



Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering

Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture

Том 13 Выпуск 7 (118)

Основан в 2005 году,
1-й номер вышел в сентябре 2006 г.
Выходит ежемесячно

Учредители:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26;

Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 19, корп. 1.

Выходит при научно-информационной поддержке Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.

Founded in 2005,
1st issue was published in September, 2006.
Published monthly

Founders:

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavlshoshe, Moscow, Russian Federation, 129337;

Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, build. 1 Yaroslavlshoshe, Moscow, Russian Federation, 129337.

The Journal enjoys the academic and informational support provided by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV).

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.

Включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Индексируется в РИНЦ, Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка»,
UlrichsWeb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus,
RSCI (Russian Science Citation Index на платформе Web of Science)

Главный редактор
акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
Валерий Иванович Теличенко (НИУ МГСУ)

Зам. главного редактора
Евгений Валерьевич Королев,
советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (НИУ МГСУ)
Елена Анатольевна Король,
чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (НИУ МГСУ)

Редакционная коллегия:
И.В. Дуничкин, О.И. Поддаева, А.П. Пустовгар, Д.Н. Силка,
А.З. Тер-Мартirosян (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
Н.В. Баничук (ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия)
А.Т. Беккер (ДВФУ, Владивосток, Россия)
В.В. Беликов (Институт водных проблем РАН, Москва, Россия)
Х.И.Х. Броуэрс (Технический университет Эйнховена,
Нидерланды)
А.И. Бурханов (ВолГТУ, Волгоград, Россия)
Й. Вальравен (Технический университет Дельфта, Дельфт,
Нидерланды)
И. Вичан (Университет Жилина, Жилина, Словакия)
З. Войчицкий (Вроцлавский технологический университет,
Вроцлав, Республика Польша)
В.Г. Гагарин (НИИСФ РААСН, Москва, Россия)
М. Голици (Институт Клокнера Чешского технического
университета в Праге, Прага, Чешская Республика)
Р. Катценбах (Технический университет Дармштадт, Дармштадт,
Федеративная Республика Германия)
П.Я. Паль (Технический университет Берлина, Федеративная
Республика Германия)

Редакционный совет:
А.А. Волков (председатель)
Ю.М. Баженов, Н.Г. Верстина, А.В. Гинзбург, Д.В. Козлов,
И.Г. Лукманова, А.А. Морозенко, Н.С. Никитина, В.А. Орлов,
Н.П. Осмоловский, Е.И. Пупырев, М.Ю. Слесарев,
З.Г. Тер-Мартirosян (НИУ МГСУ, Москва, Россия)
И.А. Бондаренко (НИИТИАГ, ф-л ЦНИИП Минстроя России,
Москва, Россия)
В.Т. Ерофеев (МГУ им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия)
Г.В. Есаулов (МАРХИ, Москва, Россия)
Е.Ю. Куликова (МИСиС, Москва, Россия)
Л.С. Ляхович (ТГАСУ, Томск, Россия)
А.Б. Пономарев (ПНИПУ, Пермь, Россия)
О.Г. Примин (АО «МосводоканалНИИпроект», Москва, Россия)
Н.В. Сироткина (ВГУ, Воронеж, Россия)
С.В. Соболев (ННГАСУ, Н. Новгород, Россия)
Ю.А. Табунщиков (МАРХИ, Москва, Россия)
В.И. Травуш (РААСН, Москва, Россия)
Дж. Харалл (Королевский институт Британских архитекторов,
Кембриджский университет, Соединенное Королевство)
И.Л. Шубин (НИИСФ РААСН, Россия, Москва)

Адрес редакции:
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26.
Тел./факс +7 (499) 188-15-87, (499) 188-29-75,
e-mail: vestnikmgsu@mgsu.ru
Официальный сайт журнала
<http://vestnikmgsu.ru>

Периодическое научное издание
Вестник МГСУ. Том 13 Выпуск 7 (118)
Научно-технический журнал

Координатор журнальных проектов *И.С. Сквородина*
Зав. редакцией *Л.А. Шилова*
Редактор *Т.В. Бердникова, А.В. Сахарова*
Корректор *А.А. Дядичева*
Верстка *А.П. Сильванович*
Перевод на английский язык
Т.В. Бердникова, А.В. Сахарова, А.П. Суворов

Подписан в печать 12.07.2018. Подписан в свет 27.07.2018.
Формат 70x108/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Гарнитура Таймс. Усл.-печ. л. 10,2. Уч.-изд. л. 13,1.
Тираж 200 экз. (1-й з-д 1–100). Цена свободная.
Заказ № 157

