuyết lớp biên và dòng tia rời, với việc sử dụng phương trình động lượng và phương trình liên tục, chấp nhận các giả thiết: + Cách xa bậc thật tổn thất năng lượng do ma sát rời trong thể tích chất lỏng được xem xét là nhỏ; + Phân bố áp suất tại bậc thật mặt cắt vào (1-1) và mặt cắt cuối nước nhảy (2-2) tuân theo quy luật thủy tĩnh; + Áp suất luồng phun sát bề mặt cũng tuân theo quy luật thủy tĩnh; + Dòng chảy từ mũi bậc được coi là dòng đều (Hình 1.11).



Hình 1.11. Sơ đồ tính nước nhảy sóng sau bậc thấp (Lưu Như Phú, 1986)

Với việc áp các điều kiện biên của nước nhảy sóng sau bậc thấp, thu được phương trình tính chiều cao sóng, hay chiều cao lớn nhất của nước nhảy mặt dạng sóng:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{2Fr_1^2}{K} + \left(K + \frac{a}{h_1}\right)^2 \cos\left(60 - \frac{\varphi}{3}\right)} \quad (1-28)$$

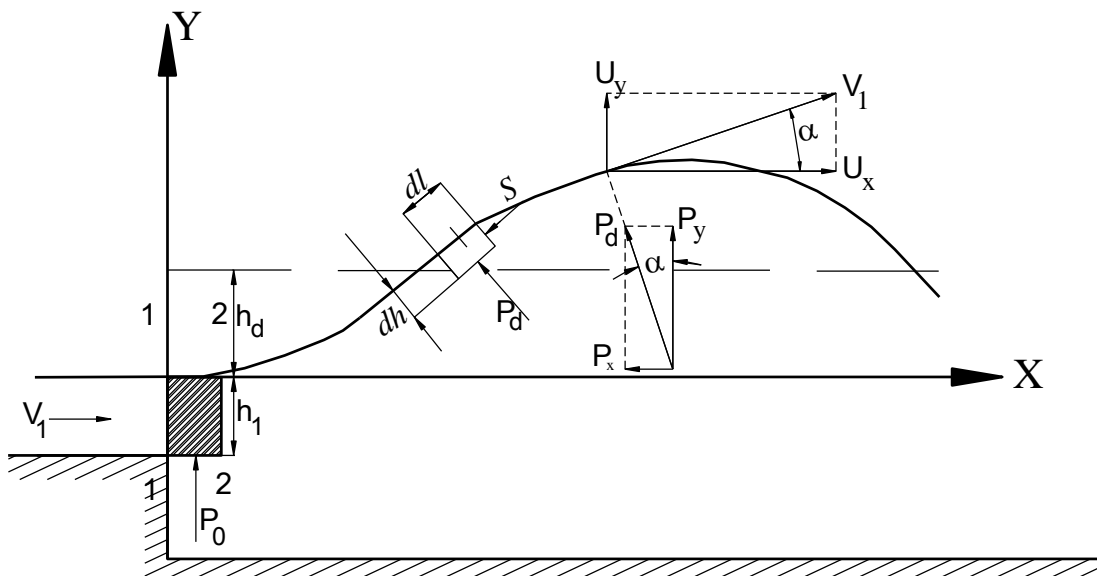
Trong đó:
$$\cos \varphi = \frac{3^{3/2} \alpha_{02} Fr_1^2}{\left[\frac{2Fr_1^2}{K} + \left(K + \frac{a}{h_1} \right)^2 \right]^{3/2}}; K = 1 + Fr_1^2 \ln \left(1 + \frac{h_1}{R_1} \right);$$

Công thức trên đã được kiểm nghiệm với số liệu thí nghiệm của chính tác giả thực hiện trên máng kính rộng 20cm, dài 10m với $a/h_1 = (1 \div 4)$; $Fr_1 = 1,41 \div 7,1$ của 27 trường hợp thí nghiệm. Kết quả tính toán theo (1-28) khá phù hợp với thực nghiệm, sai số lớn nhất là 10%.

Tuy nhiên nghiên cứu này chỉ áp dụng cho các công trình tháo có bậc nước nhỏ ($a/h_1 < 4$), đó là những bậc nước trên kênh dẫn, bậc nước sau đường ống tháo hoặc bậc ở bể tiêu năng sau cống... Trong những trường hợp này, khi mực nước hạ lưu thay đổi dòng nối tiếp có các đặc trưng khác với dòng nối tiếp chảy mặt ở đập tràn có bậc thụt đã trình bày ở trên.

Kaverin (2012, 2013) nghiên cứu chế độ chảy mặt sau bậc thụt có độ cao nhỏ, đã thu được phương trình xác định cao độ đường mặt nước trong nước nhảy mặt, chiều sâu dòng chảy ở hạ lưu giới hạn hình thành nước nhảy mặt. Với giả thiết tương tự như nghiên cứu của Lưu Như Phú (1986), bằng cách xét chuyển động của phân tử chất lỏng ở bề mặt tự do tại phần cuối bậc thụt với sơ đồ các lực tác dụng như Hình 1.12.

Sử dụng phương trình động lượng theo phương ngang và phương trình liên tục của đoạn chất lỏng giữa hai mặt cắt (1-1) và (2-2), qua các biến đổi toán học thu được tọa độ bề mặt tự do của nước nhảy mặt:



Hình 1.12. Sơ đồ tác dụng của lực (Kaverin, 2012)

$$X = \frac{|h_d|}{2K} [2E(K, \theta) - F(K, \theta)] \quad (1-29)$$

$$Y = h_d \pm \sqrt{h_d^2 - 2 \frac{U_0^2}{c} \{1 - \cos[2\arcsin(K\sin\theta)]\}} \quad (1-30)$$

$$\text{Với: } F(K, \theta) = \int \frac{d\theta}{\sqrt{1 - K^2 \sin^2 \theta}}; \quad E(K, \theta) = \int \sqrt{1 - K^2 \sin^2 \theta} d\theta;$$

$$K = \frac{h_d}{2h_1 \sqrt{Fr_1^2}}; \quad c = \frac{g}{h_1}; \quad h_d = \frac{P_0}{\gamma} - h_1$$

$$\theta = \arcsin \left\{ \frac{1}{K} \sin \left[\arccos \left(\frac{cY^2}{2U_0^2} - \frac{ch_d Y}{U_0^2} + 1 \right) \right] \right\} = \arcsin \sqrt{\frac{Y(2h_d - Y)}{h_d^2}}$$

Tác giả so sánh kết quả tính toán theo các công thức (1-29), (1-30) với các dữ liệu thực nghiệm của các tác giả khác cho kết quả khá trùng khớp.

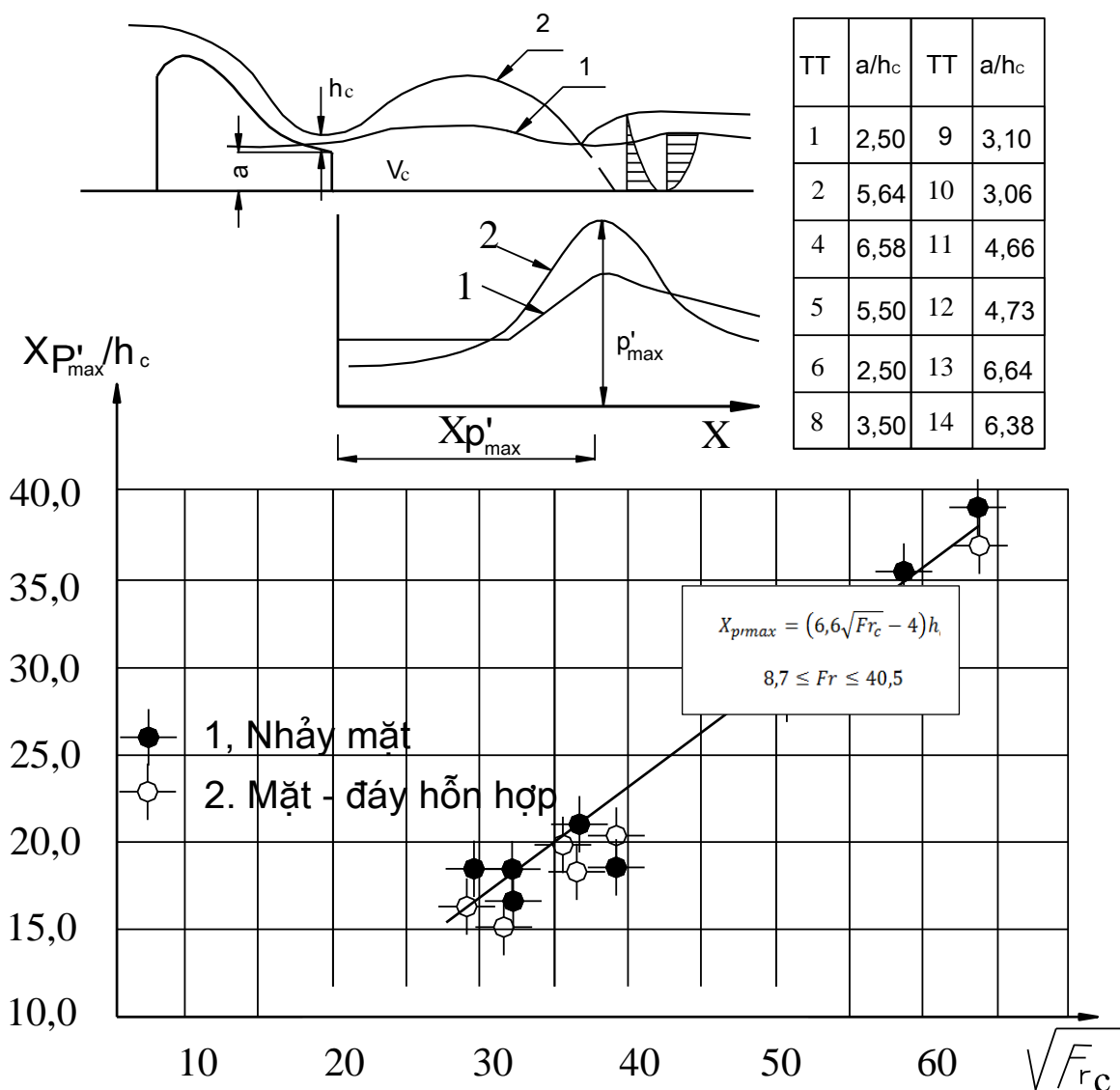
Tuy nhiên, việc xác định cao độ đường mặt nước của các tác giả nêu trên cho lời giải không chính xác vì phân bố áp suất trong dòng chảy không theo quy luật thủy tĩnh và không tuyến tính.

1.4.7. Đặc trưng nội bộ của dòng chảy mặt

Không như nước nhảy đáy, các đặc trưng nội bộ của nước nhảy mặt ít được nghiên cứu hơn, có thể tìm thấy một số nghiên cứu về phân bố vận tốc trong nước nhảy mặt và các kết quả nghiên cứu đều cho thấy phân bố vận tốc theo chiều đứng của nước nhảy mặt cũng tuân theo quy luật dòng tia của Schlichting (Luu Như Phú, 1986).

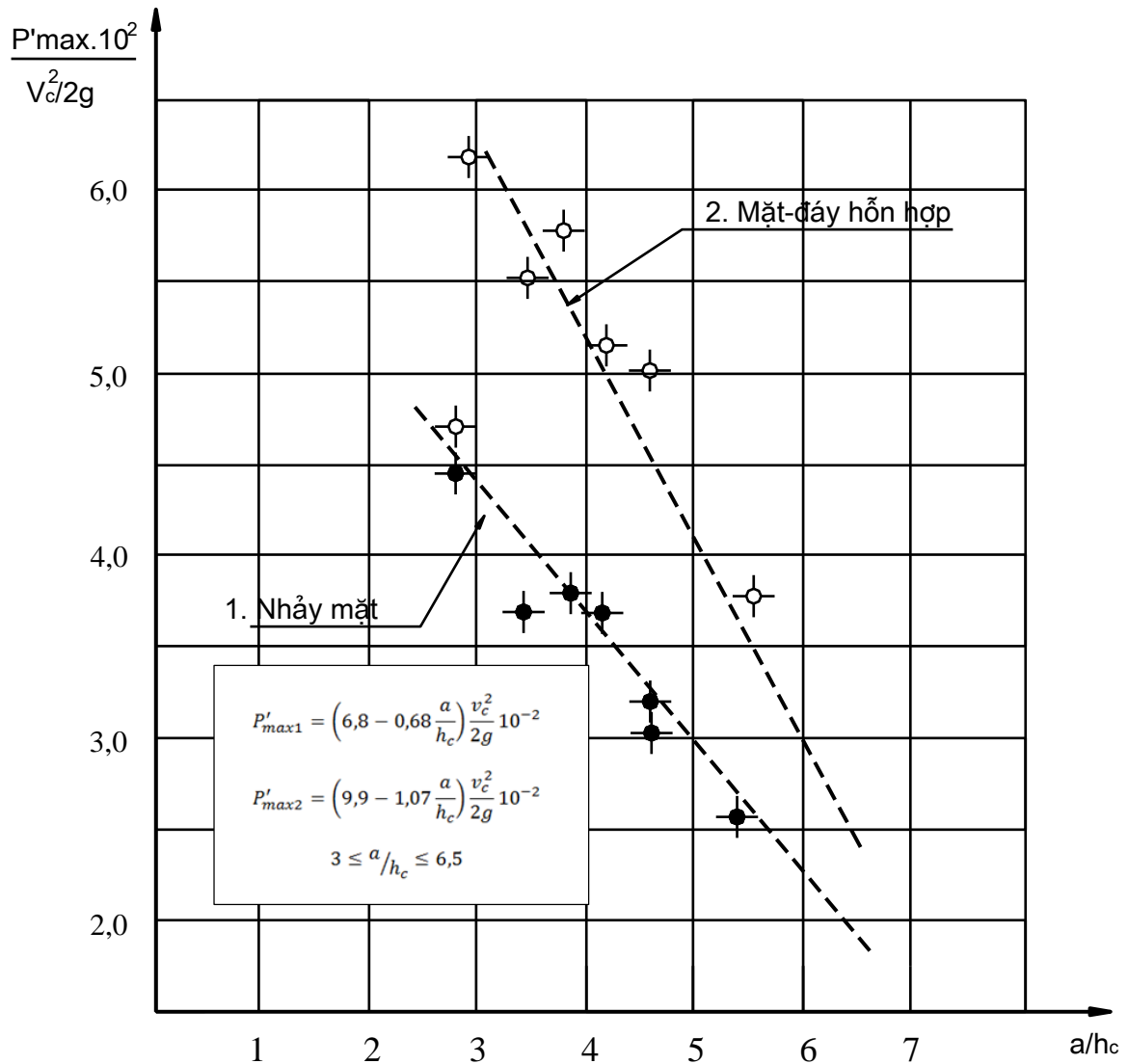
Về tác động của áp lực thủy động lên bản đáy sau bậc thụt được B.M.Ivanov (2004) công bố trong luận án tiến sỹ khoa học của ông. Từ kết quả thực nghiệm tại phòng thí nghiệm của Đại học Saint Petersburg, Liên bang Nga, trên máng kính dài 10m, rộng 1m đặt mô hình thí nghiệm là một bậc thụt của đập tràn kiểu Ophixerop có cửa van, độ cao của bậc thụt lớn hơn chiều cao nhỏ nhất a_{\min} để đảm bảo trên mô hình luôn xảy ra nước nhảy mặt hoặc mặt đáy hỗn hợp. Các thí nghiệm có $Fr_c = (2,9 \div 7,3)$. Để thu thập số liệu các thiết bị điện tử được sử dụng và phân tích số liệu theo quan điểm của lý thuyết thống kê. Kết quả đã đưa ra đồ thị vị trí xuất hiện $L_{p\max}/h_c$ của chuẩn mạch động áp suất lớn nhất ở chế độ chảy mặt (1) và mặt đáy hỗn hợp (2) theo số Froude

(Hình 1.13). Có thể nhận ra rằng khi tăng số Froude thì khoảng cách đến chuẩn mạch động áp suất lớn nhất tăng. Điều này là do vùng dòng nước gần đáy bị dịch chuyển ra xa khỏi bậc thụt.



Hình 1.13. Quan hệ giữa khoảng xuất hiện chuẩn mạch động lớn nhất ở sau bậc thụt theo Froude của nước nhảy mặt và mặt đáy hỗn hợp (Ivanov, 2004)

Tác giả cũng đã xây dựng được quan hệ tỷ số chuẩn mạch động áp suất lớn nhất ở sau bậc thụt và cột nước lưu tốc tại mặt cắt co hẹp $P_{max}/(V_c^2/2g)$ với chiều cao tương đối của bậc thụt a/h_c , trong khoảng chiều cao tương đối của bậc thụt là $(3 \div 6,5)$ đối với chế độ chảy mặt và chảy mặt đáy hỗn hợp (Hình 1.14).



Hình 1.14. Quan hệ chuẩn mạch động áp suất lớn nhất ở sau bậc thụt với chiều cao tương đối của bậc (Ivanov, 2004)

Hình 1.14 cho thấy: + Khi tăng chiều cao tương đối của bậc thụt thì mức độ mạch động áp suất lớn nhất ở cả hai chế độ đều giảm; + Ở chế độ chảy mặt đáy hỗn hợp mức độ mạch động áp suất lớn nhất cao hơn (20÷50) % so với chế độ chảy mặt, sự khác nhau càng lớn khi chiều cao tương đối của bậc thụt càng nhỏ.

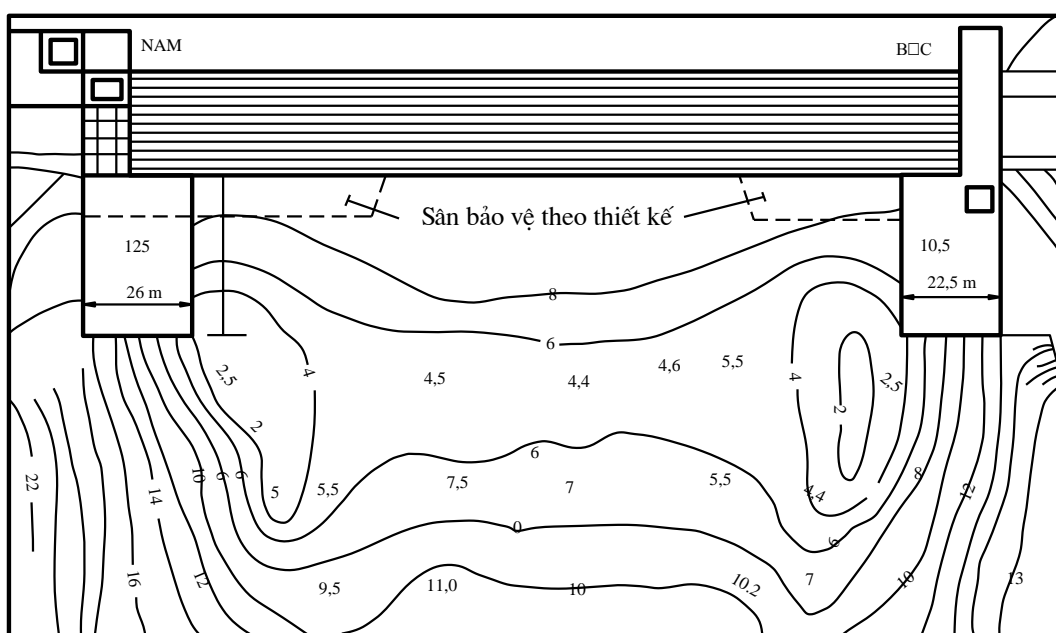
Nghiên cứu trên của Ivanov là đối với trường hợp nối tiếp dòng mặt có bậc thụt là bậc thẳng đứng, mũi bậc phẳng (góc hắt $\theta=0$).

1.4.8. Ứng dụng tiêu năng dòng mặt ở Việt Nam

Về ứng dụng tiêu năng dòng mặt ở nước ta, mới chỉ có 02 công trình là đập Thạch Nham, tỉnh Quảng Ngãi và đập thủy điện Thác Bà, tỉnh Yên Bái được áp dụng hình thức

tiêu năng mặt. Cả hai công trình này đều được thí nghiệm trên mô hình vật lý và đang làm việc có hiệu quả.

Nghiên cứu thí nghiệm cho công trình tiêu năng mặt đến nay chỉ còn tìm thấy kết quả nghiên cứu về thí nghiệm xói nền đá sau đập Thạch Nham. Đập Thạch Nham là đập dâng nước dài 200 m, có cấu tạo là tràn bê tông trọng lực, tiêu năng dạng bậc thụt (Luu Như Phú và cs, 1987). Kết quả thí nghiệm cho thấy dòng lũ tràn qua đập hình thành hai khu nước vật trực đứng 2 bên, giáp bờ; chỗ dòng chính tiếp giáp khu nước vật dòng chảy nhiều động mạnh, mạch động áp lực lớn gây xói lở hai bờ và lấn vào chân đập. Sự xói lở ban đầu xảy ra nhanh, mạnh, sau giảm dần cho đến lúc ổn định như (Hình 1.15).






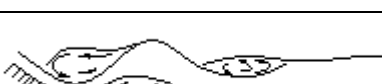
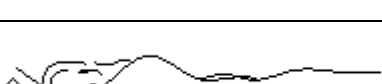
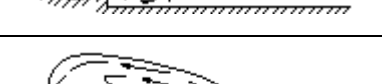
Hình 1.15. Kết quả thí nghiệm xói – phương án bảo vệ hai đầu đập Thạch Nham (Luu Như Phú và cs, 1987)

1.5. Nối tiếp và tiêu năng dòng hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt có góc hắt lớn hơn 25° (dòng chảy phễu)

1.5.1. Các dạng nối tiếp dòng chảy phễu

Việc tạo ra dạng nối tiếp chảy phễu được dựa trên cơ sở lợi dụng bán kính cong ngược của mũi bậc có góc hắt lớn hơn 25° để hình thành cuộn nước dạng phễu. Khi điều kiện mực nước hạ lưu ngập mũi hắt khiến cho dòng chảy có lưu tốc cao ở trong phễu sinh ra xoáy cuộn ở bề mặt và thông qua sóng dâng cao ở phía sau tác dụng tương hỗ với xoáy cuộn ở mặt, đáy để thu được hiệu quả tiêu năng tương đối lớn.

Bảng 1.2. Các dạng nối tiếp của dòng chảy phễu (Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985)

TT	Các dạng nối tiếp	Chế độ chảy
1		Chảy phễu tự do
2		Chảy phễu giới hạn
3		Chảy phễu bắt đầu cuộn
4		Chảy phễu ổn định
5		Chảy phễu ngập
6		Chảy phễu đáy ngập

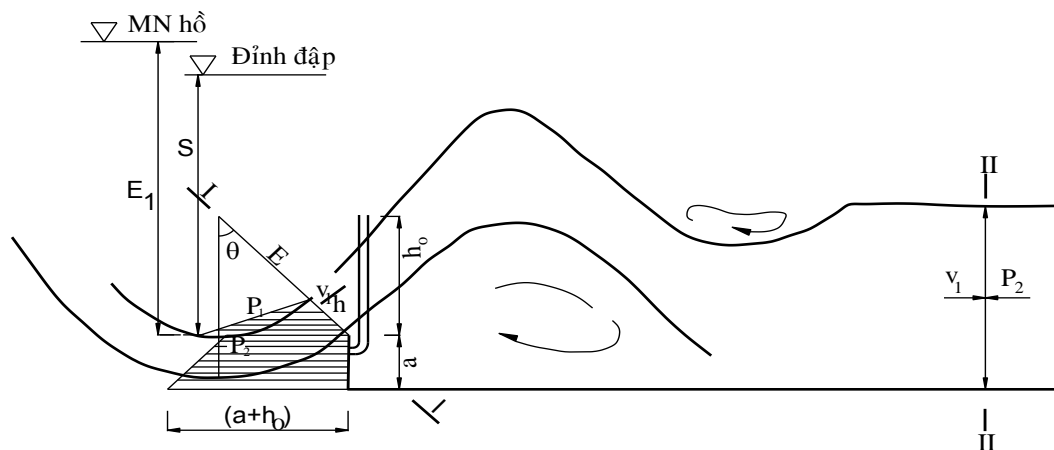
Về hình thức nối tiếp của dòng chảy phễu gần giống với hình thức nối tiếp của dòng mặt bậc thụt phẳng ($\theta=0^0$) nhưng từ kết cấu của thân phễu và cơ chế tiêu năng có nhiều điểm khác với nối tiếp dòng mặt đã nêu ở trên. Nối tiếp dòng chảy phễu khác dòng mặt với góc hắt nhỏ hơn 15^0 ở chỗ nhờ có bán kính cong ngược lớn, dòng phễu được nâng lên với một vận tốc lớn, tạo thành các sóng, độ cong của sóng lớn, tạo sóng cuộn ngay trên bề mặt làm năng lượng tiêu tán trên bề mặt dòng chảy, giảm hiện tượng xói hạ lưu. Nối tiếp dòng mặt có sóng xô mãnh liệt và kéo dài ở hạ lưu do đó đe dọa sự ổn định của bờ, còn nối tiếp dòng phễu không sinh ra sóng lớn ở hạ lưu, trạng thái chảy tương đối ổn định. Trong trường hợp mũi hắt và lưu lượng đơn vị đã cho thì trạng thái dòng chảy phễu thay đổi tùy thuộc vào chiều sâu hạ lưu (Bảng 1.2).

Việc xác định các trạng thái chảy phễu rất phức tạp, vì lúc tăng mực nước hạ lưu sẽ xuất hiện một dạng nối tiếp nào đó ứng với mỗi độ sâu hạ lưu nhưng lúc giảm về trị số trên thì lại không thấy xuất hiện dạng nối tiếp tương tự.

1.5.2. Tiêu năng dòng chảy phễu

Các công trình được ứng dụng tiêu năng dòng chảy phễu đầu tiên từ những năm 1940÷1950, sớm nhất là công trình Grand Coulee ở Hoa Kỳ; đến thập niên 1950÷1960 mở rộng sang Nhật, Ấn Độ và một số nước khác; lưu lượng đơn vị lớn nhất đạt tới trên $200\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. Thủy điện Thanh Tuyền ở Trung Quốc là công trình lớn nhất sử dụng dạng tiêu năng dòng chảy phễu có thông số: đập cao 65m, lưu lượng xả lớn nhất $25.200\text{m}^3/\text{s}$, lưu lượng đơn vị $154\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. Trong thiết kế ban đầu chọn mũi hắt dạng cung tròn đơn, bán kính phễu là 20m, góc hắt của phễu là 45° . Với lưu lượng thiết kế và lưu lượng kiểm tra xói hạ lưu tương đối nhẹ, trạng thái chảy ổn định. Chỉ khi bắt đầu xả lũ vận hành với mực nước thấp, do mực nước hạ lưu không đủ lớn nên xuất hiện trạng thái dòng phun xa, gây xói sâu. Khi công trình đi vào vận hành, các năm: 1974, 1978 và 1979 đã xả lũ với lưu lượng vượt quá $10.000\text{m}^3/\text{s}$. Kết quả thực đo cho thấy nền đá hạ lưu bị xói (4÷6) m, nhưng công trình vận hành vẫn an toàn, hố xói cách chân đập tương đối xa (Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985). Điều này cho thấy tiêu năng dòng chảy phễu được ứng dụng có hiệu quả ở công trình thực tế.

Độ sâu giới hạn của dòng chảy phễu là cơ sở cho việc tính toán thủy lực tiêu năng dòng chảy phễu (Hình 1.16).



Hình 1.16. Sơ đồ dòng chảy giới hạn tiêu năng dòng chảy phễu (Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985)

Viện Nghiên cứu Thủy lực Nam Kinh, Trung Quốc (1985), dựa trên nguyên lý động năng và tỷ số vượt áp đưa ra phương trình cơ bản chảy tới hạn bắt đầu dạng phễu như sau:

+ Dạng phễu chuẩn – bán kính cong đứng của cung tròn đơn:

$$2Fr_1^2 \cos\theta + \eta_a \cos\theta - \eta_a^2 = \frac{2Fr_1^2}{\eta} + \eta^2 - \eta_a \eta (\cos\theta + 2\eta_a) \quad (1-31)$$

+ Dạng phễu kéo dài – hình dạng kéo dài tiếp tuyến của đầu mút phễu:

$$2Fr_1^2 \cos\theta + \cos^2\theta - \eta_a^2 = \frac{2Fr_1^2}{\eta} + \eta^2 - 2\eta_c \eta_a \eta \quad (1-32)$$

Trong đó: $\eta_a = \frac{a}{h_1}$: là tỷ số độ cao của bậc; $\eta = \frac{h_2}{h_1}$: là tỷ số độ sâu liên hiệp khi chảy phễu giới hạn; $\eta_c = \frac{(h_0+a)}{h_2}$: là tỷ số tiêu áp khi chảy phễu tới hạn. Từ tài liệu thí nghiệm mô hình của 5 công trình, tổng kết rút ra được công thức kinh nghiệm về tỷ số tiêu áp của mặt đập là:

$$\eta = \frac{0,76}{q\sqrt{gS^{1,5}}} \quad (1-33)$$

Ngoài ra, cũng từ số liệu thí nghiệm mô hình lập thành số không thứ nguyên: $\eta_c = \frac{h_1}{S}$ và $k_s = \frac{q}{\sqrt{gS^{1,5}}}$, cho công thức kinh nghiệm đối với mặt đập có trụ pin:

$$\eta_s = 0,67k_s^{0,93} \quad (1-34)$$

Với chiều cao đập và hình dạng mũi hắt đã định, khi biết lưu lượng xả và mực nước hạ lưu tính toán được mực nước chảy giới hạn thông qua các công thức (1-31), (1-32), (1-33) và (1-34). Trên thực tế, trạng thái chảy lúc ấy không ổn định, trong nguyên hình là không cho phép xuất hiện trạng thái này, cho nên cần có một độ ngập nhất định, sử dụng hệ số (1,25 ÷ 1,3) để hình thành đầy đủ dòng chảy “3 xoáy 1 sóng” đảm bảo tiêu năng hiệu quả. Việc tính toán thủy lực nêu trên chỉ ứng dụng với tiêu năng dòng phễu có mũi hắt liên tục.

1.6. Kết luận chương 1

Qua các kết quả nghiên cứu trên đây cho phép rút ra một số kết luận như sau:

1. Nước nhảy, nối tiếp và tiêu năng là vấn đề phức tạp, đa dạng và luôn mang tính thời sự. Cùng với thời gian thực hiện luận án này vẫn có các nghiên cứu cơ bản về nước nhảy đáy, nước nhảy mặt, nước nhảy mặt đáy được công bố của các nhà khoa học Liên bang Nga.

2. Đề xuất hiện nước nhảy mặt, chiều cao bậc thụt phải lớn hơn một giá trị a_{\min} được xác định bằng công thức thực nghiệm.

3. Các nghiên cứu về nước nhảy mặt chủ yếu đối với bậc thụt thẳng đứng, mũi hắt phẳng hoặc mũi hắt cong có góc hắt ($\theta=0^{\circ}\div 15^{\circ}$).

4. Dạng nối tiếp chảy mặt gắn liền với bậc thụt ngưỡng thấp, khi chiều cao bậc ngưỡng thay đổi, hình dạng nước nhảy ở hạ lưu cũng thay đổi theo, nếu chiều cao tương đối của bậc nhỏ so với độ sâu dòng chảy ở hạ lưu thì dòng chảy qua đó vẫn có dạng chảy đáy, ngược lại thì sinh nước nhảy mặt. Vị trí nước nhảy đáy hoàn chỉnh thay đổi, dưới tác dụng của chiều cao bậc sinh ra dòng chủ lưu tạo sóng mặt gây bất lợi về tiêu năng.

5. Dạng nối tiếp đa xoáy với bậc thụt rất nhỏ và góc hắt lớn của kết cấu tiêu năng bồn được các nhà khoa học phương Tây nghiên cứu rất kỹ. Tuy nhiên đó là các nghiên cứu thực nghiệm trong phòng, giới hạn chiều cao bậc thụt rất nhỏ $a = 0,05R$.

6. Dạng nối tiếp chảy mặt với mũi hắt cong có góc hắt lớn hơn 25° chỉ thấy có nghiên cứu của Viện nghiên cứu Thủy lực Nam Kinh, Trung Quốc trên cơ sở tài liệu nghiên cứu của một số công trình cụ thể nên khi áp dụng vào các công trình thực tế thường có tính phiến diện, ít phổ quát. Chưa có kết quả nghiên cứu về điều kiện hình thành và tiêu chí chuyển đổi từ chế độ chảy này sang chế độ chảy khác.

7. Các kết quả về đặc trưng thủy động lực học của nước nhảy mặt chủ yếu thu được từ phương pháp nghiên cứu thực nghiệm và bán thực nghiệm, tập trung vào giới hạn hình thành các dạng nối tiếp, các nghiên cứu lý thuyết thì chấp nhận giả thiết vận tốc phân bố đều, áp suất phân bố theo qui luật thủy tĩnh, xuất phát từ phương trình động lượng để xác định đường mặt nước của luồng phun sau bậc thụt ở trạng thái phân giới 1, rất ít thấy các nghiên cứu đầy đủ về đặc trưng thủy động lực học của nối tiếp đa xoáy bằng lý thuyết.

8. Ở Việt Nam, nghiên cứu về nước nhảy sau bậc thụt chỉ duy nhất có công trình nghiên cứu của PGS.TS Lưu Như Phú (1986). Công trình ứng dụng tiêu năng mặt cũng chỉ có Trần Thạch Nham, tỉnh Quảng Ngãi và Trần Thác Bà, tỉnh Yên Bái. Trong giai đoạn hiện nay, nhiều công trình thủy lợi, thủy điện có điều kiện để áp dụng tiêu năng dòng mặt hoặc tiêu năng dòng chảy phễu với mong muốn giảm giá thành và thi công

nhanh, nhưng do những hạn chế hiểu biết về chúng mà vẫn được thiết kế là tiêu năng đáy như tràn Bản Mông, tràn Khe Bô tỉnh Nghệ An...

9. Xét trên quan điểm kết cấu công trình, dòng hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy (dòng chảy phức) là sự kết hợp giữa bốn tiêu năng theo dạng bề tiêu năng số VII của Peterka (Nhà khoa học Hoa Kỳ) với bậc thụt cao để tạo ra nước nhảy mặt với nhiều kết quả nghiên cứu của các nhà khoa học Nga và Trung Quốc. Với nhận xét đó sẽ định hướng cho nghiên cứu sinh kế thừa các phương pháp nghiên cứu và tư duy khoa học của các tác giả đi trước trong vấn đề nghiên cứu của mình.

10. Mô hình vật lý và mô hình toán là hai phương pháp nghiên cứu cơ bản được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu thủy lực hạ lưu. Với đối tượng nghiên cứu của luận án thì mô hình vật lý có hiệu quả hơn mô hình toán vì đặc điểm phức tạp của cấu trúc dòng chảy. Mô hình toán có thể được sử dụng kết hợp với mô hình vật lý nhưng về thời gian và công sức bỏ ra để tính toán bằng mô hình 3D hiện nay có chi phí không kém thí nghiệm mô hình vật lý.

Vì vậy, dòng chảy phức cần được nghiên cứu tiếp về điều kiện hình thành, cũng như các đặc trưng thủy động lực học của nó, giúp lựa chọn khi thiết kế công trình tiêu năng và sử dụng phương pháp mô hình vật lý để nghiên cứu.

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ PHƯƠNG PHÁP PHƯƠNG PHÁP LUẬN NGHIÊN CỨU CÁC ĐẶC TRƯNG THỦY ĐỘNG LỰC HỌC CỦA DÒNG NÓI TIẾP HỖN HỢP MẶT – ĐÁY – NGẬP 3 XOÁY SAU BẬC THỤT

Luận án với mục tiêu xác định đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy phức ở hạ lưu bậc thụt bằng phương pháp mô hình vật lý. Do vậy, trong chương này trình bày các vấn đề là cơ sở lý thuyết để xây dựng mô hình thực nghiệm, xác định các chuỗi thí nghiệm, cũng như đánh giá sai số trong thực nghiệm mô hình, và phương pháp xây dựng công thức thực nghiệm.

2.1. Cơ sở lý thuyết tương tự và mô hình hóa

2.1.1. Lý thuyết thứ nguyên

Đại lượng có thứ nguyên là đại lượng mà giá trị bằng số của chúng phụ thuộc vào các tỷ lệ chọn trước, nghĩa là phụ thuộc vào hệ đơn vị đo lường.

Đại lượng không thứ nguyên là đại lượng mà giá trị bằng số của chúng không phụ thuộc vào hệ đơn vị đo lường đã cho.

Thứ nguyên là biểu thức biểu diễn đơn vị dẫn xuất qua các đơn vị cơ bản. Thứ nguyên của một đại lượng có thể biểu diễn dưới dạng một công thức trên cơ sở các đơn vị cơ bản gọi là công thức thứ nguyên. Các đơn vị cơ bản thường được chọn là: độ dài được ký hiệu bằng chữ L, thời gian được ký hiệu bằng chữ T, khối lượng được ký hiệu bằng chữ M. Trong hệ đơn vị kỹ thuật (CGS) công thức thứ nguyên của các đại lượng vật lý được biểu diễn dưới dạng đơn thức mũ ($L^1 M^m T^t$) (Phạm Ngọc Quý, 2003a; Nguyễn Hữu Chí, 1974)...

Thứ nguyên của một đại lượng nào đó được biểu diễn theo ký hiệu của Maxwell [a]. Bảng 2.1 biểu diễn thứ nguyên của một số đại lượng thường gặp:

Bảng 2.1. Thứ nguyên của một số đại lượng thường gặp

Đại lượng	Thứ nguyên	Ký hiệu	Đại lượng	Thứ nguyên	Ký hiệu
1. Chiều dài	L	[l]	2. Khối lượng	M	[m]
3. Thời gian	T	[t]	4. Nhiệt độ	0	[0]

Đại lượng	Thứ nguyên	Ký hiệu	Đại lượng	Thứ nguyên	Ký hiệu
5. Vận tốc	LT^{-1}	[v]	6. Gia tốc	LT^{-2}	[a]
7. Lưu lượng	L^3T^{-1}	[Q]	8. Độ nhớt động học	L^2T^{-1}	[ν]
9. Khối lượng riêng	ML^3	[ρ]	10. Độ nhớt động lực	$ML^{-1}T^{-1}$	[μ]
11. Lực	MLT^{-2}	[F]	12. Công năng	ML^2T^{-2}	[\mathcal{E}]

2.1.2. Định lý hàm số π

Thông qua thực nghiệm, các quy luật vật lý được thiết lập và biểu diễn dưới dạng hàm số liên hệ giữa các đại lượng đặc trưng cho hiện tượng đang khảo sát. Trị số của các đại lượng vật lý phụ thuộc vào việc chọn hệ đơn vị đo lường. Việc chọn đó không liên quan đến bản thân hiện tượng. Vì vậy mỗi liên hệ hàm số biểu diễn các định luật vật lý phải có một cấu trúc đặc biệt. Giả thiết một đại lượng có thứ nguyên a là hàm của các đại lượng độc lập có thứ nguyên a_1, a_2, \dots, a_n , ta có:

$$a = f(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (2-1)$$

Trong đó một số tham số nào đó là những đại lượng biến thiên, còn các số khác không đổi. Giả sử k là đại lượng ban đầu ($k \leq n$) có thứ nguyên độc lập trong số các đại lượng có thứ nguyên a_1, a_2, \dots, a_n và được biểu diễn theo các đại lượng cơ bản: $[a_1] = A_1, [a_2] = A_2, [a_k] = A_k$. Do đó thứ nguyên của các đại lượng còn lại biểu diễn dưới dạng: $[a] = A_1^{m_1} A_2^{m_2} \dots A_k^{m_k}$; $[a_{k+1}] = A_1^{p_1} A_2^{p_2} \dots A_k^{p_k}; \dots$; $[a_n] = A_1^{q_1} A_2^{q_2} \dots A_k^{q_k}$. Thay đổi hệ đơn vị đo lường của các đại lượng a_1, a_2, \dots, a_k tương ứng với $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ lần; khi đó các trị số của các đại lượng đó và các đại lượng: a, a_{k+1}, \dots, a_n trong hệ đơn vị mới là: $a'_1 = \alpha_1 a_1$; $a' = \alpha_1^{m_1} \alpha_2^{m_2} \dots \alpha_k^{m_k} a$; $a'_1 = \alpha_1 a_1$; $a'_{k+1} = \alpha_1^{p_1} \alpha_2^{p_2} \dots \alpha_k^{p_k} a_{k+1}$; \dots ; $a'_k = \alpha_k a_k$; $a'_n = \alpha_1^{q_1} \alpha_2^{q_2} \dots \alpha_k^{q_k} a_n$.

Trong hệ đơn vị mới, biểu thức (2-1) sẽ có dạng:

$$\begin{aligned} a' &= \alpha_1^{m_1} \alpha_2^{m_2} \dots \alpha_k^{m_k} f(a_1, a_2, \dots, a_n) \\ &= f(\alpha_1 a_1, \alpha_2 a_2, \dots, \alpha_k a_k, \alpha_1^{p_1} \alpha_2^{p_2} \dots \alpha_k^{p_k} a_{k+1}, \dots, \alpha_1^{q_1} \alpha_2^{q_2} \dots \alpha_k^{q_k} a_n) \end{aligned} \quad (2-2)$$

Biểu thức (2-2) chứng tỏ hàm f có tính đẳng cấp đối với các số $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ chọn tùy ý. Đặt: $\alpha_1 = \frac{1}{a_1}, \alpha_2 = \frac{1}{a_2}, \dots, \alpha_k = \frac{1}{a_k}$, như vậy đã chọn hệ đơn vị sao cho k đối số đầu của hàm f bằng đơn vị. Trong hệ đơn vị mới này trị số của các tham số: a, a_{k+1}, a_n được xác định bởi các công thức: $\pi = \frac{a}{a_1^{m_1} a_2^{m_2} \dots a_k^{m_k}}; \pi_1 = \frac{a_{k+1}}{a_1^{p_1} a_2^{p_2} \dots a_k^{p_k}}; \dots; \pi_{n-k} = \frac{a_n}{a_1^{q_1} a_2^{q_2} \dots a_k^{q_k}}$. Trong đó a_1, a_2, \dots, a_n là trị số của các đại lượng khảo sát trong hệ đơn vị cũ. Dễ dàng thấy rằng các giá trị $\pi, \pi_1, \dots, \pi_{n-k}$ không phụ thuộc vào việc chọn hệ các đơn vị đo lường được biểu diễn qua k đơn vị đo cũ, bởi vì chúng có cùng thứ nguyên bằng không đối với các đơn vị đo A_1, A_2, \dots, A_k .

Các giá trị $\pi, \pi_1, \dots, \pi_{n-k}$ cũng không phụ thuộc vào việc chọn hệ đơn vị của các đại lượng a_1, a_2, \dots, a_k . Do đó các đại lượng ấy được xem là không thứ nguyên. Trong hệ đơn vị mới nói trên, biểu thức (2-1) có thể viết dưới dạng:

$$\pi = f(\pi, \dots, \pi_1, \dots, \pi_{n-k}) \quad (2-3)$$

Như vậy, nếu biết được đại lượng không thứ nguyên đang xét là một hàm của các đại lượng thứ nguyên, thì hàm này chỉ có thể phụ thuộc vào các tổ hợp không thứ nguyên được lập nên từ các đại lượng có thứ nguyên ấy. Dễ dàng thấy rằng từ n tham số a_1, a_2, \dots, a_n , trong đó có không quá k tham số với thứ nguyên độc lập, không thể lập nhiều hơn $(n - k)$ tổ hợp độc lập không thứ nguyên (Phạm Ngọc Quý, 2003a).

Nếu hàm $f(a_1, a_2, \dots, a_n)$ biểu diễn sự liên hệ giữa các tham biến tham gia vào các hiện tượng chưa biết, nhưng đã biết số tham biến tham gia vào hiện tượng đó. Từ đó có thể thiết lập một số tổ hợp không thứ nguyên của các tham số tham gia hiện tượng. Bằng thực nghiệm có thể xác lập sự liên hệ với các đại lượng không thứ nguyên, do đó có thể khảo sát được hiện tượng ban đầu và có thể suy ra dạng hàm ở trên.

Lý thuyết thứ nguyên và tương tự là cơ sở lý luận của mô hình hóa các hiện tượng thủy lực.

2.1.3. Mô hình hóa

Mô hình hóa là sự thay thế việc nghiên cứu hiện tượng của một đối tượng bằng việc xét hiện tượng tương tự trên mô hình có kích thước nhỏ hơn hoặc lớn hơn và thường tiến hành trong các phòng thí nghiệm.

