

Водоснабжение и строительные системы охраны водных ресурсов

Научная статья

УДК 628.113, 532.532

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-2/81-89>

В.А. Шаланин, А.А. Агарин

ШАЛАНИН ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ – старший преподаватель

Инженерно-строительного отделения Политехнического института, член-корреспондент

МАНЭБ, vic_stro_@mail.ru

Дальневосточный федеральный университет

АГАРИН АНТОН АЛЕКСАНДРОВИЧ – техник, anton_agarin@mail.ru

ООО «Проектно-диагностическая компания»

Владивосток, Россия

**Движение воды в верхнем бьефе
при наличии входного восходящего потока**

Аннотация. Проведена параметризация процесса движения потока жидкости в верхнем бьефе водослива, расположенного в канале с восходящим подходом воды. Получено параметрическое уравнение в безразмерной форме, содержащее основные критерии подобия, необходимые для моделирования задачи. Анализ позволил значительно сократить набор переменных, и предварительное компьютерное моделирование в программном комплексе ANSYS показало, что наиболее значимыми критериями являются геометрическое и кинематическое подобия. Последнее заключается в равенстве отношения скорости входа потока в канал к средней скорости потока в канале на натуре и на модели

Ключевые слова: гидравлика, водослив, ANSYS, FLUENT, теория подобия, π -теорема

Для цитирования: Шаланин В.А., Агарин А.А. Движение воды в верхнем бьефе при наличии входного восходящего потока // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 2(51). С. 81–89.

Введение

В практике строительства водозаборных гидроузлов широко распространены водопропускные сооружения, основанные на работе водосливов. Известен широкий пласт исследований, посвящённых изучению потоков на порогах водосливов, сопряжению бьефов, влиянию на конструктивные элементы. Намного меньше внимания уделено процессам движения потока в верхнем бьефе.

При проведении лабораторных экспериментов и компьютерного моделирования работы водосливов ключевую роль играет выбор геометрических параметров модели. Одним из наиболее важных параметров является расстояние от точки подвода воды в канал экспериментальной установки до исследуемого водослива. Практически все лабораторные установки для исследования проблем гидравлики открытых потоков оборудуются входными узлами с восходящим движением потока, проходящего через противотурбулизационные сетки [5, 4]. В отличие от установок с верхней подачей воды [2] в каналах с сетками образуются волновые явления, затрудняющие проведение измерений и вносящие дополнительные ошибки в опыты, или же требуются дополнительные устройства для равномерного распределения потока [1]. При входе потока в канал образуется циркуляционная зона, которая может оказать влияние на результаты эксперимента. Для уменьшения этого влияния необходим участок канала, в котором происходит стабилизация потока. Длина этого участка значительно увеличивает габариты

исследовательской установки в ходе лабораторных экспериментов, а вместе с тем увеличиваются стоимость оборудования, размеры помещения и нагрузка на несущие конструкции здания лаборатории. Чрезмерное увеличение длины подводящего канала в компьютерном моделировании ведет к увеличению числа ячеек расчетной сетки, а следовательно, к значительному уменьшению скорости решения задачи, особенно при моделировании трехмерных объектов. Для решения задачи определения оптимальной длины подводящего участка канала при входном восходящем потоке воды необходим комплексный подход, учитывающий максимально возможное количество факторов. Правильный выбор и выявление наиболее важных из них возможны только при проведении параметризации задачи и выполнении предварительных экспериментов.

Параметризация задачи

Параметризация гидравлической задачи проводится для анализа всех возможных факторов, влияющих на характеристики потока. Применение теории размерностей позволяет также свести размерные величины к безразмерным комплексам и симплексам. Это позволяет уменьшить число переменных, рассматриваемых в задаче, а также экстраполировать уже полученные данные к расчету аналогичных сооружений. Рассмотрение двухмерной задачи движения потока в канале на подходе к водосливу (рис. 1) приводит к следующей системе определяющих параметров:

$$f(l_k; H_{вб}; V; V_k; \mu; \rho; l; g; \sigma; B), \quad (1)$$

где l_k – длина канала в верхнем бьефе, $H_{вб}$ – глубина потока в верхнем бьефе, V – средняя скорость восходящего потока, V_k – средняя скорость потока в верхнем бьефе водослива, μ – коэффициент кинематической вязкости, ρ – плотность, l – длина порога водослива, g – ускорение свободного падения, σ – коэффициент поверхностного натяжения, B – ширина подводящего канала (диаметр трубопровода).