Издатель: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет».**

Издательство МИСИ—МГСУ
www.mgsu.ru, ric@mgsu.ru
(495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75.
Отпечатано в типографии Издательства МИСИ—МГСУ,
(499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

Перепечатка или воспроизведение материалов
номера любым способом полностью или по частям
допускается только с письменного разрешения Издателя.
Распространяется по подписке.
Подписка по каталогу агентства «Роспечать».
Подписной индекс 18077 (полугодовая),
36869 (годовая)

© НИУ МГСУ, 2018

Содержание

**Специалисты гидротехнической отрасли обсудили
современные проблемы гидравлики
и гидротехнического строительства 789**

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

С.А. Астафьев, М.В. Коротич
**Формирование методического подхода к разработке
стратегии управления градостроительной деятельностью
малых городов Забайкальского края. 790**

А.Н. Леонова, М.В. Курочка
**Методы повышения энергоэффективности зданий
при реконструкции 805**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.И. Притыкин, К.А. Емельянов
**Определение прогибов балок с ромбовидной
перфорацией стенки 814**

ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ. ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

А.Е. Чурбанов, Ю.А. Шамара
**Влияние технологии
информационного моделирования на развитие
инвестиционно-строительного процесса. 826**

ПРОБЛЕМЫ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

У.Ж. Шалболова, Д.Н. Силка, З.Ж. Кенжегалиева, С.М. Егембердиева
**Сравнительный анализ развития
жилищно-коммунального хозяйства
России и Казахстана 836**

О.Г. Примин, Г.Н. Громов, А.Э. Тен
**Алгоритмы построения и калибровки электронных
моделей системы водоснабжения 847**

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Е.В. Тарарушкин
**Восстановление плотности распределения частиц
дисперсных материалов методом
окна Парзена—Розенблатта 855**

А.С. Иноземцев, Е.В. Королев, Зыонг Тхань Куи
**Анализ существующих технологических решений
3D-печати в строительстве. 863**

В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, Е.Б. Мажитов
**Длительная прочность покрытий на основе
золь-силикатной краски 877**

ГИДРАВЛИКА. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.А. Соловьев, Д.А. Соловьев, Л.А. Шилова
**Радиус сопряжения поверхности водослива практического
профиля с водобоем. 885**

*Требования к составу сопроводительных материалов
и оформлению авторских оригиналов статей 892*

Contents

Experts of hydraulic engineering industry discussed current problems of hydraulics and hydraulic engineering construction 789

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

S.A. Astafyev, M.V. Korotich

Formation of the methodological approach to development of strategy of management of town-planning activity for small towns of Trans-Baikal territory 790

A.N. Leonova, M.V. Kurochka

Methods to improve energy efficiency of buildings during reconstruction. 805

CONSTRUCTION SYSTEM DESIGN AND LAYOUT PLANNING. MECHANICAL EQUIPMENT CHALLENGES IN CONSTRUCTION

A.I. Pritykin, K.A. Emelianov

Determination of deflections of beams with rhombic perforation of the web 814

CONSTRUCTION PROCESS TECHNOLOGY. CONSTRUCTION ECONOMICS, ADMINISTRATION AND MANAGEMENT

A.E. Churbanov, Yu.A. Shamara

The impact of information modeling technology on the development of investment-construction process. 826

CHALLENGES IN HOUSING UTILITIES SECTOR

U.Zh. Shalbolova, D.N. Silka, Z.Zh. Kenzhegaliyeva, S.M. Egemberdiyeva

Comparative analysis of the development of housing and communal services of Russia and Kazakhstan 836

O.G. Primin, G.N. Gromov, A.E. Ten

Algorithms for constructing and calibrating electronic models of water supply system 847

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

E.V. Tararushkin

Reconstructing distribution density of particles for disperse materials by the Parzen-Rozenblatt window method 855

A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev, Duong Thanh Qui

Analysis of existing technological solutions of 3D-printing in construction. 863

V.I. Loganina, S.N. Kislitsyna, E.B. Mazhitov

Long-term strength of coatings based on sol-silicate paint . 877

HYDRAULICS. ENGINEERING HYDROLOGY. HYDRAULIC ENGINEERING

A.A. Solovyev, D.A. Solovyev, L.A. Shilova

Radius of the junction of the spillway surface of practical profile with the water apron. 885

Requirements to the composition of the accompanying materials and the design of original author's articles. 892