Như vậy, từ các kết quả thí nghiệm trên mô hình, có thể suy ra những điều cần thiết về tính chất các hiệu ứng và các đại lượng khác nhau có liên quan đến hiện tượng trong các điều kiện thực tế. Do đó cần phải có những tiêu chuẩn tương tự để kết quả thí nghiệm trên mô hình phù hợp nguyên hình.

Để đảm bảo cho phép chuyển những kết quả thu được trên mô hình sang thực tế, giữa mô hình và nguyên hình phải đảm bảo các điều kiện tương tự (Phạm Ngọc Quý, 2003a; Nguyễn Hữu Chí, 1974).

Để tìm mối liên hệ giữa các tiêu chuẩn tương tự phải xuất phát từ phương trình vi phân cơ bản. Đối với bài toán thủy động lực học đó là phương trình Navier-Stokes. Xét phương trình Navier-Stokes đối với bài toán phẳng:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2-4)$$

Trong trường hợp lực khối chỉ là trọng lực, phương trình có thể viết dưới dạng không thứ nguyên đối với các số hạng dưới dấu vi phân.

$$\begin{aligned} \frac{u_o}{t_o} \frac{\partial \left(\frac{u}{u_o} \right)}{\partial \left(\frac{t}{t_o} \right)} + \frac{u_o}{b} u \frac{\partial \left(\frac{u}{u_o} \right)}{\partial \left(\frac{x}{b} \right)} + \frac{u_o}{b} v \frac{\partial \left(\frac{u}{u_o} \right)}{\partial \left(\frac{y}{b} \right)} \\ = g - \frac{p_o}{b} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \left(\frac{p}{p_o} \right)}{\partial \left(\frac{x}{b} \right)} + \frac{u_o}{b^2} \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \left(\frac{u}{u_o} \right)}{\partial \left(\frac{x}{b} \right)^2} + \frac{\partial^2 \left(\frac{u}{u_o} \right)}{\partial \left(\frac{y}{b} \right)^2} \end{aligned} \quad (2-5)$$

Trong đó: b là kích thước chiều dài; u_o , p_o , t_o là các thông số vận tốc, áp suất và thời gian của một điểm không gian tại thời điểm xác định.

Trong phương trình (2-5) các đại lượng dưới dấu vi phân là những đại lượng không thứ nguyên, còn hệ số của các số hạng là những đại lượng có cùng thứ nguyên.

Chia cho $\frac{u_o^2}{b}$, phương trình (2-5) sẽ có dạng không thứ nguyên:

$$\begin{aligned} \frac{b}{u_o t_o} \frac{\partial \left(\frac{u}{u_o} \right)}{\partial \left(\frac{t}{t_o} \right)} + \frac{u}{u_o} \frac{\partial \left(\frac{u}{u_o} \right)}{\partial \left(\frac{x}{b} \right)} + \frac{v}{u_o} \frac{\partial \left(\frac{u}{u_o} \right)}{\partial \left(\frac{y}{b} \right)} \\ = \frac{gb}{u_o^2} - \frac{p_o}{\rho_o u_o^2} \frac{\rho_o}{\rho} \frac{\partial \left(\frac{p}{p_o} \right)}{\partial \left(\frac{x}{b} \right)} + \frac{\mu_o}{u_o \rho_o b} \frac{\rho_o}{\rho} \frac{\mu}{\mu_o} \left[\frac{\partial^2 \left(\frac{u}{u_o} \right)}{\partial \left(\frac{x}{b} \right)^2} + \frac{\partial^2 \left(\frac{u}{u_o} \right)}{\partial \left(\frac{y}{b} \right)^2} \right] \end{aligned} \quad (2-6)$$

Để phương trình vi phân (2-6) có nghiệm chung cho mô hình và nguyên hình, phương trình phải thỏa mãn: điều kiện đơn trị của hiện tượng tương tự và các tiêu chuẩn được lập từ điều kiện đơn trị có trị số như nhau (Nguyễn Hữu Chí, 1974), nghĩa là phải:

$$\left(\frac{b}{u_0 t_0}\right)_{mh} = \left(\frac{b}{u_0 t_0}\right)_{nh}; \left(\frac{gb}{u_0}\right)_{mh} = \left(\frac{gb}{u_0}\right)_{nh}; \left(\frac{p_0}{u_0^2 \rho_0}\right)_{mh} = \left(\frac{p_0}{u_0^2 \rho_0}\right)_{nh};$$

$$\left(\frac{\mu_0}{u_0 \rho_0 b}\right)_{mh} = \left(\frac{\mu_0}{u_0 \rho_0 b}\right)_{nh}; \left(\frac{u}{u_0}\right)_{mh} = \left(\frac{u}{u_0}\right)_{nh}; \left(\frac{v}{u_0}\right)_{mh} = \left(\frac{v}{u_0}\right)_{nh}; \left(\frac{p}{p_0}\right)_{mh} = \left(\frac{p}{p_0}\right)_{nh}$$

Trong các tổ hợp không thứ nguyên trên, thu được các tiêu chuẩn tương tự:

+ Đặc trưng cho quá trình chuyển động không dừng có tiêu chuẩn Strukhan: $S_h = \frac{b}{vt}$

+ Đặc trưng cho lực khối có tiêu chuẩn Froude: $Fr = \frac{V}{\sqrt{gb}}$

+ Đặc trưng cho lực nhớt có tiêu chuẩn Reynolds: $Re = \frac{vb\rho}{\mu}$

+ Đặc trưng cho áp lực có tiêu chuẩn Euler: $Eu = \frac{p}{\rho v^2}$, người ta chứng minh rằng,

khi áp suất đo bằng mét cột nước thì $Eu = \frac{1}{Fr}$

Trong trường hợp nghiên cứu của luận án, dòng chảy qua đập tràn là dòng không áp, lực khối chủ yếu là trọng lực, vì vậy sử dụng tiêu chuẩn Froude để thiết lập mô hình nghiên cứu. Các tiêu chuẩn còn lại là điều kiện thỏa mãn.

2.2. Lập phương trình nghiên cứu thực nghiệm

Theo lý thuyết quy hoạch thực nghiệm, với mục đích, phạm vi nghiên cứu, các thông số thủy lực và hình dạng công trình được phân thành hai nhóm:

i) Các đại lượng điều chỉnh được trong quá trình thí nghiệm bao gồm: lưu lượng, mực nước hạ lưu, chất lỏng thí nghiệm, kích thước hình học của công trình;

ii) Các đại lượng cần thu thập thông tin nhưng không điều chỉnh được.

Các đại lượng ở nhóm (i) thuộc về hình dạng công trình bao gồm: dạng đập, chiều cao đập tính từ đỉnh đập tới đáy hạ lưu (P), chiều cao bậc thụt (a), bán kính cong của mũi hắt (R), góc hắt (θ), độ sâu của mũi hắt (D). Thực tế cho thấy, khi có R và θ có thể tính được D hoặc ngược lại. Như vậy một trong ba đại lượng R, D, θ chỉ có hai đại lượng là độc lập. Việc sử dụng cặp số liệu nào trong ba thông số của mũi hắt sẽ được xem xét tiếp theo khi phân tích tương quan với từng đại lượng thuộc nhóm (ii).

Các đại lượng ở nhóm (ii), thuộc về đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy phần lớn là các đại lượng đo được gồm 2 loại: (1) Các đại lượng có thứ nguyên là độ dài như: chiều sâu dòng chảy, chiều dài khu xoáy, ký hiệu là L; (2) Các đại lượng có thứ nguyên là lưu tốc, ký hiệu là V. Ở đây thấy rằng L và V là các đại lượng phái sinh không điều khiển được, phụ thuộc hoàn toàn vào các đại lượng ở nhóm (i), chúng không ảnh hưởng đến nhau nên khi xem xét L thì sẽ không có V và ngược lại. Bảng 2.2 thể hiện các đại lượng được xem xét và thứ nguyên của chúng.

Bảng 2.2. Các đại lượng được xem xét và thứ nguyên của chúng

Số TT	Các đại lượng	Ký hiệu	Thứ nguyên
I	Các đại lượng điều chỉnh được trong thí nghiệm		
1	Lưu lượng qua công trình	[Q]	L^3T^{-1}
2	Độ sâu dòng chảy hạ lưu	[h _h]	L
3	Chiều cao bậc thụt sau mũi hắt	[a]	L
4	Bán kính cong của mũi hắt	[R]	L
5	Chiều cao đập tràn tính đến đáy kênh hạ lưu	[P]	L
6	Góc hắt của mũi phóng	[θ]	θ
7	Chiều sâu của mũi phóng	[D]	L
8	Gia tốc trọng trường	[g]	LT^{-2}
9	Khối lượng riêng của nước	[ρ]	ML^{-3}
10	Độ nhớt động lực của nước	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
II	Các đại lượng không điều chỉnh được là đầu ra của thí nghiệm		
11	Độ sâu dòng chảy trước xoáy nước thứ nhất	[h ₁₁]	L
12	Độ sâu dòng chảy sau xoáy nước thứ nhất	[h ₁₂]	L
13	Chiều dài của xoáy nước thứ 1	[L ₁]	L
14	Vận tốc dòng chảy lớn nhất của xoáy thứ nhất	[V _{max1}]	LT^{-1}
15	Độ sâu dòng chảy trước xoáy nước thứ hai	[h ₂₁]	L

Số TT	Các đại lượng	Ký hiệu	Thứ nguyên
16	Độ sâu dòng chảy sau xoáy nước thứ hai	[h ₂₂]	L
17	Chiều dài của xoáy nước thứ hai	[L ₂]	L
18	Vận tốc dòng chảy lớn nhất của xoáy thứ hai	V _{max2}	LT ⁻¹
19	Độ sâu dòng chảy trước xoáy nước thứ ba	[h ₃₁]	L
20	Độ sâu dòng chảy sau xoáy nước thứ ba	[h ₃₂]	L
21	Chiều dài của xoáy nước thứ ba	[L ₃]	L
22	Vận tốc dòng chảy lớn nhất của xoáy thứ ba	V _{max3}	LT ⁻¹

Các đại lượng ở nhóm (i) sẽ được đưa vào phương trình hàm số xét tác động đến các yếu tố ở nhóm (ii). Do nhóm (ii) là các đại lượng không điều chỉnh được trong thí nghiệm nên không có tác động đến nhau và đến các đại lượng điều chỉnh được ở nhóm (i). Ngoài các yếu tố thủy lực ở nhóm (i) được xét là có ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả của thí nghiệm (các yếu tố ở nhóm ii), còn có nhiều đại lượng khác cũng ảnh hưởng mà trong nghiên cứu này không đề cập đến như: hình dạng cửa vào, cột nước trên tràn, độ nhám bề mặt, hình dạng mặt tràn,... vì chúng được xét trên cùng một bề mặt hình dạng ngưỡng tràn, nên ảnh hưởng là giống nhau đến các đại lượng ở nhóm (ii).

Những yếu tố ảnh hưởng ở nhóm (i) và một đại lượng L đại diện cho các đặc trưng độ dài như chiều sâu và chiều dài các xoáy và V đại diện cho lưu tốc của các xoáy ở nhóm (ii), có thể viết dưới dạng quan hệ hàm số:

$$f(q, h_n, a, R, P, \theta, D, g, \rho, \mu, L, V) = 0 \quad (2-7)$$

Trong phương trình trên số đại lượng biến đổi độc lập n=12. Dùng phương pháp Buckingham (Định lý π) với việc lựa chọn 3 đại lượng cơ bản là q, a, ρ được hàm số mới có (n - 3) = 9 đại lượng không thứ nguyên.

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-3}) = 0 \quad (2-8)$$

$$\text{hay : } \pi_1 = G(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-3}) \quad (2-9)$$

Việc xác định các tổ hợp không thứ nguyên này được tiến hành theo hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \pi_1 = \rho^{x_1} q^{y_1} a^{z_1} h_h \\ \pi_2 = \rho^{x_2} q^{y_2} a^{z_2} R \\ \pi_3 = \rho^{x_3} q^{y_3} a^{z_3} P \\ \pi_4 = \rho^{x_4} q^{y_4} a^{z_4} \theta \\ \pi_5 = \rho^{x_5} q^{y_5} a^{z_5} D \\ \pi_6 = \rho^{x_6} q^{y_6} a^{z_6} g \\ \pi_7 = \rho^{x_7} q^{y_7} a^{z_7} \mu \\ \pi_8 = \rho^{x_8} q^{y_8} a^{z_8} L \\ \pi_9 = \rho^{x_9} q^{y_9} a^{z_9} V \end{cases} \quad (2-10)$$

Xác định các biến không thứ nguyên π_i bằng cách thay ρ, q, a, h_h, \dots bằng các thứ nguyên của chúng. Giải phương trình (2-10) khi áp đặt các số mũ của M, L, T bằng không, thu được x_i, y_i, z_i , thay ngược trở lại từng phương trình thu được biểu thức biểu diễn từng biến π_i . Cụ thể như sau:

$$\pi_1 = [M.L^{-3}]^{x_1} [L^2.T^{-1}]^{y_1} [L]^{z_1} [L] = M^{x_1} L^{-3x_1+2y_1+z_1+1} T^{-y_1} \quad (2-11)$$

Cân bằng số mũ được: $x_1 = 0; y_1 = 0; z_1 = -1$, ta có $\pi_1 = \frac{h_h}{a}$.

Thực hiện tương tự với các biến không thứ nguyên còn lại, nhận được:

$$\begin{aligned} \pi_2 &= \frac{R}{a} & \pi_3 &= \frac{P}{a} & \pi_4 &= \theta & \pi_5 &= \frac{D}{a} \\ \pi_6 &= \frac{ag}{q^2} = \left(\frac{a}{h_k}\right)^3 & \pi_7 &= \frac{\mu}{\rho q} = \frac{\mu}{\rho V h} = \frac{1}{Re} & \pi_8 &= \frac{L}{a} & \pi_9 &= \frac{aV}{q} \end{aligned}$$

Thay các giá trị π_i vào phương trình (2-8) có:

$$F \left[\frac{h_h}{a}, \frac{R}{a}, \frac{P}{a}, \theta, \frac{D}{a}, \frac{a}{h_k}, \frac{1}{Re}, \frac{L}{a}, \frac{aV}{q} \right] = 0 \quad (2-12)$$

Phương trình (2-12) là phương trình sử dụng để xác định các chuỗi thí nghiệm và các yếu tố tác động đến đại lượng nghiên cứu thực nghiệm tổng quát của luận án.

Với dòng chảy được xét trong khu bình phương sức cản và các tổn thất cục bộ là chủ yếu thì giá trị Re ít tác động đến các yếu tố thủy lực do vậy được bỏ qua.

Trong các yếu tố hình học của mũi hắt (R, D, θ) có quan hệ với nhau, chọn yếu tố góc hắt θ và D để xét vì $D=R(1-\cos\theta)$.

Khi xét trong 03 trường hợp cụ thể của luận án thì phương trình trên được biểu diễn cụ thể như sau:

+ Khi sử dụng (2-12) để xem xét quy luật hình thành dòng chảy phễu, hay xác định chiều sâu hạ lưu giới hạn mà có xuất hiện dòng chảy phễu, lúc đó $h_h = h_{gh}$ và không xét đến nội bộ dòng chảy, nên bỏ qua L và V . Khi đó (2-12) trở thành:

$$\frac{h_{gh}}{a} = F_1 \left[\frac{P}{a}, \frac{a}{h_k}, \frac{D}{a}, \theta \right] \quad (2-13)$$

+ Khi xem xét yếu tố độ dài xoáy cuộn trong nội bộ dòng chảy phễu thì (2-12) trở thành:

$$\frac{L}{a} = F_2 \left[\frac{h_h}{a}, \frac{P}{a}, \frac{a}{h_k}, \frac{D}{a}, \theta \right] \quad (2-14)$$

+ Khi xem xét lưu tốc trong nội bộ dòng chảy phễu thì (2-12) trở thành:

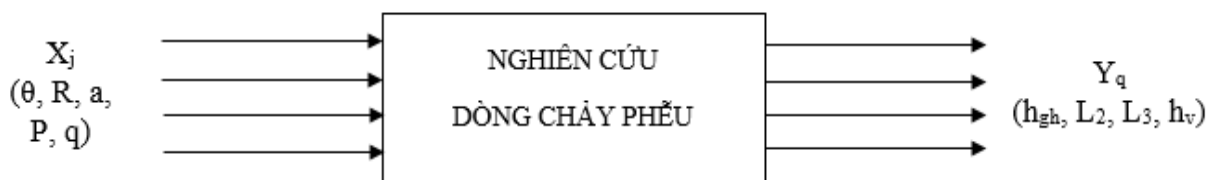
$$\frac{aV}{q} = F_3 \left[\frac{h_h}{a}, \frac{P}{a}, \frac{a}{h_k}, \frac{D}{a}, \theta \right] \quad (2-15)$$

2.3. Ứng dụng quy hoạch thực nghiệm trong nghiên cứu các đặc trưng thủy động lực học của dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt (dòng chảy phễu)

2.3.1. Xác định các kịch bản thí nghiệm

Quy hoạch thực nghiệm quan niệm hệ nghiên cứu là một hộp đen, trong đó cấu trúc và tính chất bên trong là không biết rõ. Nói cách khác, nó không cho biết bản chất bảo toàn và bản chất động học của hệ mà chỉ mô tả mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và các thông số đầu ra của hệ trên cơ sở các phương pháp của toán học thống kê (Nguyễn Lanh, 2005; Nguyễn Minh Tuyên, 2005).

Phương trình (2-13) được sử dụng để xác định các chuỗi thí nghiệm và xác định các yếu tố tác động đến đại lượng nghiên cứu thực nghiệm tổng quát của luận án. Mô tả về mô hình hộp đen nghiên cứu dòng chảy phễu cùng các quan hệ giữa các thông số đầu vào X_j và các thông số đầu ra Y_q (Hình 2.1).



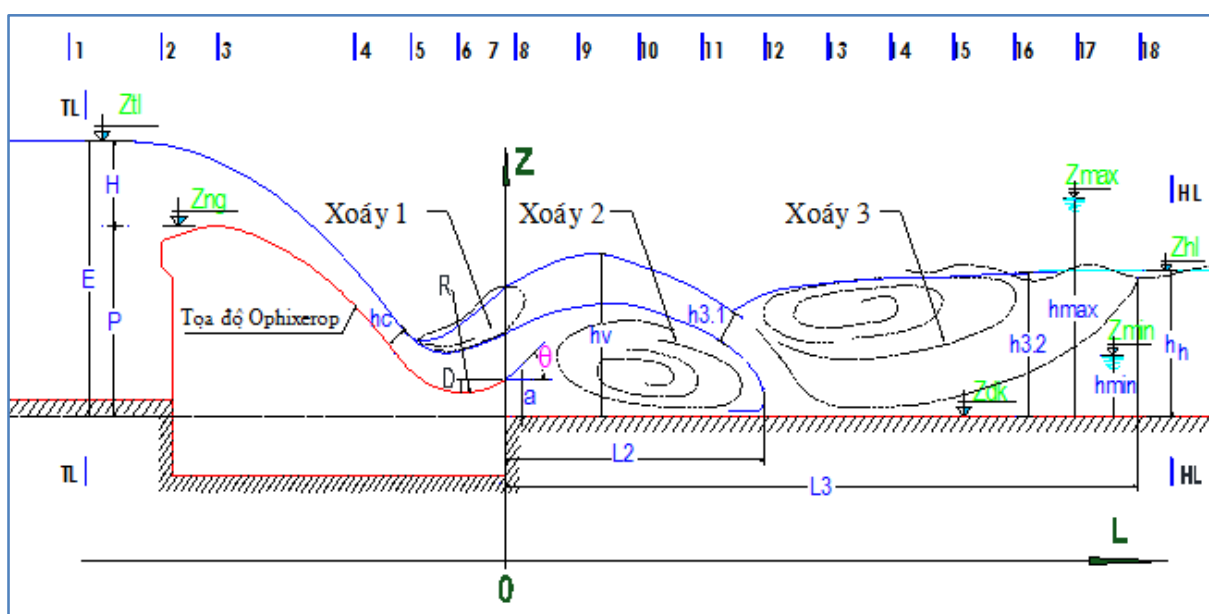
Hình 2.1. Sơ đồ đối tượng nghiên cứu thực nghiệm theo quy hoạch thực nghiệm

Với sơ đồ nghiên cứu như trên, có thể sử dụng các cách khác nhau để tìm ra các quan hệ phụ thuộc của các thông số đầu ra và các thông số đầu vào. Có hai phương pháp thường được dùng nhiều nhất đó là:

+ Phương pháp thứ nhất là xây dựng các phương trình hồi quy thực nghiệm dựa trên cơ sở phân tích thụ động các số liệu có được trong một thời gian làm việc đủ dài của hệ. Nhược điểm chính của phương pháp này là không thể khảo sát tính chất của hệ ở những vùng nằm ngoài miền làm việc, những vùng mà ta không có khả năng thu thập được số liệu.

+ Phương pháp thứ hai là mô hình hóa dựa trên cơ sở chủ động bố trí các thí nghiệm để đo các thông số đầu ra theo các thông số đầu vào đã định trước. Do chủ động bố trí các thông số đầu vào nên có thể chủ động mở rộng được miền khảo sát ra lân cận vùng làm việc của hệ. Từ đó có thể giúp tìm ra miền làm việc tối ưu của hệ. Thông số đầu vào là các biến kiểm tra được và điều khiển được mà người nghiên cứu có thể điều chỉnh theo dự định. Vì vậy, đây là phương pháp quan trọng được dùng phổ biến trong nghiên cứu để xây dựng các mô hình theo kiểu hộp đen nhằm mô tả những mô hình có cấu trúc phức tạp.

Phương pháp thứ hai được sử dụng trong luận án để xây dựng các kịch bản thí nghiệm.



Hình 2.2. Cấu tạo, thông số thủy lực dòng chảy phổ và vị trí mặt cắt đo

Bảng 2.3. Các thông số kích bản thí nghiệm

KB	Ký hiệu chi tiết kích bản	θ (độ)	R (cm)	P (cm)	a (cm)	D (cm)	a/P	D/a
1	$\theta = 51^0$, R=17,8, a/P=0,32	51	17,8	62,2	20,0	6,60	0,32	0,33
2	$\theta = 51^0$, R=17,8, a/P=0,24	51	17,8	55,6	13,3	6,60	0,24	0,50
3	$\theta = 51^0$, R=17,8, a/P=0,14	51	17,8	48,9	6,7	6,60	0,14	0,99
4	$\theta = 44^0$, R=18,6, a/P=0,46	44	18,6	62,2	28,9	5,22	0,46	0,18
5	$\theta = 40^0$, R=21,7, a/P=0,39	40	21,7	68,9	26,7	5,08	0,39	0,19
6	$\theta = 40^0$, R=21,7, a/P=0,32	40	21,7	62,2	20,0	5,08	0,32	0,25
7	$\theta = 40^0$, R=21,7, a/P=0,24	40	21,7	55,6	13,3	5,08	0,24	0,38
8	$\theta = 32^0$, R=25,5, a/P=0,28	32	25,5	62,2	17,6	3,87	0,28	0,22
9	$\theta = 25^0$, R=29,6, a/P=0,32	25	29,6	62,2	20,0	2,77	0,32	0,14
	Max	51	29,6	68,9	28,9	6,60	0,46	0,23
	Min	25	17,8	48,9	6,7	2,77	0,14	0,41

Xét thực nghiệm yếu tố toàn phần 2 mức m yếu tố ảnh hưởng thì số thí nghiệm tối thiểu phải thực hiện là 2^m (Nguyễn Lanh, 2005; Nguyễn Minh Tuyền, 2005).

Trong trường hợp nghiên cứu của luận án, các chuỗi thí nghiệm được lập là tổ hợp của các thông số: góc hất θ , bán kính mũi hất R, chiều cao bậc thụt a, chiều cao công trình P, tỷ lưu q (Hình 2.2).

Như vậy số thí nghiệm cần thực hiện là: $N = 2^5 = 32$ thí nghiệm.

Xây dựng 9 kích bản với các thông số đầu vào (Bảng 2.3), mỗi kích bản thí nghiệm với bốn cấp lưu lượng lần lượt là $0,09 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $0,18 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $0,265 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ và $0,325 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Tổng cộng có 33 trường hợp thí nghiệm, khi tổ hợp với mực nước hạ lưu có hơn 150 thí nghiệm đã được thực hiện.

2.3.2. Xác định hàm toán mô tả hệ

Khi nghiên cứu liên kết tương quan giữa nhiều đại lượng thường dùng mô hình hồi quy đa tuyến tính (Nguyễn Văn Tuấn, 2014; Bùi Thế Tâm, 2007).

Giả sử có n thí nghiệm với m biến độc lập (X_1, X_2, \dots, X_m), Y là chỉ tiêu phân tích của thí nghiệm. Mô hình hồi quy đa tuyến tính có dạng:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + U \quad (2-16)$$

Trong đó, Y (biến phụ thuộc): là chỉ tiêu phân tích của thí nghiệm; α : là hệ số chặn phản ánh mức độ ảnh hưởng của các nhân tố khác đến chỉ tiêu phân tích; β_i : là hệ số ước lượng, các hệ số hồi quy này phản ánh mức độ ảnh hưởng của từng nhân tố đến biến độc lập (nếu $\beta_i > 0$ thì ảnh hưởng thuận và ngược lại là ảnh hưởng nghịch, β_i càng lớn thì sự ảnh hưởng đến chỉ tiêu phân tích càng mạnh); X_i (biến độc lập): là các yếu tố ảnh hưởng đến chỉ tiêu phân tích ($i = 1 \div m$); U : là sai số

Muốn xác định được các hệ số hồi quy lý thuyết β_i phải cần vô số thí nghiệm. Trong thực tế số thí nghiệm chỉ là hữu hạn, nên chỉ xuất hiện các hệ số hồi quy thực nghiệm (còn gọi là các tham số của mô hình thống kê) b_i . Vì vậy hàm toán mô tả hệ là hàm hồi quy thực nghiệm:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_m X_m \quad (2-17)$$

Các hệ số hồi quy được xác định từ N thí nghiệm theo phương pháp bình phương nhỏ nhất. Phương pháp này cho phép xác định các hệ số của phương trình hồi quy đã chọn sao cho độ lệch của sự phụ thuộc đã cho so với số liệu thực nghiệm là nhỏ nhất.

$$\Phi = \sum_{i=1}^N [Y_i - \tilde{Y}]^2 \rightarrow \min \quad (2-18)$$

Trong đó: Y_i là giá trị thực nghiệm ứng với m thông số ở thí nghiệm thứ i , \tilde{Y} là giá trị theo phương trình hồi quy ở thí nghiệm thứ i .

Hệ số hồi quy được tính theo công thức:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i \quad (2-19)$$

Trong đó: $j = 1 \div m$

Các hệ số hồi quy được ước lượng nhờ các phần mềm có sẵn như: Microsoft Excel (Bùi Thế Tâm, 2007), SPSS (Trần Quang Trung, 2012; Hoàng Trọng và cs, 2008), R (Nguyễn Văn Tuấn, 2014).

2.3.3. Các thông số đánh giá độ phù hợp của mô hình hồi quy

+ Hệ số xác định:

Hệ số xác định S^2 là thể hiện tính chặt chẽ giữa biến phụ thuộc Y và các biến độc lập X_i , tức là nó thể hiện phần trăm biến thiên của Y được giải thích bởi sự biến thiên của tất cả các biến X_i (Nguyễn Cao Văn và cs, 2015; Trương Văn Tú, 2006).

$$\text{Hệ số xác định: } S^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (0 \leq S^2 \leq 1) \quad (2-20)$$

Trong đó: $SST = \sum(y_i - y_{tb})^2$: là tổng biến động của y; $SSR = \sum(\tilde{y}_i - y_{tb})^2$: là tổng bình phương hồi quy, là đại lượng biến động của y được giải thích bởi đường hồi quy (SSR càng lớn thì mô hình hồi quy càng có độ tin cậy cao, trong việc giải thích biến động của y); $SSE = \sum(y_i - \tilde{y}_i)^2$: là phần biến động còn lại hay còn gọi là số dư. Hệ số xác định $R^2 \geq 0,81$ là khá tốt.

+ Hệ số tương quan bội:

S là hệ số tương quan bội nói lên tính chặt chẽ của mối quan hệ giữa biến phụ thuộc y và các biến độc lập X_i (Nguyễn Cao Văn và cs, 2015; Trương Văn Tú, 2006).

$$S = \sqrt{S^2} \quad (-1 \leq S \leq +1) \quad (2-21)$$

+ Sai số chuẩn:

$$SS = \sqrt{\frac{SSE}{(N - m - 1)}} \quad (2-22)$$

Sai số chuẩn $SS \leq 0,30$ là khá tốt.

+ Phân tích Anova hồi quy:

Giá trị được dùng để kiểm định sự phù hợp của hàm hồi quy là giá trị F. Việc kiểm định này nhằm đảm bảo cho việc phù hợp của hàm hồi quy tuyến tính mẫu với các hệ số tìm được vẫn có giá trị khi suy diễn ra mô hình thực tế cho tổng thể. Để kiểm định sự phù hợp của mô hình hồi quy tổng thể, ta sử dụng Sig.F làm căn cứ cho việc chấp nhận hay bác bỏ giả thuyết (Ngô Văn Thứ và Nguyễn Mạnh Thế, 2015; Hoàng Trọng và Chu Nguyễn Mộng Ngọc, 2008; Bùi Thế Tâm, 2007; Trương Văn Tú, 2006).

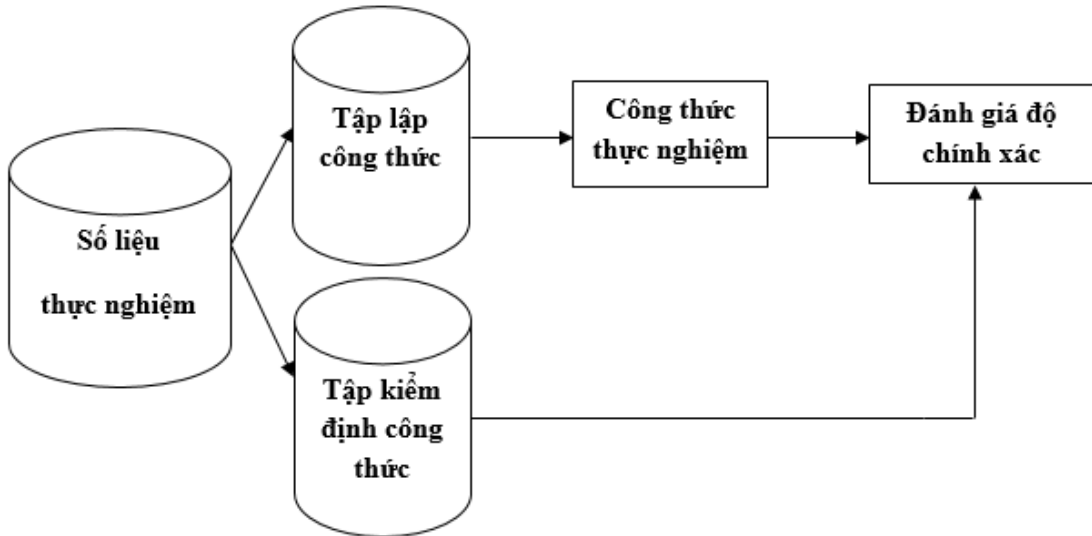
Sig. F < α : Mô hình có ý nghĩa.

Sig. F > α : Mô hình không có ý nghĩa.

Thông thường chọn $\alpha = 0,05$ (mức ý nghĩa là 5%)

+ *Kiểm định công thức thực nghiệm:*

Để kiểm định độ chính xác của các công thức thực nghiệm được xây dựng từ mô hình hồi quy tuyến tính đa biến thường sử dụng phương pháp Holdout. Trong phương pháp này, số liệu thực nghiệm được chia làm 2 tập: tập lập công thức và tập kiểm định công thức. Hình 2.3 thể hiện sơ đồ của phương pháp này.



Hình 2.3. Sơ đồ phương pháp holdout

2.3.4. Phân tích tương quan

Hệ số tương quan (r) là một chỉ số thống kê đo lường mối liên hệ tương quan giữa hai biến số x và y . Hệ số tương quan có giá trị từ -1 đến +1; hệ số tương quan bằng không hay gần không ($r \approx 0$) thì là hai biến số đó không tương quan; tương quan ít khi hệ số tương quan $|r| < 0,3$, tương quan khi hệ số tương quan $|r| = 0,3 \div 0,75$ và tương quan chặt khi hệ số tương quan $|r| > 0,75$. Về chiều tương quan của hai biến đang khảo sát: đồng biến khi hệ số tương quan $r < 0$, nghịch biến khi hệ số tương quan $r > 0$ (Nguyễn Cao Văn và cs, 2015; Ngô Văn Thứ và Nguyễn Mạnh Thế, 2015; Trương Văn Tú, 2006).

Cho hai biến số x và y từ n mẫu, hệ số tương quan Pearson được tính bằng công thức sau :

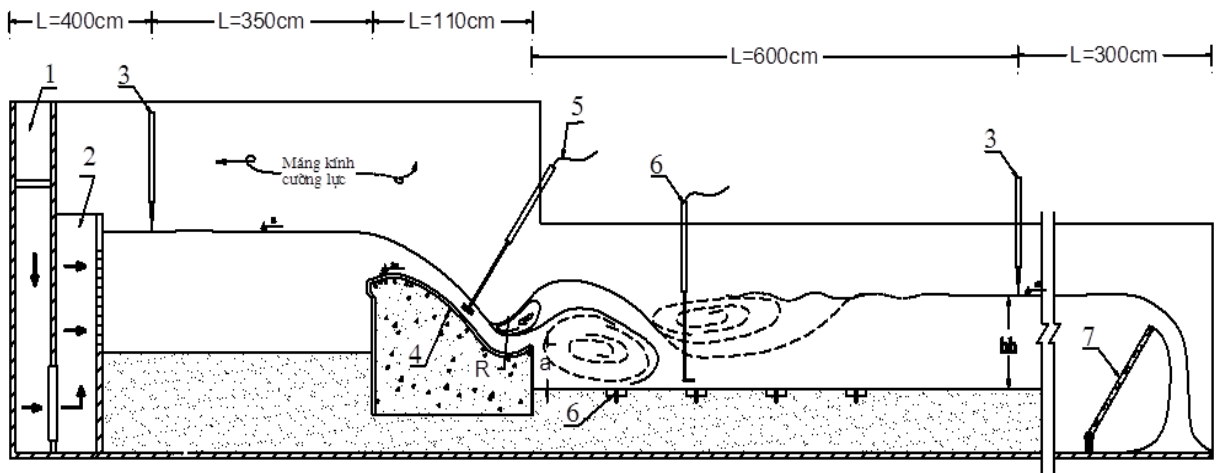
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2-23)$$

Hệ số tương quan r có thể dễ dàng tính toán nhờ các phần mềm phân tích số liệu như Microsoft Excel (Trương Văn Tú, 2006), SPSS (Trần Quang Trung, 2012), R (Nguyễn Văn Tuấn, 2014) trên hai chuỗi số liệu.

2.4. Mô hình thí nghiệm

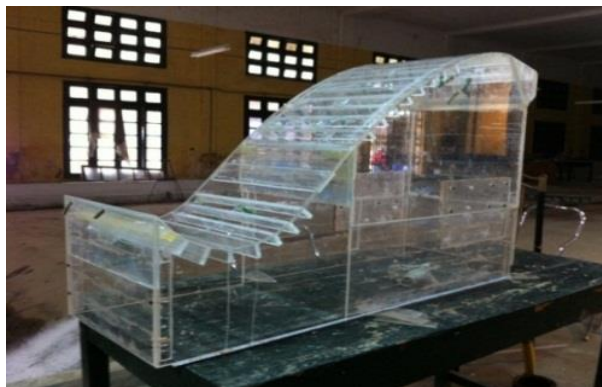
2.4.1. Mô hình

Để tiến hành thí nghiệm, mô hình mặt cắt được xây dựng trong máng kính dài 17,6m, rộng 0,4m, tại Trung tâm Nghiên cứu Thủy lực thuộc Phòng Thí nghiệm Trọng điểm Quốc gia về Động lực học sông biển, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam.



1-Máng lường cấp nước, 2-Khu lạng sóng, 3-Kim đo mực nước, 4-Đầu đo áp suất trung bình, 5- Đầu đo lưu tốc, 6-Đầu đo áp lực mạch động tại đáy, 7-Cửa xả.

Hình 2.4. Sơ đồ bố trí thí nghiệm



a. Mô hình đập tràn và mũi hút



b. Mô hình sau khi lắp đặt

Ảnh 2.1. Mô hình thí nghiệm

Kích thước mô hình: Phần thượng lưu: Dài \times Rộng \times Cao = $8,6 \times 0,4 \times 2,0$ m;
Hạ lưu: Dài \times Rộng \times Cao = $9,0 \times 0,4 \times 1,2$ m (Hình 2.4, Ảnh 2.1b), đảm bảo các yêu cầu thí nghiệm theo tiêu chuẩn TCVN: 8214 – 2009, cụ thể:

+ Chiều dài thượng lưu đảm bảo lớn hơn 10 lần cột nước tràn lớn nhất. Dòng chảy tại điểm kim đo mực nước thượng lưu ổn định.

+ Chiều dài hạ lưu đảm bảo vượt qua phạm vi các khu xoáy cuộn, dòng chảy trở về trạng thái tự nhiên và khoảng lưu không lớn, tránh các ảnh hưởng do thao tác vận hành cửa cuối đến khu vực dòng chảy phễu. Dòng chảy tại điểm kim đo mực nước hạ lưu ổn định.

+ Chiều cao máng kính đảm bảo cao hơn mực nước thượng, hạ lưu cao nhất bao gồm cả dòng vòng cao, sóng ở hạ lưu.

Việc xả nước cuối máng kính, khống chế mực nước hạ lưu bằng cửa van claple có gioăng cao su kín nước, có thể thay đổi độ mở với những bước rất nhỏ để điều chỉnh tăng giảm mực nước hạ lưu từ từ giúp cho việc quan sát các hiện tượng xảy ra trong thí nghiệm một cách liên tục.

Mô hình đập tràn được làm bằng kính hữu cơ, đường cong mặt tràn được vạch theo tọa độ Ophixerop (Ảnh 2.1a), phần mũi hắt được thiết kế có thể tháo rời từ mặt đập tràn. 5 mũi hắt có bán kính 17,8cm; 18,6cm; 21,7cm; 25,5cm và 29,6cm tương ứng với góc hắt 51^0 , 44^0 , 40^0 , 32^0 , 25^0 với các kích bản khác nhau được xây dựng theo các tỷ lệ kích thước tương ứng; địa hình đáy lòng dẫn dùng vữa xi măng cát xoa nhẵn có độ nhám từ (0,10÷0,12).

2.4.2. Bố trí mặt cắt, vị trí, thiết bị đo

2.4.2.1. Vị trí, mặt cắt đo

Vị trí, mặt cắt đo trong thí nghiệm được bố trí tại các vị trí đặc thù nhằm mô tả chi tiết các yếu tố đường mặt nước, lưu tốc, áp suất, đặc trưng thủy động lực học dòng chảy tại: ngưỡng đập, bậc thụt, mũi hắt, chi tiết tại các vị trí xoáy cuộn... (Hình 2.2). Ngoài ra trên kênh hạ lưu bố trí các mặt cắt đo với bước 0,2m/1 mặt cắt. Các mặt cắt đo đường mặt nước và lưu tốc bố trí trùng nhau. Mỗi mặt cắt đo hai thủy trực, trên mỗi thủy

trực đo 3 điểm lưu tốc. Trong khu vực các xoáy sau bậc thụt, trên 1 thủy trực đo 5 điểm lưu tốc, theo khoảng cách đều.

Ngoài các mặt cắt đo bố trí theo hệ thống, các vị trí cục bộ được tiến hành đo đặc tại các vị trí đặc trưng, xung yếu nhằm xác định được đặc trưng của các hình thức nổi tiếp sau công trình tháo có bậc thụt.

Để xác định phân bố vận tốc, cấu trúc dòng chảy, tiến hành thí nghiệm chi tiết xác định các thông số như: lưu tốc dòng chảy tại mặt cắt co hẹp, đáy cong mũi hắt, đỉnh mũi hắt, dòng quần ngược hạ lưu bậc thụt, các xoáy, các điểm. Đồng thời xác định phạm vi, vị trí xuất hiện các giá trị lưu tốc đáy lớn nhất của dòng phóng, dòng quần nhằm tìm ra giới hạn, phạm vi dòng chảy sẽ tác động tới lòng dẫn hạ lưu.

Để xác định kích thước các khu xoáy gồm chiều dài, chiều cao, chiều dày dòng chủ lưu được đo đặc gồm: chiều dài xoáy, chiều cao nước vòng, độ sâu tại mặt cắt co hẹp.

2.4.2.2. Thiết bị và phương pháp đo



a. Máy thủy chuẩn



b. Kim đo mực nước cố định



c. Máng lờng đo lưu lượng



d. Thiết bị đo lưu tốc

Ảnh 2.2. Thiết bị đo

+ **Do lưu lượng:** Để xác định lưu lượng cấp vào mô hình, dùng máng lường chữ nhật, với ngưỡng là đập tràn thành mỏng (Ảnh 2.2c). Lưu lượng được xác định theo công thức Rehbock. Công thức này áp dụng trong phạm vi giới hạn $0,15m < P_T < 1,22m$ (P_T là chiều cao máng lường, h là cột nước đỉnh máng lường; h_e là cột nước tính toán: $h_e = h + 0,0011m$). Máng lường ở đây có chiều rộng $b=0,8m$, chiều cao $P_T=0,70m$, được thiết kế ba tầng để kéo dài dòng chảy đảm bảo lắng nước trước khi tới ngưỡng.

$$Q = bh_e^{\frac{3}{2}} \left(1,782 + 0,24 \frac{h_e}{P_T} \right) \quad (2-24)$$

+ **Do cao độ mặt nước:** Sử dụng kim đo mực nước cố định, máy thủy chuẩn Ni04 và mia để đo cao độ mặt nước dòng chảy (Ảnh 2.2a), kết hợp kiểm tra bằng thước thép.

Đo đường mặt nước tại các vị trí đặc trưng của dòng chảy như vị trí dòng chảy co hẹp trên mặt ngưỡng, trên mũi hắt, vị trí điểm nước vòng lớn nhất, vị trí đặc trưng các xoáy cuộn của dòng chảy phễu “3 xoáy, 1 sóng”.

Để đo đường mặt nước dùng các bình đo được bố trí ở hạ lưu và thượng lưu. Tại các điểm đo, giá trị thu được là cao độ đường mặt nước đã được trung bình hóa theo thời gian.

Sử dụng mia có gắn thước thép với vạch chia độ đến 1mm và đọc bằng máy thủy bình Ni04 có du xích 0,1mm để đo cao độ đường mặt nước. Đường mặt nước tại khu vực thượng lưu và sau các xoáy rất dễ dàng để đo đúng với độ chính xác trên. Nhưng với khu vực có xoáy, đường mặt nước luôn dao động, do vậy cần phải đọc trong một thời gian đủ dài để lấy số trung bình hóa và đọc tối thiểu 03 lần.

Ngoài số liệu đo bằng mia, các độ sâu dòng chảy cũng được đo bằng thước thép lá thông qua thành máng. Giá trị phép đo là số liệu trung bình thời gian trong khoảng 1-2 phút, đặc biệt là chiều cao nước vòng.

Số liệu đo bằng các cách khác nhau được đối chứng ngay khi đo và nếu có sai lệch ngay lập tức được đo lại để kiểm tra, đảm bảo rằng các số liệu đo được là chính xác, loại bỏ được sai số chủ quan, sai số hệ thống và sai số ngẫu nhiên.

+ **Do chiều dài nước nhảy:** Chiều dài của nước nhảy là phép đo khó khăn nhất vì nó thường biến động, nên được chú ý đặc biệt. Chiều dài nước nhảy tính từ chân bậc thụt đến điểm kết thúc các xoáy quan sát được bên thành máng. Vị trí khi dòng chảy bắt đầu quán lại là điểm kết thúc của xoáy. Trong phép đo này, vị trí kết thúc xoáy cuộn là vị trí trung bình thời gian. Trên mô hình quan sát trong khoảng thời gian từ 30 giây đến 1 phút

để xác định (Hình 2.2). Cũng như đo đường mặt nước tại mỗi lần thí nghiệm phép đo được lặp lại để đảm bảo không mắc phải các sai số chủ quan, sai số hệ thống và sai số ngẫu nhiên.