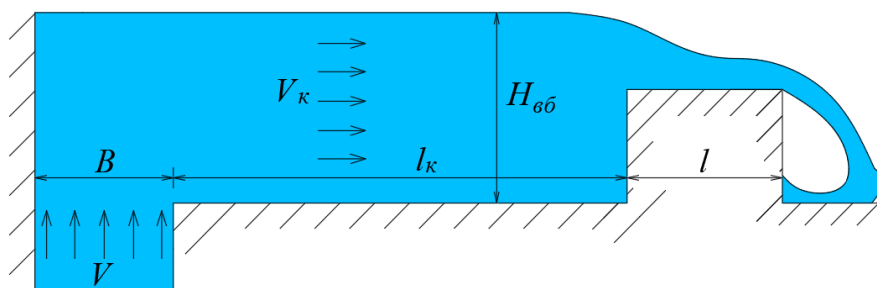


Рис. 1. Расчетная схема водослива

Для формирования основных безразмерных величин, обеспечивающих гидравлическое подобие, в задаче применена П-теорема. Она утверждает, что если имеется зависимость между n физическими величинами, не меняющая своего вида при изменении масштабов единиц в некотором классе систем единиц, то она эквивалентна зависимости между меньшим числом $p = n - k$ безразмерных величин, где k – наибольшее число величин с независимыми размерностями среди исходных n величин. П-теорема устанавливает общую структуру зависимости, вытекающую из требования инвариантности физической зависимости при изменении масштабов единиц, даже если конкретный вид зависимости между исходными величинами не известен [3]. В качестве основных определяющих параметров выбраны $\Pi_0 = H_{вб} \mu V$. Тогда остальные Π_i члены безразмерного параметрического уравнения будут определяться добавлением оставшихся членов параметрического уравнения (1). Результаты расчетов и итоговые уравнения сведены в табл. 1, где L – размерность длины, M – размерность массы, T – размерность времени.

Полученные в результате расчетов безразмерные критерии подобия образуют критериальное уравнение:

$$f(l/H_{вб}; l_k/H_{вб}; B/H_{вб}; V/V_k; V_k^2/Hg; HV_k/\nu; \sigma/\mu V_k). \quad (2)$$

Таблица 1

Результаты расчетов безразмерных параметров при использовании П-теоремы

П-член уравнения	Уравнение Π_i	Уравнение в размерной форме	Итоговой критерий подобия
Π_0	$(H_{\text{вб}})^x (\mu)^y (V_{\text{к}})^z$	$(L^1)^x (L^{-1} M^1 T^{-1})^y (L^1 T^{-1})^z$	
Π_1	$(H_{\text{вб}})^x (\mu)^y (V_{\text{к}})^z (l)^1$	$(L^1)^x (L^{-1} M^1 T^{-1})^y (L^1 T^{-1})^z (L^1)^1$	$l/H_{\text{вб}}$
Π_2	$(H_{\text{вб}})^x (\mu)^y (V_{\text{к}})^z (l_{\text{к}})^1$	$(L^1)^x (L^{-1} M^1 T^{-1})^y (L^1 T^{-1})^z (L^1)^1$	$l_{\text{к}}/H_{\text{вб}}$
Π_3	$(H_{\text{вб}})^x (\mu)^y (V_{\text{к}})^z (B)^1$	$(L^1)^x (L^{-1} M^1 T^{-1})^y (L^1 T^{-1})^z (L^1)^1$	$B/H_{\text{вб}}$
Π_4	$(H_{\text{вб}})^x (\mu)^y (V_{\text{к}})^z (V_{\text{к}})^1$	$(L^1)^x (L^{-1} M^1 T^{-1})^y (L^1 T^{-1})^z (L^1 T^{-1})^1$	$V/V_{\text{к}}$
Π_5	$(H_{\text{вб}})^x (\mu)^y (V_{\text{к}})^z (g)^1$	$(L^1)^x (L^{-1} M^1 T^{-1})^y (L^1 T^{-1})^z (L^1 T^{-2})^1$	$V_{\text{к}}^2/Hg$
Π_6	$(H_{\text{вб}})^x (\mu)^y (V_{\text{к}})^z (\rho)^1$	$(L^1)^x (L^{-1} M^1 T^{-1})^y (L^1 T^{-1})^z (L^{-3} M^1)^1$	$HV_{\text{к}}/\nu$
Π_7	$(H_{\text{вб}})^x (\mu)^y (V_{\text{к}})^z (\sigma)^1$	$(L^1)^x (L^{-1} M^1 T^{-1})^y (L^1 T^{-1})^z (M^1 T^{-2})^1$	$\sigma/\mu V_{\text{к}}$