Editor-in-chief
Member of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences
(RAACS), DSc, Prof. **V.I. Telichenko**
(MGSU)
Advisor of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences
(RAACS), DSc, Prof. **E.V. Korolev**
Corresponding Member, Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences
(RAACS), DSc, Prof. **E.A. Korol'**
(MGSU)

Editorial board:

I.V. Dunichkin, O.I. Poddaeva, A.P. Pustovgar, D.N. Silka, A.Z. Ter-Martiroyan (MGSU, Moscow, Russian Federation)
N.V. Banichuk (Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow, Russian Federation)
A.T. Bekker (Far Eastern Federal University, FERD RAASN, Vladivostok, Russian Federation)
V.V. Belikov (Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation)
H.J.H. Brouwers (Eindhoven University of Technology, Netherlands)
A.I. Burkhanov (VSTU, Volgograd, Russia)
V.G. Gagarin (NIISF RAASN, Moscow, Russian Federation)
M. Holický (Czech Technical University in Prague, Klokner Institute, Czech Republic)
R. Katzenbach (Technical University of Darmstadt, Germany)
P.J. Pahl (Technical University of Berlin, Germany)
J. Vican (Zilina University, Slovakia)
J.C. Walraven (Delft University of Technology, Netherlands)
Z. Wójcicki (Wrocław University of Technology, Republic of Poland)

Editorial council:

A.A. Volkov (Chairman)
Yu.M. Bazhenov, A.V. Ginzburg, D.V. Kozlov, I.G. Lukmanova, A.A. Morozenko, N.S. Nikitina, V.A. Orlov, N.P. Osmolovskiy, E.I. Pupyrev, M.Y. Slesarev, Z.G. Ter-Martiroyan, N.G. Verstina (MGSU, Moscow, Russian Federation)
I.A. Bondarenko (Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning, branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation)
V.T. Erofeev (Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation)
G.V. Esaulov (Moscow Institute of Architecture (State Academy)), Moscow, Russian Federation)
J. Harall (Royal Institute of British Architects, University of Cambridge, Cambridge)
E.Y. Kulikova (NUST MISIS, Moscow, Russian Federation)
L.S. Lyahovich (TSUAB, Moscow, Russian Federation)
A.B. Ponomarev (Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation)
O.G. Primin (Joint Stock Company «MosvodokanalNIIPROject Institute», Moscow, Russian Federation)
N.V. Sirotkina (VSU, Voronezh, Russian Federation)
S.V. Sobol' (NNSAGU, N. Novgorod, Moscow, Russian Federation)
I.L. Shubin (NIISF RAASN, Moscow, Russian Federation)
Yu.A. Tabunshchikov (Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russian Federation)
V.I. Travush (Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation)

Address:
MGSU, 26, Yaroslavskoye shosse, Moscow,
129337, Russian Federation
Tel./ fax: +7 (499) 188-15-87, (499) 188-29-75,
e-mail: vestnikmgsu@mgsu.ru
online version of the journal
<http://vestnikmgsu.ru/>

Editorial team of issues:
Coordinator of magazine projects *I.S. Skovorodina*
Managing editor *L.A. Shitova*
Editor *T.V. Berdnikova, A.V. Saharova*
Corrector *A.A. Dyadicheva*
Layout *A.P. Silvanovich*
Russian-English translation
T.V. Berdnikova, A.V. Saharova, A.P. Suvorov

Reprint or reproduction of material numbers
by any means in whole or in part is permitted only with
prior written permission of the publisher — MGSU.
Distributed by subscription

ГИДРАВЛИКА. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 556.536.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.885-891

РАДИУС СОПРЯЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОДОСЛИВА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ С ВОДОБОЕМ

А.А. Соловьев¹, Д.А. Соловьев², Л.А. Шилова³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ),
119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 19;

²Институт океанологии им. П.П. Шишова Российской академии наук (ИО РАН),
117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36;

³Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ: одной из основных задач инженера при проектировании гидротехнических сооружений является точный расчет профилей водосливов в открытых потоках. Современные технологии дают возможность получать строительные материалы, которые позволяют реализовать заданные формы поверхности плотинных сооружений. Для повышения надежности элементов строительных конструкций водосливных безвакуумных плотин, возникает необходимость в совершенствовании методов расчета конфигураций сливной поверхности в области ее сопряжения с водобоем.

Предмет исследования: методы расчета конфигураций сливной поверхности в области ее сопряжения с водобоем.

Цели: совершенствование методов расчета конфигураций сливной поверхности в области ее сопряжения с водобоем.