+ **Đo lưu tốc:** Dùng đầu đo điện tử E30, E40 và PEMS do Hà Lan chế tạo (Ảnh 2.2d) có dải đo lần lượt là $(0 \div 2,50)$ m/s và $(0 \div 5,00)$ m/s. Tín hiệu đo được bộ thu đưa vào máy vi tính có chương trình lập sẵn để xử lý cho kết quả lưu tốc trung bình thời gian và hệ số mạch động lưu tốc tại các điểm đo (Hình 2.2).

Để đảm bảo độ ổn định của phép đo, thời gian đo mỗi điểm là 30 giây, mỗi giây nhận 10 tín hiệu, như vậy mỗi điểm đo có 300 số liệu tức thời.

+ **Xác định hiệu quả tiêu năng:** Bằng cách tính năng lượng tại hai mặt cắt thượng lưu và hạ lưu công trình (Hình 2.2):

Mặt cắt thượng lưu công trình: mặt cắt thượng lưu tràn (mcTL);

Mặt cắt hạ lưu công trình: mặt cắt trên kênh hạ lưu (mcHL) sau nước nhảy;

Năng lượng dòng chảy tại từng mặt cắt xác định theo công thức:

$$E_i = Z_i + \frac{\alpha \bar{V}_i^2}{2g} \quad (2-25)$$

Năng lượng được tiêu hao ΔE qua toàn công trình là: $\Delta E = E_T - E_H$

Tỷ lệ năng lượng được tiêu hao $\Delta E\% = \Delta E / E_T$

Trong đó: E_i , Z_i , V_i : giá trị năng lượng, mực nước và lưu tốc trung bình dòng chảy tại mặt cắt tính toán (Hình 2.2).

2.4.3. Đánh giá sai số thí nghiệm mô hình

Sai số của số liệu thí nghiệm mô hình mắc phải bao gồm sai số do chế tạo mô hình, sai số do thiết bị đo, sai số của công thức áp dụng và sai số đo của đại lượng dao động. Trong đó sai số đo của đại lượng dao động chỉ xuất hiện với các đại lượng có dao động bởi tính rối mạnh của dòng chảy như: Đường mặt nước ở khu xoáy, chiều dài, kích thước khu xoáy, độ sâu co hẹp khi bị ngập, phạm vi dòng chủ lưu khi đo bằng thước thép, máy thủy chuẩn và mia.

2.4.3.1. Sai số do chế tạo mô hình

Sai số chế tạo máng kính: Mô hình mặt cắt dòng chảy phễu đặt trong máng kính với chiều rộng 0,4m. Gia công máng kính có sai số đo được là ± 2 mm. Sai số tương đối tính với kích thước nhỏ nhất (chiều rộng máng) 0,4m, có giá trị là $\frac{2}{400} * 100 = 0,5\%$.

Sai số chế tạo đáy lòng dẫn mô hình: Lòng dẫn mô hình được xây trát bằng vữa xi măng cát mịn, có sai số đo được sau khi hoàn thành là $\pm 2\text{mm}$. Sai số tương đối lớn nhất mắc phải với độ sâu dòng chảy hạ lưu bé nhất có $h_n = 10,6\text{ cm}$ là $2/106 = 1,5\%$.

Sai số gia công chế tạo đầu mối bằng kính hữu cơ: Sai số tuyệt đối mắc phải về cao độ và kích thước dài đo được sau khi lắp đặt vào máng là $\pm 0,2\text{mm}$. Với chiều cao bậc thực bé nhất là 67mm thì sai số tương đối là $0,5\%$. Với độ sâu dòng chảy tại mặt cắt co hẹp nhỏ nhất là 3cm thì sai số tương đối là $0,6\%$.

Tổng sai số do chế tạo máng kính và đáy máng hoặc gia công đầu mối được tính theo công thức: $\frac{\Delta\omega}{\omega}(\%) = \left| \frac{\Delta h}{h} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right|$

Với phần trát vữa xi măng ở thượng, hạ lưu đầu mối là:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega}(\%) = \left| \frac{\Delta h}{h} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right| = 1,8 + 0,5 = 2,3\%$$

$$\text{Với phần kính hữu cơ ở đầu mối công trình là: } \frac{\Delta\omega}{\omega}(\%) = \left| \frac{\Delta h}{h} \right| + \left| \frac{\Delta b}{b} \right| = 0,6 + 0,5 = 1,1\%$$

2.4.3.2. Sai số của thiết bị đo

Sai số của thiết bị là sai số của công thức tính được áp dụng hoặc khoảng chia nhỏ nhất của thiết bị đo.

- Sai số của công thức (2-24) tính lưu lượng qua máng lường nhỏ hơn 1% ;
- Sai số đo mực nước bằng kim đo là $0,1\text{mm}$;
- Sai số đo mực nước bằng mia và máy Ni04 là $0,1\text{mm}$;
- Sai số đo chiều dài bằng thước thép là $0,5\text{mm}$ ($1/2$ khoảng chia);
- Sai số của thiết bị đo lưu tốc đã được kiểm định không quá 1% .

2.4.3.3. Sai số của số liệu thí nghiệm

- Sai số của phép đo lưu lượng gồm các sai số: do chế tạo máng lường, do phép đo cột nước trên đỉnh đập tràn bằng kim đo và do công thức. Tổng sai số của phép đo lưu lượng là khoảng 2% . Trong đó sai số của công thức là 1% , sai số đọc kim và chế tạo máng là 1% được tính theo công thức:

$$\frac{\Delta q}{q}(\%) = 1,782 \left(\left| \frac{\Delta b}{b} \right| + \left| \frac{3\Delta h_e^{1/2}}{2h_e} \right| \right) = 1,782(0,00067 + 0,0047)100 \approx 1\%$$

- Sai số của phép đo độ sâu dòng chảy ở các vùng ít dao động, sai số mắc phải gồm sai số chế tạo máng và sai số của thiết bị đo:

- + Khi đo bằng kim đo sai số tuyệt đối là $(0 \pm 0,1)\text{mm}$, sai số tương đối dưới 2,5%.
- + Khi đo bằng mìa sai số tuyệt đối là $(1 \pm 0,5)\text{mm}$, sai số tương đối là 3,0%.
- Sai số của phép đo độ sâu dòng chảy ở các vùng dao động mạnh, ngoài sai số chế tạo máng và sai số của thiết bị đo còn có sai số dao động của đại lượng đo.
- + Với chiều sâu nước vòng sai số dao động lên đến 5mm. Vậy tổng sai số tuyệt đối là 7mm. Với độ sâu nước vòng nhỏ nhất là 37cm, thì sai số tương đối của độ sâu nước vòng là $7/370=2,0\%$, tổng sai số tương đối là $(2,0\%+0,5\%)=2,5\%$.
- + Với phép đo chiều dài khu xoáy, sai số dao động là 2cm, tổng sai số tuyệt đối là 2,1cm. Với chiều dài xoáy nhỏ nhất là 50cm thì sai số tương đối là 2%. Phép đo này không ảnh hưởng của sai số do chế tạo.

Sai số tương đối khi đo lưu tốc tính theo công thức:

$$v = \frac{q}{\omega}, \text{ sai số tương đối } \frac{\Delta v}{v} = \left| \frac{\Delta q}{q} \right| + \left| \frac{\Delta \omega}{\omega} \right|$$

Trong đó b, h là chiều rộng và chiều sâu mặt cắt đo.

Tổng cộng sai số đo lưu tốc: $\Delta v = 2\% + 1\% \approx 3\%$.

Như vậy sai số của các phép đo mắc phải lớn nhất về trị tuyệt đối chiều dài khu xoáy là 2,5%. Sai số tương đối lớn nhất mắc phải của lưu tốc dòng chảy và chiều cao nước vòng là 3%.

2.4.4. Các điều kiện giới hạn mô hình

Khi nghiên cứu dòng chảy qua công trình tháo là dòng chảy hở, các lực tác dụng vào dòng chảy thì trọng lực đóng vai trò chủ yếu, nên tiêu chuẩn tương tự mô hình được chọn trong các thí nghiệm này là tương tự trọng lực hay tiêu chuẩn Froude.

$$\begin{cases} Fr = \text{idem} \\ Re_m > Re_{gh} \\ C = \text{idem} \end{cases} \quad (2-26)$$

Ngoài luật tương tự cơ bản nêu trên, mô hình phải đảm bảo các điều kiện tương tự của dòng chảy trong mô hình và ngoài thực tế:

- + Về chế độ dòng chảy: Nếu ngoài thực tế, dòng chảy ở chế độ chảy tầng hoặc chảy rối thì trong mô hình cũng phải tương tự điều kiện đó. Trong trường hợp thí nghiệm của luận án, dòng chảy là dòng chảy rối ở khu bình phương sức cản.

+ Tương tự nhám: Vì dòng chảy ở nguyên hình và trong mô hình là dòng chảy rối ở khu bình phương sức cản nên khi thiết kế mô hình chỉ cần đảm bảo tương tự hình học giữa độ gồ ghề của nguyên hình và mô hình theo hệ số nhám là có tương tự về sức cản dọc đường (Nguyễn Cảnh Cầm và cs 2006).

+ Ngoài ra độ sâu dòng chảy nhỏ nhất trên mô hình không được phép nhỏ hơn 3cm, để bảo đảm không bị ảnh hưởng của sức căng mặt ngoài.

Xét theo điều kiện (2-26), để đảm bảo các thí nghiệm được tiến hành trong khu tự động mô hình thì số Reynolds nhận được ở thượng lưu mô hình – vị trí có vận tốc nhỏ nhất (Re_m) phải lớn hơn số Reynolds giới hạn trên (Re_{gh}). Khi nghiên cứu sự nối tiếp dòng chảy thượng hạ lưu, I.I. Levy cho rằng số $Re_{gh} = 5.000 \div 10.000$ (Hoàng Văn Quý, 1979).

Số Reynolds ở hạ lưu tính theo công thức:

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu} = \frac{V \cdot h_h}{\nu} = \frac{q}{\nu} \quad (2-27)$$

Tính cho trường hợp khi tháo với lưu lượng nhỏ nhất ($Q=36$ l/s) và lưu lượng lớn nhất ($Q=130$ l/s) thì lưu lượng đơn vị ở hạ lưu mô hình thay đổi trong khoảng ($0,09 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \div 0,325 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$). Trong điều kiện thí nghiệm với nhiệt độ nước $t > 20^\circ \text{C}$, chọn $\nu = 0,01 \text{ cm}^2/\text{s}$. Từ công thức (2-27) xác định được phạm vi thay đổi của số Reynolds (Re) trong khoảng ($9.000.000 \div 325.000.000$). So sánh với Reynolds giới hạn có $Re_m > Re_{gh}$, nên dòng chảy trong mô hình sẽ làm việc trong khu tự động mô hình.

2.4.5. Điều kiện áp dụng trong thực tế

Từ điều kiện tự động mô hình nêu trên có:

$$Re_m = \frac{q_m}{\nu_m} \geq Re_{gh} \quad (2-28)$$

Theo tiêu chuẩn tương tự Froude có: $\frac{q_{tt}}{q_m} = \lambda^{3/2} \quad (2-29)$

Thay (2-28) vào (2-29) được:

$$\lambda \leq \left(\frac{q_{tt}}{\nu_m Re_{gh}} \right)^{2/3} \quad (2-30)$$

Theo điều kiện thực tế của một số công trình tháo lũ ở Việt Nam có lưu lượng đơn vị qua tràn thường là $q_{tt} = 40 \div 130 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Do đó, nếu lấy $Re_{gh} = Re_{\min} = 9.000.000$

và $v_m = 0,01 \text{ cm}^2/\text{s}$ (tương ứng với nhiệt độ của nước thí nghiệm $t > 20^\circ\text{C}$) thì tỷ lệ mô hình cho phép tương ứng với phạm vi của lưu lượng thực tế theo (2-30) là:

$$\lambda \leq 58 \div 127 \quad (2-31)$$

Như vậy, với đối tượng nghiên cứu và các điều kiện đã cho, mô hình với tỷ lệ theo (2-31) sẽ đảm bảo sự tương tự giữa mô hình với tự nhiên và chắc chắn các thí nghiệm đã được tiến hành trong khu tự động mô hình đối với sức cản. Vì vậy, các kết quả nghiên cứu thí nghiệm trong luận án này hoàn toàn áp dụng được vào thực tế, khi sử dụng phép biến đổi ra nguyên hình với tỷ lệ $\lambda \leq 100$, với công trình lớn hơn thì vẫn có thể tham khảo tốt.

2.4.6. Quy trình thí nghiệm

Mở nước: Vận hành máy bơm đưa nước từ bể chứa lên bể áp lực rồi từ đó chảy qua máng lường đo lưu lượng, chảy vào mô hình.

Với các kích bản về kết cấu bậc thụt (Bảng 2.3), tiến hành thí nghiệm với 04 cấp lưu lượng lần lượt là: $Q_1 = 130 \text{ l/s}$, $Q_2 = 106 \text{ l/s}$, $Q_3 = 72 \text{ l/s}$, $Q_4 = 36 \text{ l/s}$ hay: $q_1 = 0,325 \text{ m}^3/\text{s/m}$; $q_2 = 0,265 \text{ m}^3/\text{s/m}$, $q_3 = 0,180 \text{ m}^3/\text{s/m}$, $q_4 = 0,090 \text{ m}^3/\text{s/m}$, bằng cách điều chỉnh cửa van hạ lưu, có thể thay đổi độ mở với những bước rất nhỏ. Ứng với từng trạng thái dòng chảy nối tiếp, cố định mực nước hạ lưu và tiến hành đo đạc các thông số như trình bày ở mục 2.4.2.2.

2.5. Kết luận chương 2

1. Trên cơ sở lý thuyết tương tự, mô hình hóa, quy hoạch thực nghiệm xây dựng được cơ sở phương pháp luận để xác định các đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy phễu.

2. Với đối tượng nghiên cứu và trong các điều kiện đã cho, mô hình được xây dựng đảm bảo các thí nghiệm tiến hành trong khu tự động mô hình đối với sức cản và các kết quả nghiên cứu thí nghiệm trong luận án này có thể áp dụng vào thực tế.

3. Qua đánh giá sai số các phép đo trên mô hình, cho thấy sai số mắc phải nhỏ hơn 3%.

CHƯƠNG 3: ĐẶC TRƯNG THỦY ĐỘNG LỰC HỌC CỦA DÒNG NỐI TIẾP HỖN HỢP MẶT – ĐÁY – NGẬP 3 XOÁY SAU BẬC THỤT

Với lý thuyết được trình bày ở chương 2, cùng mô hình vật lý được xây dựng, trong chương 3 trình bày các kết quả nghiên cứu đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy phễu sau bậc thụt trong điều kiện nghiên cứu của luận án.

3.1. Giới hạn trên và giới hạn dưới hình thành dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập sau bậc thụt (dòng chảy phễu)

3.1.1. Sự chuyển đổi chế độ nối tiếp ở hạ lưu bậc thụt có tỷ lệ $a/P=0,14\div 0,46$ và góc hắt $\theta=25^{\circ}\div 51^{\circ}$

Khi thay đổi mực nước hạ lưu, thu được các dạng nối tiếp khác nhau của dòng chảy. Việc phân định các dạng nối tiếp ở hạ lưu được xác định bởi sự hình thành các xoáy cuộn trên chiều đứng dòng chảy (Hình 2.2).

Từ thượng lưu về hạ lưu, các xoáy được đánh số theo thứ tự 1, 2, 3. Xoáy 1 là xoáy xuôi, ngược chiều kim đồng hồ, xuất hiện ở ngay trên mũi phóng. Xoáy 2 là xoáy ngược, thuận chiều kim đồng hồ, xuất hiện ở sau bậc thụt. Xoáy 3 là xoáy xuôi, ngược chiều kim đồng hồ, xuất hiện ở sau luồng phun, sau xoáy 2. Khi tổng hợp, phân tích, sơ đồ hóa thu được tất cả 07 dạng cơ bản lần lượt từ mực nước hạ lưu thấp đến cao:

+ Khi mực nước hạ lưu thấp hơn chiều cao bậc thụt, dòng chảy phóng tự do trên mũi và nối tiếp với hạ lưu bằng dòng phóng xa. Khi mực nước còn thấp ở hạ lưu hoàn toàn là dòng xiết, không xuất hiện bất kỳ xoáy cuộn nào. Dạng nối tiếp này gọi là hình thức nối tiếp phóng xa bằng dòng xiết (HT1) (Hình 3.1a).

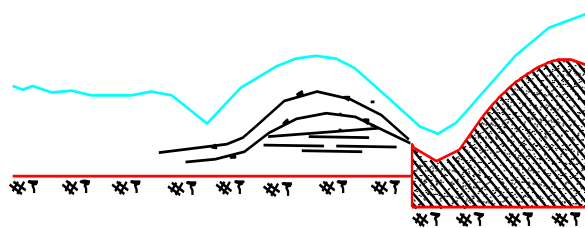
+ Tiếp tục dâng mực nước hạ lưu, khi $h_h > h_k$, nối tiếp hạ lưu chuyển sang nối tiếp dạng 2. Tùy kích bản và cấp lưu lượng mà ở hạ lưu chỉ xuất hiện xoáy 3, hoặc đồng thời xuất hiện xoáy 2 và xoáy 3, hoặc xuất hiện xoáy 3 rồi tiếp tục xuất hiện xoáy 2 và 3. Dạng nối tiếp chỉ có xoáy 3 vẫn giống như dòng phun xa được ký hiệu là TT2a (Hình 3.1b). Nhưng dạng nối tiếp xuất hiện đồng thời xoáy 2 và 3 thì là nước nhảy mặt đáy không ngập, dạng nối tiếp này được ký hiệu là TT2b (Hình 3.1c). Dạng nối tiếp này tồn tại trong một khoảng nhỏ của chiều sâu hạ lưu nên không ổn định, gọi là trạng thái giới hạn dưới (TT2).

+ Tiếp tục dâng mực nước hạ lưu, nối tiếp hạ lưu chuyển sang dạng 3. Dòng chảy sau mũi bậc phía trên và phía dưới đều có xoáy cuộn (xoáy 2 và xoáy 3) cùng với xoáy 1 ở trên mũi hất, hình thành dòng chảy phức với 3 xoáy cuộn ổn định trong một khoảng biên độ chiều sâu hạ lưu lớn (Hình 3.1d). Dạng nối tiếp này chính là dòng hỗn hợp mặt–đáy–ngập hỗn hợp 3 xoáy gọi là dòng chảy phức (HT3). Trong kết quả thí nghiệm, chỉ duy nhất trường hợp góc hất 51^0 và có $a/P=0,14$, $q=0,325 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ không xuất hiện nối tiếp dạng 3.

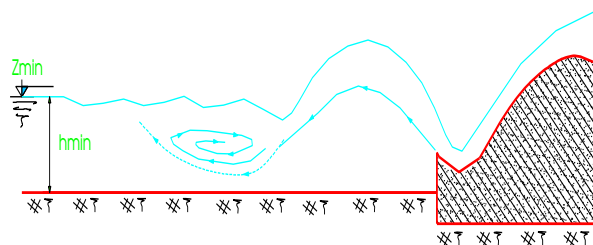
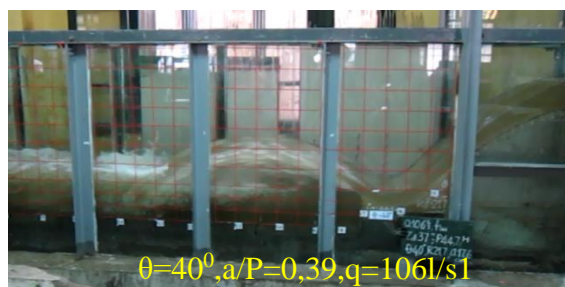
+ Tiếp tục dâng mực nước hạ lưu, nối tiếp dạng 3 chuyển sang nối tiếp dạng 4. Nước trong khối phức xoáy cuộn theo chiều đứng càng lớn thì góc tới của dòng nước càng nhỏ, dòng chảy chính vượt quá bề mặt, các xoáy cuộn ở hạ lưu dần biến mất, thay vào đó là một loạt sóng bề mặt, chỉ còn xoáy cuộn trên mũi bậc (xoáy 1), dạng này được ký hiệu là TT4a (Hình 3.1e). Trong một số trường hợp lưu lượng tháo, chiều cao bậc thụt và góc hất lớn thì đáy của dòng chảy sau mũi bậc vẫn còn xoáy cuộn (xoáy 2) dạng này ký hiệu là TT4b (Hình 3.1g), dòng chảy chính bị nổi lên hình thành sóng xô ở hạ lưu. Dạng nối tiếp này là nước nhảy mặt ngập gọi là trạng thái giới hạn trên (TT4).

+ Tiếp tục dâng cao mực nước hạ lưu, từ nối tiếp dạng 4 chuyển sang nối tiếp dạng 5, đây là hình thức nối tiếp chảy đáy ngập (HT5).

Với 07 dạng nối tiếp xuất hiện như trên, chúng phù hợp với các nghiên cứu thực nghiệm của D.I. Cumin đối với dòng chảy mặt, Viện Nghiên cứu Thủy lực Nam Kinh, Trung Quốc đối với dòng chảy phức.

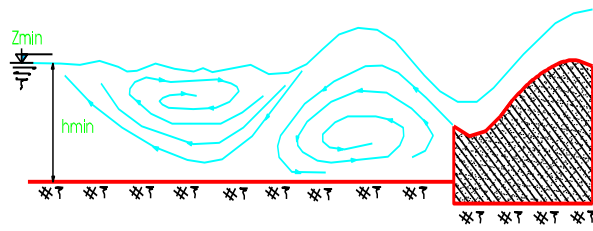


a. Dòng phóng xạ tự do

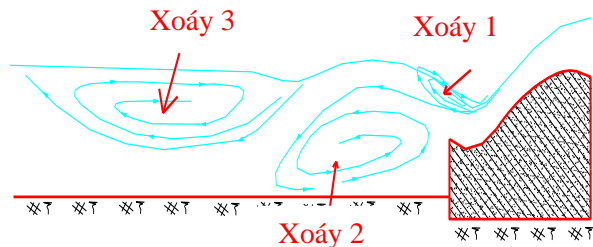
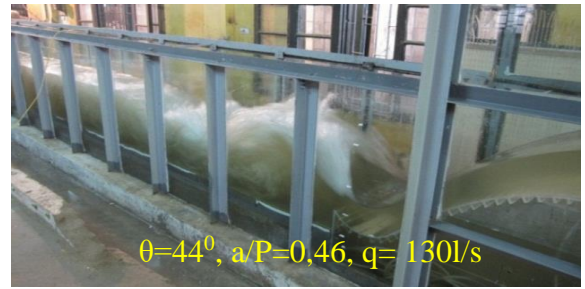


b. TT Giới hạn dưới có xoáy 3 (TT2a)

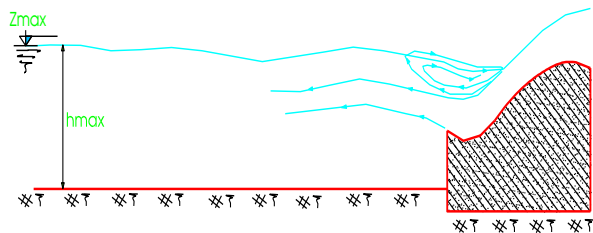
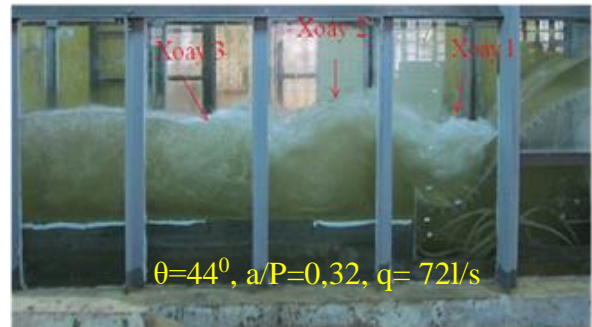




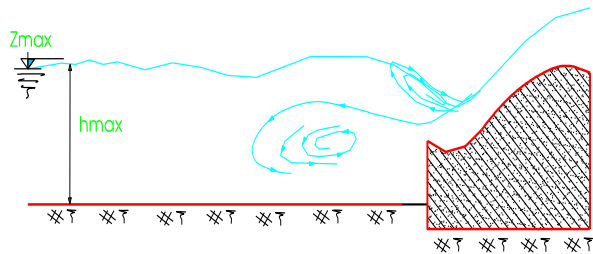
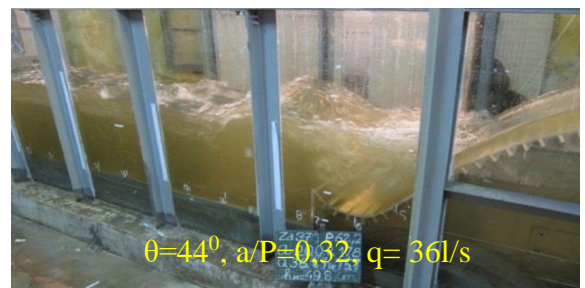
c. TT giới hạn dưới có xoáy 2, 3 (TT2b)



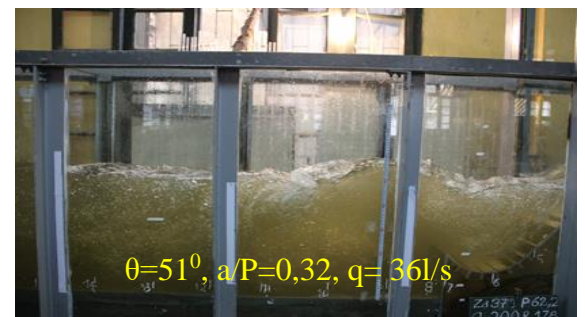
d. Dòng chảy phễu (HT3)



e. TT giới hạn trên có xoáy 1



g. TT giới hạn trên có xoáy 1 và 2



Hình 3.1. Các dạng nối tiếp ở hạ lưu bậc thụt có tỷ lệ $a/P=0,14\div0,46$ và góc hất $\theta=25^{\circ}\div51^{\circ}$

3.1.2. Dòng chảy phễu và trạng thái giới hạn

Dòng chảy phễu là dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập xuất hiện đồng thời 3 xoáy theo chiều đứng ở hạ lưu bậc thụt. Theo kết quả thí nghiệm (Bảng 3.1), hình thức nối tiếp hạ lưu (HT3) là dòng chảy phễu. Trạng thái giới hạn là trạng thái mà ở đó khi có sự thay đổi chiều sâu hạ lưu thì hình thức nối tiếp được chuyển đổi. Hay trạng thái

giới hạn là trạng thái ở đó mực nước hạ lưu là mức tới hạn, khi qua giá trị đó (hoặc một khoảng nhỏ) sẽ có sự biến đổi về chất làm thay đổi hình thức nổi tiếp ở hạ lưu.

Bảng 3.1. Kết quả thí nghiệm sự chuyển đổi các TT2 và TT4 sang HT3

Số TT	Thông số thí nghiệm							Trạng thái và xoáy xuất hiện				
	KB	θ°	a/P	q (m ² /s)	D/h _k	a/h _k	P/h _k	TT2a	TT2b	HT3	TT4a	TT4b
1	1	51	0,32	0,090	0,70	2,13	6,66	3		123		1
2	1	51	0,32	0,180	0,44	1,34	4,20	3		123	12	1
3	1	51	0,32	0,265	0,34	1,04	3,24	3	23	123	12	
4	1	51	0,32	0,325	0,30	0,91	2,83	3	23	123	12	1
5	2	51	0,24	0,090	0,70	1,42	5,92	3		123		1
6	2	51	0,24	0,180	0,44	0,90	3,73	3		123		1
7	2	51	0,24	0,325	0,30	0,60	2,52	3	23	123		1
8	2	51	0,24	0,265	0,34	0,69	2,88	3	23	123		1
9	9	25	0,32	0,265	0,14	1,04	3,24		23	123		1
10	9	25	0,32	0,180	0,19	1,34	4,20		23	123		1
11	9	25	0,32	0,325	0,13	0,91	2,83		23	123		1
12	5	40	0,39	0,090	0,54	2,84	7,29		23	123		1
13	5	40	0,39	0,180	0,34	1,79	4,59	3	23	123		1
14	5	40	0,39	0,265	0,26	1,38	3,55	3	23	123		1
15	5	40	0,39	0,325	0,23	1,21	3,10	3	23	123		1
16	7	40	0,24	0,090	0,54	1,42	5,92		23	123		1
17	7	40	0,24	0,180	0,34	0,90	3,73	3	23	123		1
18	7	40	0,24	0,265	0,26	0,69	2,88		23	123		1
19	7	40	0,24	0,325	0,23	0,60	2,52		23	123		1
20	8	32	0,28	0,180	0,26	1,18	4,21	3	23	123		1
21	8	32	0,28	0,265	0,20	0,91	3,25	3	23	123		1
22	8	32	0,28	0,325	0,18	0,80	2,84		23	123	12	1
23	4	44	0,46	0,180	0,35	1,94	4,22	3	23	123		1
24	4	44	0,46	0,265	0,27	1,50	3,26	3	23	123		1
25	4	44	0,46	0,325	0,24	1,31	2,84	3	23	123		1
26	3	51	0,14	0,090	0,70	0,71	5,08	3		123		1
27	3	51	0,14	0,180	0,44	0,45	3,20	3		123		1
28	3	51	0,14	0,265	0,34	0,35	2,47	3		123		1

Số TT	Thông số thí nghiệm							Trạng thái và xoáy xuất hiện				
	KB	θ^0	a/P	q (m ² /s)	D/h _k	a/h _k	P/h _k	TT2a	TT2b	HT3	TT4a	TT4b
29	6	40	0,32	0,090	0,54	2,13	6,66		23	123		1
30	6	40	0,32	0,265	0,26	1,04	3,24		23	123		1
31	6	40	0,32	0,180	0,34	1,34	4,20	3	23	123		1
32	6	40	0,32	0,325	0,23	0,91	2,83		23	123	12	1
33	3	51	0,14	0,325	0,30	0,30	2,16	3				1
<i>Số lần xuất hiện</i>								22	25	32	5	32
<i>Max</i>		51	0,46	0,325	0,70	2,84	7,29					
<i>Min</i>		25	0,14	0,090	0,13	0,30	2,16					

Khi thay đổi mực nước hạ lưu, ứng với mỗi cấp lưu lượng thường xuất hiện 7 dạng nổi tiếp ở hạ lưu. Mỗi dạng nổi tiếp tồn tại trong 1 khoảng nhất định của mực nước hạ lưu. Trong luận án này, hình thức nổi tiếp dòng chảy phễu (HT3) được nghiên cứu. Khi chuyển đổi từ trạng thái 2 sang hình thức 3 có mực nước hạ lưu giới hạn dưới, hay gọi là mực nước nhỏ nhất xuất hiện dòng chảy phễu, ký hiệu là z_{\min} . Khi chuyển đổi từ hình thức 3 sang trạng thái 4 có mực nước hạ lưu giới hạn trên, hay mực nước hạ lưu lớn nhất xuất hiện dòng chảy phễu, ký hiệu z_{\max} .

Từ đây về sau trong luận án này, mực nước tạo ra sự chuyển đổi hình thức trước và sau dòng chảy phễu được gọi là mực nước hạ lưu giới hạn dưới (z_{\min}) và mực nước hạ lưu giới hạn trên (z_{\max}), tương ứng có độ sâu dòng chảy nhỏ nhất (h_{\min}) và độ sâu dòng chảy lớn nhất (h_{\max}). Trong khoảng chiều sâu hạ lưu từ h_{\min} đến h_{\max} (và ngược lại) là vùng xuất hiện dòng chảy phễu.

Trạng thái giới hạn dưới là trạng thái bắt đầu xuất hiện cả 3 xoáy 1, 2 và 3. Khi chiều sâu hạ lưu nhỏ hơn h_{\min} có 2 trường hợp xảy ra: xuất hiện cả xoáy 2 và 3 là 25/32 lần và chỉ xuất hiện xoáy 3 là 7/32 lần trước khi xuất hiện cả 3 xoáy (Bảng 3.1).

Trạng thái giới hạn trên là trạng thái kết thúc xuất hiện đồng thời cả 3 xoáy 1, 2 và 3. Khi độ sâu dòng chảy lớn hơn h_{\max} cũng có 2 trường hợp xảy ra: xuất hiện đồng thời xoáy 1 và 2 là 5/32 lần và chỉ xuất hiện xoáy 1 là 28/32 lần sau khi xuất hiện cả 3 xoáy (Bảng 3.1).

3.1.3. Tương quan của độ sâu giới hạn và các biến thực nghiệm

Các phương pháp truyền thống trong thủy lực thường dùng để xác định các mối quan hệ thực nghiệm như: phân tích thứ nguyên, định lý hàm π chỉ cho biết chúng có liên hệ với nhau hay không mà không chỉ ra được mức độ tương quan và chiều tương quan (đồng biến hay nghịch biến) của hai đại lượng được khảo sát. Với công cụ phân tích thống kê hiện đại, việc sử dụng các phần mềm xử lý số liệu như SPSS (Hoàng Trọng và Chu Nguyễn Mộng Ngọc, 2008), R (Nguyễn Văn Tuấn, 2014), Microsoft Excel (Bùi Thế Tâm, 2007; Trương Văn Tú, 2006) cho thấy mức độ tương quan và chiều tương quan như phân tích ở mục 2.3.4.

Từ phương trình thực nghiệm (2-13) nhận thấy mực nước giới hạn phụ thuộc vào a, P, θ, R, D, h_k , nhưng không cho biết tương quan của chúng với h_{gh} ở mức độ nào. Bằng cách phân tích tương quan, sử dụng phần mềm Microsoft Excel xử lý số liệu thực nghiệm thu được mối tương quan đơn biến của các đại lượng cần khảo sát và các biến thực nghiệm (Bảng 3.2) và các biến không thứ nguyên (Bảng 3.3).

Bảng 3.2. Hệ số tương quan giữa các đại lượng thứ nguyên

Thứ tự	Tên đại lượng	Ký hiệu	Hệ số tương quan			
			h_{gh}	h_v-h_{22}	L_2	L_3
1	Độ sâu dòng chảy hạ lưu ở trạng thái giới hạn	h_{gh}	1,00			
2	Độ sâu dòng chảy tại xoáy 2	h_v-h_{22}	0,88	1,00		
3	Vị trí kết thúc xoáy 2	L_2	0,75	0,52	1,00	
4	Vị trí kết thúc xoáy 3	L_3	0,76	0,54	0,79	1,00
5	Góc hất mũi phóng	θ	-0,06	0,13	-0,20	-0,35
6	Bán kính cong mũi hất	R	-0,01	-0,24	0,16	0,29
7	Độ sâu của mũi hất $R^* (1-\cos \theta)$	D	-0,11	0,06	-0,20	-0,36
8	Chiều cao đập	P	0,56	0,58	0,26	0,38
9	Chiều cao bậc thụt	A	0,62	0,77	0,18	0,31
10	Lưu lượng đơn vị	Q	0,66	0,40	0,73	0,59
11	Chiều cao cột nước tràn	H	0,66	0,40	0,75	0,60
12	Độ sâu phân giới	h_k	0,66	0,40	0,73	0,58
13	Năng lượng $E=H+P$	E	0,91	0,85	0,82	0,76
14	Độ sâu dòng chảy ở mặt cắt trước xoáy 1	h_{11}	0,69	0,42	0,75	0,62

Bảng 3.2 cho thấy chiều sâu hạ lưu ở trạng thái giới hạn h_{gh} tương quan chặt với các đặc trưng hình dạng của dòng chảy phổ như L_2 , L_3 , h_v , nhưng chúng là các biến thực nghiệm thứ cấp, đo được nhưng không điều khiển được, vì vậy ở đây không xét các tương quan này.

Với các biến độc lập điều khiển được, chiều sâu hạ lưu giới hạn h_{gh} và góc hắt θ , bán kính cong R không có tương quan (hệ số tương quan $r < 0,06$), độ sâu mũi hắt $D=R(1-\cos\theta)$ có tương quan ít ($r = -0,11$). Các đại lượng P , a , q , H , h_k có tương quan và đồng biến với h_{gh} ($r = 0,5 \div 0,7$). Nhưng một điều dễ thấy là hệ số tương quan giữa h_{gh} với H , h_k , q bằng nhau ($r = 0,66$), điều này được lý giải vì q , H , h_k có quan hệ hàm số với nhau, hay nói cách khác chúng là các đại lượng phụ thuộc, nên chỉ cần một đại lượng xuất hiện trong công thức là đủ tổng quát. Điều này phù hợp với các nhận định tại mục 2.2. Do đó, để xây dựng công thức thực nghiệm cho h_{gh} cần thiết lập quan hệ $h_{gh} = F(a, P, h_k, D)$, trong đó biến D thực chất là một biến tích hợp gồm bán kính cong R và góc hắt θ .

Bảng 3.3. Hệ số tương quan giữa các đại lượng không thứ nguyên

Đại lượng	h_{gh}/h_k	h_{gh}/a	h_v/h_k	h_v/a	L_2/h_k	L_2/a	L_2/h_{11}	L_2/h_h	L_3/a	L_3/h_h	R/h_c
a/P	0,86	-0,81	0,74	-0,86	0,38	-0,78	0,28	-0,49	-0,79	-0,38	-0,13
a/H	0,95	-0,92	0,93	-0,9	0,47	-0,87	0,55	-0,49	-0,84	-0,24	0,59
a/h_k	0,95	-0,92	0,94	-0,89	0,48	-0,87	0,56	-0,48	-0,83	-0,22	0,61
$a/(H+P)$	0,92	-0,88	0,83	-0,9	0,42	-0,84	0,38	-0,51	-0,83	-0,34	0,10
D/a	-0,77	0,64	-0,56	0,76	-0,56	0,6	-0,45	0,26	0,52	0	0,04
$R/(h_{11}+v_{11}^2/2g)$	0,32	-0,21	0,22	-0,26	0,33	-0,18	0,43	-0,02	-0,1	0,34	0,75
Fr_c	0,26	-0,38	0,51	-0,18	0,31	-0,29	0,69	0,05	-0,19	0,35	0,89

Các đại lượng không thứ nguyên ở cột thứ nhất (Bảng 3.3) là các đại lượng biến số có tương quan với các đại lượng hàm số ở hàng thứ nhất. Các đại lượng biến số a/P , a/H , a/h_k , $a/(H+P)$, D/a , đều có tương quan chặt với h_{gh}/a và h_{gh}/h_k . Nhưng độ chặt cao hơn khi xét với h_{gh}/h_k . Tương quan của số a/P , a/h_k , $a/(H+P)$ là đồng biến còn D/a là nghịch biến với h_{gh}/h_k . Ngược lại, tương quan của biến số a/P , a/h_k , $a/(H+P)$ là nghịch biến còn D/a là đồng biến với h_{gh}/a . Tương quan của Fr_c và $R/(h_c+v_c^2/2g)$ với h_{gh}/h_k và

h_{gh}/a , là tương quan ít. Cũng như tương quan của các đại lượng có thứ nguyên thì tương quan của các đại lượng không thứ nguyên a/H và a/h_k có giá trị bằng nhau.

Từ các phân tích trên, công thức thực nghiệm tính chiều sâu giới hạn được xác định bởi các đại lượng không thứ nguyên theo các dạng hàm: $\frac{h_{gh}}{h_k} = f_1 \left[\frac{a}{P}, \frac{a}{h_k}, \frac{D}{a} \right]$, và $\frac{h_{gh}}{h_k} = f_{11} \left[\frac{a}{P}, \frac{a}{h_k} \right]$ để lựa chọn một công thức thực nghiệm tốt nhất.

3.1.4. Độ sâu dòng chảy nhỏ nhất và lớn nhất hình thành dòng chảy phễu

Trong mục này, trình bày kết quả xây dựng phương trình xác định độ sâu dòng chảy nhỏ nhất (h_{min}) và lớn nhất (h_{max}) mà trong khoảng đó xuất hiện dòng chảy phễu.

Với mỗi cấp lưu lượng thí nghiệm cho mỗi kích bản, tiến hành dò tìm mực nước hạ lưu mà tại đó có sự chuyển đổi từ TT2 sang HT3, xác định được h_{min} ; mực nước tại đó chuyển đổi từ HT3 sang TT4 và ngược lại, xác định được h_{max} (Bảng 3.4).

Từ kết quả xây dựng phương trình nghiên cứu thực nghiệm và phân tích tương quan đơn biến đã xác định được các biến của hàm không thứ nguyên là: $\frac{h_{gh}}{h_k} = f_1 \left[\frac{a}{P}, \frac{a}{h_k}, \frac{D}{a} \right]$ và $\frac{h_{gh}}{h_k} = f_{11} \left[\frac{a}{P}, \frac{a}{h_k} \right]$ để xác định công thức tính các độ sâu hạ lưu nhỏ nhất và lớn nhất hình thành dòng chảy phễu. Phương pháp phân tích hồi quy đa tuyến tính được sử dụng, việc tuyến tính hóa các dạng hàm khác nhau được sử dụng phép đổi biến và hàm hợp của toán học giải tích. Nhiều dạng hàm số tích hợp bởi các biến không thứ nguyên và các dạng hàm của các công thức tính h_{gh} được trình bày ở chương 1 đã được khảo sát và thử nghiệm, nhưng dạng hàm tuyến tính và hàm mũ được sử dụng cho hàm f_1 và f_{11} thu được kết quả tốt nhất, được trình bày dưới đây, có dạng:

$$\frac{h_{gh}}{h_k} = A_0 + A_1 \frac{a}{P} + A_2 \frac{a}{h_k} + A_3 \frac{D}{a} \quad (3-1)$$

$$\frac{h_{gh}}{h_k} = M_0 \left(\frac{a}{P} \right)^{M_1} \left(\frac{a}{h_k} \right)^{M_2} \left(\frac{D}{a} \right)^{M_3} \quad (3-2)$$

$$\frac{h_{gh}}{h_k} = A_0 + A_1 \frac{a}{P} + A_2 \frac{a}{h_k} \quad (3-3)$$

Phương trình (3-2) được tuyến tính hóa khi logarit hai vế thu được:

$$\ln \left(\frac{h_{gh}}{h_k} \right) = \ln(M_0) + M_1 \ln \left(\frac{a}{P} \right) + M_2 \ln \left(\frac{a}{h_k} \right) + M_3 \ln \left(\frac{D}{a} \right) \quad (3-4)$$

Áp dụng phương pháp kiểm định sai số cho công thức thực nghiệm bằng phương pháp Holdout. Tập số liệu thí nghiệm (Bảng 3.4) được chia thành 2 tập: Tập lập công thức gồm 25 số liệu (từ 1 đến 25) có số liệu thí nghiệm của 7 kích bản, 5 góc hắt, 5 giá trị a/P; tập kiểm định công thức dùng để đánh giá sai số của công thức gồm 7 số liệu (từ 26 đến 32) có số liệu thí nghiệm của hai trường hợp góc hắt 51⁰, a/P=0,14 và góc hắt 40⁰, a/P=0,32. Sai số trong luận án được tính là sai số tương đối (h_{tn}-h_{tt})/h_{tn}.