В уравнении (2) безразмерные симплексы $l/H_{\text{вб}}$; $l_{\text{к}}/H_{\text{вб}}$; $B/H_{\text{вб}}$ представляют собой критерии геометрического подобия задачи. Симплекс $V/V_{\text{к}}$ отвечает за соблюдение кинематического подобия. Оставшиеся 3 комплекса представляют собой:

- $V_{\text{к}}^2/Hg = \text{Пк}$; Fr – параметр кинетичности, или число Фруда;
- $HV_{\text{к}}/\nu = Re$ – число Рейнольдса;
- $\sigma/\mu V_{\text{к}} = Ca$ – число капиллярности.

Представленный набор членов уравнения (2) можно сократить. Симплексы $B/H_{\text{вб}}$ и $V/V_{\text{к}}$ являются взаимозаменяемыми, так как размеры подводящего трубопровода, или шахты B , определяют величину скорости восходящего потока V . Вследствие этого достаточно соблюдения критерия кинематического подобия $V/V_{\text{к}}$, который и будет определять условия входа потока в подводящий канал. Число Рейнольдса определяет отношение сил инерции потока к силам вязкого трения и удобно для исследования потерь напора в потоке. Короткие подводящие участки каналов сооружений зачастую имеют достаточно малые потери на трение в сравнении с потерями в сооружениях, и ими допустимо пренебречь. Число Фруда определяет отношение сил инерции потока к силе тяжести, в основном используется для определения состояния потока. В подводящих руслах водосливов поток всегда находится в докритическом состоянии, а также движение жидкости в канале верхнего бьефа происходит от источника к стоку без заметного уклона, следовательно, числом Фруда допустимо пренебречь. Число капиллярности выражает соотношение между вязким трением и поверхностным натяжением. В рассматриваемой задаче свободная поверхность потока является недеформируемой, влияние поверхностных сил незначимо, следовательно, числом капиллярности можно пренебречь.

Принимая во внимание всё вышеперечисленное, итоговое параметрическое уравнение в безразмерной форме имеет вид:

$$f(l/H_{\text{вб}}; l_{\text{к}}/H_{\text{вб}}; V_{\text{к}}/V). \quad (3)$$

Критерий $l/H_{\text{вб}}$ определяет влияние конфигурации водослива, критерий $l_{\text{к}}/H_{\text{вб}}$ – влияние длины подводящего канала, критерий $V/V_{\text{к}}$ – влияние скорости подвода воды.

Компьютерное моделирование

Основная цель компьютерного моделирования – изучение влияния условий входного восходящего потока на гидравлические процессы, протекающие в верхнем бьефе водосливов с тонкой стенкой и широким порогом. В процессе исследования были получены поля скорости в верхнем бьефе от входа потока в канал до входа на водослив, определен коэффициент расхода сооружения, построены профили скорости потока на расстоянии $l_5=5$ м ($l_5/H_{\text{вб}} = 0,83$).