Материалы и методы: предложенная методика основана на возможности уточнения аналитических определений радиуса сопряжения с учетом влияния на интенсивность динамических воздействий потоков на конструкции сопрягающих элементов водосливов потерь полной механической энергии сбросных потоков, обусловленных развиваемыми при этом турбулентными напряжениями с критическими глубинами, соответствующими минимуму энергии.

Результаты: предложен способ уточненного расчета радиуса окружности концевой участка контура безвакуумного водослива практического профиля.

Выводы: предложенный в работе подход может найти применение в гидротехническом строительстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидравлика гидротехнических сооружений, радиус сопряжения, водослив практического профиля, водобой, надежность

Данная работа выполнялась в рамках Госзадания (№ 0149-2018-0001; № АААА-А16-116032810088-8)).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соловьев А.А., Соловьев Д.А., Шилова Л.А. Радиус сопряжения поверхности водослива практического профиля с водобоем // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7 (118). С. 885–891. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.885-891

RADIUS OF THE JUNCTION OF THE SPILLWAY SURFACE OF PRACTICAL PROFILE WITH THE WATER APRON

A.A. Solovyev¹, D.A. Solovyev², L.A. Shilova³

¹Lomonosov Moscow State University (MSU),

Bldg. 19, 1 Leninskie gory st., Moscow, GSP-1, 119991, Russian Federation;

²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (IO RAS),

36 Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russian Federation;

³Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT: one of the main task for engineer during design of hydraulic engineering structures is an accurate calculation of weir profiles in open streams. Modern technologies make it possible to obtain building materials that allow realization of the given shapes of the surface of dam structures. To increase the reliability of building structures elements of spillway vacuum-free dams, there is a need to improve methods of calculating configuration of the drainage surface in the area where it meets the apron.

Subject: methods for calculating configuration of the drainage surface in the area where it connects with the apron.

Research objectives: improvement of methods for calculating configuration of the drainage surface in the area where it meets the apron.

Materials and methods: the method proposed in this article is based on the possibility of refinement of analytical definitions of the conjugation radius with allowance for the influence of the losses of the total mechanical energy of the falling streams

due to the created turbulent stresses with the critical depths corresponding to the minimum energy on the intensity of dynamic effects of the flows onto the structures of spillway's coupling elements.

Results: the method of refined calculation of the circumference radius of the contour end section of vacuum-free weir of practical profile is proposed.

Conclusion: the approach proposed in this research work can be used in hydrotechnical construction.

KEY WORDS: hydraulics of hydraulic structures, radius of conjugation, spillway of practical profile, apron, safety

This research work was carried out within the framework of the State Task (No. 0149-2018-0001; No. AAAA-A16-116032810088-8).

FOR CITATION: Solovyev A.A., Solovyev D.A., Shilova L.A. Radius sopryazheniya poverkhnosti vodosliva prakticheskogo profilya s vodoboem [Radius of the junction of the spillway surface of practical profile with the water apron]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 7 (118), pp. 885–891. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.885-891

ВВЕДЕНИЕ

Водосливные плотины относятся к числу гидротехнических сооружений, используемых с различными конфигурациями поверхностей, обтекаемых потоками на различных участках от верхней оголовочной до нижней концевой части, соприкасающейся с водобоем [1, 8]. Широкое распространение в практике гидротехнического строительства получили безвакуумные водосливы практического профиля, благодаря хорошей пропускной способности и устойчивости к гидравлическим нагрузкам быстроменяющихся потоков за водосбросами [1, 2, 4, 5]. При проектировании таких водосливов значительное число выполненных работ связано с изучением оптимальной для коэффициента расхода конфигурации профиля их сливной поверхности, совпадающей с поверхностью переливающейся струи. В меньшей степени рассматривались вопросы, относящиеся к определению координат сопряжения нижних участков криволинейной конфигурации водосливной поверхности с водобоем [19]. Проектные расчеты радиусов сопряжения профилей, осуществляемые с использованием эмпирических соотношений, содержат неопределенные числовые параметры, ограничения по интервалу граничных значений напоров и высот водосливов и приводят к возникновению погрешностей при определении допустимых динамических воздействий на флютбеты водосливных плотин [3, 8, 11]. В инженерных расчетах наибольшее предпочтение отдается таблицам, составленным по данным наблюдений с присутствием им интерполяционной неопределенностью, которая может приводить к неточным результатам при их использовании. Необходимость располагать аналитическим расчетным соотношением для точного расчета радиуса сопряжения профиля плотины с водобоем — актуальная практическая задача. Наблюдения за водосбросами свидетельствуют о том, что при снижении радиуса следует ожидать роста динамического действия потока на дно вниз по те-