Bảng 3.4. Số liệu thí nghiệm và tính toán độ sâu dòng chảy nhỏ nhất và lớn nhất

TT	Góc (độ)	a (cm)	q (m ³ /s/m)	Thí nghiệm (cm)			a/P	a/H	a/h _k	Tính toán (cm)		Sai số (%)	
				H	h _{min}	h _{max}				h _{min} theo (3-6)	h _{max} theo (3-9)	h _{min}	h _{max}
Tập lập công thức													
1	51	20,0	0,09	13,5	30,0	49,8	0,32	1,5	2,1	30,6	51,4	1,9	3,2
2	51	20,0	0,18	20,8	38,9	57,5	0,32	1,0	1,3	41,3	59,1	6,2	2,7
3	51	20,0	0,27	26,5	45,9	65,0	0,32	0,8	1,0	48,8	63,9	6,3	-1,8
4	51	20,0	0,33	30,4	52,0	66,1	0,32	0,7	0,9	53,3	66,5	2,6	0,6
5	51	13,3	0,09	13,5	26,3	45,7	0,24	1,0	1,4	26,2	45,9	-0,5	0,5
6	51	13,3	0,18	21,1	33,5	55,3	0,24	0,6	0,9	35,3	52,7	5,6	-4,6
7	51	13,3	0,33	30,7	47,0	59,0	0,24	0,4	0,6	45,6	59,4	-2,9	0,6
8	51	13,3	0,27	26,5	40,5	60,1	0,24	0,5	0,7	41,8	57,0	3,2	-5,2
9	25	20,0	0,27	27,0	52,7	65,0	0,32	0,7	1,0	54,2	65,0	2,8	0,0
10	25	20,0	0,18	21,1	45,0	61,7	0,32	1,0	1,3	45,8	60,1	1,8	-2,6
11	25	20,0	0,33	30,5	57,3	67,3	0,32	0,7	0,9	59,2	67,7	3,2	0,6
12	40	26,7	0,09	13,5	37,0	60,1	0,39	2,0	2,8	35,3	56,8	-4,5	-5,5
13	40	26,7	0,18	21,1	48,9	65,1	0,39	1,3	1,8	47,7	65,2	-2,4	0,2
14	40	26,7	0,27	26,8	55,5	69,4	0,39	1,0	1,4	56,4	70,5	1,5	1,6
15	40	26,7	0,33	30,7	61,1	73,0	0,39	0,9	1,2	61,6	73,4	0,9	0,5
16	40	13,3	0,09	13,5	27,5	44,3	0,24	1,0	1,4	27,0	46,2	-1,8	4,2

TT	Góc (độ)	a (cm)	q (m ³ /s/m)	Thí nghiệm (cm)			a/P	a/H	a/h _k	Tính toán (cm)		Sai số (%)	
				H	h _{min}	h _{max}				h _{min} theo (3-6)	h _{max} theo (3-9)	h _{min}	h _{max}
17	40	13,3	0,18	21,0	37,3	54,3	0,24	0,6	0,9	36,5	53,0	-2,2	-2,3
18	40	13,3	0,27	26,9	44,4	56,8	0,24	0,5	0,7	43,1	57,3	-3,0	0,9
19	40	13,3	0,33	30,6	49,6	59,6	0,24	0,4	0,6	47,1	59,7	-5,1	0,1
20	32	17,6	0,18	21,0	40,2	59,3	0,28	0,8	1,2	42,0	58,9	4,6	-0,7
21	32	17,6	0,27	27,2	51,1	61,0	0,28	0,7	0,9	49,7	63,6	-2,8	4,3
22	32	17,6	0,33	30,8	55,8	68,7	0,28	0,6	0,8	54,3	66,3	-2,7	-3,5
23	44	28,9	0,18	20,9	50,7	61,6	0,46	1,4	1,9	48,3	61,8	-4,8	0,3
24	44	28,9	0,27	27,0	58,5	66,9	0,46	1,1	1,5	57,1	66,8	-2,4	-0,1
25	44	28,9	0,33	30,4	62,5	70,0	0,46	1,0	1,3	62,4	69,6	-0,2	-0,6
Tập kiểm định công thức													
26	51	6,7	0,09	13,5	19,3	36,0	0,14	0,5	0,7	20,2	39,4	4,7	9,3
27	51	6,7	0,18	21,0	27,7	45,3	0,14	0,3	0,5	27,3	45,2	-1,4	-0,2
28	51	6,7	0,27	26,9	35,6	50,7	0,14	0,3	0,4	32,3	48,8	-9,4	-3,7
29	40	20,0	0,09	13,6	34,4	52,7	0,32	1,5	2,1	31,5	51,7	-8,3	-1,8
30	40	20,0	0,27	27,0	50,6	64,8	0,32	0,7	1,0	50,4	64,2	-0,4	-0,9
31	40	20,0	0,18	21,1	42,0	61,0	0,32	1,0	1,3	42,6	59,4	1,4	-2,6
32	40	20,0	0,33	30,6	55,7	68,4	0,32	0,7	0,9	55,0	66,9	-1,2	-2,2

Trong luận án này, dùng cùng tập lập công thức và tập kiểm định công thức trên để xây dựng và kiểm định các công thức thực nghiệm.

Từ số liệu thí nghiệm (Bảng 3.4), lập bảng tính giá trị hàm số và biến số cho các dạng công thức (3-1), (3-2) và (3-3). Sử dụng công cụ phân tích hồi quy (Regression) của phần mềm xử lý số liệu Microsoft Excel xác định các hệ số hồi quy của phương trình cho kết quả các tham số và hệ số hồi quy của hàm thực nghiệm (Bảng 3.5).

Bảng 3.5 cho thấy giá trị của hệ số kiểm định tương quan Sig.F<0,05. Như vậy việc giả thiết hàm tuyến tính là phù hợp. Các hệ số xác định $S^2 > 0,9$ là có tương quan rất chặt, sai số chuẩn SS < 0,16 nên các kết quả có ý nghĩa.

Bảng 3.5. Tham số tương quan và hệ số hàm thực nghiệm về độ sâu dòng chảy nhỏ nhất và lớn nhất

TT	Đại lượng	Theo công thức (3-1)	Theo công thức (3-2)	Theo công thức (3-3)
I	Độ sâu dòng chảy nhỏ nhất (h_{\min})			
1	Hệ số tương quan bội S	0,9814	0,9739	0,9570
2	Hệ số xác định S^2	0,9631	0,9485	0,9159
3	Hệ số xác định điều chỉnh	0,9578	0,9411	0,9083
4	Sai số chuẩn SS	0,0891	0,0372	0,1313
5	Số lượng quan sát N	25	25	25
6	Hệ số kiểm định tương quan Sig. F	3,4E-15	1,11E-13	1,48E-12
7	Hệ số tự do	2,3200	0,6453	1,5825
8	Hệ số/Số mũ của biến a/P	-0,545	-0,1176	0,8235
9	Hệ số/Số mũ của biến a/ h_k	0,7308	0,3548	0,7171
10	Hệ số/Số mũ của biến D/a	-1,107	-0,1218	
11	Sai số lớn nhất tập lập công thức (%)	6,6	6,3	8,8
12	Sai số lớn nhất tập kiểm định công thức (%)	24,2	9,4	8,3
II	Độ sâu dòng chảy lớn nhất (h_{\max})			
1	Hệ số tương quan bội S	0,9857	0,9925	0,9856
2	Hệ số xác định S^2	0,9715	0,9850	0,9714
3	Hệ số xác định điều chỉnh	0,9675	0,9829	0,9688
4	Sai số chuẩn SS	0,1584	0,0281	0,1551
5	Số lượng quan sát N	25	25	25
6	Hệ số kiểm định tương quan Sig.F	2,2E-16	2,59E-19	1,03E-17
7	Hệ số tự do	3,251	0,460	3,177
8	Hệ số / Số mũ của biến a/P	-6,106	-0,601	-5,970
9	Hệ số/ Số mũ của biến a/ h_k	1,992	0,695	1,991

TT	Đại lượng	Theo công thức (3-1)	Theo công thức (3-2)	Theo công thức (3-3)
10	Hệ số / Số mũ của biến D/a	-0,110	-0,020	0,000
11	Sai số lớn nhất tập lập công thức (%)	9,7	5,5	10,4
12	Sai số lớn nhất tập kiểm định công thức (%)	13,9	9,3	16,1

Bảng 3.5 cho các phương trình hồi quy tính toán chiều sâu giới hạn của dòng chảy phễu cụ thể như sau:

+ Độ sâu dòng chảy nhỏ nhất h_{\min} :

$$\frac{h_{\min}}{h_k} = 2,32 - 0,54 \frac{a}{P} + 0,73 \frac{a}{h_k} - 1,11 \frac{(1 - \cos \theta) R}{a} \quad (3-5)$$

$$\frac{h_{\min}}{h_k} = e^{0,645} \left(\frac{P}{a}\right)^{0,117} \left(\frac{a}{h_k}\right)^{0,355} \left(\frac{a}{(1 - \cos \theta) R}\right)^{0,122} \quad (3-6)$$

$$\frac{h_{\min}}{h_k} = 1,58 + 0,82 \frac{a}{P} + 0,72 \frac{a}{h_k} \quad (3-7)$$

+ Độ sâu dòng chảy lớn nhất h_{\max} :

$$\frac{h_{\max}}{h_k} = 3,25 - 6,11 \frac{a}{P} + 1,99 \frac{a}{h_k} - 0,11 \frac{(1 - \cos \theta) R}{a} \quad (3-8)$$

$$\frac{h_{\max}}{h_k} = e^{0,46} \left(\frac{P}{a}\right)^{0,601} \left(\frac{a}{h_k}\right)^{0,695} \left(\frac{a}{(1 - \cos \theta) R}\right)^{0,02} \quad (3-9)$$

$$\frac{h_{\max}}{h_k} = 3,18 - 5,97 \frac{a}{P} + 1,99 \frac{a}{h_k} \quad (3-10)$$

Áp dụng các công thức tính độ sâu dòng chảy nhỏ nhất và lớn nhất nêu trên, cho thấy:

+ Khi tính h_{\min} , công thức (3-5) có sai số mắc phải lớn nhất với tập lập công thức là 6,6%, với tập kiểm định công thức là 24,2% (trương ứng với trường hợp $a/P=0,14$, $q=0,27\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, góc hắt 51°); công thức (3-6) có sai số mắc phải lớn nhất với tập lập công thức là 6,3% và tập kiểm định công thức là 9,4%; công thức (3-7) có sai số mắc phải lớn nhất với tập lập công thức là 8,8% và tập kiểm định công thức là 8,3%.

+ Khi tính h_{\max} , công thức (3-8) có sai số mắc phải lớn nhất với tập lập công thức là 9,7%, với tập kiểm định công thức là 13,9% (trương ứng với trường hợp $a/P=0,14$, $q=0,27\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, góc hắt 51°); công thức (3-9) có sai số mắc phải lớn nhất với tập lập công

thức là 5,5% và tập kiểm định công thức là 9,3%; công thức (3-10) có sai số mắc phải lớn nhất với tập lập công thức là 10,4% và tập kiểm định công thức là 16,1%.

Các công thức thực nghiệm thu được (3-7) và (3-10) có cùng dạng với các công thức thực nghiệm (1-14), (1-15) của T.N.Astaficheva đã xây dựng cho trường hợp $H/P < 2/3$, góc hắt từ 0^0 đến 15^0 (Nguyễn Văn Cung và cs, 2005) và công thức (1-17), (1-18) của Viện Nghiên cứu Thủy lực Nam Kinh, Trung Quốc (Nanjing Hydraulic Research Institute, 1985) thiết lập khi không kể đến yếu tố góc hắt.

Các công thức (3-6) và (3-9) cho thấy ảnh hưởng của yếu tố góc hắt với độ sâu giới hạn dưới lớn hơn với độ sâu giới hạn trên, điều này là phù hợp với đặc tính của dòng chảy phễu và các phân tích ở mục 3.1.1.

So sánh sai số và mức độ tương quan cho thấy công thức (3-6) và (3-9) là phù hợp nhất để xác định độ sâu dòng chảy nhỏ nhất và lớn nhất mà trong khoảng đó tồn tại dòng chảy phễu. Công thức rút gọn như sau:

$$\frac{h_{\min}}{h_k} = 1,906 \left(\frac{a}{P}\right)^{-0,117} \left(\frac{a}{h_k}\right)^{0,355} \left(\frac{a}{D}\right)^{0,122} \quad (3-11)$$

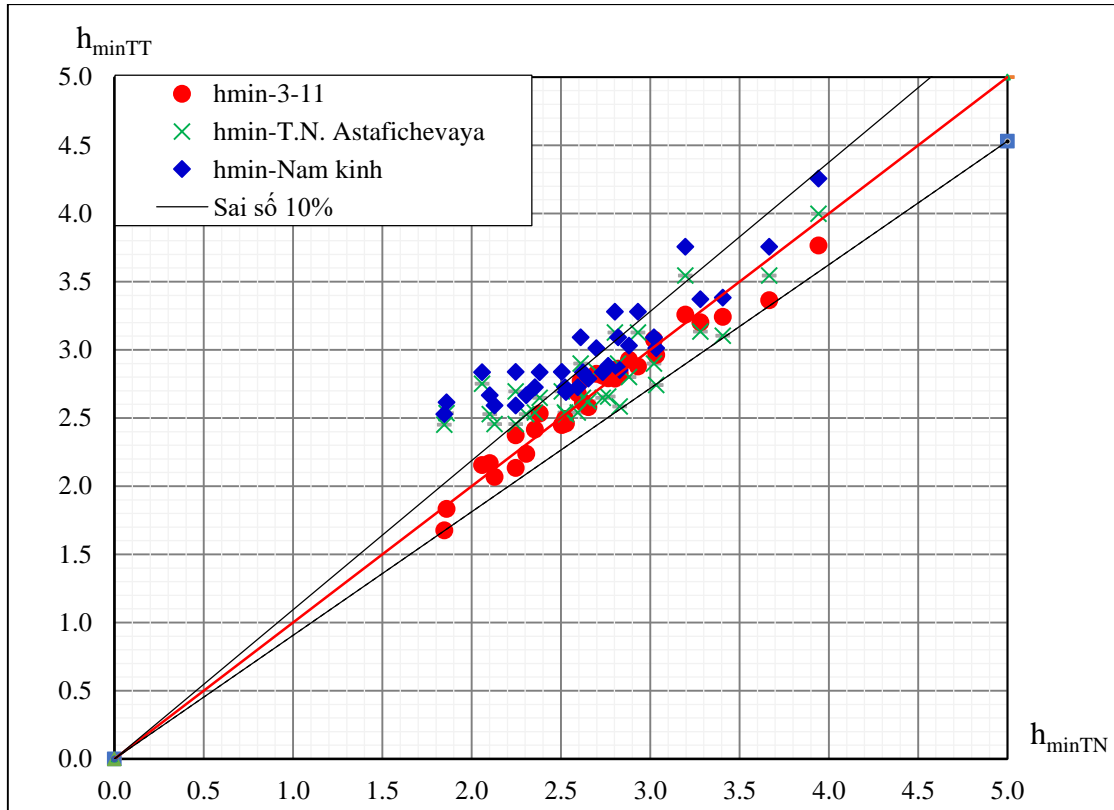
$$\frac{h_{\max}}{h_k} = 1,584 \left(\frac{a}{P}\right)^{-0,601} \left(\frac{a}{h_k}\right)^{0,695} \left(\frac{a}{D}\right)^{0,02} \quad (3-12)$$

Căn cứ số liệu thí nghiệm và kết quả tính toán vẽ các quan hệ (Hình 3.2, Hình 3.3, Hình 3.4, Hình 3.5 và Hình 3.6).

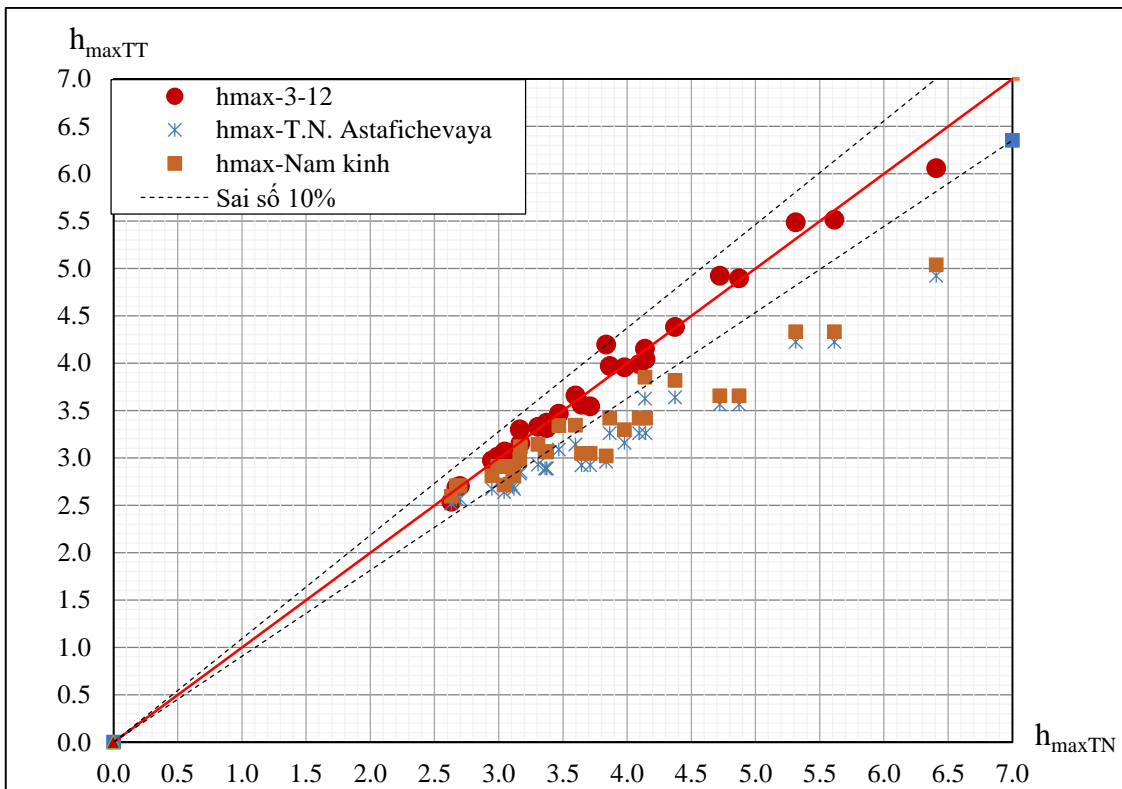
Hình 3.2, Hình 3.3 cho thấy kết quả tính toán theo công thức (3-11) và (3-12) rất tập trung và nằm trong phạm vi sai số nhỏ hơn 10%, đối với kết quả tính toán theo công thức (1-14), (1-15) của T.N.Astaficheva; công thức (1-17), (1-18) của Viện Nghiên cứu Thủy lực Nam Kinh, Trung Quốc thiết lập có sai số lớn hơn 10%.

Hình 3.4, Hình 3.5 cho thấy các giá trị tính toán theo công thức thực nghiệm (3-11) và (3-12) so với tài liệu thí nghiệm khá phù hợp cả về quy luật thay đổi cũng như các giá trị ở từng thời điểm.

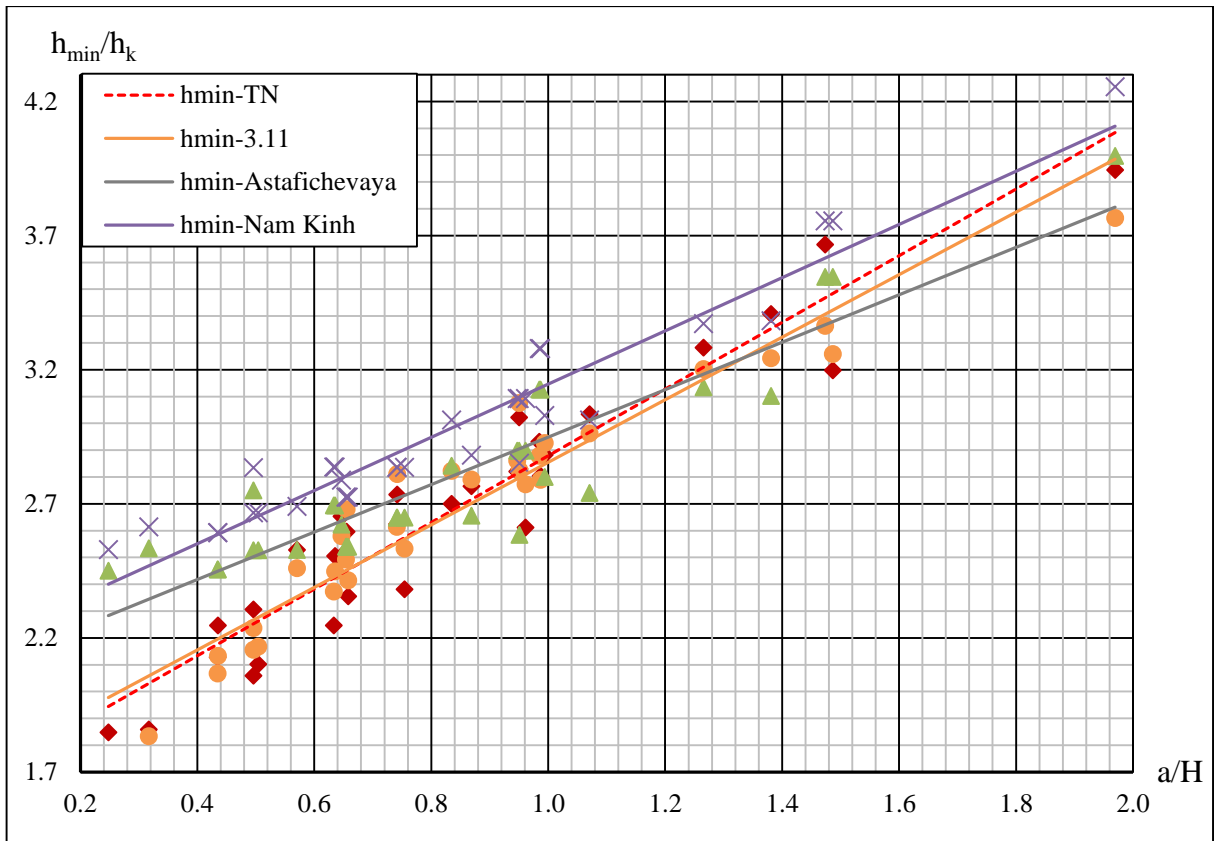
Với cùng thông số đầu vào, tính toán theo công thức (1-14), (1-15) của T.N.Astaficheva đã xây dựng cho trường hợp $\frac{H}{P} \leq \frac{2}{3}$, góc hắt từ 0^0 đến 15^0 ; công thức (1-17), (1-18) của Viện Nghiên cứu Thủy lực Nam Kinh, Trung Quốc thiết lập khi không kể đến yếu tố góc hắt và công thức thực nghiệm (3-11) và (3-12). Lập quan hệ không thứ nguyên giữa h_{gh}/h_k và a/H (Hình 3.6) cho thấy:



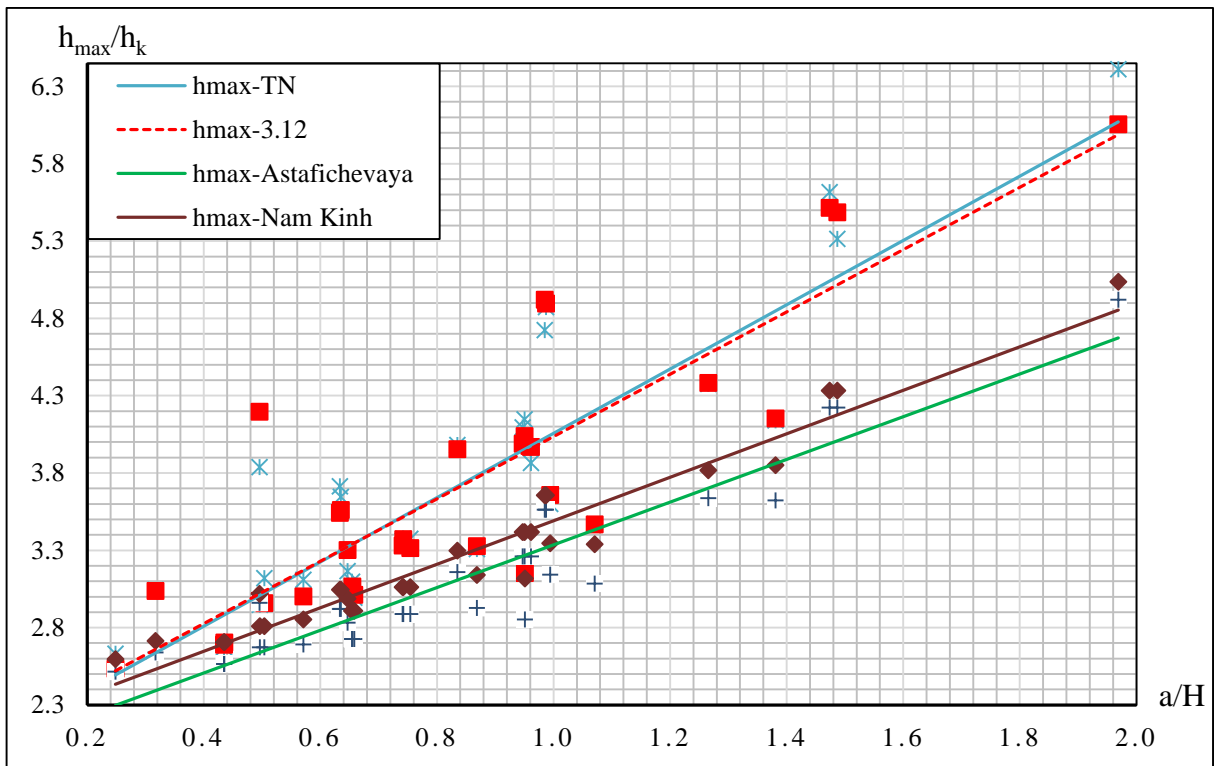
Hình 3.2. Quan hệ giữa số liệu thí nghiệm và số liệu tính toán h_{min}



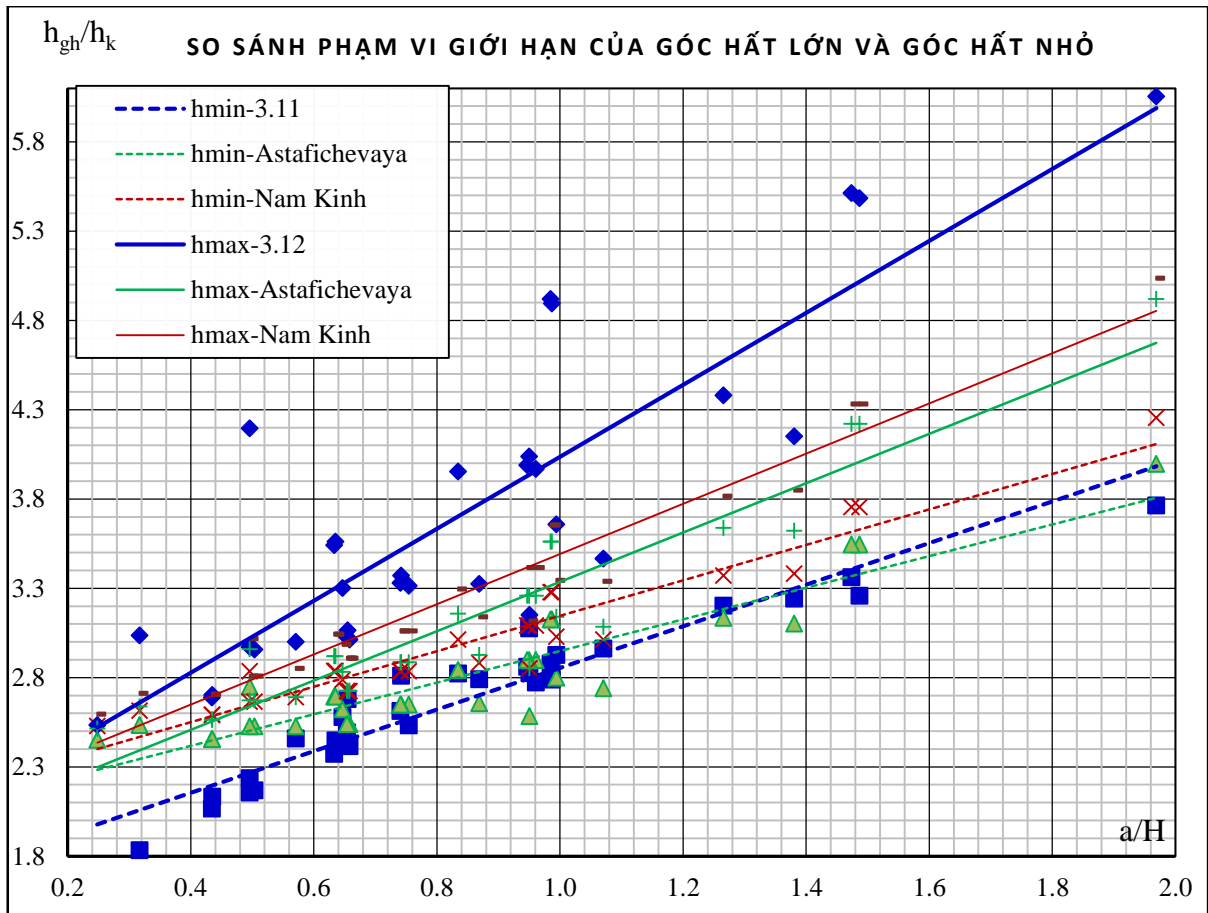
Hình 3.3. Quan hệ giữa số liệu thí nghiệm và số liệu tính toán h_{max}



Hình 3.4. Quan hệ đại lượng $h_{\min}/h_k \sim a/H$ thực nghiệm và tính toán



Hình 3.5. Quan hệ đại lượng $h_{\max}/h_k \sim a/H$ thực nghiệm và tính toán



Hình 3.6. Quan hệ h_{gh}/h_k và a/H của góc hắt nhỏ hơn 15° và góc hắt lớn hơn 25°

+ Đường bao giới hạn trên và dưới theo kết quả nghiên cứu của luận án này bao trọn các đường giới hạn của góc hắt nhỏ; khoảng cách nhỏ nhất giữa đường giới hạn trên và giới hạn dưới gần bằng khoảng cách lớn nhất tương ứng của góc hắt nhỏ.

+ Tại đầu dưới của trục hoành khi $a/H = 0,25$: với góc hắt nhỏ hai đường giới hạn trên và dưới trùng nhau, còn với góc hắt lớn $\Delta h_{gh} = 0,56h_k$.

+ Khi giá trị a/H lớn ($a/H \approx 2,0$) phạm vi dòng chảy ổn định giữa 2 trạng thái giới hạn ở hạ lưu bậc thụt của dạng góc hắt lớn hơn 25° ($\Delta h_{gh} = 2,5h_k$) gấp 2,5 lần so góc hắt nhỏ hơn 15° ($\Delta h_{gh} = 0,92 h_k$).

+ Kết quả tính toán chi tiết cũng chỉ ra rằng trong khoảng $a/H = (0,25 \div 2)$ thì với góc hắt lớn hơn 25° có $\Delta h_{gh} = (0,33 \div 2,5)h_k$, còn với góc hắt nhỏ hơn 15° có $\Delta h_{gh} = (0,06 \div 0,92)h_k$.

Điều này có nghĩa khi công trình sử dụng bậc thụt có góc hắt lớn hơn 25° thì vùng xuất hiện hình thức dòng chảy phễu ở hạ lưu lớn hơn tới 2,5 lần so với dạng góc hắt nhỏ hơn 15° , hệ số có giá trị lớn được áp dụng cho trường hợp góc hắt lớn.

Những phân tích trên đây cũng chỉ ra rằng, với góc hắt nhỏ hơn 15° hình thức nối tiếp qua nước nhảy mặt rất thiếu ổn định, nó chỉ ổn định với trường hợp a/H lớn. Đó là nhược điểm lớn nhất của hình thức nối tiếp nhảy mặt ở sau bậc thụt, nên chúng ít được áp dụng trong thực tế.

3.2. Đặc trưng hình dạng của dòng chảy phễu

Trong thủy lực công trình, việc xác định các đặc trưng hình dạng của nước nhảy và các dạng nối tiếp tiêu năng nhằm phục vụ thiết kế xây dựng công trình tiêu năng. Trong dòng chảy phễu, việc xác định tính toán kích thước các xoáy cuộn có ý nghĩa quan trọng. Trong phần này trình bày các đặc trưng hình học, tập trung vào hai yếu tố là chiều cao nước vồng lớn nhất của dòng chảy phễu và chiều dài khu xoáy 2 và xoáy 3.

3.2.1. Chiều cao nước vồng

Trong cấu trúc của dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt. Sóng hình thành bởi sự cưỡng bức dòng phun của mực nước hạ lưu, xuất hiện tại vị trí xoáy 2. Chiều cao sóng đó được gọi là chiều cao nước vồng (Nguyễn Quốc Huy, 2016a), hay là độ sâu dòng chảy lớn nhất ở hạ lưu của dòng chảy phễu, theo sơ đồ nước nhảy, đó chính là độ sâu liên hiệp thứ hai của xoáy 2 (Hình 2.2).

Với một kết cấu mũ hắt và cùng một lưu lượng tháo thì chiều cao sóng không tỷ lệ với mực nước hạ lưu, có thể sẽ lớn nhất với trạng thái giới hạn dưới hoặc giới hạn trên, không xuất hiện ở dòng chảy phễu. Để xác định chiều cao nước vồng, với mỗi cấp lưu lượng đo từ (3÷5) chiều cao sóng ứng với các trạng thái giới hạn trên và giới hạn dưới (Bảng 3.6).

Số liệu 32 trường hợp thí nghiệm cho thấy chiều cao nước vồng lớn nhất xuất hiện ở trạng thái giới hạn dưới là 11 lần, ở trạng thái giới hạn trên là 21 lần. Tỷ lệ chiều cao nước vồng lớn nhất đối với độ sâu dòng chảy giới hạn dưới biến thiên trong khoảng (1,2÷1,92) lần. Tỷ lệ chiều cao nước vồng lớn nhất đối với độ sâu dòng chảy giới hạn trên trong khoảng (1,02÷1,14) lần, giá trị này lớn nhất trong trường hợp a/P lớn nhất.

Bảng 3.6. Kết quả thí nghiệm chiều cao cột nước vồng

TT	Góc hất (độ)	q (m ³ /s /m)	Fr _c (gh1)	D/a	a/P	a/H	H/E	h _v /h _k (gh1)	h _v /h _k (gh2)	h _v /h _k (3x)	h _v /h _k (max)	h _{vmax} /h _{min}	h _{vmax} /h _{max}
Tập lập công thức													
1	51	0,09	4,5	0,33	0,32	1,5	0,2	5,2	5,5	4,7	5,5	1,7	1,04
2	51	0,18	3,5	0,33	0,32	1,0	0,3	3,7	4,2	4,0	4,16	1,6	1,08
3	51	0,27	2,9	0,33	0,32	0,8	0,3	3,3	3,1	3,0	3,32	1,4	1,10
4	51	0,33	2,6	0,33	0,32	0,7	0,3	3,0	2,8	2,9	2,99	1,3	1,12
5	51	0,09	4,4	0,49	0,24	1,0	0,2	4,8	5,3	5,0	5,33	1,9	1,09
6	51	0,18	3,3	0,49	0,24	0,6	0,3	3,6	4,0	3,5	4,00	1,8	1,08
7	51	0,33	2,5	0,49	0,24	0,4	0,4	2,6	2,8	2,5	2,76	1,3	1,03
8	51	0,27	2,9	0,49	0,24	0,5	0,3	2,8	3,3	2,5	3,27	1,6	1,05
9	25	0,27	2,9	0,14	0,32	0,7	0,3	3,2	3,5	3,2	3,48	1,3	1,03
10	25	0,18	3,2	0,14	0,32	1,0	0,3	3,7	4,2	4,0	4,23	1,5	1,02
11	25	0,33	2,7	0,14	0,32	0,7	0,3	3,0	3,1	2,9	3,12	1,2	1,03
12	40	0,09	4,3	0,19	0,39	2,0	0,2	6,4	6,7	5,3	6,72	1,7	1,05
13	40	0,18	3,2	0,19	0,39	1,3	0,2	4,5	4,7	4,6	4,70	1,4	1,07
14	40	0,27	2,9	0,19	0,39	1,0	0,3	3,8	3,8	3,6	3,84	1,3	1,07
15	40	0,33	2,5	0,19	0,39	0,9	0,3	3,2	3,4	3,1	3,40	1,2	1,03
16	40	0,09	4,4	0,38	0,24	1,0	0,2	4,8	5,0	4,7	4,96	1,7	1,05
17	40	0,18	3,5	0,38	0,24	0,6	0,3	3,6	3,8	3,7	3,83	1,5	1,05
18	40	0,27	3,0	0,38	0,24	0,5	0,3	3,1	3,1	2,9	3,11	1,4	1,06
19	40	0,33	2,6	0,38	0,24	0,4	0,4	2,8	2,7	2,6	2,76	1,2	1,02
20	32	0,18	3,3	0,22	0,28	0,8	0,3	3,6	4,2	3,6	4,23	1,6	1,06
21	32	0,27	2,8	0,22	0,28	0,6	0,3	3,5	3,3	3,1	3,53	1,3	1,11
22	32	0,33	2,6	0,22	0,28	0,6	0,3	2,9	3,0	2,9	3,03	1,2	1,06
23	44	0,18	3,2	0,18	0,46	1,4	0,3	4,7	4,4	4,2	4,70	1,4	1,14
24	44	0,27	2,6	0,18	0,46	1,1	0,3	3,9	3,6	3,5	3,94	1,3	1,14

TT	Góc hất (độ)	q (m ³ /s /m)	Fr _c (gh1)	D/a	a/P	a/H	H/E	h _v /h _k (gh1)	h _v /h _k (gh2)	h _v /h _k (3x)	h _v /h _k (max)	h _{vmax} /h _{min}	h _{vmax} /h _{max}
25	44	0,33	2,5	0,18	0,46	1,0	0,3	3,5	3,3	3,2	3,53	1,2	1,11
Tập kiểm định công thức													
26	51	0,09	4,2	0,99	0,14	0,5	0,2	3,6	3,9	3,8	3,94	1,9	1,03
27	51	0,18	3,5	0,99	0,14	0,3	0,3	3,1	3,3	3,0	3,27	1,8	1,07
28	51	0,27	2,8	0,99	0,14	0,2	0,4	2,4	2,7	2,3	2,70	1,5	1,03
29	40	0,09	4,2	0,25	0,32	1,5	0,2	5,3	5,9	5,5	5,86	1,6	1,04
30	40	0,27	2,9	0,25	0,32	0,7	0,3	3,6	3,5	3,2	3,58	1,4	1,07
31	40	0,18	3,5	0,25	0,32	0,9	0,3	3,7	4,3	4,0	4,30	1,6	1,05
32	40	0,33	2,6	0,25	0,32	0,7	0,3	3,3	3,0	2,9	3,31	1,3	1,13

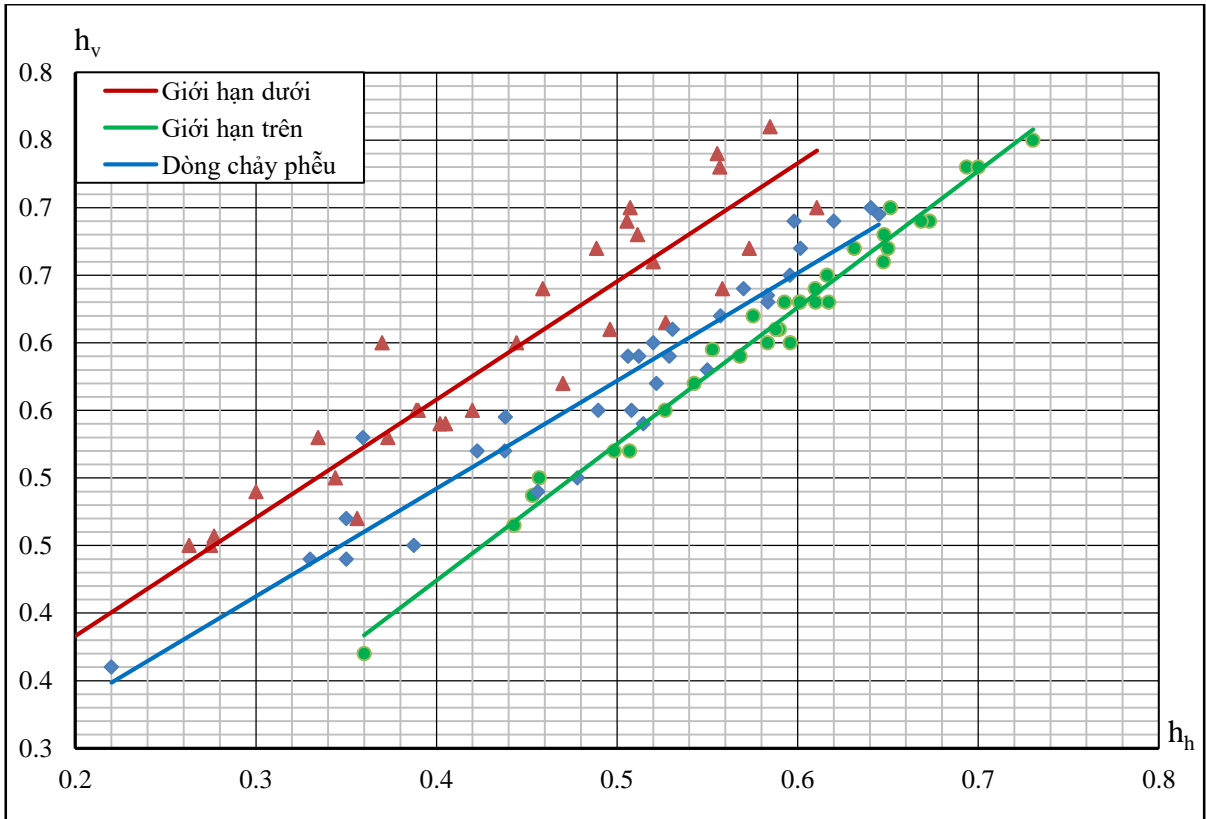
Từ số liệu thí nghiệm xây dựng các quan hệ giữa h_v và h_h (Hình 3.7), quan hệ giữa các đại lượng không thứ nguyên (Hình 3.8, Hình 3.9).

Hình 3.7 khi xem xét hệ số góc của đường xu hướng nhận thấy tỷ lệ h_v/h_h ở trạng thái giới hạn dưới lớn hơn ở trạng thái giới hạn trên và dòng chảy phễu. Điều này có thể giải thích rằng, ở trạng thái giới hạn dưới mực nước hạ lưu có tác động nâng chiều cao nước vòng lên đến mức tối đa, ở đó chiều cao nước vòng tối đa ít bị phụ thuộc vào mực nước hạ lưu. Khi mực nước hạ lưu vượt qua giá trị mực nước hạ lưu giới hạn thì chiều cao nước vòng lại có xu hướng giảm dần.

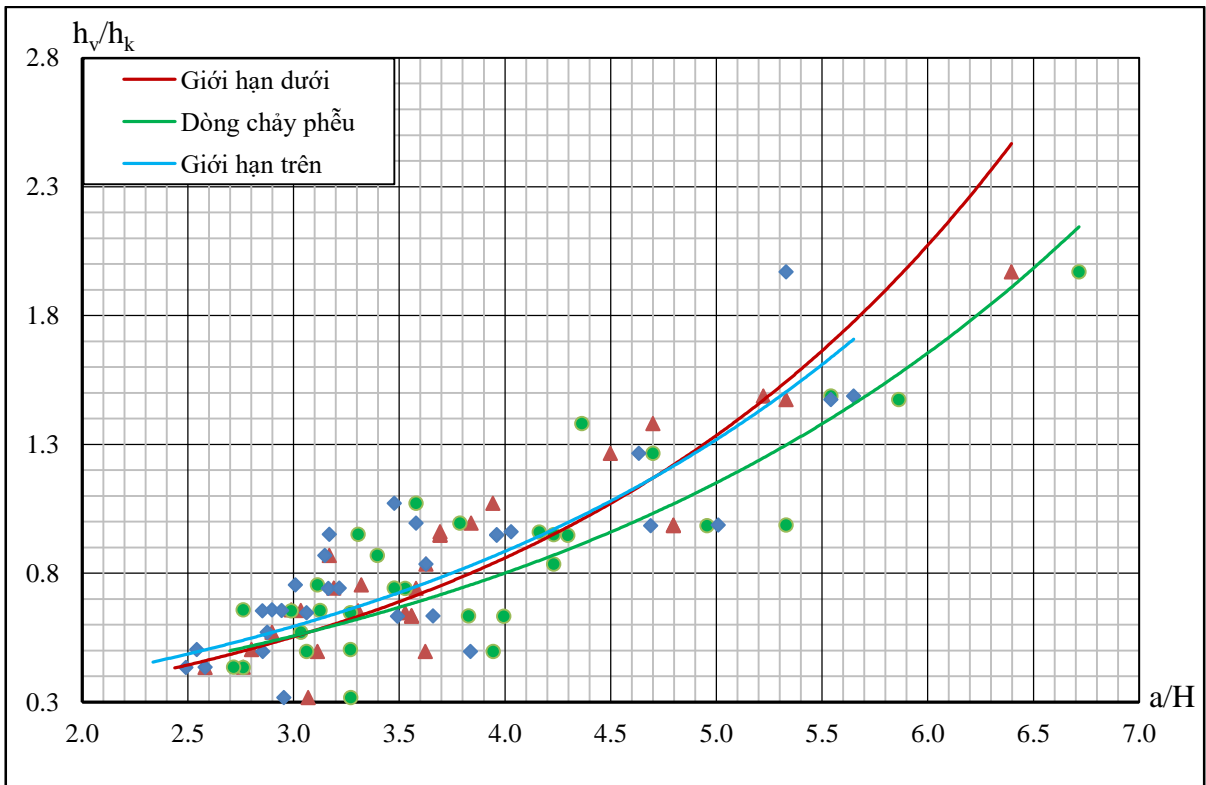
Hình 3.8 và Hình 3.9 cho thấy độ sâu cột nước vòng tương đối h_v/h_k đồng biến với a/H , nó cũng cho thấy chiều cao h_v có xu hướng lớn nhất ở trạng thái giới hạn trên và nhỏ nhất ở dòng chảy phễu.