Моделирование проведено при варьировании характеристик потока, указанных в табл. 2: безразмерной длины подводящего канала $l_{\text{к}}/H_{\text{вб}}$, отношения скоростей при подводе воды $V/V_{\text{к}}$

и двух конфигурациях водосливов – с широким порогом и тонкой стенкой. Суммарное число опытов – 16 (табл. 2).

Таблица 2

Матрица эксперимента

№ опыта	Водослив с широким порогом		№ опыта	Водослив с тонкой стенкой	
	$l_k/H_{вб}$	V_k/V		$l_k/H_{вб}$	V_k/V
1	2,5	2,4	9	2,6	2,4
2	3,3	2,4	10	3,4	2,4
3	4,2	2,4	11	4,3	2,4
4	5,0	2,4	12	5,1	2,4
5	2,5	1,2	13	2,6	1,2
6	3,3	1,2	14	3,4	1,2
7	4,2	1,2	15	4,3	1,2
8	5,0	1,2	16	5,2	1,2

Процесс моделирования состоял из построения геометрической модели, формирования расчетной сетки, решения и анализа полученных данных. Геометрические модели водослива и подводящего канала в восходящем входе потока были выполнены в программе ANSYS Design Modeler с характеристиками: длина водослива 5 м, высота 5 м, длина входного участка – 14,4 и 7,2 м (в зависимости от эксперимента), длина подводящего канала менялась в пределах от 15 до 30 м, скорость восходящего потока – 0,1 и 0,2 м/с (в зависимости от эксперимента). Решение выполнено в программе ANSYS Fluent. Основу расчета составляют уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости и уравнение Рейнольдса. Для замыкания уравнений Рейнольдса выбрана модель турбулентности – Realizable. Данная модель соответствует точным математическим ограничениям по напряжениям Рейнольдса, используются улучшенная формула для определения турбулентной вязкости и уравнение диссипации, основанное на динамическом уравнении среднеквадратичных колебаний завихренности. Для моделирования свободной поверхности потока применен численный метод отслеживания объема жидкости в ячейке VOF (volume of fluid). Данный метод позволяет рассматривать физическую задачу как систему из двух несмешивающихся несжимаемых вязких сред [6]. Визуализация и анализ результатов моделирования произведены в программе CFD-Post

Результаты экспериментов

Результаты измерения коэффициента пропускной способности при изменении гидравлических условий, рассматриваемых в табл. 2, в подводящем канале показали максимальное расхождение 1,3%. В абсолютных цифрах – 0,329÷0,333 для водослива с широким порогом и 0,434÷0,439 для водослива с тонкой стенкой. Данный факт показывает, что условия в верхнем бьефе влияют на работу сооружений и требуют подробного рассмотрения и изучения при проектировании не только водопропускных сооружений, но и гидравлических лотков для проведения исследований.

Для оценки влияния условий входа потока в канал на движение жидкости в верхнем бьефе были исследованы профили скорости на расстоянии 5 м от входной грани водослива или $l_5/H_{вб} = 0,84$, $l_5/H = 5 \div 6$ в безразмерной форме. Результаты исследований представлены на рисунках 2 и 3, где h – отметка точки в потоке жидкости, v_i – скорость потока в точке жидкости.

На основании данных рисунков 2 и 3 были построены графики отношения максимальной скорости потока (V_{max}) к средней скорости движения воды в верхнем бьефе (рис. 4). Представленный график иллюстрирует степень неравномерности движения жидкости в потоке. Согласно этим данным, изменение скорости потока на входе в канал привело к росту неравномерности распределения скоростей до 10%; увеличение длины подводного канала постепенно нивелирует эти различия.