чению. В то же время, с увеличением радиуса возможно возникновение повышенных динамических нагрузок на поверхность водослива из-за увеличения длины сопряженной части профиля. Выбор оптимального значения радиуса может быть выполнен на основе анализа аналитических зависимостей. В настоящей статье предполагается рассмотреть и учесть параметры течения за водосбросом, которые являются критичными при определении оптимальной с точки зрения восприятия гидравлических воздействий радиуса сопряжения с водобоем профиля водослива.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В. Кригером и А. Офицеровым были определены координаты начального участка сливной поверхности безвакуумного водослива практического профиля без учета сопряжения с водобоем [6, 9]. Полученные значения для координат профильной поверхности после экспериментальной проверки сводятся в таблицы для нормированного стандартного статического напора на водосливе [10]. Опыт эксплуатации свидетельствует, что использованные методы расчета и фактические наблюдения не в полной мере отражают гидравлические процессы при истечении через водослив [7, 11, 14, 16]. А необходимость использования в таблицах интерполяции, при ограничениях значений для высот водосливов и статических напоров, приводит к ошибкам в компьютерных расчетах и неоднозначному выбору проектных решений. В частности, это относится к определению радиуса сопряжения сливной поверхности водослива с водобоем. Большая часть предлагаемых аналитических выражений для определения радиуса сопряжения R получена путем эмпирического подбора. Р.Р. Чугаевым рекомендуется использовать при расчетах радиуса сопряжения безвакуумных водосливов практического профиля следующие соотношения соответственно для низких и высоких плотин [12]:

$$R = (0,5 - 1,0)(H_* + \Delta H_{\max});$$

$$R = (0,25 - 0,5)(H_* + \Delta H_{\max}), \quad (1)$$

где ΔH_{\max} — максимальная разница между уровнями верхнего и нижнего бьефа; H_* — стандартный напор равный 1 м.

Неоднозначность эмпирических соотношений радиуса сопряжения может приводить к неопределенности при оценках оптимальных динамических воздействий потока падающего на водобой и определению размеров сопряженной части водобоя [12]. В качестве оптимальных значений радиуса сопряжения принимаются данные наблюдений и расчетов Н.Н. Павловского [13], представленные в обобщенном виде в справочных таблицах П.Г. Киселева [10]. В практических расчетах для замены массива значений используется следующее табулированное соотношение [15]:

$$(-0,005P + 0,039)H^2 + (0,0732P + 0,3914)H + (1,1841 + 0,0957P - 0,0018P^2). \quad (2)$$

Получено несколько эмпирических формул для определения радиуса сопряжения [17]. В их числе соотношение В.Т. Чоу с величинами для скорости V и напора H и радиуса R , выраженными в футах [18]

$$R = 10^{\frac{V+6,4H+16}{3,6H+64}}. \quad (3)$$

В эмпирических формулах А.Н. Бутакова определение радиуса сопряжения связывается с оценкой динамического воздействия потока через соотношение глубины в сжатом сечении h_c и критической глубины h_{kr} [17]

$$\frac{R}{h_{kr}} = 0,85 \cdot \left(\frac{h_{kr}}{h_c}\right)^{1,9} \quad \text{при } 1,8 < \frac{h_{kr}}{h_c} \leq 3,35, \quad (4)$$

$$\frac{R}{h_{kr}} = 0,33 \cdot \left(\frac{h_{kr}}{h_c}\right)^{2,66} \quad \text{при } \frac{h_{kr}}{h_c} > 3,35. \quad (5)$$

При определении радиуса сопряжения безвакуумного водослива с водобоем предлагается принимать во внимание воздействие потока на конструкцию водослива центробежной силы и силы тяжести воды, приводящий к следующему выражению относительного радиуса сегмента окружности касательного к профилю Кригера — Офицерова [20]:

$$\frac{R}{H} = \left(\frac{\rho\phi B 2gm}{p_d}\right) H \sqrt{1 + \frac{P}{H}}, \quad (6)$$

где R — радиус сопряжения; H — статический напор; B — ширина водослива; ϕ — коэффициент скорости; m — коэффициент расхода; p_d — допустимое давление; P — высота водослива.