Hình 3.9 cho thấy cùng một cấp lưu lượng, xu hướng h_v của dòng chảy phễu nhỏ hơn khi ở trạng thái giới hạn dưới và giới hạn trên. Với mỗi cấp lưu lượng thí nghiệm xác định được một giá trị h_v lớn nhất $(h_v/h_k)_{max}$. Từ đó xác lập được công thức thực nghiệm cho giá trị chiều cao nước vòng lớn nhất h_v .

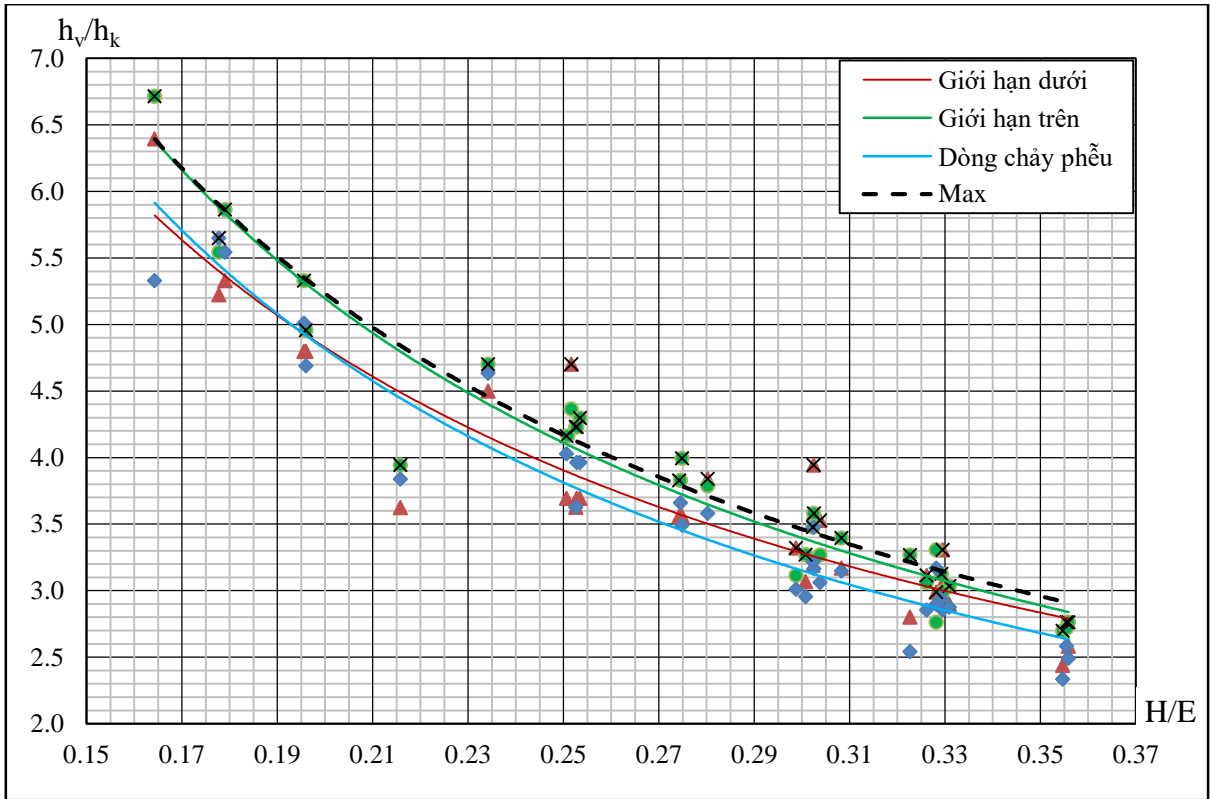
Tiếp theo, khảo sát sự phụ thuộc của h_v/h_k và số Froude của dòng chảy tại mặt cắt trước xoáy 1 (Fr_c) theo các tỷ lệ a/P và góc hất. Ở đây chỉ xem xét các quan hệ ở trạng thái giới hạn dưới mà không xem xét ở các trạng thái khác do chúng có sự tương đồng nhau.



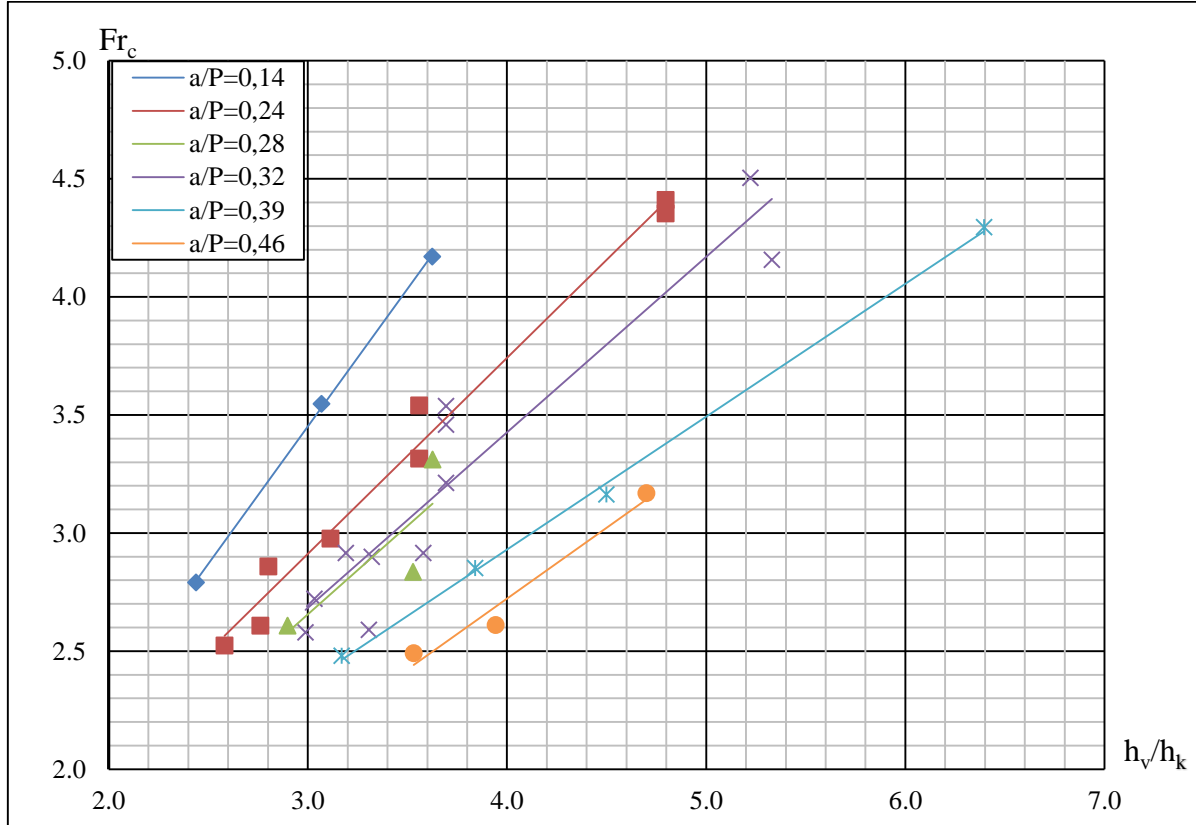
Hình 3.7. Quan hệ chiều cao nước vòng theo mực nước hạ lưu



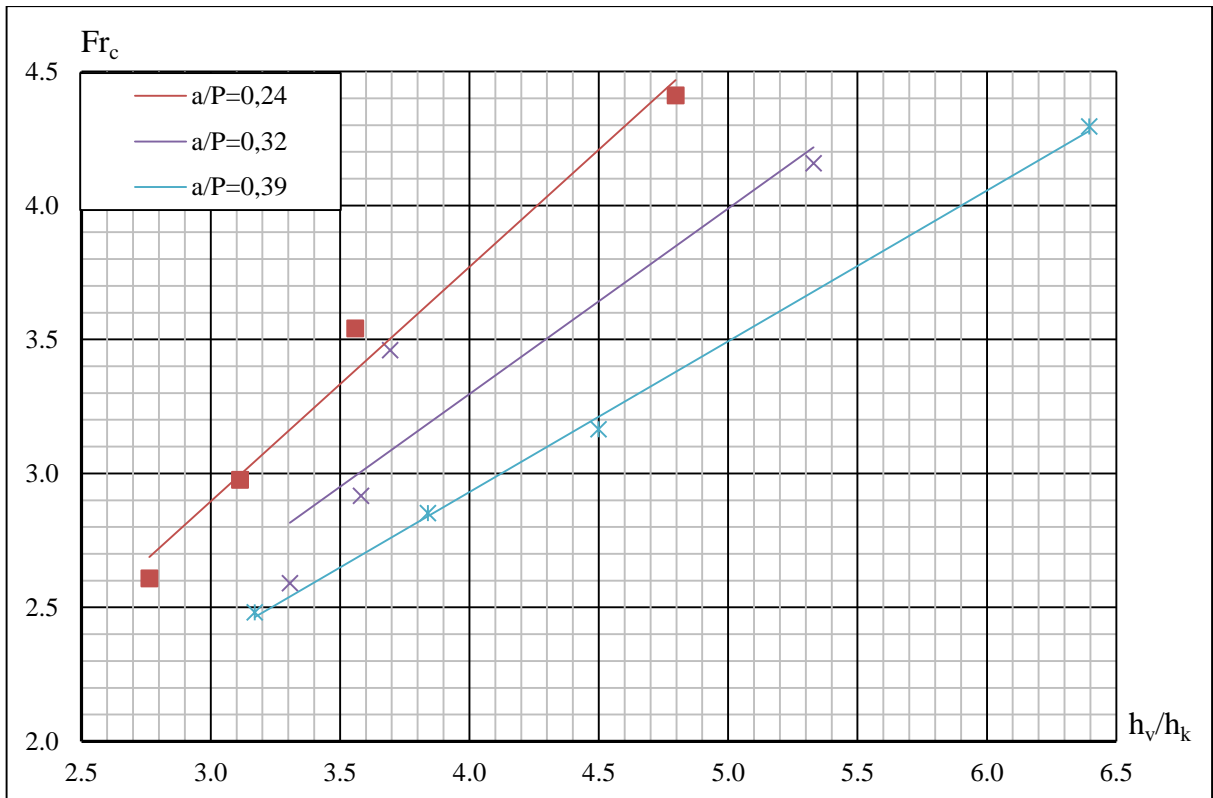
Hình 3.8. Quan hệ $h_v/h_k - a/H$ các trạng thái dòng chảy



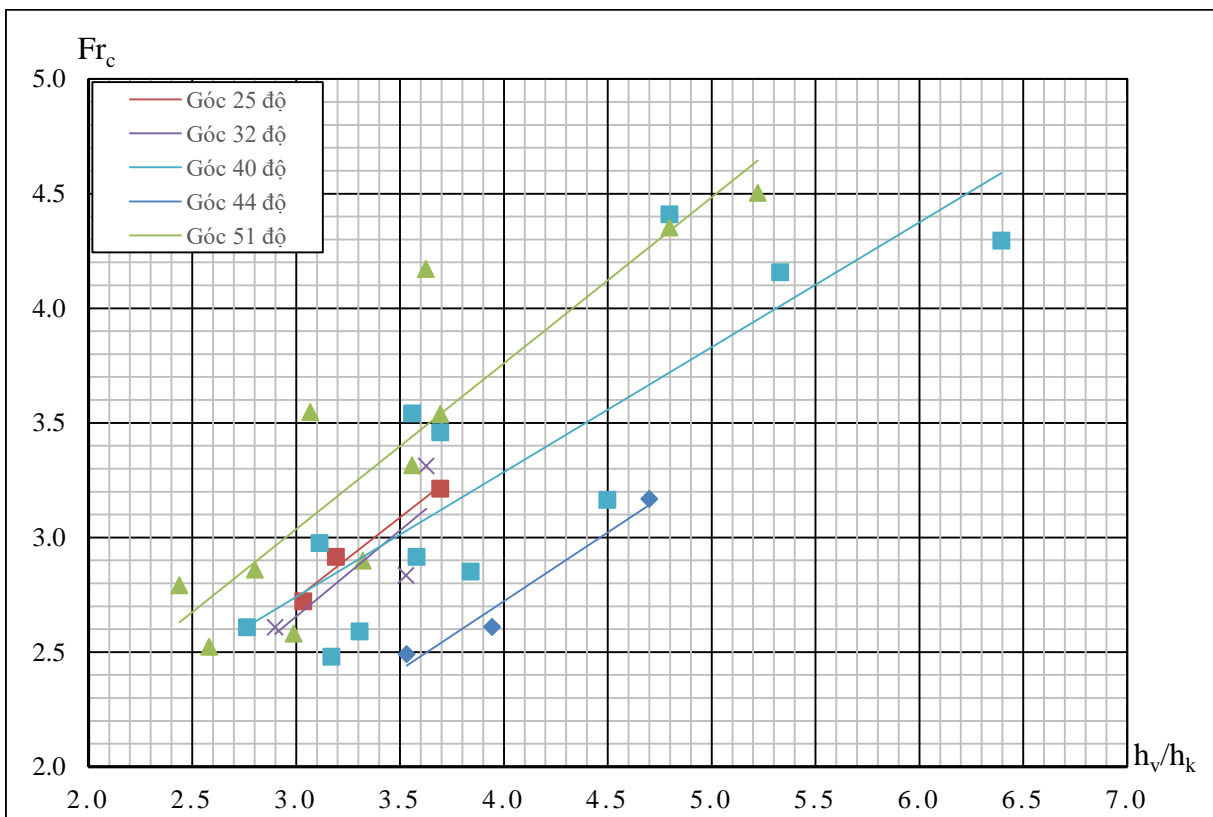
Hình 3.9. Quan hệ $h_v/h_k - H/E$ các trạng thái dòng chảy



Hình 3.10. Quan hệ $Fr_c - h_v/h_k$ của trạng thái giới hạn dưới theo a/P



Hình 3.11. Quan hệ $Fr_c - h_v/h_k$ với góc hất 40 độ theo tỷ lệ a/P



Hình 3.12. Quan hệ $Fr_c - h_v/h_k$ theo các góc hất

Hình 3.10, Hình 3.11 và Hình 3.12 cho thấy chiều cao nước vòng đồng biến với số Froude trước nước nhảy, nó cũng phù hợp với các nghiên cứu về nước nhảy đáy, và nước nhảy mặt đã biết; khi a/P tăng thì chiều cao nước vòng tăng. Ở đây chưa thấy chiều cao nước vòng giảm khi a/P tăng, có thể do các thí nghiệm chưa khảo sát thấy điều này.

Hình 3.12 là quan hệ giữa chiều cao nước vòng tương đối và số Froude theo các góc hắt. Chiều cao nước vòng lớn nhất trong trường hợp góc hắt 44° và nhỏ nhất trong trường hợp góc hắt 51° , các đường quan hệ cho các góc hắt khác khá trùng nhau.

Tương tự cách đánh giá tương quan của độ sâu mực nước nhỏ nhất và lớn nhất với các biến thực nghiệm áp dụng với chiều cao nước vòng (Bảng 3.2) cho thấy:

+ Chiều cao nước vòng tương quan thuận (đồng biến) với các biến thực nghiệm, còn lại tương quan nghịch (nghịch biến) với độ sâu mũi hắt (D).

+ Mức độ tương quan: chiều cao nước vòng h_v tương quan chặt với mực nước hạ lưu (hệ số tương quan $r=0,88$), năng lượng dòng chảy ở mặt cắt thượng lưu E ($r=0,85$), chiều cao bậc thụt ($r=0,77$); chiều cao nước vòng h_v tương quan với chiều cao đập ($r=0,58$), các yếu tố cột nước tràn H, h_k, h_{11} ($r=0,4$); chiều cao nước vòng h_v tương quan ít với góc hắt ($r=0,13$) và không tương quan với độ sâu mũi hắt ($r=0,06$). Như vậy chiều cao nước vòng ít phụ thuộc vào các yếu tố hình học của mũi hắt hơn các yếu tố độ sâu dòng chảy.

Bảng 3.3 cho thấy mức độ tương quan của đại lượng không thứ nguyên h_v/a lớn hơn mức độ tương quan của h_v/h_k . Hai đại lượng thứ nguyên này quan hệ chặt với các biến $a/P, a/h_k, a/E, a/H, D/a$ ($r>0,75$); tương quan ít với $R/(h_{11}+v_{11}^2/2g)$ và số Froude ($r=0,26$ và $0,18$).

Với cách xây dựng công thức thực nghiệm tại mục 3.1.4, tiến hành xây dựng được các công thức đối với giá trị h_v lớn nhất. Sử dụng công thức cùng dạng với mực nước hạ lưu giới hạn xác định được h_v lớn nhất như sau:

+ Sử dụng hàm tuyến tính đa biến xây dựng quan hệ cho h_v lớn nhất thu được công thức với sai số chuẩn $SS=0,14$, hệ số tương quan bội $S=0,98$:

$$\frac{h_v}{a} = 1,35 - 0,32 \frac{a}{h_k} + 0,36 \frac{D}{a} + 0,52 \frac{H + P}{a} \quad (3-13)$$

+ Sử dụng hàm mũ xây dựng quan hệ cho h_v lớn nhất thu được công thức với sai số chuẩn $SS=0,04$, hệ số tương quan bội $S=0,98$:

$$\frac{h_v}{a} = e^{0,29} \left(\frac{h_k}{a}\right)^{0,138} \left(\frac{D}{a}\right)^{0,016} \left(\frac{H+P}{a}\right)^{0,648} \quad (3-14)$$

Công thức (3-14) cho thấy h_v tỷ lệ thuận với chiều cao bậc thực, chiều cao dòng chảy thượng lưu hay năng lượng dòng chảy, tỷ lệ nghịch với h_k , đồng thời nhận thấy ảnh hưởng của góc hất đến chiều cao nước vòng là rất nhỏ.

Hệ số kiểm định SigF < 0,05, vì vậy các hàm hồi quy giả thiết phù hợp với các thông số thực nghiệm. Bảng 3.7 thể hiện các thông số khi xây dựng công thức trên.

Bảng 3.7. Tham số tương quan và hệ số của hàm thực nghiệm đối với h_v

T T	Đại lượng	h_v (Tính theo hàm tuyến tính)	h_v (Tính theo hàm mũ)
1	Hệ số tương quan bội S	0,9808	0,9806
2	Hệ số xác định S^2	0,9620	0,9616
3	Hệ số xác định điều chỉnh	0,9567	0,9561
4	Sai số chuẩn SS	0,1409	0,0403
5	Số lượng quan sát N	25	25
6	Hệ số kiểm định tương quan Sig. F	4,4624E-15	5,1303E-15
7	Hệ số tự do	1,3548	0,2942
8	Hệ số/Số mũ của biến a/h_k	-0,3215	-0,1377
9	Hệ số/Số mũ của biến D/a	0,3619	0,0164
10	Hệ số/Số mũ của biến $(H+P)/a$	0,5169	0,6477
11	Sai số lớn nhất tập lập công thức (%)	8,7	7,9
12	Sai số lớn nhất tập kiểm định công thức (%)	10,4	4,3

Khi sử dụng công thức (3-13) để tính toán chiều cao nước vòng lớn nhất cho kết quả với sai số mắc phải lớn nhất của tập lập công thức là 8,7%, tập kiểm định công thức là 10,4%. Đối với công thức (3-14) cho kết quả với sai số mắc phải lớn nhất của tập lập công thức là 7,9% và tập kiểm định công thức là 4,3%. So sánh sai số và mức độ tương

quan cho thấy công thức (3-14) là phù hợp nhất để xác định chiều cao cột nước vòng lớn nhất. Công thức rút gọn nhận được như sau:

$$\frac{h_v}{a} = 1,342 \left(\frac{h_k}{a}\right)^{0,138} \left(\frac{D}{a}\right)^{0,016} \left(\frac{E}{a}\right)^{0,648} \quad (3-15)$$

3.2.2. Chiều dài xoáy cuộn

Cũng như nước nhảy mặt, chiều dài các khu xoáy của dòng chảy phễu cũng là một đại lượng được quan tâm trong thiết kế. Chiều dài nước nhảy nói chung hay chiều dài khu xoáy là đại lượng rất khó đo đạc và các nghiên cứu thường cho kết quả rất khác nhau. Trong luận án này, chiều dài khu xoáy số 2 (ký hiệu là L_2) và chiều dài kết thúc khu xoáy số 3 (ký hiệu là L_3) (Hình 2.2) được quan tâm đo đạc và nghiên cứu phân tích.

Chiều dài khu xoáy số 2 (L_2) là khoảng cách kết thúc xoáy 2 (xoáy ở đáy) được tính từ sau bậc thụt, hay chiều dài tính từ bậc thụt đến hết xoáy 2. Chiều dài kết thúc khu xoáy 3 (L_3) là khoảng cách từ chân bậc thụt tính đến hết phạm vi xoáy 3 (xoáy mặt cuối cùng của dòng chảy phễu). Chiều dài L_3 như vậy đã bao gồm chiều dài xoáy 2 (nếu có) và luôn lớn hơn chiều dài xoáy 2, sau đây gọi tắt là chiều dài xoáy 3.

Nghiên cứu đã thực hiện thí nghiệm trên mô hình với 32 phương án xác định 96 trường hợp mực nước gồm: giới hạn dưới, giới hạn trên và dòng chảy phễu. Bảng 3.1 cho thấy, xoáy 2 và 3 chỉ xuất hiện đồng thời ở trạng thái giới hạn dưới và dòng chảy phễu, không xuất hiện ở trạng thái giới hạn trên. Bảng 3.8 thể hiện kết quả đo chiều dài các khu xoáy.

Bảng 3.8. Kết quả thí nghiệm chiều dài khu xoáy L_2 , L_3 ở dạng không thứ nguyên

TT	KB	$q(m^3/s/m)$	Fr_c	a/H	h_v/a	L_2/h_h	L_3/h_h	L_2/a	L_3/a	L_2/h_v	L_3/h_v
I		Giới hạn dưới									
1	1	0,265	2,9	0,75	3,20	1,8	2,9	4,1	9,1	1,3	2,9
2	1	0,325	2,6	0,66	3,30	1,8	3,7	4,6	12,1	1,4	3,7
3	2	0,265	2,9	0,50	4,05	1,8	2,8	5,5	11,5	1,4	2,8
4	2	0,325	2,5	0,43	4,27	2,4	3,9	8,5	16,7	2,0	3,9
5	4	0,180	3,2	1,38	2,42	1,7	3,1	2,9	7,4	1,2	3,1
6	4	0,265	2,6	1,07	2,63	1,8	3,4	3,6	8,8	1,4	3,4

TT	KB	q(m ³ /s/m)	Fr _c	a/H	h _v /a	L ₂ /h _h	L ₃ /h _h	L ₂ /a	L ₃ /a	L ₂ /h _v	L ₃ /h _v
7	4	0,325	2,5	0,95	2,70	2,0	3,3	4,3	9,0	1,6	3,3
8	5	0,265	2,9	0,99	2,78	1,9	3,3	3,9	9,1	1,4	3,3
9	5	0,325	2,5	0,87	2,63	1,9	3,8	4,4	10,1	1,7	3,8
10	6	0,180	3,5	0,95	2,75	2,6	4,1	5,1	11,1	1,9	4,1
11	6	0,265	2,9	0,74	3,45	2,0	3,5	5,1	12,1	1,5	3,5
12	6	0,325	2,6	0,65	3,65	2,0	3,7	5,6	13,6	1,5	3,7
13	7	0,180	3,5	0,64	3,97	2,0	3,8	5,5	15,2	1,4	3,8
14	7	0,265	3,0	0,50	4,50	2,3	3,6	7,7	16,0	1,7	3,6
15	7	0,325	2,6	0,44	4,57	2,2	4,3	8,1	19,7	1,8	4,3
16	8	0,180	3,3	0,83	3,08	2,1	3,4	4,7	10,4	1,5	3,4
17	8	0,265	2,8	0,65	3,87	2,0	3,0	5,9	11,6	1,5	3,0
18	8	0,325	2,6	0,57	3,65	2,0	4,4	6,4	16,1	1,8	4,4
19	9	0,180	3,2	0,95	2,75	1,7	4,1	3,6	11,1	1,3	4,1
20	9	0,265	2,9	0,74	3,07	2,1	4,3	5,6	13,1	1,8	4,3
21	9	0,325	2,7	0,65	3,35	2,1	4,1	6,1	13,6	1,8	4,1
II		Đòng chảy phễu									
22	1	0,090	4,3	1,49	2,20	1,5	3,0	2,6	6,6	1,2	3,0
23	1	0,180	3,3	0,96	3,00	1,4	2,4	3,6	7,1	1,2	2,4
24	1	0,265	2,9	0,75	2,90	1,5	3,0	4,1	8,6	1,4	3,0
25	1	0,325	2,6	0,66	3,20	1,6	2,9	4,6	9,1	1,5	2,9
26	2	0,180	3,0	0,63	3,90	1,7	3,1	5,5	12,2	1,4	3,1
27	2	0,265	2,7	0,50	3,67	1,8	2,9	6,0	10,7	1,6	2,9
28	2	0,325	2,4	0,43	4,12	1,6	3,0	6,2	12,2	1,5	3,0
29	3	0,090	4,0	0,50	5,40	2,9	3,7	9,5	20,0	1,8	3,7
30	3	0,180	3,3	0,32	6,60	1,9	2,8	10,2	18,5	1,5	2,8
31	3	0,265	2,8	0,25	6,75	1,6	3,2	9,5	21,5	1,4	3,2
32	4	0,265	2,5	1,07	2,32	1,9	3,5	4,0	8,1	1,7	3,5

TT	KB	q(m ³ /s/m)	Fr _c	a/H	h _v /a	L ₂ /h _h	L ₃ /h _h	L ₂ /a	L ₃ /a	L ₂ /h _v	L ₃ /h _v
33	4	0,325	2,3	0,95	2,42	2,0	4,1	4,3	9,9	1,8	4,1
34	5	0,180	2,8	1,27	2,59	1,7	2,9	3,9	7,6	1,5	2,9
35	5	0,265	2,5	0,99	2,59	1,7	3,2	3,9	8,4	1,5	3,2
36	5	0,325	2,4	0,87	2,61	1,9	3,5	4,6	9,1	1,8	3,5
37	6	0,180	3,0	0,95	2,95	1,6	3,3	4,1	9,6	1,4	3,3
38	6	0,265	2,6	0,74	3,05	1,8	3,7	4,6	11,1	1,5	3,7
39	6	0,325	2,4	0,65	3,15	1,9	3,5	5,6	11,1	1,8	3,5
40	7	0,090	3,7	0,98	3,30	1,9	2,8	4,7	9,2	1,4	2,8
41	7	0,180	3,0	0,63	4,09	1,7	3,0	5,5	12,2	1,3	3,0
42	7	0,265	2,8	0,50	4,12	1,7	3,7	6,2	15,2	1,5	3,7
43	7	0,325	2,3	0,44	4,27	2,0	3,6	7,7	15,2	1,8	3,6
44	8	0,180	3,2	0,83	3,08	1,6	3,8	4,7	11,6	1,5	3,8
45	8	0,265	3,0	0,65	3,36	1,8	3,4	5,3	11,6	1,6	3,4
46	8	0,325	2,7	0,57	3,62	1,9	3,2	6,4	11,6	1,8	3,2
47	9	0,180	2,9	0,95	2,95	1,8	3,4	4,6	10,1	1,6	3,4
48	9	0,265	3,0	0,74	3,10	2,0	3,3	5,6	10,1	1,8	3,3
49	9	0,325	2,6	0,65	3,25	2,1	3,7	6,4	12,1	2,0	3,7
	Max				6,75	2,9	4,4	10,2	21,5	2,0	4,4
	Min				2,20	1,4	2,4	2,6	6,6	1,2	2,4

Bảng 3.8 cho thấy, chiều dài xoáy 2 nằm trong khoảng (1,2÷2,0) chiều cao nước vòng, hay $1,2 \leq L_2/h_v \leq 2,0$, chiều dài xoáy 3 nằm trong khoảng (2,4÷4,4) chiều cao nước vòng, hay $2,4 \leq L_3/h_v \leq 4,4$.

Công thức kinh nghiệm tính giới hạn xuất hiện của các khu xoáy ở hạ lưu bậc thụt khi có dòng chảy phễu được lập tương ứng với các trường hợp xuất hiện nhiều nhất:

$$L_2 = (1,4 \div 1,8)h_v \quad (3-16)$$

$$L_3 = (3,0 \div 3,7)h_v \quad (3-17)$$

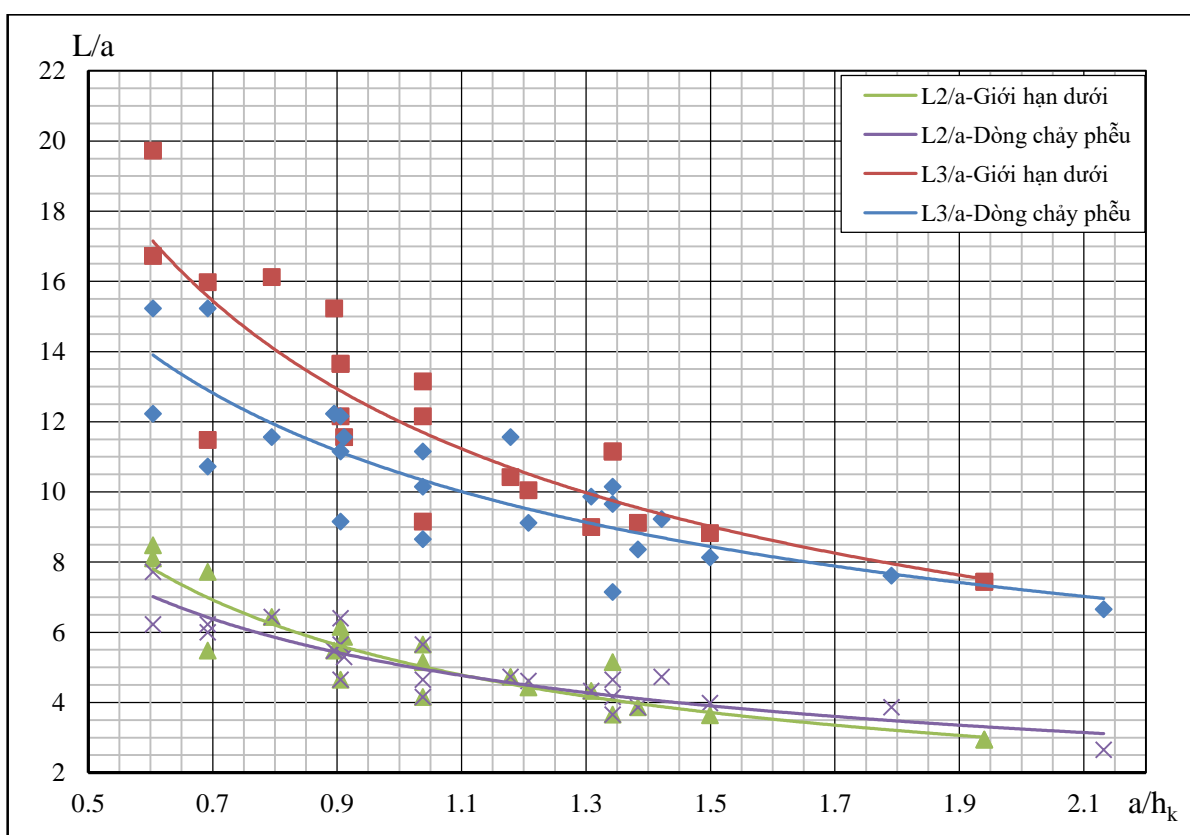
Từ kết quả thí nghiệm, các biểu đồ biểu diễn quan hệ giữa chiều dài các khu xoáy được thiết lập ở dạng không thứ nguyên (Hình 3.13, Hình 3.14, Hình 3.15, Hình 3.16, Hình 3.17, Hình 3.18).

Hình 3.13 cho thấy chiều dài tương đối các khu xoáy ở trạng thái giới hạn dưới lớn hơn chiều dài khu xoáy ở hình thức dòng chảy phễu, khi a/h_k càng nhỏ (lưu lượng càng lớn) thì độ chênh lệch càng cao. Độ chênh lệch của giới hạn xoáy 3 lớn hơn so với giới hạn xoáy 2.

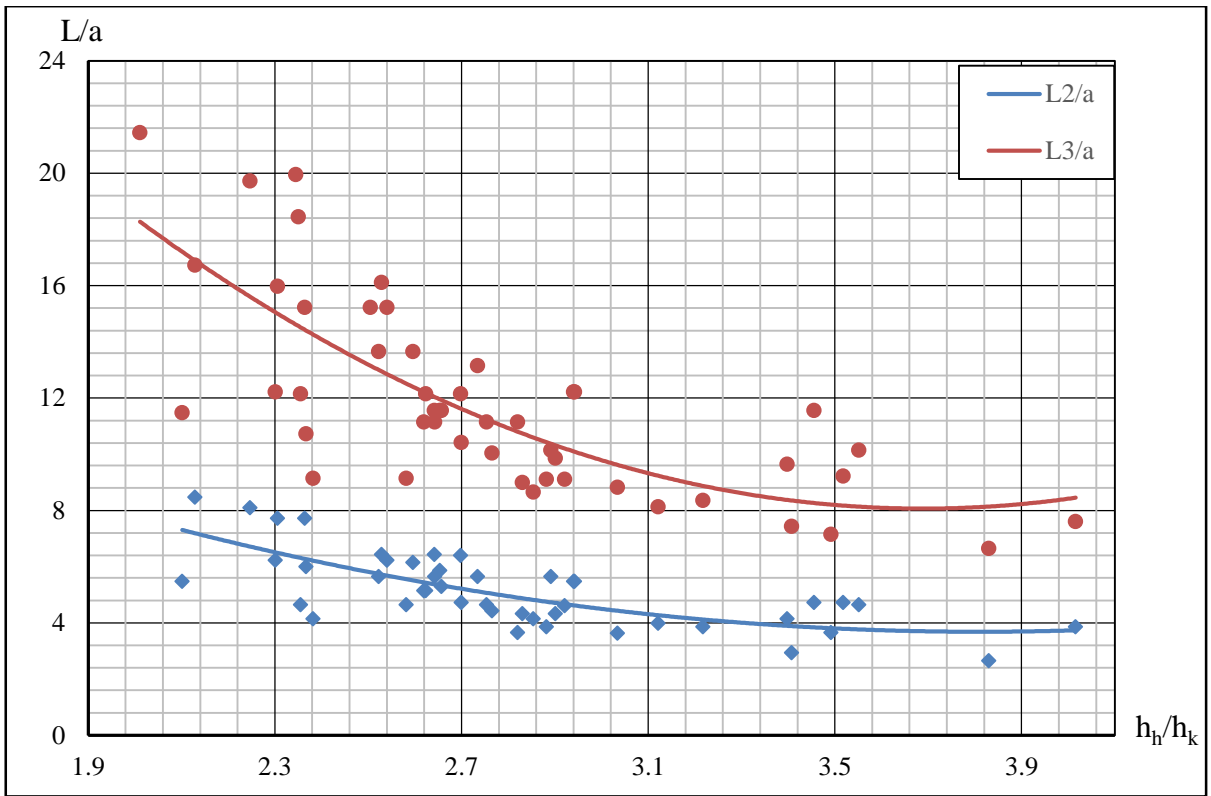
Hình 3.14 và Hình 3.15 cho thấy chiều dài các khu xoáy đồng biến với độ sâu mực nước hạ lưu, chiều cao cột nước vòng, nghịch biến với chiều cao bậc thụt a và độ sâu phân giới h_k .

Hình 3.16 cho thấy chiều dài khu xoáy lớn nhất với trường hợp $a/P=0,14$ không theo quy luật chung, độ dốc của quan hệ L/a và a/h_k gần như nằm ngang và không nằm gần các đường của a/P khác. Vì với $a/P=0,14$ thì rất ít xuất hiện trường hợp có từ 2 xoáy trở lên. Với các tỷ lệ a/P khác rất tập trung, hầu như không có sự phân biệt.

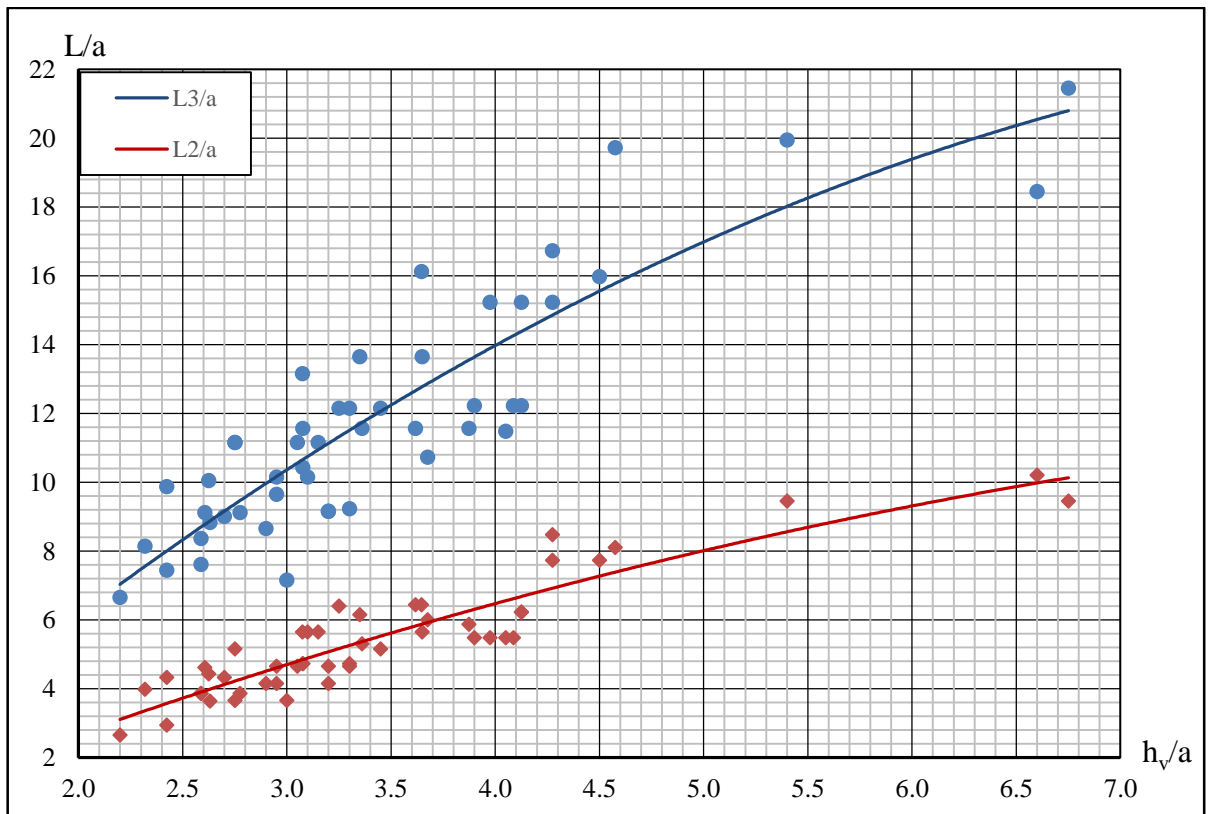
Hình 3.17 cho thấy chiều dài khu xoáy càng lớn khi góc hắt nhỏ.



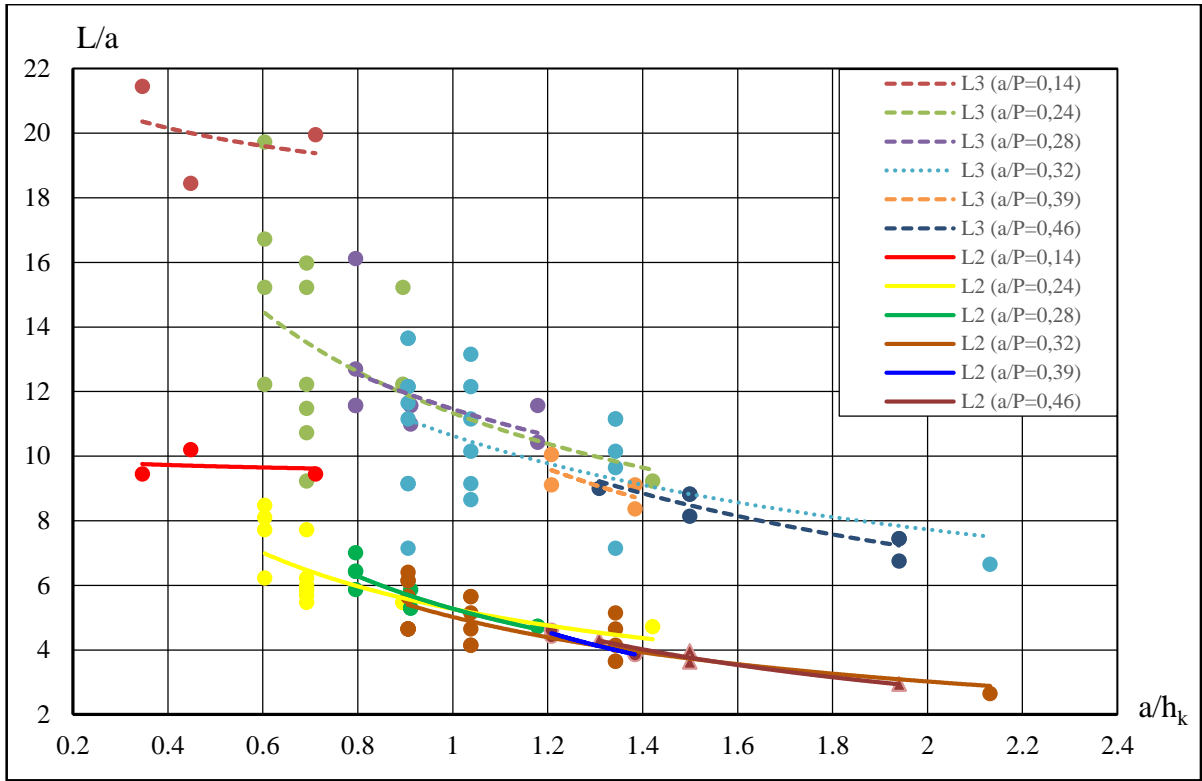
Hình 3.13. Quan hệ L/a và a/h_k trạng thái giới hạn dưới và dòng chảy phễu



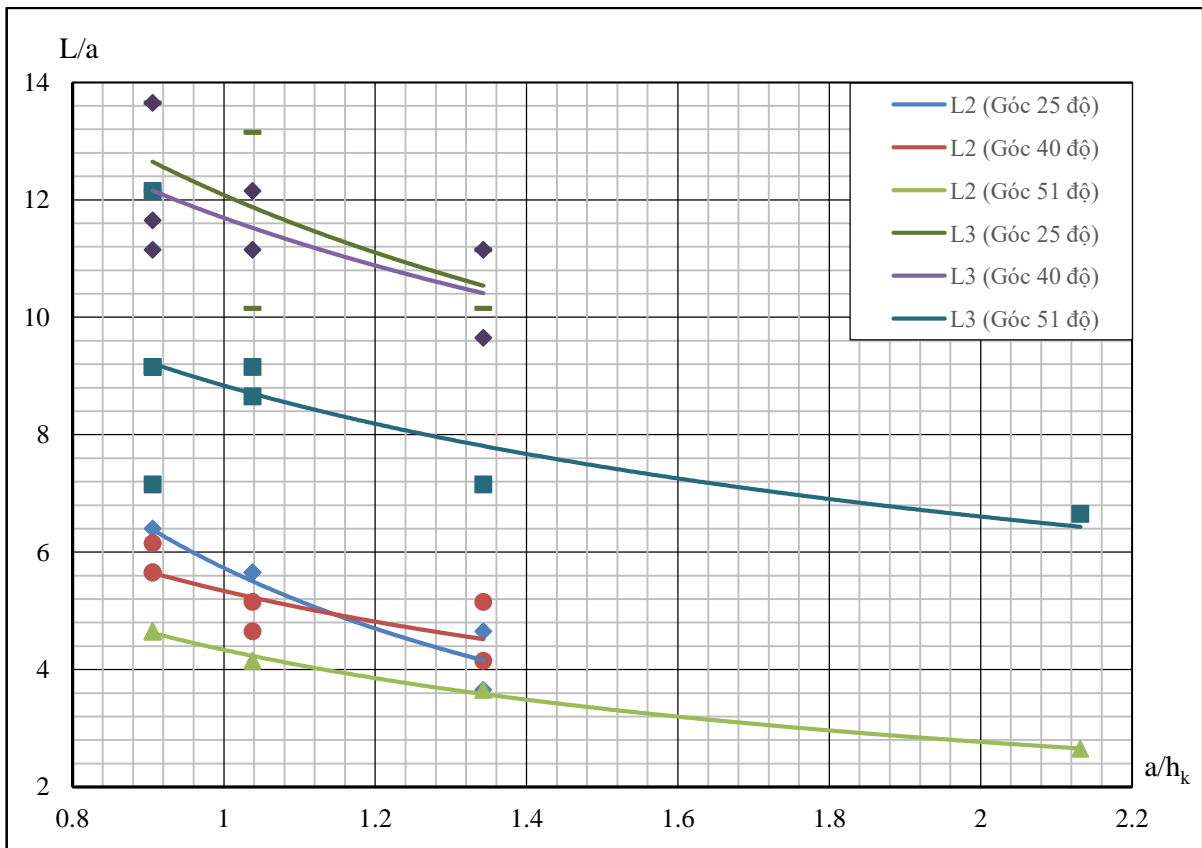
Hình 3.14. Quan hệ L/a và h_b/h_k



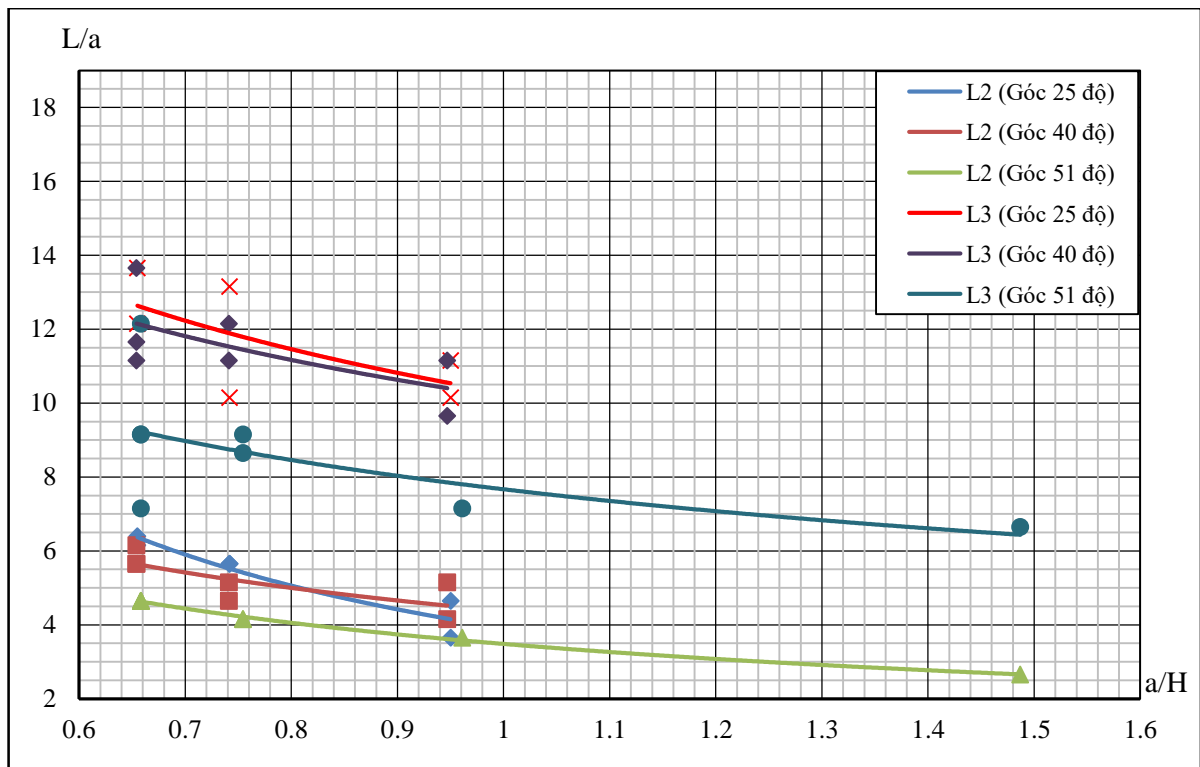
Hình 3.15. Quan hệ L/a và h_v/a



Hình 3.16. Quan hệ L/a và a/h_k theo a/P



Hình 3.17. Quan hệ L/a và a/h_k theo góc hatch



Hình 3.18. Quan hệ L/a và a/H theo góc hắt với $a/P=0,32$

3.3. Phân bố lưu tốc, cấu trúc dòng chảy phễu

Để phân tích cấu trúc nội bộ của dòng chảy phễu, các số liệu lưu tốc, áp suất được đo đạc theo các mặt cắt (Hình 2.2), từ mặt cắt 7 về hạ lưu đo 5 điểm trên một thủy trực. Số liệu đo lưu tốc có khối lượng rất lớn, trong phạm vi luận án này, quy luật phân bố lưu tốc đáy và lưu tốc lớn nhất trên mặt cắt theo chiều dài dòng chảy được tập trung nghiên cứu. Còn phân bố lưu tốc theo chiều đứng ít được quan tâm hơn vì chúng được phân bố theo các quy luật đã biết trong các vùng xoáy cuộn.