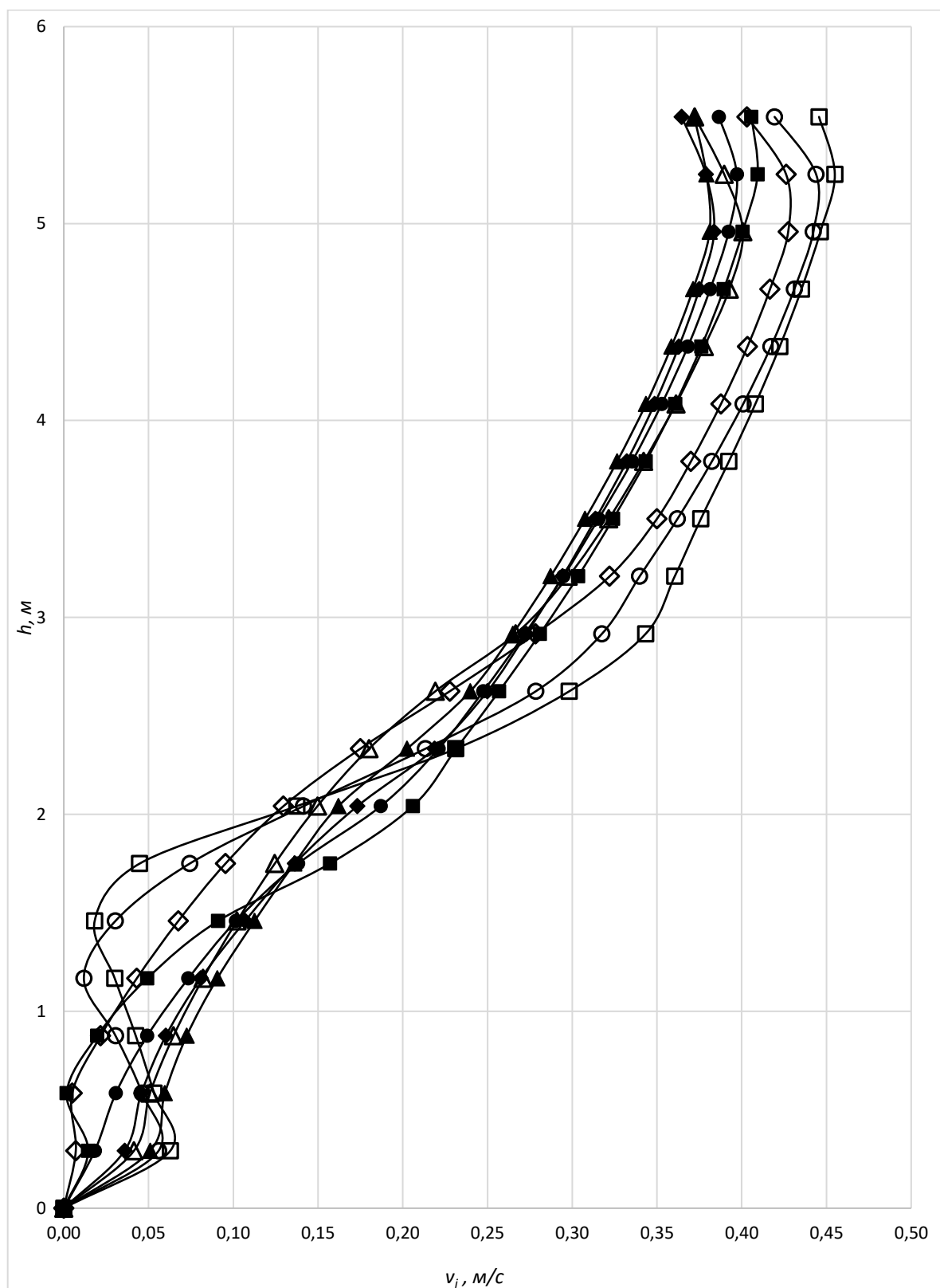


Рис. 2. Профили скорости потока воды в верхнем бьефе водослива с широким порогом полученные в ходе компьютерного моделирования. Данные экспериментов:
 ■ – № 1, ● – № 2, ◆ – № 3, ▲ – № 4, □ – № 5, ○ – № 6, ◇ – № 7, △ – № 8