Приведенные формулы и дополняющие их табулированные данные соответствуют фактическим данным для относительно небольших напоров и высот водосливов. При больших размерах и ин-

тенсивных напорах точность расчетов по таблицам и формулам не совпадает с экспериментальными наблюдениями. Между тем для надежной эксплуатации плотинных гидросооружений повышение точности расчетов контуров сопряженных поверхностей в концевых участках водосливов имеет принципиальное значение, поскольку конструкция сопряжения сливной поверхности с придонным основанием водосливов должна обеспечивать безопасный уровень динамических воздействий водных потоков на флотбет гидросооружений и устойчивость к возникновению критических напряжений, обусловленных гидродинамическими нагрузками. Таким образом, расчеты радиусов сопряжения между поверхностью водослива и водобоем нуждаются в анализе и коррекции для надежного и адекватного практического использования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье рассматривается возможность уточнения аналитических определений радиуса сопряжения с учетом влияния на интенсивность динамических воздействий потоков на конструкции сопрягающих элементов водосливов, потерь полной механической энергии сбросных потоков, обусловленных развиваемыми при этом турбулентными напряжениями с критическими глубинами, соответствующими минимуму энергии.

Для уточнения расчетных соотношений, используемых при вычислении радиусов сопряжения водосливов с водобоем, целесообразно провести расчеты с учетом воздействий на поверхность сопряжения обусловленных возникновением гидравлических прыжков надвинутых на водослив. Нагрузку на сегментный контур с радиусом R сопряжения водосливной поверхности с водобоем, создаваемую массой воды плотности ρ над сегментной поверхностью площади S_{cek} в виде силы $F = \rho g S_{cek} B$ гидростатического давления $p_c = \frac{F}{BR}$, действующего по всей ширине водослива B можно представить в следующем виде:

$$p_c = \frac{\rho g S_{cek}}{R},$$

где $S_{cek} = \frac{\pi R^2 \alpha^\circ}{360}$, α° — центральный угол сектора.

Давление p_c , оказываемое на концевую поверхность сегмента сопряжения водослива с водобоем, можно также выразить через центробежную силу, возникающую при повороте потока глубиной h , с учетом того, что длина дуги сегмента приблизительно заменяется радиусом окружности R следующим образом $\frac{p_c}{\rho g} = \frac{V^2 h}{2gR}$. Приравняв давление, создаваемое гравитационной и центробежной силой, получаем

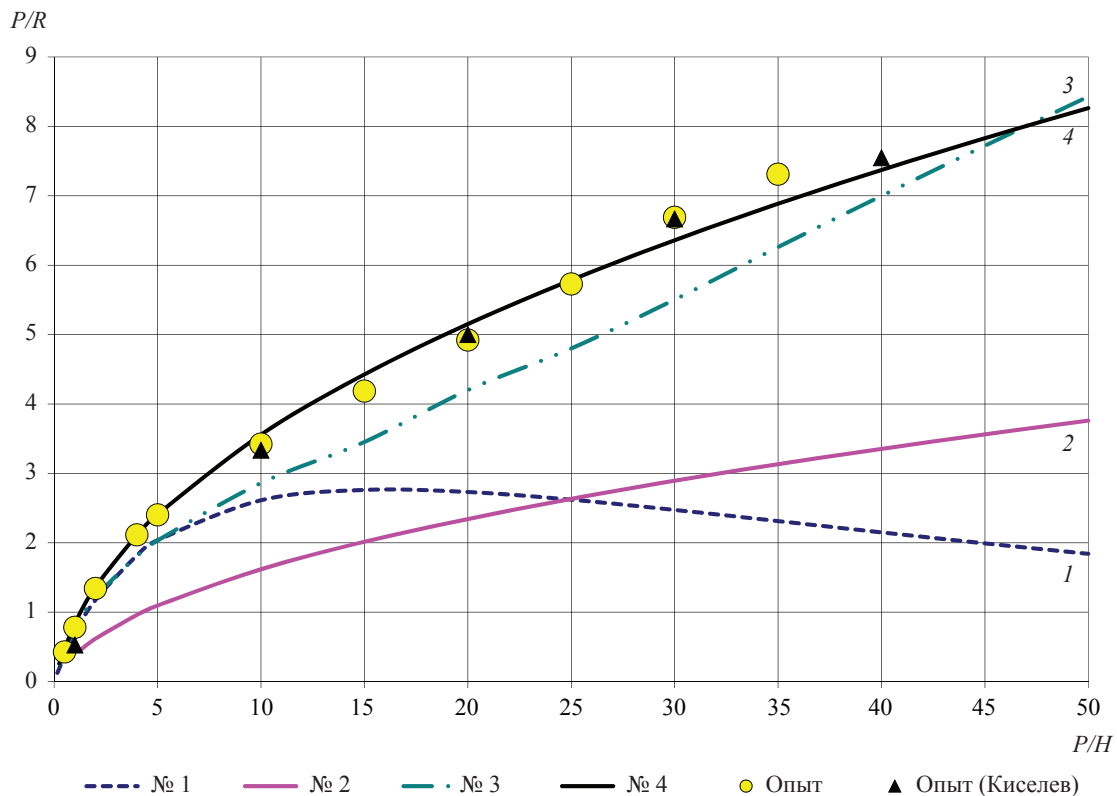
$$\frac{\pi R^2 \alpha^{\circ}}{360} = \frac{V^2 h}{2g}, \quad (7)$$