3.3.1. Phân bố lưu tốc trung bình theo chiều dài dòng chảy

Từ kết quả thí nghiệm tiến hành lập quan hệ giữa lưu tốc trung bình V_{tb} và chiều dài dòng chảy L các trạng thái (Hình 3.19), cho thấy:

- + Lưu tốc trung bình mặt cắt lớn nhất xuất hiện tại vị trí co hẹp (vị trí cuối ngưỡng, bắt đầu kết cấu gàu phễu) và vị trí mũi hắt.
- + Trên kênh hạ lưu, giá trị lưu tốc trung bình lớn nhất xuất hiện ở hình thức dòng phóng tự do, tại các vị trí ngay trước và sau điểm rơi của luồng phóng.
- + Khu vực ngay sau mũi, dòng chảy đổ xuống hạ lưu, giá trị lưu tốc giảm dần.

3.3.2. Phân bố lưu tốc đáy theo chiều dòng chảy

Trên cơ sở kết quả thí nghiệm tiến hành lập quan hệ giữa lưu tốc đáy $V_{\text{đáy}}$ và chiều dài dòng chảy L (Hình 3.20, Hình 3.21). Các biểu đồ cho thấy:

- + Lưu tốc đáy lớn nhất xuất hiện tại trường hợp dòng chảy ở trạng thái giới hạn dưới.
- + Lưu tốc đáy nhỏ nhất xuất hiện tại trường hợp dòng chảy ở trạng thái giới hạn trên.
- + Dòng chảy phễu có giá trị lưu tốc đáy ở khoảng giữa giới hạn dưới và giới hạn trên, bằng khoảng $\frac{1}{2}$ giá trị lưu tốc đáy trong trường hợp dòng chảy ở trạng thái giới hạn dưới.
- + Ở trạng thái giới hạn dưới và dòng chảy phễu thì vị trí xuất hiện giá trị lưu tốc đáy lớn nhất trên kênh hạ lưu theo xu hướng xa chân công trình.

3.3.3. Sự suy giảm lưu tốc của dòng chảy phễu

Từ số liệu thí nghiệm thiết lập các biểu đồ quan hệ giữa h_{umax}/a và h_h/h_k (Hình 3.22), lưu tốc đáy lớn nhất dọc chiều dài công trình (Hình 3.23), $V_{\text{đáy}}/V_h$ và L/a (Hình 3.24). Các biểu đồ trên cho thấy:

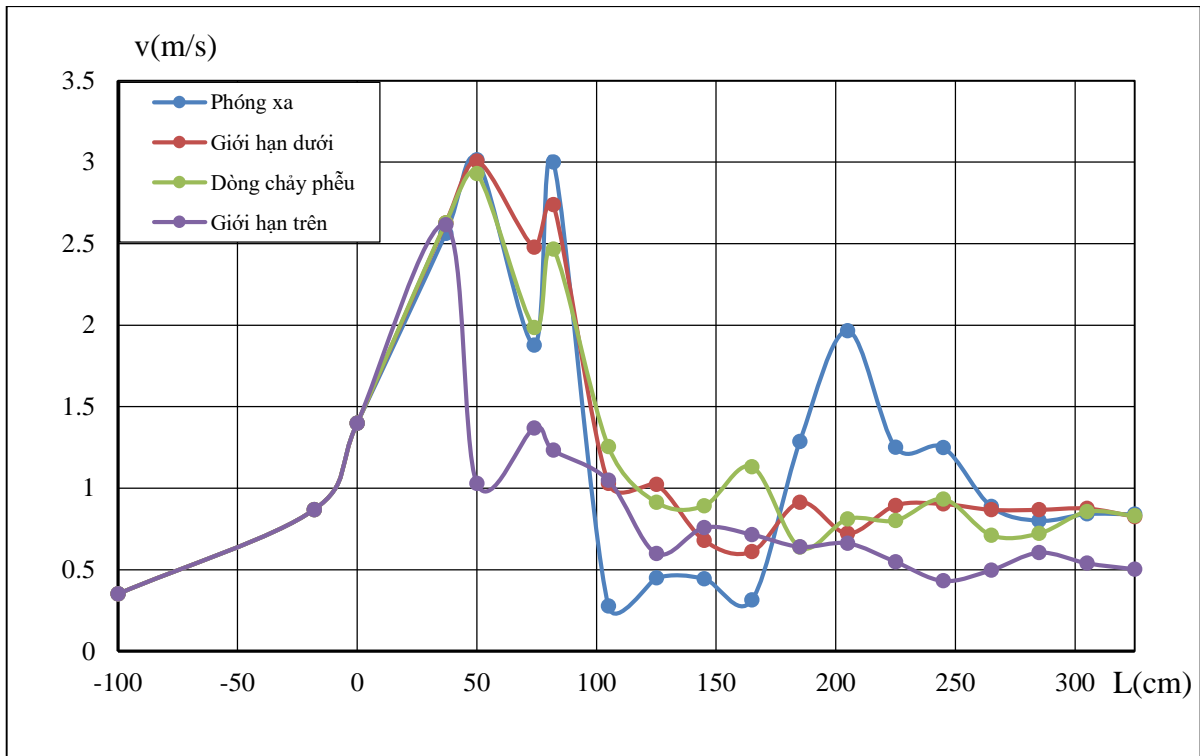
+ Lưu tốc đáy trên kênh hạ lưu xuất hiện lớn nhất ở dòng chảy phóng xa ($h_h < h_{\text{min}}$) và xuất hiện tại vị trí càng xa mũi hắt với giá trị Q càng lớn, a/H nhỏ và ngược lại. Nói tiếp dòng chảy mặt ngập ($h_h > h_{\text{max}}$) tuy có sóng lớn trên bề mặt nhưng giá trị lưu tốc đáy là nhỏ. Dòng chảy phễu có lưu tốc đáy trung bình của hai trạng thái trên.

+ Độ suy giảm giá trị lưu tốc đáy dọc theo kênh hạ lưu khi tỷ lệ h_h/h_k nhỏ của dòng phóng tự do (khi $h_h < h_{\text{min}}$) nhanh hơn so với dòng chảy mặt ngập ($h_h > h_{\text{max}}$) và dòng chảy phễu (tức $h_{\text{min}} < h_h < h_{\text{max}}$) (Hình 3.22).

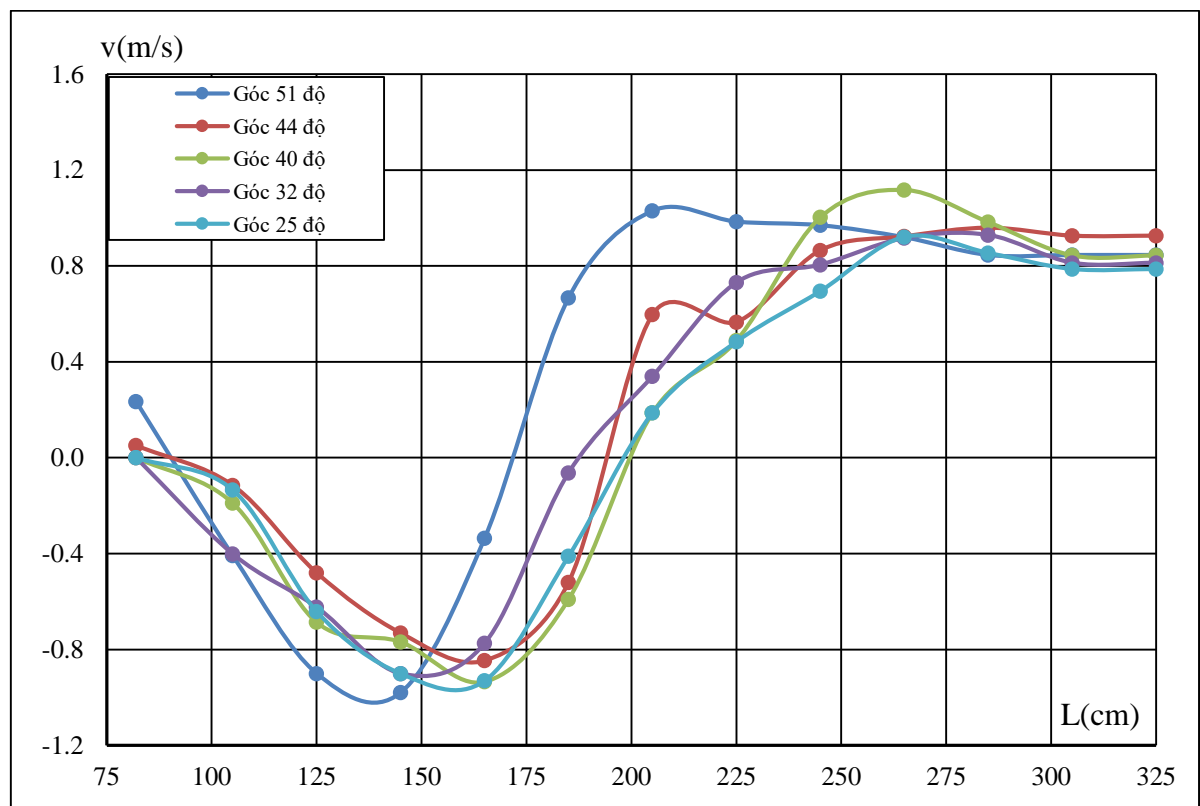
+ Ở dòng chảy phóng xa và dòng chảy phễu ngập, vị trí xuất hiện giá trị lưu tốc đáy lớn nhất trên kênh hạ lưu (U_{max}) theo xu hướng xa chân công trình (Hình 3.23).

+ Lưu tốc đáy dòng quân (đáy xoáy 2) và lưu tốc đáy dòng xuôi trên kênh hạ lưu (đáy xoáy 3) gần đối xứng nhau, giá trị lưu tốc lớn nhất đạt khoảng 2 lần giá trị lưu tốc sau nước nhảy $V_{\text{đáyHLmax}} = 2V_h$ ($V_h = q/h_h$) (Hình 3.24). Vị trí có lưu tốc quân lớn nhất cách chân bậc thụt khoảng 2,5 lần chiều cao bậc. Vị trí xuất hiện lưu tốc xuôi lớn nhất là 8 lần chiều cao bậc.

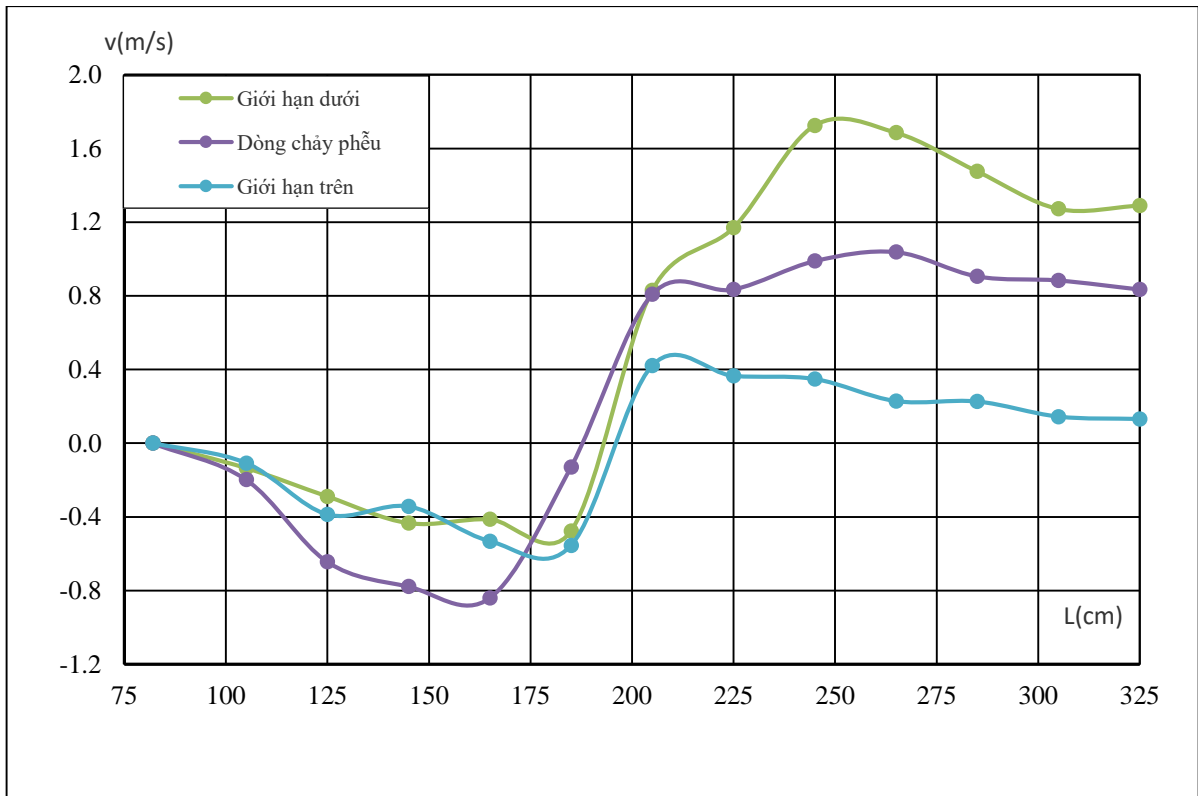
+ Khu vực dòng chảy phễu dòng chảy có những xáo trộn mạnh, vì vậy có ảnh hưởng đến kết quả đo đạc lưu tốc dòng chảy.



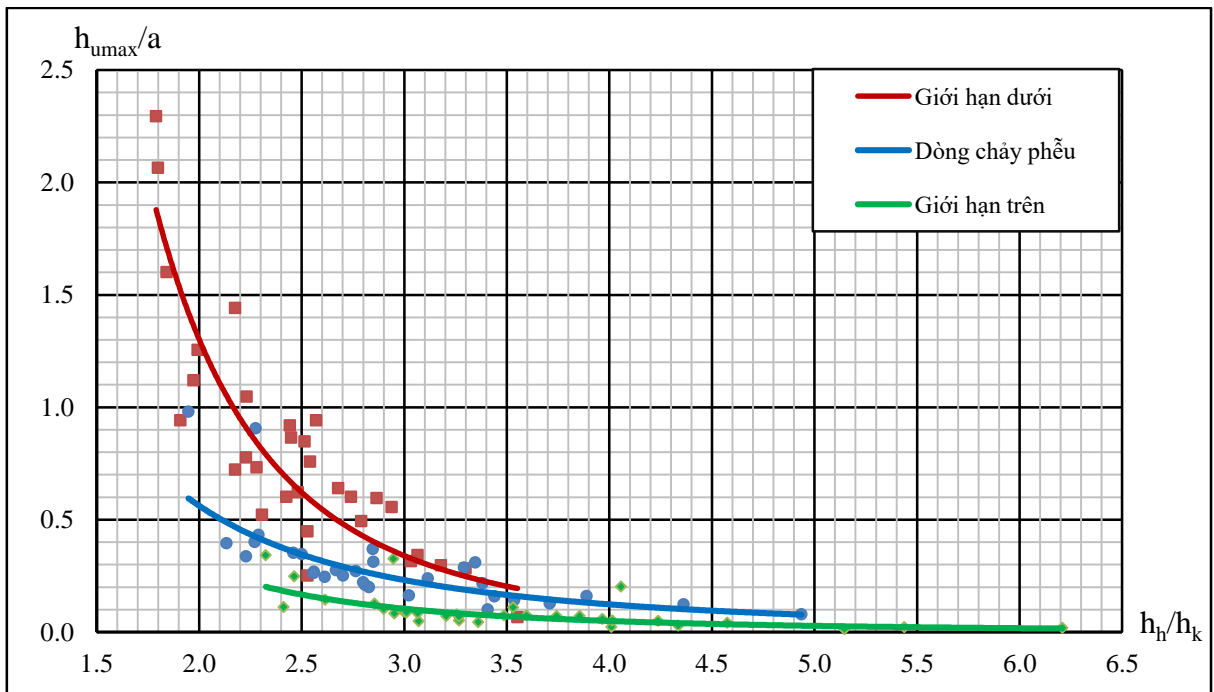
Hình 3.19. Phân bố lưu tốc trung bình mặt cắt dọc theo dòng chảy



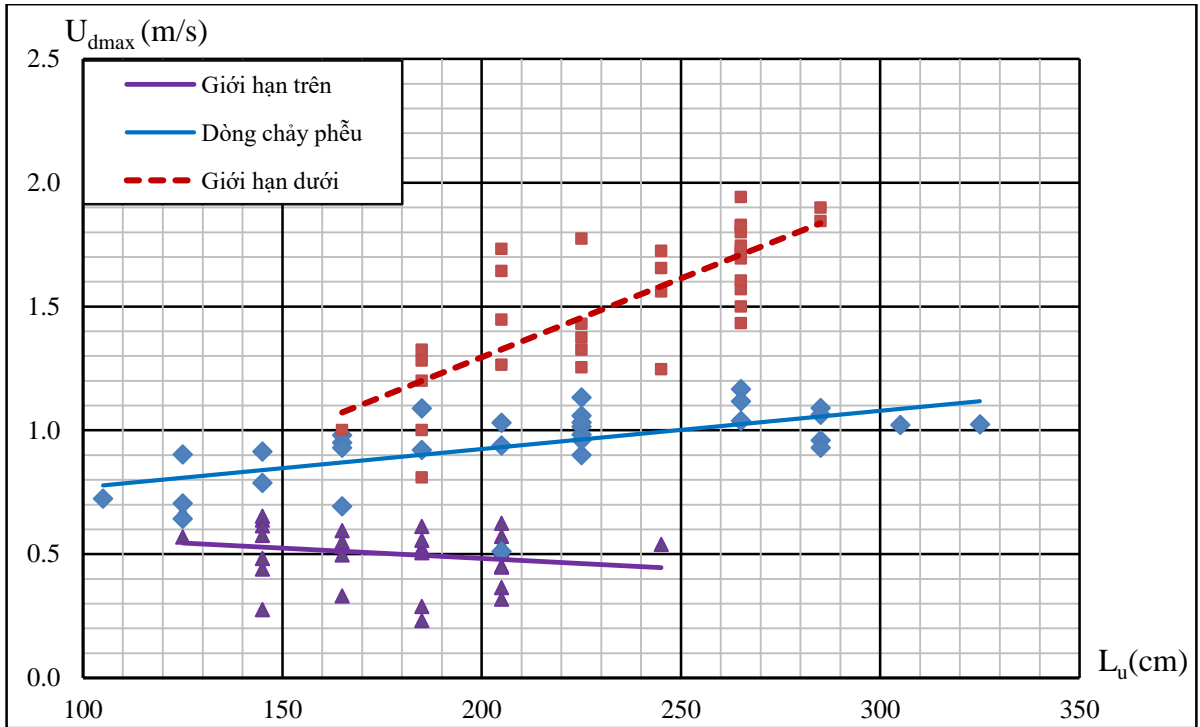
Hình 3.20. Phân bố lưu tốc đáy ở hạ lưu của dòng chảy phễu các góc hất



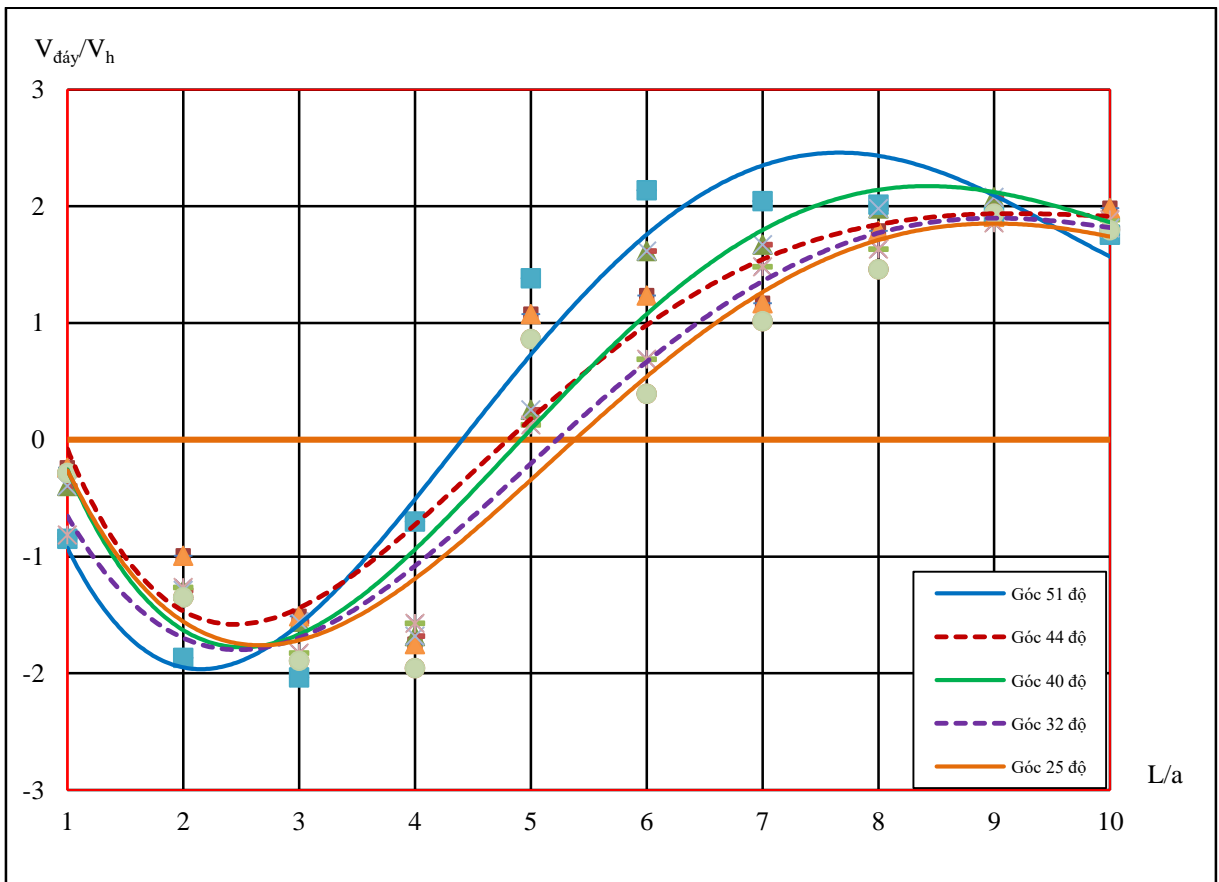
Hình 3.21. Phân bố lưu tốc đáy ở hạ lưu theo các trạng thái nối tiếp



Hình 3.22. Độ suy giảm giá trị lưu tốc đáy lớn nhất trên kênh hạ lưu của 3 trạng thái nối tiếp



Hình 3.23. Phân bố giá trị lưu tốc đáy lớn nhất (U_m) và vị trí xuất hiện (L_u)



Hình 3.24. Phân bố lưu tốc đáy ở hạ lưu bậc thụt của dòng chảy phễu

3.4. Sự tiêu hao năng lượng của dòng chảy phễu

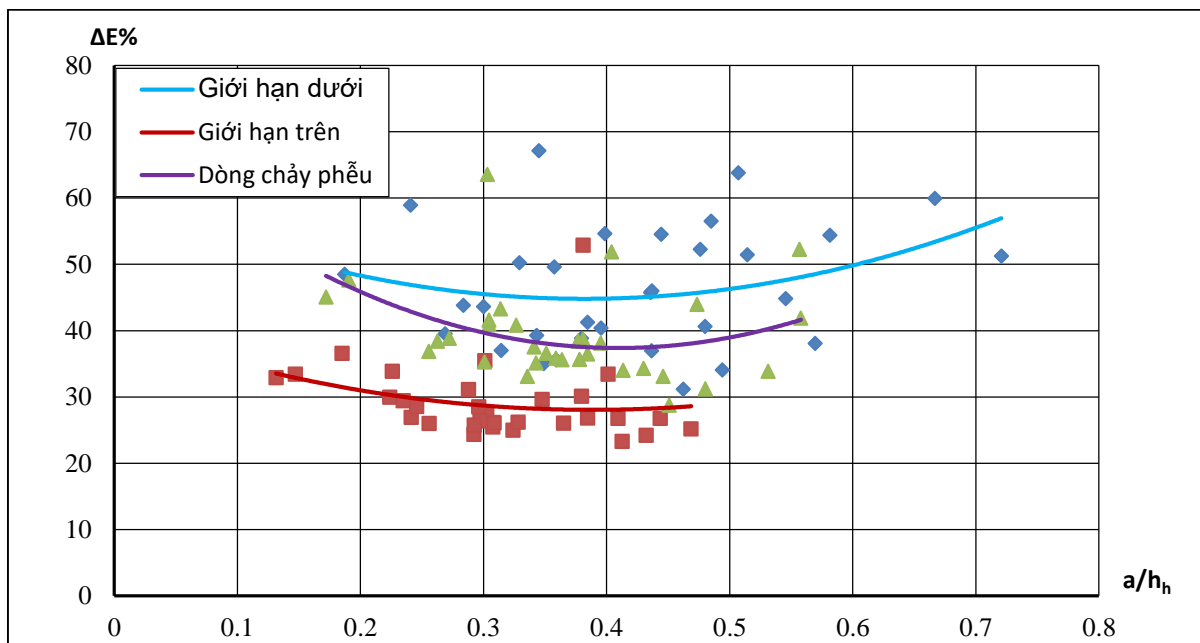
Trên cơ sở kết quả thí nghiệm, lập quan hệ ΔE và a/h (Hình 3.25); ΔE và số Froude (Hình 3.26). Các biểu đồ quan hệ này cho thấy:

+ Sự suy giảm, tiêu hao năng lượng của dòng chảy từ thượng lưu về hạ lưu công trình phụ thuộc vào từng loại nước nhảy, trạng thái nối tiếp dòng chảy hạ lưu.

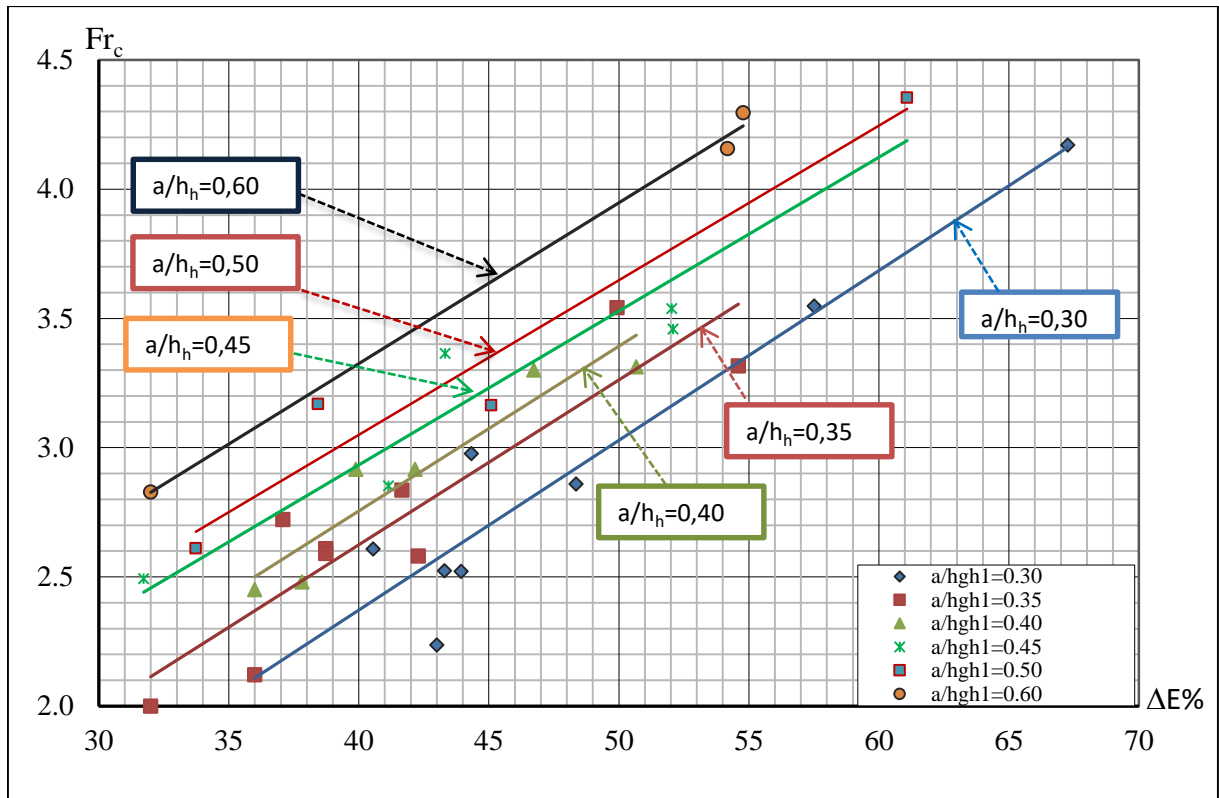
+ Năng lượng dòng chảy được tiêu hao tốt hơn khi nối tiếp là dòng phóng tự do ($h_h < h_{min}$), đạt từ khoảng 35% đến 65%, sự tiêu hao năng lượng tăng khi giá trị a/h_h lớn và ngược lại, tuy nhiên trong hình thức này lưu tốc đáy ở kênh hạ lưu là lớn nhất.

+ Sự suy giảm, tiêu hao năng lượng của dòng chảy phễu ngập ($h_h > h_{max}$) là ít nhất chỉ khoảng 25% đến 35% và không phụ thuộc nhiều vào giá trị a/h_h , dòng đáy của trạng thái chảy này có lưu tốc nhỏ nhưng là trạng thái có sóng trên mặt lớn nhất.

+ Dòng chảy hạ lưu nối tiếp ở trạng thái dòng chảy phễu ($h_{min} < h_h < h_{max}$) năng lượng được tiêu hao nhờ sự xáo trộn của 3 xoáy cuộn, sự tiêu hao năng lượng đạt mức trên 30% tới trên 60% và phụ thuộc vào giá trị a/h_h . Hiệu quả tiêu năng lớn khi công trình có tham số a/P nhỏ, lưu tốc đáy tăng và ngược lại. Đây là trạng thái ổn định tốt nhất trong các trạng thái nối tiếp hạ lưu với lưu tốc đáy nhỏ và sóng trên mặt hạ lưu là nhỏ nhất.



Hình 3.25. Xu hướng tiêu hao năng lượng các trạng thái theo a/h_h



Hình 3.26. Quan hệ hiệu quả tiêu hao năng lượng $\Delta E\% \sim Fr_c$ theo a/h_h

3.5. Kết luận chương 3

Từ kết quả thí nghiệm với 9 kích bản, hơn 150 thí nghiệm, tiến hành phân tích, tổng hợp, khái quát hóa và đã xác định được các quy luật dòng chảy phễu như sau:

1. Dòng chảy phễu là một dạng nước nhảy mặt – đáy – ngập hỗn hợp được sinh ra trên kết cấu mũi hắt cong, góc hắt $\theta=25^0 \div 51^0$, chiều cao bậc thụt $a/P=0,14 \div 0,46$ có nhiều đặc tính nổi trội hơn so với nước nhảy mặt đáy sau bậc thụt với góc hắt $<15^0$. Khi xuất hiện dòng chảy phễu, ở hạ lưu không có sóng lan truyền dài ở hạ lưu, khả năng tiêu hao năng lượng lớn $30\% \div 60\%$, lưu tốc đáy nhỏ.

2. Nối tiếp ở hạ lưu bậc thụt mũi hắt cong, góc hắt $\theta=25^0 \div 51^0$, chiều cao bậc thụt $a/P=0,14 \div 0,46$ chuyển đổi qua 7 dạng cơ bản (1) từ nối tiếp phóng xạ bằng dòng xiết – HT1, (2) trạng thái giới hạn dưới – TT2 (TT2a và TT2b), (3) dòng chảy phễu – HT3, (4) trạng thái giới hạn trên – TT4 (TT4a và TT4b) và (5) nối tiếp chảy đáy ngập – HT5. Trong 7 dạng nối tiếp này có 3 dạng được gọi là hình thức nối tiếp, 4 dạng được gọi là trạng thái là giới hạn để chuyển đổi hình thức nối tiếp. Các dạng nối tiếp thu được phù

hợp với các kết quả nghiên cứu trước đây của D.I. Cumin, Viện Nghiên cứu Thủy lực Nam Kinh, Trung Quốc.

3. Bảng công thức thực nghiệm (3-11), (3-12) xác định được độ sâu dòng chảy nhỏ nhất (h_{\min}) và độ sâu dòng chảy lớn nhất (h_{\max}) là khoảng xuất hiện dòng chảy phễu. Với kết cấu mũi hắt có góc hắt $\theta=25^{\circ}\div 51^{\circ}$ cho khoảng xuất hiện dòng chảy phễu lớn hơn 2,5 lần so với mũi hắt có góc hắt $\theta<15^{\circ}$. Điều này rất có ý nghĩa khi ứng dụng tiêu năng dòng chảy phễu ở hạ lưu công trình tháo.

4. Chiều cao nước vồng nhỏ nhất trong trường hợp dòng chảy phễu, đạt giá trị lớn nhất khi ở trạng thái giới hạn trên và có thể xác định được giá trị chiều cao nước vồng lớn nhất h_v bằng công thức thực nghiệm (3-15).

5. Tỷ lệ chiều dài xoáy 2 với chiều cao nước vồng lớn nhất biến thiên trong khoảng (1,2÷2,0) lần; tỷ lệ chiều dài xoáy 3 với chiều cao nước vồng lớn nhất biến thiên trong khoảng (2,4÷4,4) lần.

6. Dòng chảy phễu có lưu tốc đáy lớn nhất trên kênh hạ lưu bằng xấp xỉ 2 lần lưu tốc ở kênh hạ lưu, vị trí xuất hiện lưu tốc đáy lớn nhất cách chân mũi phóng một khoảng bằng (2÷5) chiều cao bậc thụt a.

CHƯƠNG 4: QUY TRÌNH TÍNH TOÁN LỰA CHỌN KẾT CẤU MŨI HÁT TẠO DÒNG NỐI TIẾP HỖN HỢP MẶT – ĐÁY – NGẬP 3 XOÁY

Trong chương này trình bày ứng dụng kết quả ở chương 3 để xác định phương pháp lựa chọn kết cấu mũi hát hợp lý, cũng như xây dựng quy trình tính toán thủy lực dòng chảy phễu và áp dụng chúng cho công trình cụ thể.

4.1. Lựa chọn kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu

Kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu là kết cấu tạo ra được dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt trong một khoảng đủ lớn của sự thay đổi mực nước hạ lưu, có lưu tốc ở đáy kênh hạ lưu nhỏ, nằm xa công trình và mức độ tiêu hao năng lượng lớn.

4.1.1. Điều kiện hình thành dòng chảy phễu

Dòng chảy phễu hình thành bao gồm các điều kiện về thủy lực, kết cấu và giới hạn liên quan giữa kết cấu và điều kiện thủy lực. Dòng chảy phễu xuất hiện trong khoảng từ h_{\min} đến h_{\max} . Nhưng thực tế để tồn tại khoảng cách đó lại phụ thuộc vào từng cấp lưu lượng xả, mực nước hạ lưu. Ở đây, xét điều kiện tồn tại dòng chảy phễu theo ràng buộc $h_{\max} - h_{\min} > 0$. Từ kết quả thí nghiệm (Bảng 3.4), tính hiệu số $\Delta h_{gh} = h_{\max} - h_{\min}$ và xây dựng biểu đồ quan hệ $\Delta h_{gh}/h_k$ và a/E với các giá trị a/P và góc hát khác nhau (Hình 4.1), từ đó cho thấy: Δh quan hệ tuyến tính rất chặt với a/E và không phụ thuộc vào góc hát. Để thỏa mãn điều kiện tồn tại dòng chảy phễu cần có $\Delta h_{gh}/h_k > 0$, từ đó tìm được giá trị a/E nhỏ nhất để tồn tại dòng chảy phễu cho các trường hợp khác nhau (Bảng 4.1).

Bảng 4.1. Tính toán điều kiện a/E tồn tại dòng chảy phễu

TT	a/P	Tương quan ($h_{\max} - h_{\min}$) theo a/E		
		Hệ số góc	hệ số tự do	(a/E) _{min}
1	0,14	52,448	3,827	0,073
2	0,24	38,584	5,326	0,138
3	0,28	34,477	6,059	0,176
4	0,32	29,533	5,739	0,194
5	0,32	35,606	5,078	0,143

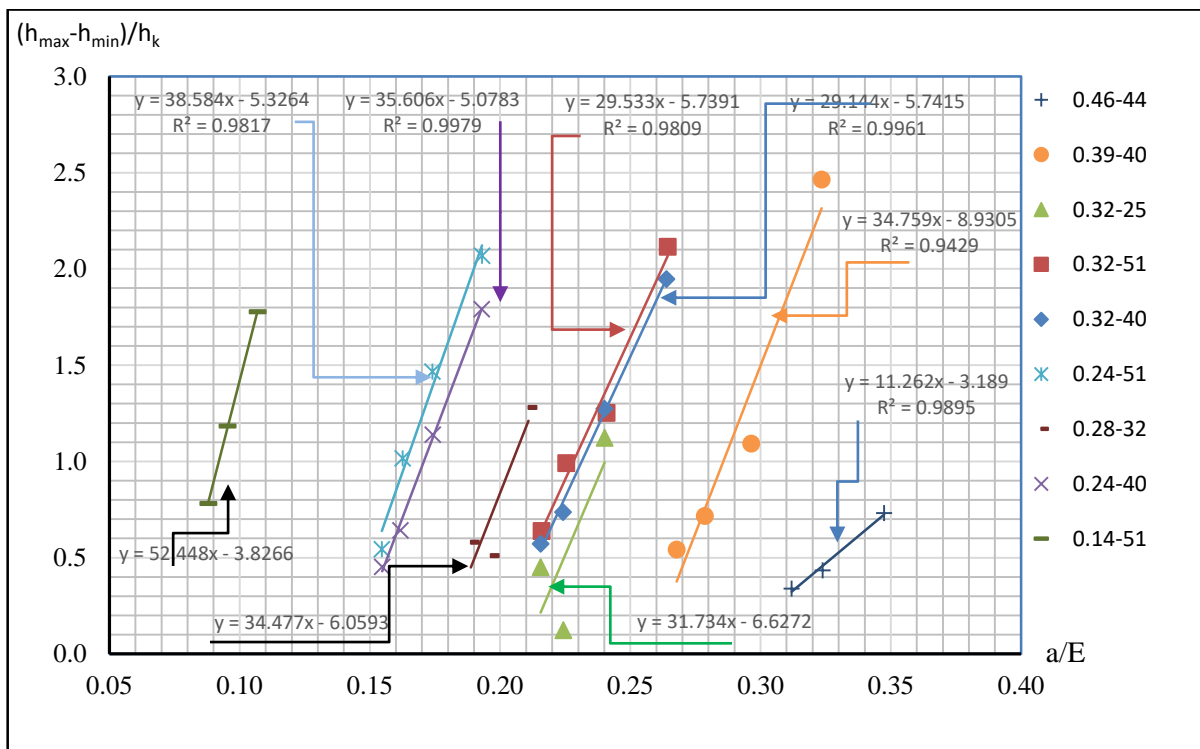
TT	a/P	Tương quan ($h_{\max}-h_{\min}$) theo a/E		
		Hệ số góc	hệ số tự do	(a/E) _{min}
6	0,32	31,734	6,627	0,209
7	0,32	29,144	5,742	0,197
8	0,39	34,759	8,931	0,257
9	0,46	11,262	3,189	0,283

Hình 4.2 thể hiện quan hệ giữa a/E và a/P (Bảng 4.1) theo phương trình:

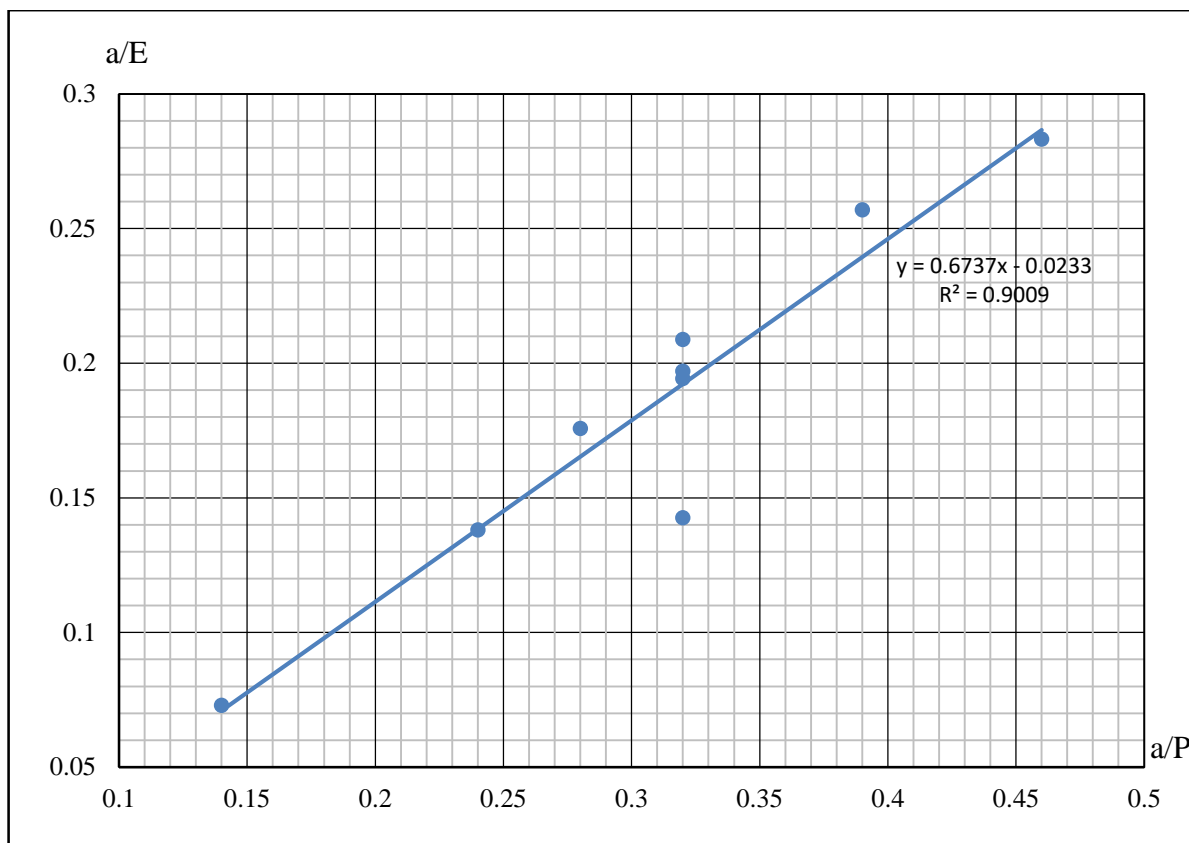
$y = 0,6737x - 0,0233$. Để thỏa mãn điều kiện $\Delta h_{gh} \geq 0$ thì:

$$\frac{a}{E} \geq 0,6737 \frac{a}{P} - 0,0233 \quad (4-1)$$

Như vậy để tồn tại dòng chảy phễu theo điều kiện thí nghiệm của luận án này thì cột nước trên tràn cần thỏa mãn điều kiện (4-1). Trong các tập thí nghiệm ở Bảng 3.4 đều thỏa mãn điều kiện (4-1).