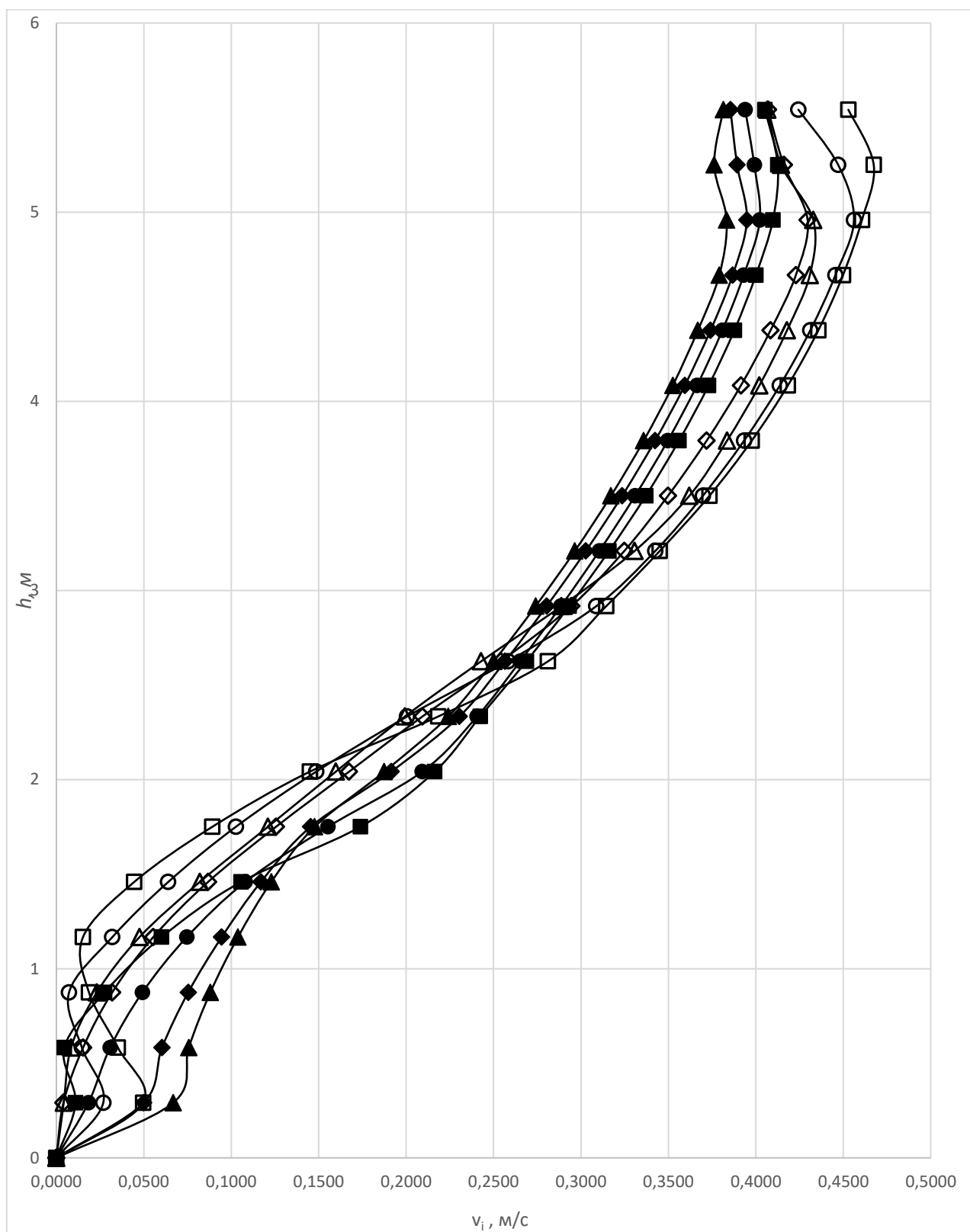


Рис. 3. Профили скорости потока воды в верхнем бьефе водослива с тонкой стенкой, полученные в ходе компьютерного моделирования. Данные экспериментов:
 ■ – № 9, ● – № 10, ◆ – № 11, ▲ – № 12, □ – № 13, ○ – № 14, ◇ – № 15, △ – № 16