где V — скорость и глубина воды в зоне сопряжения. Скорость, развиваемая в потоке, сходящем на водобой под статическим напором H с водослива высотой P выражаем через $V = \phi \sqrt{2g(H + P)}$, где ϕ — коэффициент скорости.

Что касается значений для глубины потока h в зоне его поворота при схождении водосливной поверхности на водобой, нами использована гипотеза — в качестве возможного предположения принять ее равной критической глубине потока, соответствующей минимальным значениям механической энергии потока. В тех случаях, когда фактическая сжатая глубина при падении потока на водобой оказывается меньше критической глубины, она не стремится принять критическое значение с минимумом энергии и скачком увеличивается с резким подъемом воды и ростом центробежной составляющей гидравлического воздействия на конструкцию сопрягающего участка водосливной поверхности. Благодаря неустойчивости значений потенциальной

составляющей энергии соответствующей сжатой глубине, меньшей критических значений, именно критическая глубина как предел перераспределения энергии в направлении увеличения была выбрана в качестве критериального параметра при расчетах оптимального силового воздействия потока на водосливную поверхность на участке ее сопряжения с водобоем.

В качестве критической глубины, соответствующей минимальному значению полной механической энергии потока, используем выражение $h_{kr} = \sqrt[3]{\frac{\beta q^2}{g}}$. Здесь β — коэффициент коррекции скорости Кориолиса. Используя формулу Дюбуа для удельного расхода q воды через водослив с коэффициентом расхода m в приближении малости составляющей скоростной составляющей напора [12] $q = m \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}$, для критической глубины можно записать выражение $h_{kr} = H \sqrt[3]{2\beta m^2}$. С учетом приведенных выше соотношений, получаем следующую расчетную формулу для вычисления радиуса сопряжения:



Опытные и расчетные данные для радиусов сопряжения для различных напоров и высот водосливов: \blacktriangle — опытные данные П.Г. Киселева [10]; \circ — табулированные опытные данные [13, 15]; 1 — расчет по формуле (3) Чоу [18]; 2 — линия расчета по формуле (6) [20]; 3 — расчет по формулам (4), (5) [17]; 4 — сплошная линия, расчет по формуле (8) при $\beta = 1,1$; $m = 0,49$; $\phi = 0,85$; $\alpha = 90^{\circ}$.

Experimental and calculated data for the radii of conjugation for different heads and height of weirs: \blacktriangle — experimental data of P.G. Kiselev [10]; \circ — tabulated experimental data [13, 15]; 1 — calculation by formula (3) of Chow [18]; 2 — calculated line according to formula (6) [20]; 3 — calculation by formulas (4) and (5) [17]; 4 — solid line calculated by formula (8) with $\beta = 1.1$; $m = 0.49$; $\phi = 0.85$; $\alpha = 90^{\circ}$.

$$R = CH \sqrt{1 + \frac{P}{H}}, \quad (8)$$

где $C = \sqrt{\frac{360}{\pi\alpha}} \phi^2 \sqrt[3]{2\beta m^2}$ — безразмерный множитель из комбинации числовых коэффициентов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученная формула (8) использована для анализа условий сопряжения практического профиля безвакуумных водосливов относительно падения потока на водобой.