Hình 4.1. Quan hệ giữa $(h_{\max}-h_{\min}) / h_k$ với a/E theo các trị số a/P và góc hạt



Hình 4.2. Quan hệ giữa số a/E và a/P để tồn tại dòng chảy phễu

4.1.2. Lựa chọn chiều cao bậc thụt

Các công thức đã thiết lập được xây dựng trong điều kiện thí nghiệm mà luận án đặt ra, cụ thể như sau: Dòng chảy qua tràn là dòng chảy không ngập, hay mực nước hạ lưu thấp hơn cao trình ngưỡng tràn.

Bảng 3.1 cho thấy, trong 33 trường hợp thí nghiệm chỉ duy nhất một trường hợp không xuất hiện dòng chảy phễu là trường hợp ứng với mũi hắt số 1 (góc 51° , $a/P=0,14$), có trị số $a/h_k=0,3$ là nhỏ nhất và trường hợp tiếp theo xuất hiện dòng phễu có $a/h_k = 0,35$. Như vậy để xuất hiện dòng phễu chiều cao bậc thụt a phải thỏa mãn:

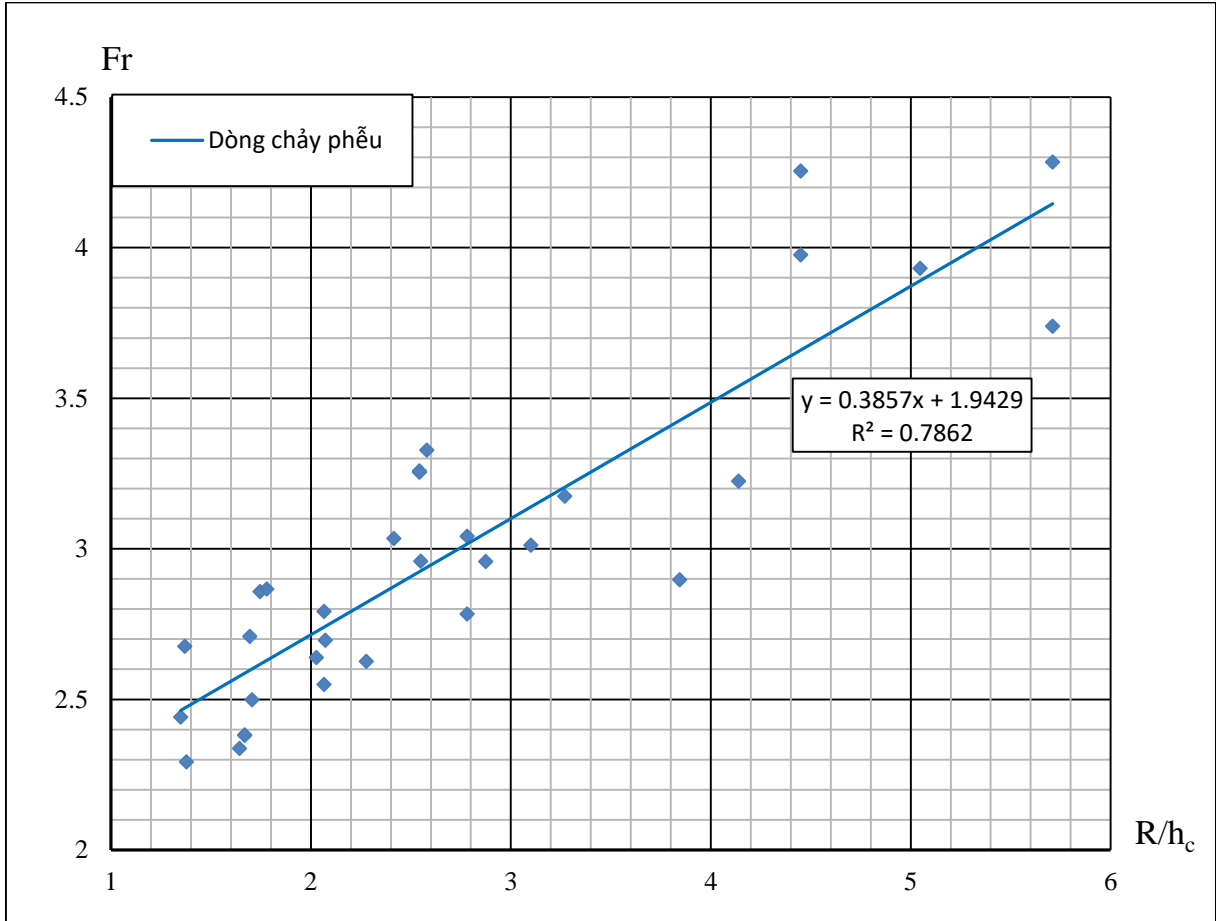
$$\frac{a}{h_k} \geq 0,35 \quad (4-2)$$

4.1.3. Lựa chọn bán kính mũi hắt

Bảng 3.3 cho thấy giữa số Froude và tỷ số R/h_c tương quan chặt với nhau (hệ số tương quan là 0,89), còn với các đại lượng không thứ nguyên khác thì tương quan ít hoặc không tương quan. Lập biểu đồ quan hệ giữa số Froude và tỷ số R/h_c cho trường

hợp dòng chảy phễu (Hình 4.3). Từ biểu đồ nhận thấy số Froude đồng biến với bán kính mũi hắt, nghịch biến với độ sâu dòng chảy tại mặt cắt co hẹp. Trên cơ sở biểu đồ này có thể chọn được bán kính cho mũi hắt hoặc từ phương trình thu được trên biểu đồ (Hình 4.3) có thể tính toán được bán kính R:

$$R_{tt} = 2,59(Fr_c - 1,9429)h_c \quad (4-3)$$

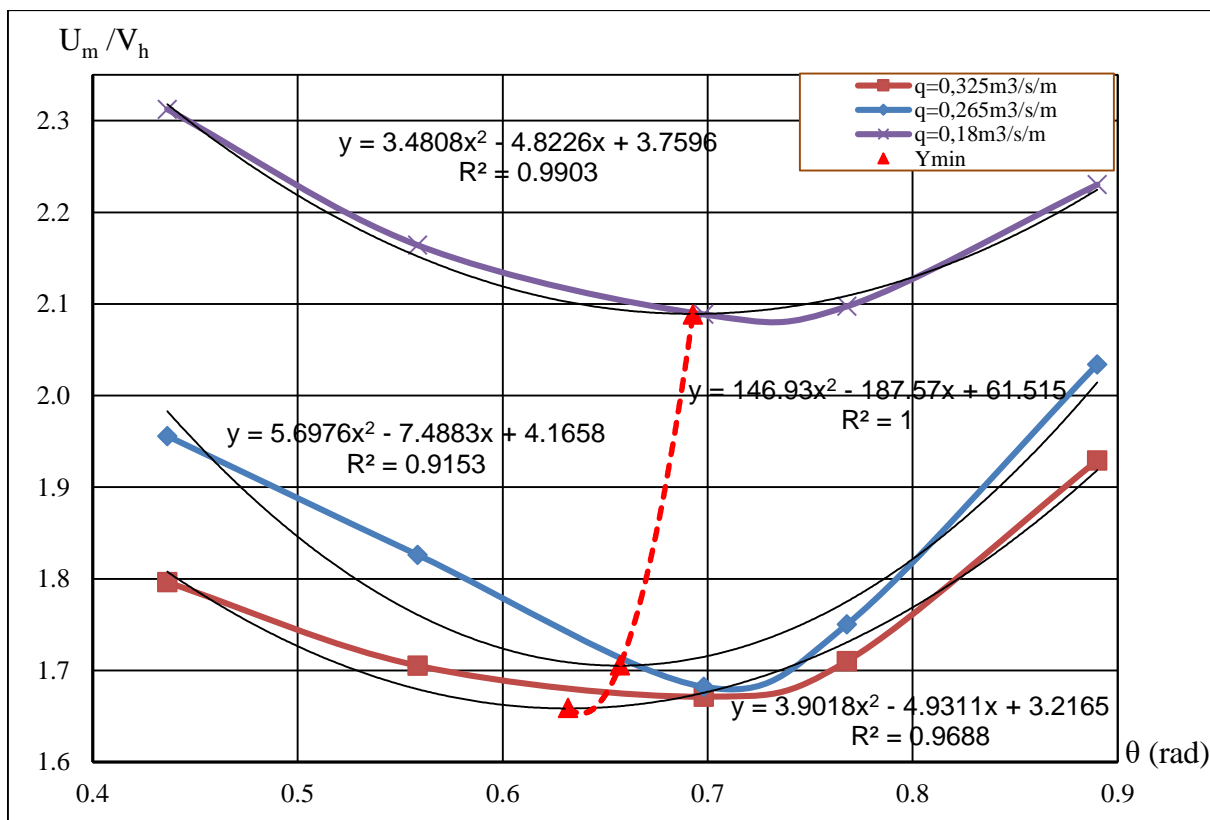


Hình 4.3. Quan hệ giữa số Froude và R/h_c dòng chảy phễu

4.1.4. Lựa chọn góc hắt theo điều kiện lưu tốc đáy lớn nhất

Từ kết quả thí nghiệm tiến hành lập đại lượng không thứ nguyên là giá trị lưu tốc lớn nhất trên kênh hạ lưu và lưu tốc trung bình mặt cắt tại kênh hạ lưu (U_m/V_h). Với mỗi cấp lưu lượng thí nghiệm lập quan hệ (U_m/V_h) với góc hắt cho trường hợp dòng chảy phễu (Hình 4.4).

Hình 4.4 cho thấy lưu tốc tương đối quan hệ theo góc hắt ở dạng phương trình bậc 2 và xác định được vùng góc hắt có giá trị lưu tốc nhỏ nằm trong khoảng $\theta=(30^0\div 45^0)$. Do vậy kiến nghị sử dụng mũi hắt với góc nhỏ hơn 45^0 .



Hình 4.4. Quan hệ lưu tốc lớn nhất tương đối và góc hất theo từng cấp lưu lượng

4.1.5. Điều kiện áp dụng các công thức thực nghiệm

Như vậy, tổng hợp các điều kiện để có kết cấu mũi hất hợp lý, tạo được dòng chảy phễu và cho lưu tốc đáy nhỏ cần thỏa mãn các điều kiện sau:

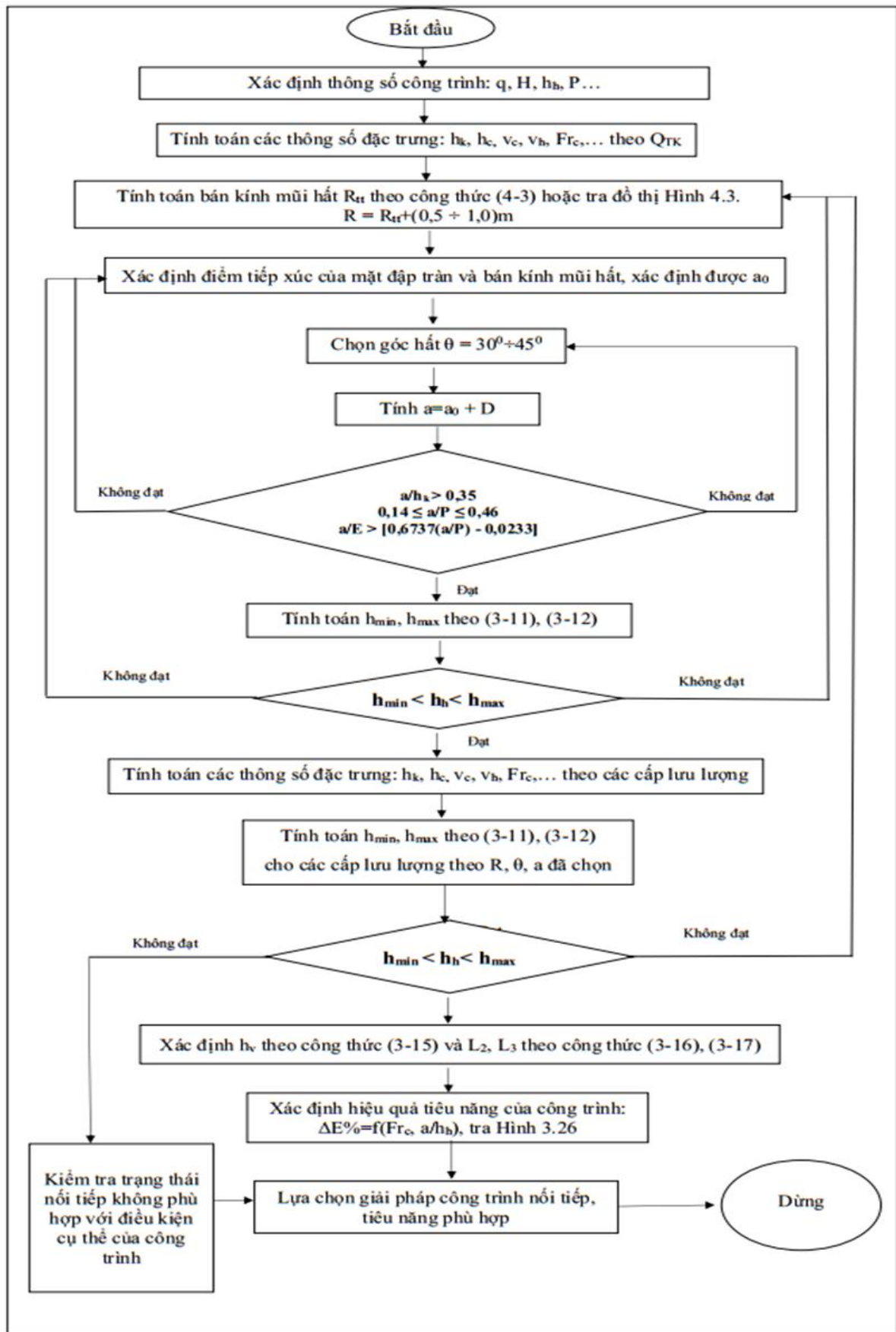
$$\theta = 30^\circ \div 45^\circ; \frac{a}{h_k} \geq 0,35; 0,14 \leq \frac{a}{P} \leq 0,46; \frac{a}{E} \geq 0,6737 \frac{a}{P} - 0,0233 \quad (4-4)$$

4.2. Quy trình tính toán lựa chọn kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu

Quy trình tính toán lựa chọn kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu nhằm xác định kích thước kết cấu mũi hất đảm bảo xuất hiện dòng chảy phễu (Hình 2.2). Kích thước kết cấu mũi hất gồm các thông số: chiều cao bậc (a), bán kính cong mũi hất (R) và góc phóng của mũi hất (θ). Quy trình tính toán được thể hiện ở sơ đồ (Hình 4.5), các bước tính toán lựa chọn mũi hất được trình bày dưới đây.

4.2.1. Xác định các thông số công trình

Lựa chọn lưu lượng ứng với tần xuất thiết kế làm lưu lượng tính toán để chọn ra các thông số kết cấu mũi hất.



Hình 4.5. Sơ đồ tính toán lựa chọn kết cấu tiêu năng dòng chảy phổ

+ Lưu lượng đơn vị tính toán: Lưu lượng đơn vị tính toán (q_{tt}) được xác định $q_{tt}=Q_{TK}/B$, trong đó: Q_{TK} là lưu lượng thiết kế.

+ Cột nước trên tràn, $H = Z_{tl} - Z_{ng}$

+ Chiều sâu hạ lưu ứng với trường hợp lưu lượng tính toán, $h_h = Z_{hl} - Z_{đk}$

Đối với các công trình đặt trên nền địa chất phong hóa hoàn toàn, làm bề tiêu năng, chiều sâu hạ lưu dùng để tính toán là chiều sâu cuối bể, $h_h = \sigma \cdot h_c$ '' (Nguyễn Cảnh Cầm và cs, 2006).

4.2.2. Tính toán các thông số đặc trưng dòng chảy

+ Xác định các thông số dòng chảy tại mặt cắt co hẹp gồm: giá trị lưu tốc v_c (m/s), giá trị độ sâu dòng chảy h_c (m), vị trí v_c , h_c (Hình 2.2).

+ Lưu tốc dòng chảy v_c có thể được ước tính theo công thức $v_c = \sqrt{2g\Delta Z}$, lấy $\Delta Z = Z_{tl} - \xi_k Z_{hl}$ (Nguyễn Cảnh Cầm và cs, 2006)

Trong đó: ξ_k là hệ số chênh lệch mực nước thượng và hạ lưu, mực nước hạ lưu tại vị trí bắt đầu nước nhảy thường thấp hơn mực nước hạ lưu sau nước nhảy, lấy $\xi_k = 0,95$.

+ Tính toán độ sâu dòng chảy: $h_c = \frac{q_{tt}}{v_c}$

+ Tính toán số Froude: $Fr_c = \frac{v_c}{\sqrt{gh_c}}$

4.2.3. Xác định bán kính mũi hắt (R)

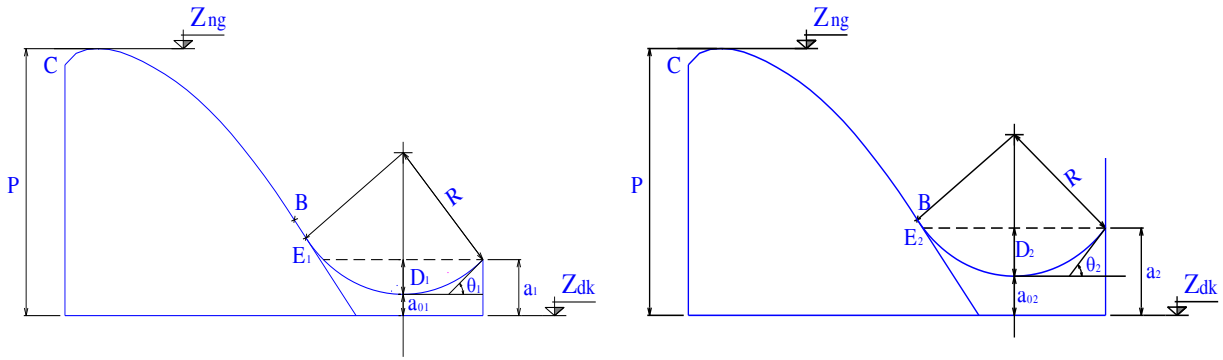
+ Tính toán bán kính cong mũi hắt R_{tt} theo công thức (4-3); hoặc từ số Froude vừa tính toán được ở trên, tra đồ thị (Hình 4.3) xác định được R/h_c , từ đó tính được R_{tt} .

+ Chọn giá trị bán kính mũi hắt $R = R_{tt} + (0,5 \div 1,0)$ m.

4.2.4. Xác định chiều cao đáy mũi hắt (a_0)

+ Căn cứ vào cột nước trên tràn H , xác định được hình dạng mặt cong CBE dạng Ophixerop của đập tràn (Hình 4.6).

+ Với bán kính mũi hắt R đã chọn vẽ được bán kính cong mũi hắt tiếp tuyến với đoạn thẳng BE, bán kính cong mũi hắt sẽ trượt trên đường thẳng BE. Tương ứng mỗi điểm E_i sẽ xác định được một giá trị a_{oi} (Hình 4.6).



Hình 4.6. Sơ đồ xác định a_0

4.2.5. Xác định góc mũi hất (θ)

+ Giả thiết góc mũi hất θ , sơ bộ chọn $\theta = (30^\circ \div 45^\circ)$.

4.2.6. Xác định chiều cao bậc thụt (a)

+ Tính chiều cao bậc thụt $a = D + a_o = (1 - \cos \theta)R + a_o$

+ Kiểm tra điều kiện: $\frac{a}{h_k} \geq 0,35$; $0,14 \leq \frac{a}{P} \leq 0,46$; $\frac{a}{E} \geq 0,6737 \frac{a}{P} - 0,0233$

4.2.7. Tính toán chiều sâu hạ lưu giới hạn (h_{min} và h_{max})

+ Tính toán xác định các giá trị chiều sâu hạ lưu giới hạn h_{min} và h_{max} theo công thức (3-11), (3-12) với các cấp lưu lượng từ $Q_{max} \div Q_{min}$

+ So sánh giá trị chiều sâu hạ lưu h_h của công trình với cặp giá trị chiều sâu hạ lưu giới hạn (h_{min}, h_{max}).

Nếu $h_{min} < h_h < h_{max}$, giá trị a, R chọn là phù hợp.

Nếu giá trị h_h nằm ngoài phạm vi (h_{min}, h_{max}) cần tính toán chọn lại R, a và tính toán lại theo các bước nêu trên.

+ Trong trường hợp $h_{min} < h_h < h_{max}$ chỉ đáp ứng với một số cấp lưu lượng nhất định, tùy trường hợp cụ thể tạo ra nổi tiếp chảy đáy hồi phục hay nổi tiếp phóng xa và điều kiện cụ thể của công trình để có phương án điều chỉnh chiều sâu mực nước hạ lưu để tạo ra dòng chảy phễu sau bậc thụt.

4.2.8. Xác định chiều cao nước vòng và chiều dài khu xoáy dòng chảy phễu

+ Tính toán chiều cao nước vòng lớn nhất theo công thức (3-15).

+ Tính toán chiều dài khu xoáy dòng chảy phễu theo công thức (3-16), (3-17).

Lấy trị số nhỏ khi tỷ lưu tính toán nhỏ hoặc góc mũi hất lớn và ngược lại.

4.2.9. Xác định lưu tốc dòng chảy sau bậc thụt

+ Lưu tốc đáy dòng quần (đáy xoáy 2) và lưu tốc đáy dòng xuôi trên kênh hạ lưu (đáy xoáy 3) gần đối xứng nhau, giá trị lưu tốc lớn nhất đạt khoảng 2 lần giá trị lưu tốc sau nước nhảy: $V_{\text{đáyHLmax}}=2V_h$ ($V_h=q/h_h$).

+ Vị trí dòng quần lớn nhất cách công trình khoảng: $L_{U\text{quần}} = (2\div 5)a$ tùy theo giá trị góc hắt của mũi, lấy hệ số nhỏ khi mũi có góc hắt lớn và ngược lại.

+ Kiểm tra lưu tốc đáy nhằm đảm bảo lựa chọn loại vật liệu và chiều dài gia cố (nếu có) sau công trình bậc thụt đảm bảo an toàn cho công trình khi đi vào vận hành.

4.2.10. Xác định hiệu quả tiêu năng

Hiệu quả tiêu năng của kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu được xác định theo tham số Froude và đại lượng không thứ nguyên a/h_h .

$\Delta E\% = f(Fr_c, a/h_h)$ tra theo Hình 3.26.

4.3. Tính toán ứng dụng đối với tràn xả lũ Bản Mông

4.3.1. Giới thiệu chung

Công trình đầu mối Hồ chứa nước Bản Mông thuộc xã Yên Hợp, huyện Quỳnh Hợp, tỉnh Nghệ An là công trình cấp II gồm các hạng mục: Đập chính và đập phụ tạo hồ, tràn xả lũ, cống xả sâu, cống lấy nước tưới và cấp nước, cửa lấy nước tuyến năng lượng và nhà máy thủy điện.

Bảng 4.2. Quan hệ Q-Z công trình Bản Mông (Lê Văn Nghị, 2012a)

Mức nước thí nghiệm		Lưu lượng qua tràn $Q_{\text{tràn}}$ (m ³ /s)	Tần suất P%
Z_{tl} (m)	Z_{hl} (m)		
76,75	60,64	6215,47	P _{KT}
75,05	59,04	4915,47	P _{TK}
73,82	57,86	4036,56	P _{TX1}
71,54	55,7	2580,6	P _{TX2}
69,47	53,58	1460,91	P _{TX3}
66,21	50,61	221,91	P _{TX4}

Đập ngăn là đập bê tông trọng lực, thân đập có mác bê tông M150 hạt thô, vỏ bọc là lớp bê tông mác M200. Mặt tràn xả lũ được thiết kế theo mặt cắt Ophixerop không chân

không với cột nước thiết kế $H_{tk} = 10,15\text{m}$ và gia cố bằng bê tông cốt thép M400 có cao trình ngưỡng tràn $Z_{ng}=+64,9\text{m}$, cao trình đáy kênh hạ lưu $Z_{ng}=+40,4\text{m}$. Tràn gồm 05 khoang có tổng chiều rộng tràn nước: $B=5 \times 15=75\text{m}$ (Lê Văn Nghi, 2012a). Quan hệ giữa lưu lượng và mực nước thượng hạ lưu như Bảng 4.2.

4.3.2. Xác định các thông số công trình nối tiếp tiêu năng dòng chảy phễu

Để xác định các thông số của kết cấu công trình nối tiếp tiêu năng, sử dụng cấp lưu lượng ứng với tần suất thiết kế $Q_{TK} = 4915,47 \text{ m}^3/\text{s}$

4.3.2.1. Bán kính cong mũi hắt (R)

Chiều cao ngưỡng tràn $P=Z_{ng}-Z_{đk}=64,9-40,4=24,5\text{m}$

Cột nước tràn: $H=Z_{tl}-Z_{ng}=75,05-64,90=10,15\text{m}$

Chiều sâu hạ lưu: $h_h=Z_{hl}-Z_{đk}=59,04-40,40=18,64\text{m}$

Tỷ lưu qua tràn: $q_{tt}=Q_{TK}/B=4915,47/75=65,54\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Chiều sâu phân giới: $h_k = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{(65,54)^2}{9,81}} = 7,59\text{m}$

Giá trị lưu tốc dòng chảy tại vị trí co hẹp:

$$v_c = \sqrt{2g\Delta z} = \sqrt{2g(z_{tl} - \xi_k z_{hl})} = \sqrt{2 * 9,81 * (75,05 - 0,95 * 59,04)} = 19,29 \text{ m/s}$$

Độ sâu dòng chảy tại vị trí co hẹp: $h_c = \frac{q_{tt}}{v_c} = \frac{66,67}{19,29} = 3,40\text{m}$

Hệ số Froude: $Fr = \frac{v_c}{\sqrt{gh_c}} = \frac{19,29}{\sqrt{9,81 * 3,40}} = 3,34$

+ Bán kính cong mũi hắt tính sơ bộ theo công thức (4-3):

$$R_{tt} = 2,59(Fr_c - 1,9429)h_c = 2,59 * (3,31 - 1,9429) * 3,40 = 12,30\text{m}$$

+ Chọn bán kính mũi hắt: $R = R_{tt} + 0,70 = 12,30 + 0,70 = 13,0\text{m}$

4.3.2.2. Chiều cao đáy mũi hắt (a_0)

Với cột nước thiết kế $H_{tk} = 10,15\text{m}$, chiều cao đập $P= 24,5\text{m}$ vẽ được đường cong mặt tràn Ophixerop CBE, với bán kính mũi hắt $R = 13\text{m}$, vẽ được cung tròn tiếp xúc với đoạn thẳng BE (Hình 4.7). Lựa chọn $a_0 = 1,95\text{m}$.

4.3.2.3. Góc mũi hắt (θ)

+ Giả thiết góc mũi hắt $\theta=40^\circ$

4.3.2.4. Chiều cao bậc thụt (a)

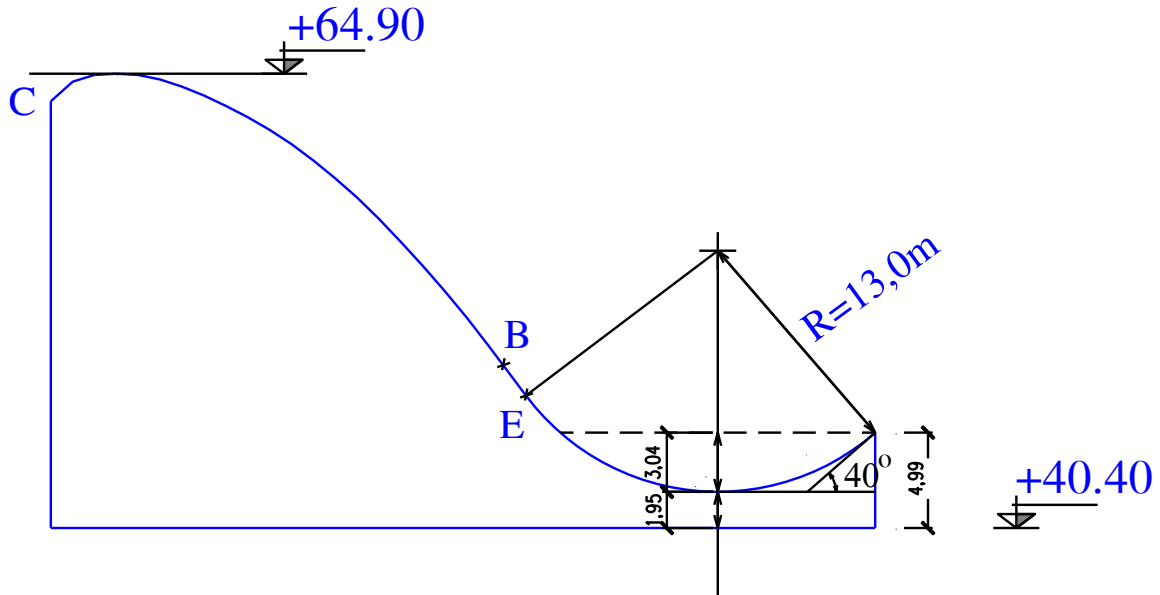
+ Tính chiều cao bậc thụt

$$a = D + a_0 = (1 - \cos 40^\circ) * 13 + 1,95 = 4,99\text{m}$$

$$+ \text{Tính: } \frac{a}{h_k} = 0,66; \frac{a}{P} = 0,2; \frac{a}{E} = 0,14; 0,6737 \frac{a}{P} - 0,0233 = 0,11$$

$$\text{Như vậy điều kiện: } \frac{a}{h_k} \geq 0,35; 0,14 \leq \frac{a}{P} \leq 0,46; \frac{a}{E} \geq 0,6737 \frac{a}{P} - 0,0233 \text{ thỏa}$$

mãn.



Hình 4.7. Thông số mũi hắt của tràn Bản Mông

4.3.3. Xác định các đặc trưng nối tiếp tiêu năng dòng chảy phễu sau tràn Bản Mông

Với kết cấu mũi hắt đã được xác định, cần tính toán các đặc trưng thủy lực của nối tiếp dòng chảy phễu ở hạ lưu tràn, kiểm tra khả năng hình thành dòng chảy phễu với các cấp lưu lượng. Từ kết quả đó kiểm tra sự ổn định lòng dẫn ở hạ lưu và đề xuất giải pháp an toàn cho hạ lưu công trình.

4.3.3.1. Các chiều sâu giới hạn của dòng chảy phễu:

$$\text{Theo công thức (3-11): } \frac{h_{\min}}{h_k} = 1,906 \left(\frac{a}{P}\right)^{-0,117} \left(\frac{a}{h_k}\right)^{0,355} \left(\frac{a}{D}\right)^{0,122}$$

$$\text{Theo công thức (3-12): } \frac{h_{\max}}{h_k} = 1,584 \left(\frac{a}{P}\right)^{-0,601} \left(\frac{a}{h_k}\right)^{0,695} \left(\frac{a}{D}\right)^{0,02}$$

Tính được các giá trị h_{\min} , h_{\max} (Bảng 4.3), so sánh giá trị h_h với cặp giá trị độ sâu giới hạn đã được xác định ở trên (h_{\min} , h_{\max}) cho thấy $h_{\min} < h_h < h_{\max}$ với từng cấp lưu lượng tính toán từ $6215,47\text{m}^3/\text{s}$ đến $221,91\text{m}^3/\text{s}$.

Như vậy với giá trị góc hắt $\theta=40^0$, bán kính mũi hắt $R=13,0m$ và chiều cao bậc thụt $a=4,99m$ đảm bảo tạo ra dòng chảy phễu sau bậc công trình của tràn Bản Mông.

4.3.3.2. Chiều cao nước vòng và chiều dài khu xoáy dòng chảy phễu

+ Chiều cao nước vòng:

$$\text{Theo công thức (3-15): } \frac{h_v}{a} = 1,342 \left(\frac{h_k}{a}\right)^{0,138} \left(\frac{D}{a}\right)^{0,016} \left(\frac{E}{a}\right)^{0,648}$$

Thay số: $h_v=24,71m$

+ Chiều dài khu xoáy:

$$\text{Theo công thức (3-16): } L_2 = (1,4 \div 1,8)h_v$$

Thay số : $L_2 = 1,8 * 24,71 = 44,48m$

$$\text{Theo công thức (3-17): } L_3 = (3,0 \div 3,7)h_v$$

Thay số : $L_3 = 3,7 * 24,71 = 91,43m$

4.3.3.3. Lưu tốc dòng quần đáy lớn nhất

Giá trị lưu tốc dòng quần đáy lớn nhất đạt: $v_{\text{đáymax}} = 2 * v_h = 7,03m/s$

4.3.3.4. Hiệu quả tiêu năng dòng chảy phễu

Tra đồ thị Hình 3.26: $\Delta E\% = f(Fr_c, a/h_h)$, ($Fr_c=2,99$; $a/h_h=0,27$), có: $\Delta E = 50\%$.

Vậy với kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu có: chiều cao bậc thụt $a=4,99m$, góc hắt $\theta=40^0$, bán kính mũi hắt $R=13,0m$ áp dụng cho tràn Bản Mông có khả năng tiêu tán năng lượng dòng chảy đạt khoảng 50 %.

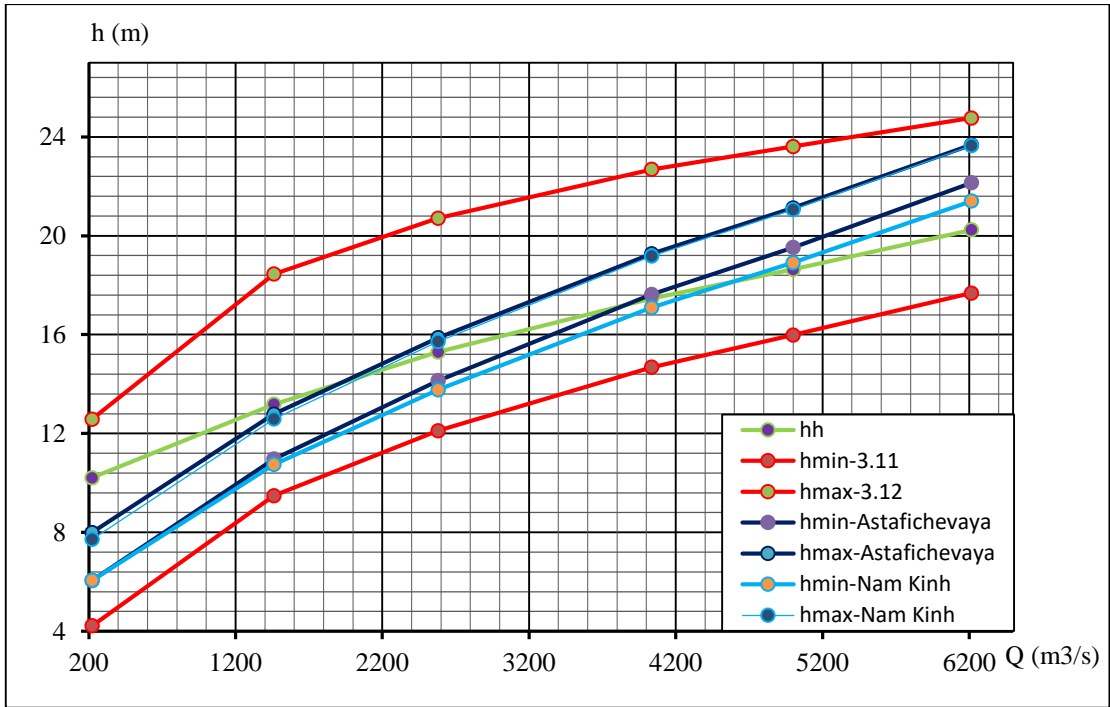
4.3.4. Tính toán so sánh khả năng xuất hiện dòng chảy phễu ở hạ lưu tràn Bản Mông với các góc hắt và công thức khác nhau

Với kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu có: chiều cao bậc thụt $a=4,99m$, góc hắt $\theta=40^0$, bán kính mũi hắt $R=13,0m$. Tính toán cho các góc hắt khác nhau và các đặc trưng của nước nhảy mặt đáy với góc hắt nhỏ hơn 15^0 theo công thức (1-14), (1-15) của T.N.Astaficheva, công thức (1-17), (1-18) của Viện nghiên cứu Thủy lực Nam Kinh, Trung Quốc để so sánh (Bảng 4.3).

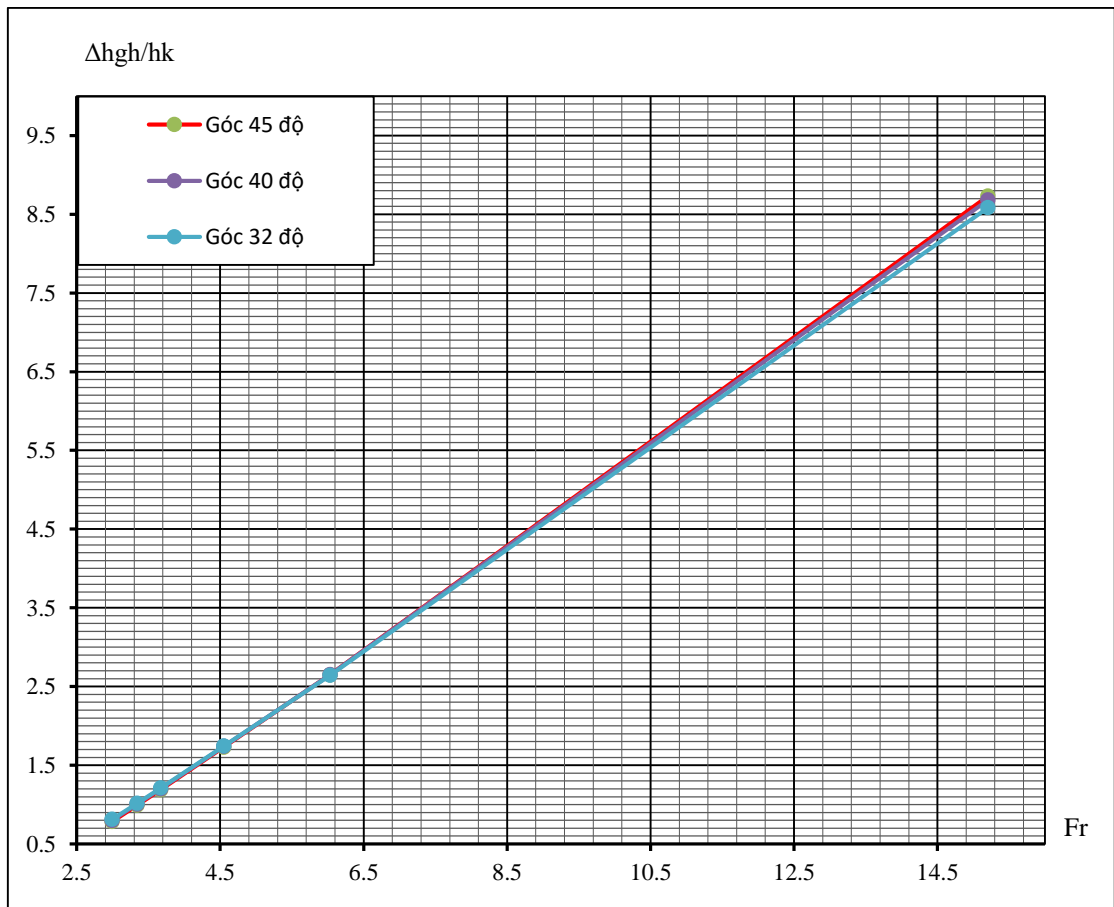
Với kết quả tính toán tại Bảng 4.3, cho thấy với mọi cấp lưu lượng tháo qua tràn Bản Mông luôn hình thành dòng chảy phễu với góc hắt lựa chọn là góc 40^0 và các góc 45^0 , 32^0 , mực nước hạ lưu luôn nằm trong khoảng giữa h_{\min} - h_{\max} . Từ kết quả tính toán vẽ quan hệ Q - h (Hình 4.8), Δh_{gh} - Fr (Hình 4.9), cho thấy:

Bảng 4.3. Kết quả tính toán kiểm tra, so sánh cho tràn Bản Mông

Tham số	Đơn vị	P _{KT}	P _{TK}	P _{TX1}	P _{TX2}	P _{TX3}	P _{TX4}
Góc hắt 40°							
Q	m ³ /s	6215,47	4915,47	4036,56	2580,60	1460,91	221,91
h_{\min}	m	17,68	15,98	14,68	12,11	9,48	4,22
h_h	m	20,24	18,64	17,46	15,30	13,18	10,21
h_{\max}	m	24,76	23,61	22,68	20,71	18,45	12,58
h_v	m	26,05	24,71	23,71	21,73	19,72	15,35
L ₂	m	46,88	44,48	42,67	39,12	35,50	27,64
L ₃	m	96,37	91,43	87,71	80,41	72,98	56,81
V _{dáymax}	m/s	8,19	7,03	6,17	4,50	2,96	0,58
Góc hắt 45°							
h_{\min}	m	18,10	16,37	15,04	12,41	9,71	4,32
h_h	m	20,24	18,64	17,46	15,30	13,18	10,21
h_{\max}	m	25,06	23,89	22,95	20,96	18,67	12,72
Góc hắt 32°							
h_{\min}	m	17,09	15,45	14,20	11,71	9,17	4,08
h_h	m	20,24	18,64	17,46	15,30	13,18	10,21
h_{\max}	m	24,30	23,17	22,26	20,33	18,11	12,34
Công thức (1-14), (1-15) của T.N.Astaficheva							
h_{\min}	m	22,14	19,53	17,63	14,14	10,97	6,05
h_h	m	20,24	18,64	17,46	15,30	13,18	10,21
h_{\max}	m	23,67	21,13	19,28	15,87	12,78	7,99
Công thức (1-17), (1-18) của Nam Kinh – Trung Quốc							
h_{\min}	m	21,40	18,91	17,10	13,77	10,75	6,06
h_h	m	20,24	18,64	17,46	15,30	13,18	10,21
h_{\max}	m	23,65	21,06	19,18	15,73	12,59	7,72



Hình 4.8. Quan hệ Q - h trường hợp góc hất 40°



Hình 4.9. Quan hệ giới hạn xuất hiện dòng chảy phễu theo số Froude

+ Trường hợp kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu có góc hắt 40^0 hình thành dòng hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt (dòng chảy phễu) ứng với tất cả các cấp lưu lượng xả qua tràn trong một khoảng khá lớn của sự thay đổi mực nước hạ lưu (trong khoảng 7,09m÷8,36m).