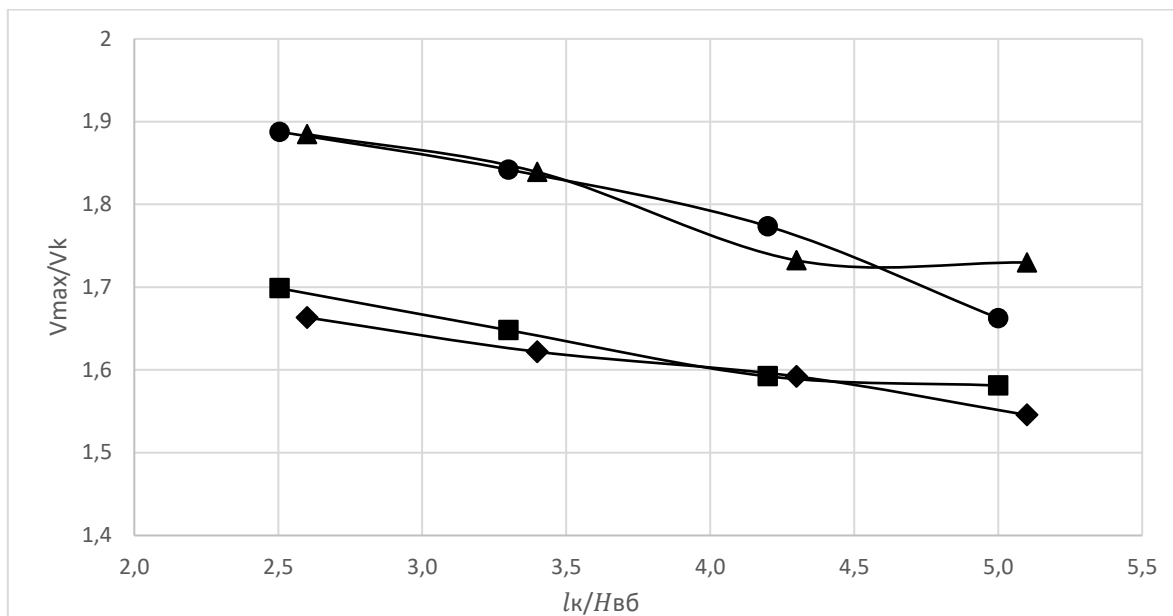


Рис. 4. Максимальная относительная скорость потока для различных экспериментов.

Данные экспериментов:

■ – № 1-4, ● – № 5-8, ◆ – № 9-12, ▲ – № 13-16

Вывод

Проведена параметризация задачи движения потока жидкости в верхнем бьефе с выявлением факторов, наибольшим образом влияющих на движение жидкости в канале верхнего бьефа при вертикальной подаче жидкости в канал. Моделирование и анализ данных пропускной способности и профилей скорости перед водосливом показали, что ключевыми факторами, влияющими на поток, признаны относительное расстояние между вводом воды в канал и водосливом к глубине потока в верхнем бьефе, а также соотношение скоростей в верхнем бьефе и восходящего потока.

Эксперименты в диапазоне значений $\frac{l_k}{H_{вб}} = 2,5 \div 5,2$ и $V_k/V = 1,2 \div 2,4$ позволили сделать следующие выводы.

1. При малой длине входного канала и высокой входной скорости наблюдается образование циркуляционных зон в канале верхнего бьефа.
2. Вид водослива не оказывает столь сильного влияния на картину потока в верхнем бьефе, как длина подводящего канала и скорость подвода воды.
3. Проектирование экспериментальных установок для исследования гидравлических характеристик сооружений следует производить с учетом влияния условий входа потока.

Необходимы дальнейшие эксперименты для получения эмпирической зависимости, описывающей влияние условий входа потока в канал на равномерность профиля скорости и пропускную способность сооружения.