+ Trường hợp kết cấu mũi bậc có góc hắt nhỏ ($\theta=0^0\div15^0$) không hình thành dòng chảy mặt khi lưu lượng xả nhỏ hoặc lớn, chỉ hình thành dòng chảy mặt khi lưu lượng xả trong khoảng (2000 m³/s÷ 4000m³/s) và trong một khoảng nhỏ của sự thay đổi mực nước hạ lưu (khoảng 2,0m).

+ Với góc 45^0 cho khoảng xuất hiện dòng chảy phễu lớn nhất, tuy nhiên chênh lệch giữa các góc hắt không nhiều.

Như vậy với các thông số thủy văn đầu vào của đập tràn Bản Mông, tỉnh Nghệ An khi áp dụng phương án tiêu năng mặt đáy hỗn hợp sử dụng kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu không phải sử dụng biện pháp công trình ở hạ lưu để tạo cột nước hạ lưu đảm bảo hình thành dòng chảy mặt hoặc mặt đáy hỗn hợp.

4.3.5. Giải pháp gia cố bảo vệ lòng dẫn hạ lưu và so sánh tiêu năng dòng chảy phễu với tiêu năng đáy của tràn Bản Mông

Với kết quả tính toán phương án tiêu năng dòng chảy phễu cho thấy lưu tốc đáy lớn nhất đạt 8,19m/s trong phạm vi xoáy 2 (khoảng 47m), với địa chất nền là cát kết có vận tốc cho không xói là 7,5m/s, để an toàn cho công trình cần giải pháp gia cố lòng dẫn để bảo đảm chống xói lòng dẫn hạ lưu. Trong trường hợp không gia cố hạ lưu cần phải xác định cụ thể trường vận tốc trên mô hình tổng thể.

Kết quả thí nghiệm mô hình phương án tiêu năng đáy (Lê Văn Nghị, 2012a) cho thấy:

+ Hiệu quả tiêu năng đạt khoảng 44% đến 55%

+ Bể tiêu năng có chiều dài 52m, bằng BTCT M400 dày 3m, được neo vào nền bằng thép D30, với chiều dài 300cm, khoảng cách giữa các neo là 2m; đoạn sân sau thứ nhất dài 20m, bằng BTCT M200 dày 1,5m; tiếp đến là sân sau thứ hai có cấu tạo là đá hộc đổ trong khung bê tông dày 1,5m.

+ Lưu tốc đáy lớn nhất trong bể tiêu năng là 25,4m/s; lưu tốc đáy lớn nhất ở sân sau thứ nhất là 6,12m/s.

Với phạm vi xoáy 3 cách chân bậc thụt lớn nhất là $L_3 = 96,37\text{m}$, lưu tốc đáy dòng quẩn lớn nhất $V_{\text{đáymax}} = 8,19\text{m/s}$ tương ứng trường hợp lưu lượng tháo lớn nhất $Q=6215,47\text{m}^3/\text{s}$. Đồng thời qua thí nghiệm cho thấy lưu tốc đáy của dòng chảy phễu nhỏ (Hình PL 3.1, 3.2, 3.3). Vì vậy sơ bộ có thể chọn chiều dài gia cố là 100m, bằng BTCT M200 dày 1,5m bằng với cấu tạo sân sau thứ nhất của phương án tiêu năng đáy. Tiếp theo về hạ lưu là đoạn gia cố bằng đá hộc đổ trong khung bê tông với chiều dài 50m. Do không xuất hiện áp suất âm tại bản đáy, cũng như mạch động áp lực và vận tốc nhỏ hơn tiêu năng đáy, nên với tiêu năng dòng chảy phễu không cần thiết gia cố nền bằng giải pháp neo bản đáy như với tiêu năng dòng đáy.

Như vậy khi sử dụng phương án tiêu năng dòng chảy phễu có chiều dài gia cố bê tông có thể lớn hơn, nhưng kết cấu không yêu cầu độ dày như với tiêu năng dòng đáy. Tổng khối lượng xây dựng sẽ nhỏ hơn so với tiêu năng dòng đáy.

Với địa chất nền tốt hơn ta có thể không phải gia cố bản đáy sẽ tiết kiệm được kinh phí và giảm thời gian thi công.

4.4. Kết luận chương 4

1. Qua khảo sát quan hệ giữa các yếu tố cấu tạo của mũi hắt đã đề xuất được các thông số của kết cấu bậc thụt cần được lựa chọn thỏa mãn điều kiện (4-4) để hình thành dòng chảy phễu ở hạ lưu công trình.

2. Quy trình tính toán được xây dựng giúp rút ngắn thời gian, giảm công sức tính toán, giảm bớt một phần khối lượng phải thí nghiệm, giúp người thiết kế có cái nhìn sát thực hơn về khả năng làm việc cũng như dự đoán trước tình hình thủy lực dòng chảy qua công trình từ trong các điều kiện cụ thể khi tính toán, góp phần cho công tác thiết kế, quản lý, vận hành công trình đạt hiệu quả cao.

3. Với tràn Bản Mông hoàn toàn có thể ứng dụng kết cấu tiêu năng dòng chảy phễu, khi đó sẽ giảm khối lượng gia cố hạ lưu nhưng vẫn đảm bảo công trình làm việc ổn định.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

I. KẾT LUẬN

1. Các kết luận chung của luận án

(1) Nước nhảy, nối tiếp và tiêu năng là vấn đề phức tạp, đa dạng và luôn mang tính thời sự. Các hình thức nối tiếp mặt đáy, mặt đáy hỗn hợp với bậc thụt phẳng hoặc mũi bậc có góc hắt nhỏ ($\theta=0^{\circ}\div 15^{\circ}$) đã được nghiên cứu tương đối hoàn chỉnh, nhưng do nhược điểm không ổn định và có sóng lan truyền dài ở hạ lưu mà ở Việt Nam rất ít được áp dụng và nghiên cứu. Các dạng nối tiếp đa xoáy với bậc thụt rất nhỏ và góc hắt lớn của kết cấu tiêu năng bồn được các nhà khoa học phương Tây nghiên cứu rất tỉ mỉ. Tuy nhiên đó là các nghiên cứu thực nghiệm trong phòng, giới hạn chiều cao bậc thụt rất nhỏ $a = 0,05R$.

(2) Các kết quả về đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy đa xoáy chủ yếu thu được từ phương pháp nghiên cứu thực nghiệm và bán thực nghiệm, tập trung vào giới hạn hình thành các dạng nối tiếp, các nghiên cứu lý thuyết thì chấp nhận giả thiết vận tốc phân bố đều, áp suất phân bố theo qui luật thủy tĩnh. Trong điều kiện nghiên cứu của luận án thì phương pháp nghiên cứu thực nghiệm trên mô hình vật lý cho kết quả tốt nhất.

(3) Dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy (dòng chảy phễu) là trường hợp mở rộng của nước nhảy mặt, là loại nối tiếp đa xoáy, với khả năng tiêu hao năng lượng đạt tới 60%, “cắt được” sóng lan truyền ở hạ lưu bởi sự hình thành “3 xoáy” ở sau bậc thụt có mũi hắt cong, góc hắt lớn ($\theta=25^{\circ}\div 51^{\circ}$). Dòng chảy phễu có lưu tốc đáy nhỏ hơn nhiều so với tiêu năng đáy và tiêu năng phóng xa cùng điều kiện.

(4) Mô hình thủy lực dòng chảy phễu đã được xây dựng trong máng kính, đảm bảo các tiêu chuẩn về tương tự theo các tiêu chuẩn thực nghiệm hiện hành và chuyển được ra thực tế với tỷ lệ mô hình $\lambda_L \leq 100$, sai số các phép đo trên mô hình nhỏ hơn 3%.

(5) Chế độ nối tiếp hạ lưu bậc thụt mũi hắt cong, góc hắt $\theta=25^{\circ}\div 51^{\circ}$, chiều cao bậc thụt $a/P=0,14\div 0,46$ chuyển đổi qua 7 dạng cơ bản phù hợp với các kết quả nghiên cứu trước đây về dòng chảy mặt.

(6) Dòng chảy phễu xuất hiện trong một khoảng rộng của sự thay đổi mực nước hạ lưu từ giới hạn dưới – độ sâu dòng chảy nhỏ nhất (h_{\min}) đến giới hạn trên – độ sâu dòng chảy lớn nhất (h_{\max}).

(7) Tỷ lệ chiều cao nước vòng lớn nhất đối với độ sâu hạ lưu nhỏ nhất hình thành dòng chảy phễu biến thiên trong khoảng $(1,2 \div 1,92)$ lần và với chiều sâu hạ lưu lớn nhất hình thành dòng chảy phễu biến thiên trong khoảng $(1,02 \div 1,14)$ lần. Chiều cao nước vòng nhỏ nhất trong trường hợp dòng chảy phễu và đạt giá trị lớn nhất khi ở trạng thái giới hạn trên.

(8) Giới hạn các xoáy cuộn ở hạ lưu bậc thụt của dòng chảy phễu tỷ lệ với chiều cao cột nước vòng lớn nhất, giới hạn xoáy 2 là $L_2 = (1,2 \div 2,0)h_v$ và giới hạn xoáy 3 là $L_3 = (2,4 \div 4,4)h_v$.

(9) Dòng chảy phễu có lưu tốc dòng chảy ngược lớn nhất bằng khoảng 2 lần lưu tốc dòng chảy ở kênh hạ lưu đáy bằng. Vị trí xuất hiện lưu tốc đáy lớn nhất cách chân mũi phóng một khoảng bằng $(2 \div 5)$ chiều cao bậc thụt a .

(10) Kết cấu mũi hắt cho sự hình thành dòng chảy phễu cần được lựa chọn thỏa mãn điều kiện (4-4). Đây cũng là giới hạn của các công thức thực nghiệm được xây dựng từ luận án này.

(11) Quy trình tính toán, lựa chọn kết cấu mũi hắt tạo dòng chảy phễu được xây dựng và áp dụng tính toán thành công cho một công trình thực tế.

2. Các đóng góp mới của luận án

(1) Xây dựng được các công thức thực nghiệm xác định giới hạn trên h_{max} , giới hạn dưới h_{min} của cột nước hạ lưu để tạo dòng nối tiếp mặt – đáy – ngập 3 xoáy và chiều cao nước vòng h_v của dòng nối tiếp hỗn hợp sau bậc thụt có mũi hắt cong, góc hắt từ 25^0 đến 51^0 .

(2) Đề xuất được hình dạng và kích thước của bậc thụt, mũi hắt để đảm bảo chế độ nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy sau bậc thụt.

(3) Thiết lập được quy trình tính toán lựa chọn kết cấu mũi hắt tạo dòng nối tiếp hỗn hợp mặt – đáy – ngập 3 xoáy và xác định các đặc trưng thủy động lực dòng nối tiếp hỗn hợp sau bậc thụt.

II. KIẾN NGHỊ

+ Áp dụng hình thức nối tiếp, tiêu năng dòng phễu vào thiết kế tiêu năng cho các công trình tháo nhằm đến phương án tối ưu về kinh tế và kỹ thuật;

+ Áp dụng số liệu, công thức, quan hệ được thiết lập của luận án vào tính toán thiết kế công trình tiêu năng dạng phễu ở hạ lưu bậc thụt mà trước đây chưa đủ luận cứ khoa học để thiết kế dạng nối tiếp chảy mặt có hiệu quả kinh tế...

III. HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

+ Tiếp tục nghiên cứu hoàn thiện các đặc trưng thủy động lực học theo hướng chi tiết hơn của kết quả luận án như: kích thước các xoáy cuộn, đặc trưng đường mặt nước trong dòng chảy phễu; phân bố chi tiết lưu tốc, áp lực, mạch động lưu tốc, mạch động áp lực;

+ Mở rộng phạm vi nghiên cứu trong bài toán không gian, dòng chảy qua cửa van, điều kiện biên địa hình đáy lòng dẫn để thu được các kết quả tốt hơn của luận án này;

+ Xây dựng chương trình tính toán thủy lực nhằm lựa chọn kết cấu phễu hợp lý từ kết quả nghiên cứu của luận án;

+ Nghiên cứu áp dụng dạng mũi hắt không liên tục, nhằm nâng cao khả năng khuếch tán dòng chảy tăng cường tiêu năng ở hạ lưu của bậc thụt;

+ Ứng dụng mô hình toán 3 chiều hoặc 2 chiều đứng trong việc phân tích kết cấu dòng chảy của dòng chảy phễu cũng là một hướng để làm giàu các hiểu biết về đặc trưng thủy động lực học của dòng chảy phễu.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

1. Nguyễn Quốc Huy, Xác định giới hạn hình thành dòng chảy phễu ở hạ lưu bậc thụt mũi hát cong, góc hát lớn, *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*, Số 20, Kỳ 2, Tr. 76-84, tháng 10/2016.
2. Nguyễn Quốc Huy, Lê Văn Nghị, Đặc trưng hình dạng của dòng chảy phễu sau bậc thụt có góc hát lớn, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, Số 34, tr. 55-64, tháng 08/2016.
3. Nguyễn Quốc Huy, Lê Văn Nghị, Tính toán tiêu năng dòng mặt sau bậc thụt có mũi hát cong và góc hát lớn, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, Số 34, tr. 9-15, tháng 08/2016.
4. Lê Văn Nghị, Nguyễn Quốc Huy, Đoàn Thị Minh Yên , Điều kiện hình thành, chuyển hóa các trạng thái dòng chảy ở hạ lưu công trình dạng bậc thụt có góc hát lớn, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, Số 25, Tr. 44-51, tháng 2/2015.
5. Lê Văn Nghị, Nguyễn Quốc Huy, Đoàn Thị Minh Yên, *Sáng chế “Kết cấu mũi hát tạo dòng chảy hỗn hợp mặt đáy ổn định dạng 3 xoáy ở hạ lưu công trình tháo”*, Số đơn 1-2015-03470, ngày 21/9/2015, Quyết định chấp nhận đơn hợp lệ số 68818/QĐ-SHTT, ngày 03/11/2015 của Cục Sở hữu Trí tuệ - Bộ Khoa học và Công nghệ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Hoàng Tư An (2012), *Thủy lực công trình*, Nhà xuất bản Nông nghiệp, Hà Nội.
2. Nguyễn Cảnh Cầm, Nguyễn Văn Cung, nnk (2006), *Giáo trình Thủy lực tập 1, 2*, Nhà xuất bản Nông nghiệp, Hà Nội.
3. Nguyễn Hữu Chí (1974), *Cơ học chất lỏng ứng dụng tập II*, Nhà xuất bản Đại học và Trung học chuyên nghiệp, Hà Nội.
4. Nguyễn Văn Cung, Nguyễn Xuân Đăng và Ngô Trí Viêng (2005), *Công trình tháo lũ trong đầu mối hệ thống thủy lợi*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
5. Lê Thị Việt Hà (2013), Đặc trưng hình học nối tiếp nước nhảy đáy trong lòng dẫn mở rộng dần đáy bằng, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, số 14.
6. Nguyễn Quốc Huy, Lê Văn Nghị (2016a), Đặc trưng hình dạng của dòng chảy phễu sau bậc thụt có góc hắt lớn, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, số 34, tr. 55-64.
7. Nguyễn Quốc Huy, Lê Văn Nghị (2016b), Tính toán tiêu năng dòng mặt sau bậc thụt có mũi hắt cong và góc hắt lớn, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, số 34, tr. 9-15.
8. Nguyễn Lanh (2005), *Quy hoạch hóa thực nghiệm*, Viện Công nghệ xạ hiếm, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
9. Nguyễn Văn Mạo (2001), *Tính toán thủy lực công trình tháo nước*, Bài giảng dùng cho cao học đại học Thủy lợi, Hà Nội.
10. Lê Văn Nghị (2005), “Một vài đặc trưng thủy động lực học và ổn định lòng dẫn hạ lưu công trình tháo cột nước thấp”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Hà Nội.
11. Lê Văn Nghị, Nguyễn Quốc Huy, Đoàn Thị Minh Yên (2015a), Điều kiện hình thành, chuyển hóa các trạng thái dòng chảy ở hạ lưu công trình dạng bậc thụt có góc hắt lớn, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, số 25, tháng 2/2015.
12. Lê Văn Nghị, Nguyễn Quốc Huy, Đoàn Thị Minh Yên, và nnk (2015b), *Báo cáo kết quả thí nghiệm mô hình vật lý giải pháp công trình tiêu năng, nhằm bảo vệ và chống sạt lở*, thuộc đề tài cấp bộ “Nghiên cứu chế độ thủy động lực và đề xuất giải pháp ổn định lòng dẫn khu vực Quảng Huế sông Vu Gia - Thu Bồn”, Hà Nội.
13. Lê Văn Nghị và nnk (2012a), *Báo cáo thí nghiệm mô hình thủy lực công trình đầu mối hồ chứa nước Bản Mòng tỉnh Nghệ An*, Hà Nội.
14. Lê Văn Nghị, Hoàng Đức Vinh, Nguyễn Việt Hùng, Nguyễn Quốc Huy (2012b). Lựa chọn hình thức đoạn chuyển tiếp từ dốc nước xuống bể tiêu năng cho công trình tràn xả lũ Earok tỉnh Đắk Lắk, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, số 11, tr. 49-54.
15. Lưu Như Phú, Nguyễn Thu Hương, Nguyễn Đình Bảo và Nguyễn Thị Hồng Vân (1989), Kết quả thí nghiệm xói nền đá sau đập Thạch Nham, *Tuyển tập công trình nghiên cứu khoa học*, Viện Nghiên cứu khoa học Thủy lợi, Hà Nội, tr. 75.
16. Lưu Như Phú (1986), *Các chế độ thủy lực nối tiếp sau cống có bậc hạ thấp*, Luận án PTS KHKT, Hà Nội.

17. Hoàng Văn Quý (1979), *Tính thủy lực tường tiêu năng trong điều kiện lòng dẫn mở rộng dần*, Luận án PTS KHKT, Hà Nội.
18. Phạm Ngọc Quý (2003a), *Mô hình toán và mô hình vật lý công trình thủy lợi*, Bài giảng dùng cho cao học, Đại học Thủy lợi, Hà Nội.
19. Phạm Ngọc Quý (2003b), *Nối tiếp và tiêu năng hạ lưu công trình tháo nước*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
20. Bùi Thế Tâm (2007), *Giải các bài toán tối ưu và thống kê trên Microsoft Excel*, Nhà xuất bản Giao thông vận tải, Hà Nội.
21. Ngô Văn Thứ, Nguyễn Mạnh Thế (2015), *Giáo trình Thống kê Thực hành (với sự trợ giúp của SPSS và Stata)*, Nhà xuất bản Đại học Kinh tế Quốc dân, Hà Nội.
22. Trần Quốc Thường và nnk (2009), *Báo cáo mô hình thủy điện Khe Bó tỉnh Nghệ An*, Hà Nội.
23. Nguyễn Văn Tuấn (2014), *Phân tích dữ liệu với R*, Nhà xuất bản Tổng hợp Thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh.
24. Nguyễn Minh Tuyển (2005), *Quy hoạch thực nghiệm*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
25. Hoàng Trọng, Chu Nguyễn Mộng Ngọc (2008), *Phân tích dữ liệu nghiên cứu với SPSS tập 1, 2*, Nhà xuất bản Hồng Đức, Thành phố Hồ Chí Minh.
26. Trần Quang Trung (2012), *Phân tích và xử lý số liệu bằng SPSS*, Nhà xuất bản Đại học kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh.
27. Trương Văn Tú (2006), *Xác xuất thống kê và các tính toán trong Excel*, Nhà xuất bản Đại học Kinh tế Quốc dân, Hà Nội.
28. Nguyễn Cao Văn, Trần Thái Ninh, Ngô Văn Thứ (2015), *Giáo trình Lý thuyết Xác suất và Thống kê toán*, Nhà xuất bản Đại học Kinh tế Quốc dân, Hà Nội.
29. Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 8214 (2009), *Thí nghiệm mô hình thủy lực công trình thủy lợi, thủy điện*, Hà Nội.
30. Flow Science, Inc (2012), FLOW-3D Documentation, Release 10.1.0
31. Hager, W.H. and Sinniger, R.St. (1985), Flow Characteristics in a Stilling Basin With an Abrupt Bottom Rise, *J. Hydraulic Research* 23 (2) : 101-113. Discussion 1986, 24 (3) : 207-215.
32. Hager, W.H. (1989), Hydraulic Jump in U-Shaped Channel, Proc. ASCE, *J. Hydraulic Engineering* 115 (5) : 667-675.
33. Hager, W.H., Bremen, R. and Kawagoshi, N.St. (1990), Classical Hydraulic Jump: Length of Roller, *J. Hydraulic Research* 28 (5) : 591-608.
34. Hager, W.H. (1992), *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*, Water Science and Technology Library.
35. Long, D., Steffler, P.M. and Rajaratnam, N. (1990), LDA Study of Flow Structure in Submerged Hydraulic Jump, *J. Hydraulic Research* 28 (4) : 437- 460.

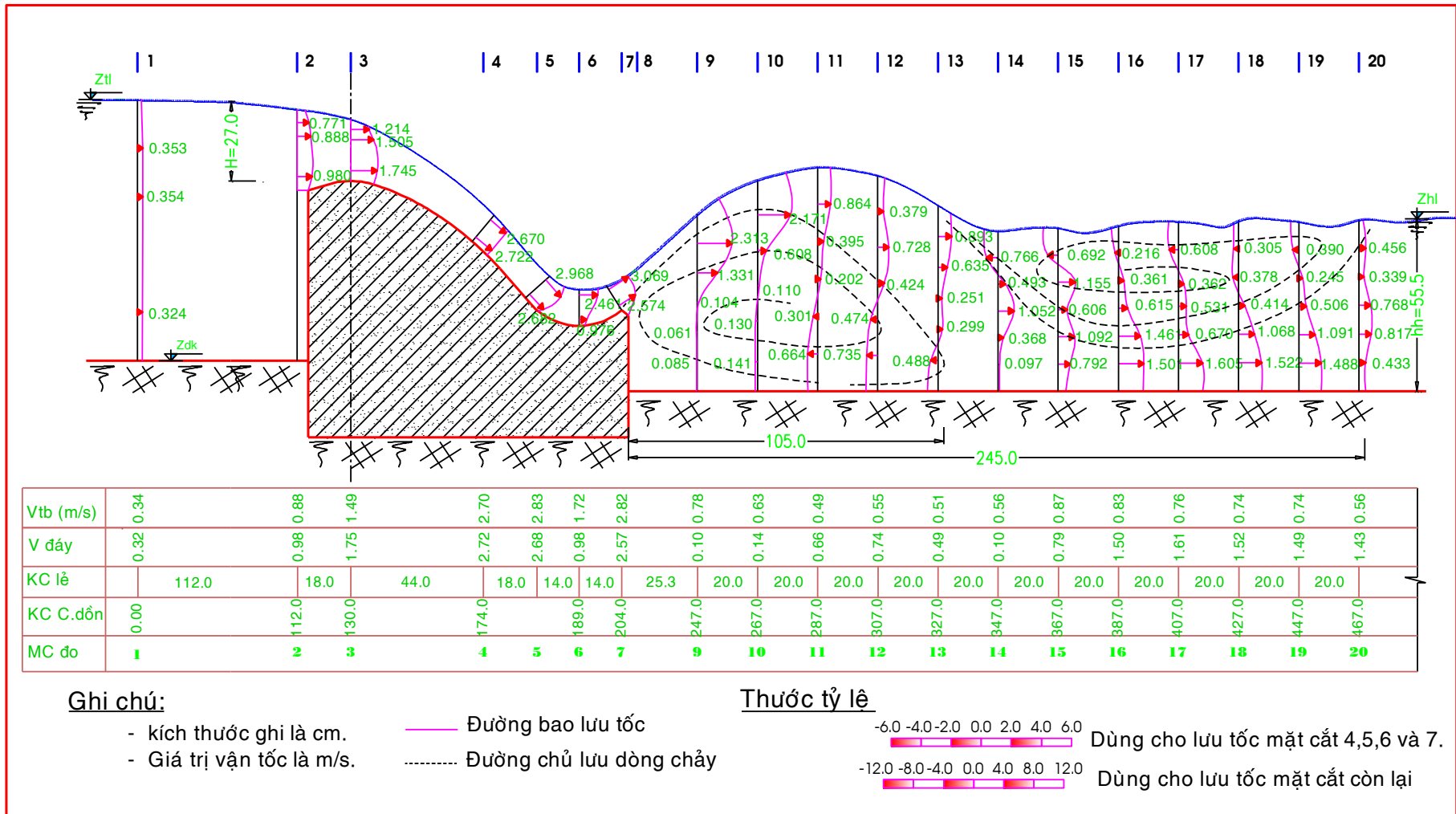
36. Mikhalev, M.A. and Hoang, T.A. (1976), Kinematic Characteristics of a Hydraulic Jump on a Sloping Apron, *Hydrotechnical Constructions* 7 (12) : 686- 690.
37. Pavlov, B.A. (1987), Length of a Direct Hydraulic Jump, *Hydraulic Construction* 21 (4) : 198.
38. Peterka, A.J. (1958), *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*, US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph, 25: Denver, Col. (Appeared also as 7th Printing in 1983).
39. Rajan, B.H. & Shivashanka Rao, K.N. (1980), Design of Solid Roller Buckets, *J. Irrigation and Power* 37 (4) : 435-444.
40. Rajan, B.H., Shivashanka Rao, K.N., Gowda, G & Raghavendra, V.J. (1982), An Experimental Study of the Shapes of Spillway Buckets, *J. Irrigation and Power* 39 (1) : 75-83.
41. Rajaratnam, N. (1967), Hydraulic Jumps, *Advances in Hydrosience* 4: 197- 280, ed, V.T.Chow, *Academic Press*, New York.
42. Sun J. H, J. Kuang and C.T. Hsu (2003), Laser measurements on flapping motion of vertical plan jet;
43. Wu S. and Rajaratnam N. (1995), "Free jumps, submerger jumps and wall jets", *Journal of Hydraulic research*, Vol.33(2), pp. 197-212.
44. Hydraulic Model Practive (1985), Institute of Water conservancy and Hydroelectric Power Research Nanjing Hydraulic Research Institute, China water Resources and Electric Power Press, Printed by Printing House of China Water Resources and Electric Power Press, Beijing.
45. Астафичева Т.Н (1952), Экспериментальное исследование поверхностного режима при сопряжении бьефов: Автореф. дис. на соискание з^еной степени канд. техн. наук. -Л.-12 с.
46. Астафичева Т.Н (1954), К расчету сопряжения бьефов за водосливными плотинами с уступом, *Гидротехническое строительство*, -№4, -С.37-40.
47. Беляшевский Н.Н. (1973), Пивоваров Н.Г., Калантыренко И.И., *Расчеты нижнего бьефа за водосливными сооружениями на нескольких основаниях*. - Киев: Наукова думка.
48. Васильев О.Ф. (1966), Букреев В.И. Некоторые результаты исследований пульсации давления в гидравлическом прыжке, *Труды Гидропроекта*. -М., Сб. 13. - С, 172-176.
49. Ивойлов А.А. (1981), Исследование пульсации давления на открытых турбулентных потоках в водосбросных гидросооружениях, *Гидротехническое строительство*.- М., -№11.-С.23-25.
50. Исаев А.А. (1982), Исследование статических характеристик редких выбросов гидродинамической нагрузки на плиты водобоев, *Материалы конференции и совещаний по гидротехнике: Повышение надежности энергетических:*

сооружений при динамических воздействиях/ ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Л.: Энергоатомиздат, -С.63-66.

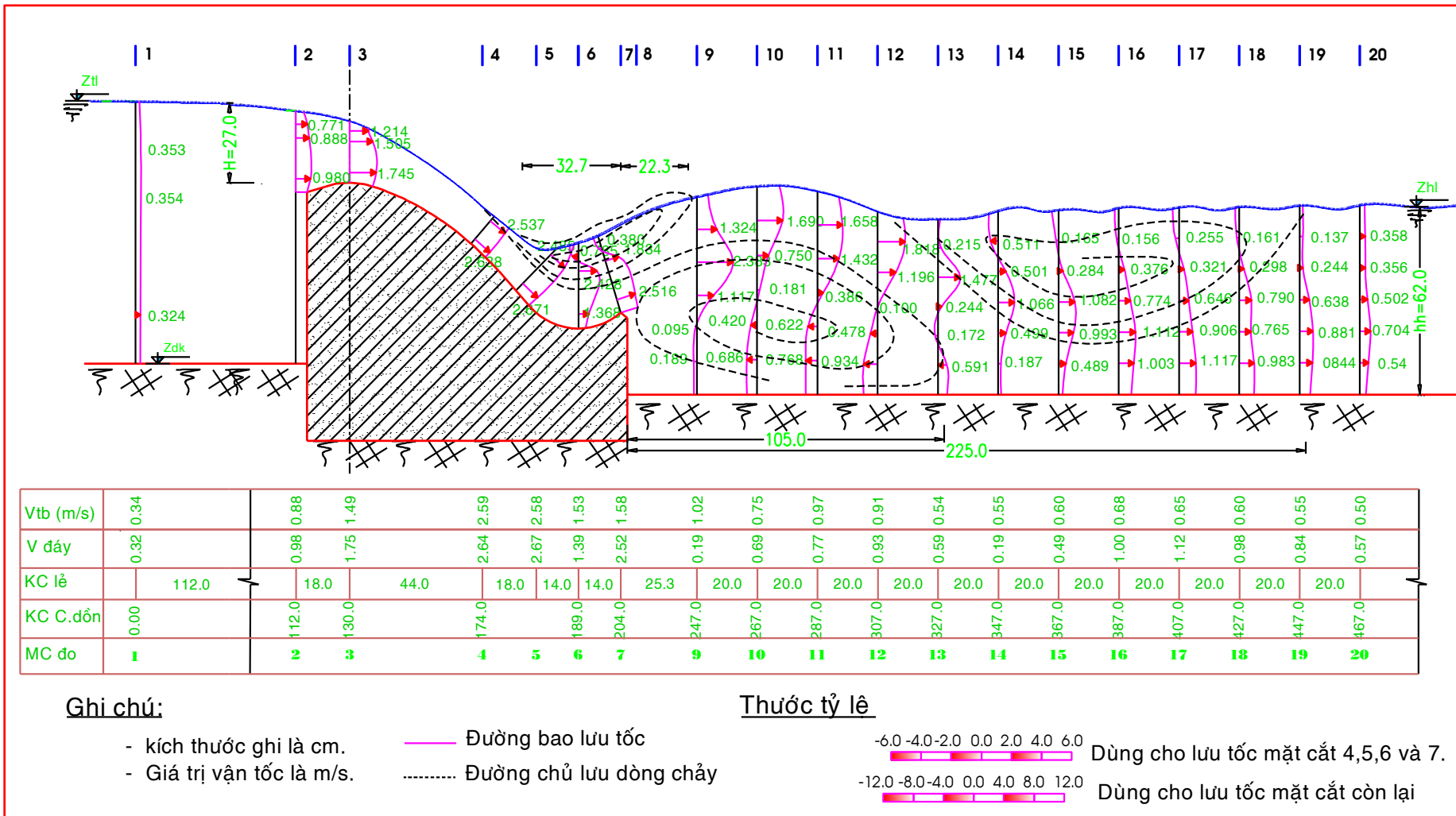
51. Иванов, В.М. (2004), Совершенствование теории и методов расчета гидродинамических воздействий за водосбросными сооружениями при поверхностном режиме сопряжения бьефов, *Ползуновский вестник № 4*, С.186-200.
52. Иванов, В.М. & Иванова, Т.Ю. (2015). Совершенствование методов расчета гидродинамических воздействий за водосбросными сооружениями при донном режиме сопряжения бьефов, *Вестник СГАСУ. Градостроительство и Архитектура- № 3 (20)*, С.64 -72.
53. Каверин, А.А. (1985). Универсальная модель для изучения течения за уступом, *Информ.листок ЛенЦНТИ № 1026-85*, Ленинград, С. 1 -2.
54. Каверин, А.А. (2011). К вопросу о гидродинамическом гистерезисе, Научная сессия ГУАП, Сборник докладов, *Санкт-Петербург*, Часть 1, С. 121 -122.
55. Каверин, А.А. (2012). Уравнение движения струи идеальной жидкости со свободной поверхностью за уступом, *Приволжский научный журнал, № 3*, С. 42-48.
56. Каверин, А.А. (2013). Экспериментальное исследование поверхностного режима течения при малых высотах уступа/ Автореферат дис... кандидата технических наук - Специальность: Гидравлика и инженерная гидрология, *Санкт-Петербург*, 16 с.
57. Каверин, А.А. (2013). Результаты экспериментальных исследований границ смены режимов течения за уступом, *Инженерно-строительный журнал, № 2*. С. 62-66.
58. Кумин Д.И. (1948), *Сопряжение бьефов при поверхностном режиме*, -М.-Л.: Гос. Энергетическое изд.
59. Кузьмин С.А. & Иванов В.М. (1982), Исследование нагрузок на крепление русла за водосливными плотинами с уступом, *Гидравлика сооружений в деформируемых руслах и охрана среды /Труды ЛПИ, -№383. -С.15-22.*
60. Кудрявцев Е.П. (1967), Пульсация в нижнем бьефе ГЭС совмещенного типа с горизонтальными агрегатами: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Киев, - 24с.
61. Леви И.И. (1955), *Движение речных потоков в нижних бьефах гидротехнических сооружений*. - М.-Л., Гос. Энергетическое изд.
62. Мошков Л.В. (1982), Влияние дренирования на гидродинамические нагрузки, действующие на плыгныс крепления, *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. - Л. , - Т.154.-С.17-21.*
63. Михалев М.А. (1971), *Гидравлический расчет потоков с водоворотом*, - Л.: Энергия.
64. Преображенский Н.А. (1954), Пульсация давления за гасителями энергии в нижнем бьефе гидросооружений , *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. - Л. , Т.52. С.66-78.*

65. Розовский И.Л. (1952), О расчете сопряжения бьефов для плотин с вертикальным уступом (носком), *Гидротехническое строительство*. -М., -№2. -С.32-34.
66. Складнев М.Ф. (1956), О длине водоворотного участка поверхностного и поверхностно-донного гидравлических прыжков, *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. -Л., -С. 176-187.
67. Слиский СМ. (1952), Расчет сопряжения бьефов при поверхностных режимах при истечении из-под щита, *Гидротехническое строительство*. -М., №4. -С.44-45.
68. Фомичев М.С. (1959), Исследование кинематических и динамических характеристик потока на участке сопряжения бьефов, *Сб. статей. «Гидравлика сооружений и динамика ручных русел»*. - М.: Изд. АН СССР, -С.62-79.
69. Халтурина Н.В. (1966), Гинтовт НИ. Гидродинамические нагрузки на водобой совмещенной ГЭС при поверхностном режиме, *Труды координационных совещаний по гидротехнике / ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*, -Вып.28. -С.48-57.
70. Хапаева А.К. (1982), Гидродинамическое воздействие потока на крепление в нижнем бьефе, *Гидравлика сооружений в деформируемых руслах и охрана среды / Труды ЛПИ*. -Л., -№383. -С.23-28.
71. Чертоусов М.Д. (1952), О расчете сопряжения бьефов для плотин вертикальным уступом (носком), *Гидротехническое строительство*. -М., -№4. -С.45.
72. Шрагин Н.В. (1965), Сопряжение бьефов за совмещенными ГЭС в пространственных условиях, *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. -Л., -Т.77. -С.205-214.
73. Юдицкий Г.А. (1968), *Динамическое воздействие потока на укрепленное и неукрепленное русло нижнего бьефа водосливных плотин*, Автореф. дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук.

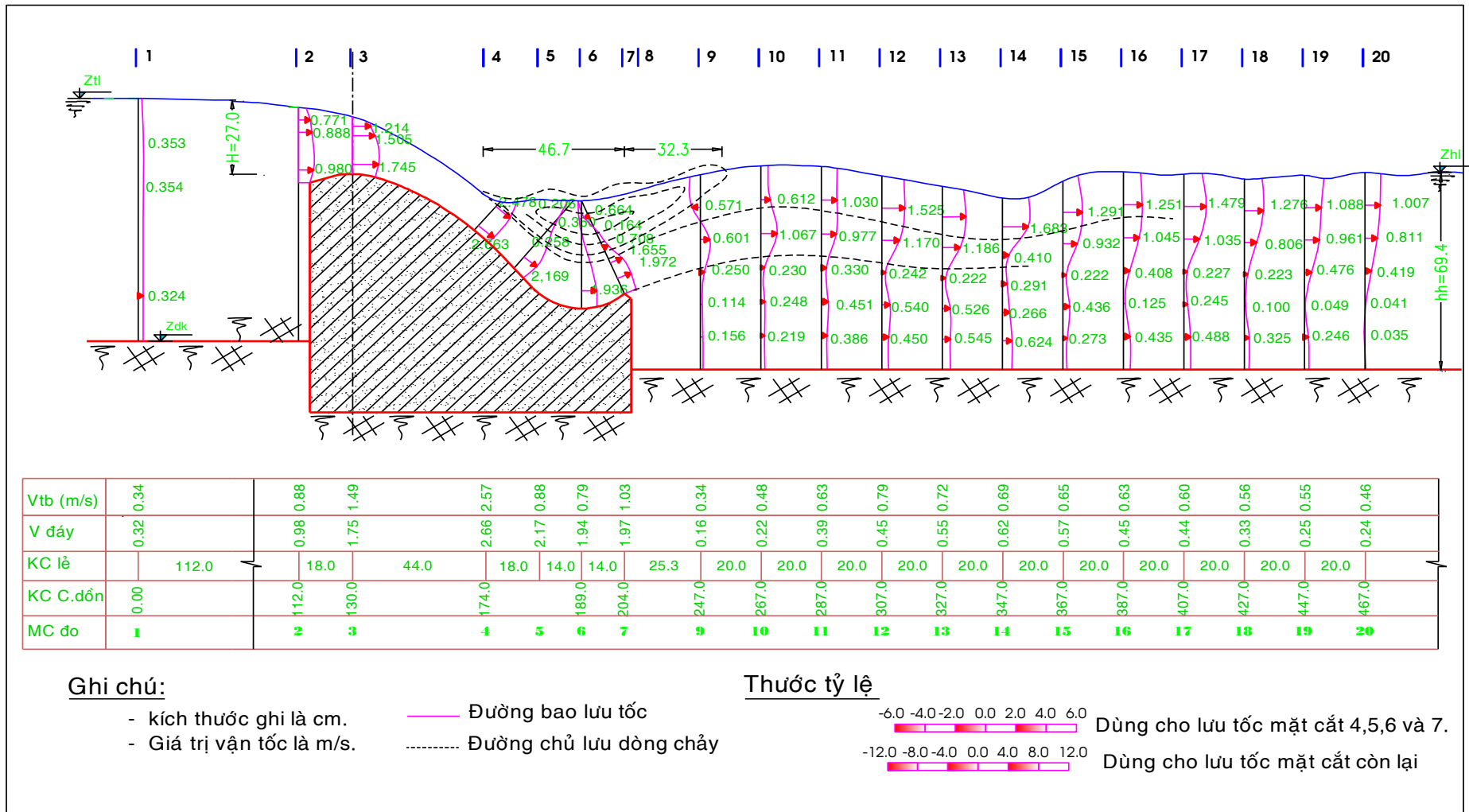
PHỤ LỤC



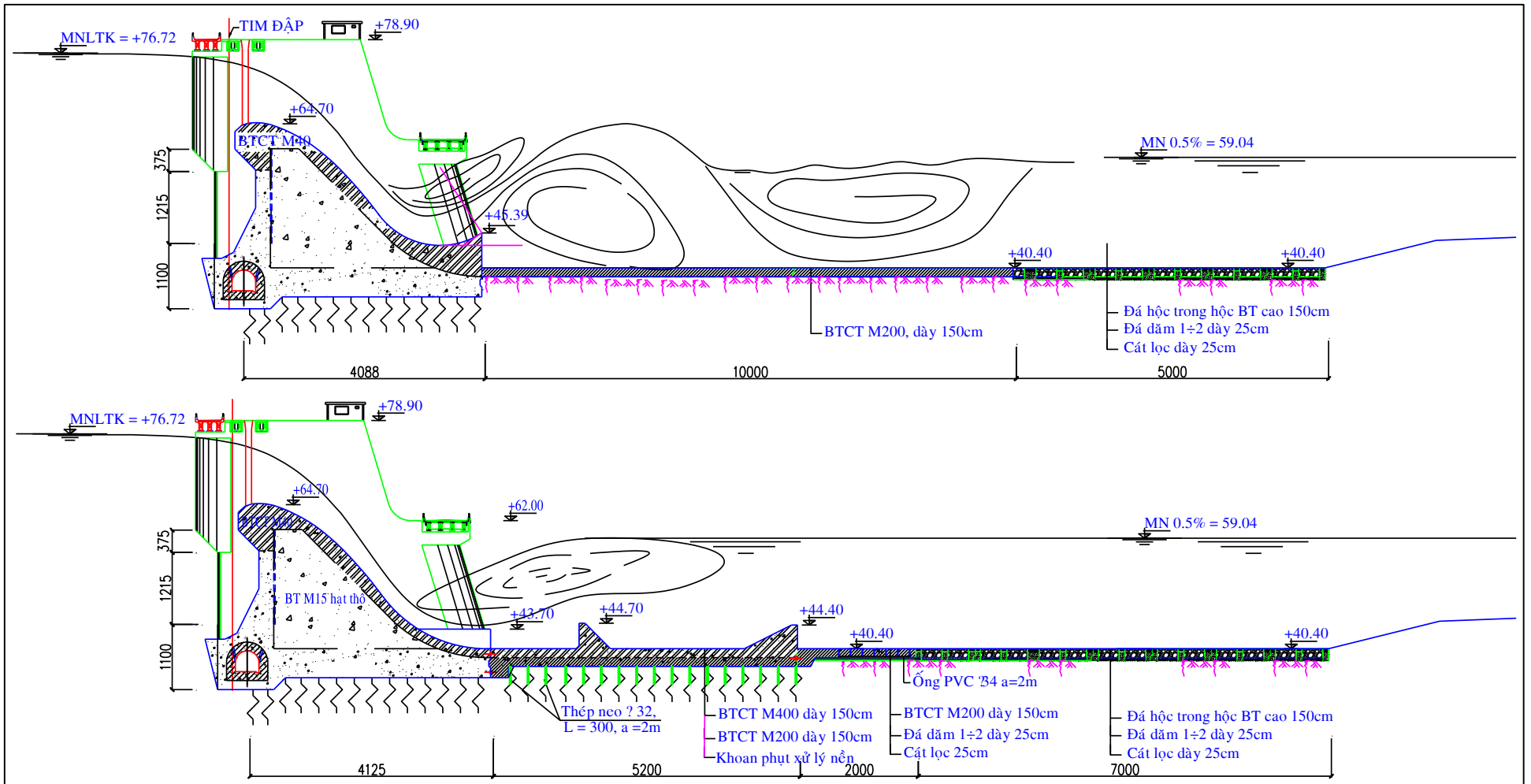
Hình PL 3.1. Phân bố lưu tốc trạng thái giới hạn dưới, góc hắt 40° , $a/P=0,39$, $q=0,18\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$



Hình PL 3.2. Phân bố lưu tốc dòng chảy đều, góc hắt 40° , $a/P=0,39$, $q=0,18m^3/s/m$



Hình PL 3.3. Phân bố lưu tốc trạng thái giới hạn trên, góc hắt 40° , $a/P=0,39$, $q=0,18\text{m}^3/\text{s/m}$



Hình PL 4.1. Kết cấu tiêu năng sau tràn Bản Mỏng phương án tiêu năng dòng chảy phổ và tiêu năng đáy