Вклад авторов: Шаланин В.А. – проведение параметризации задачи и компьютерного моделирования; Агарин А.А. – планирование эксперимента, анализ экспериментальных данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Косиченко Ю.М., Михайлов Е.Д., Баев О.А. Экспериментальные исследования водослива с широким порогом резервного водосброса // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 3(20). С. 73–81. doi: 10.17673/Vestnik.2015.03.10

2. Кузнецова Ю.А., Гурин К.Г. Маломасштабное моделирование динамических средств защиты нижних бьефов гидроузлов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 113. С. 525–534. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24925193>
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. Москва: Наука, 1977. 440 с.
4. Ткачев А. А. Гидравлические лабораторные исследования лотка быстротока Новотроицкого водохранилища при пропуске расчётного расхода $q = 260 \text{ М}^3/\text{с}$ // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: материалы II международной научно-практической интернет-конференции, Новочеркасск, 21–23 апреля 2021 г. Новочеркасск: Лик, 2021. С. 65–76. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46386538>
5. Хасан М., Кузнецов Е.В. Исследование коэффициента расхода полигонального водослива // Экология речных ландшафтов: сборник статей по материалам III международной научной экологической конференции, Краснодар, 12 декабря 2018 г. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2019. С. 339–344. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41367029>
6. Mu Zhenwei, Zhang Zhiyan, Zhao Tao. Numerical Simulation of 3-D flow field of Spillway based on VOF method. International Conference on Modern Hydraulic Engineering. *Procedia Engineering*. 2012;(28):808–812.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2022. N 2/51

Water Supply, Construction Systems for Waterwww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-2/81-89>

SHalanin V., Agarin A.

VIKTOR A. SHALANIN, Senior Lecturer, Corresponding member of IAELPS, vic_stro_@mail.ru
Far Eastern Federal University

ANTON A. AGARIN, Technician, anton_agarin@mail.ru

ООО «Proektno-dagnosticheskaya kompaniya»

Vladivostok, Russia

Water movement in upstream in the presence of an incoming updraft

Abstract. The article describes the parametrization of fluid flow in the upstream of the weir located in a channel with an incoming updraft. The obtained parametric nondimensional equation contains the basic similarity criteria necessary for modeling the flow. The analysis made it possible to reduce significantly the set of variables, while the preliminary computer simulation in the ANSYS software package showed that the most significant criteria are geometric and kinematic similarity. The latter implies the equality between the ratio of the incoming flow rate to the average flow rate in the channel in nature and in the model.

Keywords: hydraulics, spillway, ANSYS, FLUENT, similarity theory, π -theorem.

For citation: SHalanin V., Agarin A. Water movement in upstream in the presence of an incoming updraft. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2022;(2):81-89. (In Russ.).

Contribution of the authors: Shalanin V.A. – parameterization of the problem and computer modeling; Agarin A.A. – experiment planning, analysis of experimental data.

The authors declare no conflicts of interests.

REFERENCES

1. Kosichenko YU. M., Mihajlov E.D., Baev O.A. Experimental studies of a spillway with a wide reserve spillway waterfall. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arhitektura*. 2015;(3):73–81. doi: 10.17673/Vestnik.2015.03.10

2. Kuznecova YU. A. Small-scale simulation of dynamic hydroelectric downstream protection. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015;(113):525-534. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24925193>
3. Sedov L.I. Methods of similarity and dimension in mechanics. 8-e izd., pererab. Moscow, Nauka, 1977. 440 p.
4. Tkachev A. A., Gurin K.G. Hydraulic laboratory studies of the fast-flow flume of the Novotroitsk reservoir when the calculated flow rate is $q = 260 \text{ M}^3/\text{c}$. *Melioraciya kak drajver modernizacii APK v usloviyah izmeneniya klimata: Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy internet-konferencii, Novocherkassk, 21–23 aprelya 2021. Novocherkassk, Lik, 2021. P. 65-76.* URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46386538>
5. Hasan M., Kuznecov E.V. Investigation of the discharge coefficient of a polygonal weir. *Ekologiya rechnyh landshaftov: Sbornik statej po materialam III Mezhdunarodnoj nauchnoj ekologicheskoy konferencii, Krasnodar, 12 dekabrya 2018. Krasnodar, 2019. P. 339-344.* URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41367029>
6. Mu Zhenwei, Zhang Zhiyan, Zhao Tao. Numerical Simulation of 3-D flow fielt of Spillway based on VOF method. *International Conference on Modern Hydraulic Engineering. Procedia Engineering*. 2012;(28):808–812.