В качестве сравнения результатов расчета и опытных данных были выбраны координатные оси с нормировкой на статические напоры радиусов сопряжения и высот водосливов. Из представленных на рисунке данных видно, что в большинстве расчетных формул при малых относительных высотах водосливов (при P/H приблизительно расположенных в интервале до 9–10) значения радиусов сопряжения совпадают между собой. Формула (8) достаточно близко соответствует опытным данным практически во всем диапазоне высот водосливов и напоров с относительно небольшим расхождением. Расхождение расчетов радиуса сопряжения по формулам (3), (6), по-видимому, связано с недостаточно полным определением характерных глубин в зоне сопряжения, не соотносящихся с критической глубиной ниже значений, которой инициируется развитие гидродинамической неустойчивости с образованием резких скачков давления, отражающихся на оценках допустимого центробежного давления на участке поворота потока. Отклонения профиля от расчетного свидетельствуют о значимости влияния на определение оптимального значения радиуса сопряжения водослива, соотношения глубины сжатия после водосброса с критической глубиной, являющейся экстремальной предельно допустимой величиной энергии потока.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ исследований позволил получить более полные сведения о гидравлических воздействиях потока на концевые участки профильной поверхности водосбросных плотин, сопряженные с водобоем. Предложен способ уточненного расчета радиуса окружности концевого участка контура безвакуумного водослива практического профиля. В результате учета условий взаимодействия гидродинамически неустойчивого потока с водосливом на участках сливной поверхности, сопрягающейся с водобоем, и анализа соответствия с данными опытов и эмпирических расчетов, получено аналитическое соотношение для расчета радиуса сопряжения криволинейного профиля гидротехнических водосбросных сооружений. Показано, что для снижения погрешностей при определении воздействий потоков с высотных водосбросов в расчетах координат сливной поверхности водосливов необходимо принимать во внимание центробежные динамические нагрузки в зоне поворота потока, согласующиеся с соотношением характерных глубин течений (критической и сжатой) в зоне сопряжения с водобоем. Водосброс с профилем Кригера — Офицера, дополненный плавным сопряжением с водобоем, способствует гашению избыточной кинетической энергии и снижению риска возникновения избыточных динамических нагрузок на конструкцию сопрягающего элемента водослива. Предложенный в работе расчет радиуса сопряжения конфигурации сливной поверхности водосливных плотин в концевых участках перехода профиля к водобою, свидетельствует о целесообразности его практического использования. Соотношение для радиуса сопряжения также может найти применение при определении кривизны поверхности дефлекторных носиков, способствующих снижению риска формирования отогнанных от водосливов гидравлических прыжков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chanson H., James D.P. Historical development of arch dams: from cut-stone arches to modern concrete designs // Australian Civil Engineering Transactions. 2001. Vol. 43. Pp. 39–56.
2. Sobeih M.F., Helal E.Y., Nassralla T.H., Abdelaziz A.A. Scour depth downstream weir with openings // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. Vol. 3. No. 1. Pp. 259–270.
3. Mahtabi G., Arvanaghi H. Experimental and numerical analysis of flow over a rectangular full-width sharp-crested weir // Water Science and Engineering. 2018. Vol. 11. Issue 1. Pp 75–80
4. Mohammadzadeh-Habili J., Heidarpour M., Afzalimehr H. Hydraulic characteristics of a new weir entitled of quarter-circular crested weir // Flow Measurement and Instrumentation. 2013. Vol. 33. Pp. 168–178.
5. Clemmens A.J., Tony L. Wahl, Bos M.G., John Replogle. Water Measurement with Flumes and Weirs. 2001. 28 p.
6. Creager W.P. Engineering for masonry dams. New York : J. Wiley & sons, Inc., 1917. 273 p.

7. Sangsefidi Y., Mehraein M., Ghodsian M. Experimental Study on Flow over In-Reservoir Arced Labyrinth Weirs // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2018. Vol. 59. Pp. 215–224

8. Goodarzi E., Farhodi J., Shokri N. Flow characteristics of rectangular broad-crested weirs with sloped upstream face // *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2012. Vol. 60. No. 2. Pp. 87–100.

9. Офицеров А.С. Гидравлика водосливов. М. : ОНТИ, 1938. 200 с.

10. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. 4-е изд. М. : Энергия, 1972. 312 с.

11. Shabanlou S., Khorami E. Study of the hydraulic properties of the cylindrical crested weirs // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013. Vol. 33. Pp. 153–159.

12. Чугаев Р.Р. Гидротехнические сооружения. Ч. 2. Водосливные плотины. М. : Высшая школа, 1978. 352 с.

13. Павловский Н.Н. Гидравлический справочник. М. : ОНТИ, 1937. 890 с.

14. Chanson H., Montes J.S. Overflow characteristics of circular weirs: effects of inflow conditions //

Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1998. Vol. 124. No. 3. Pp. 152–162.

15. Соловьев А.А. Речная гидравлика. М. : Альтаир, 2004. 145 с.

16. Oliveto G., Biggiero V., Fiorentino M. Hydraulic features of supercritical flow along prismatic side weirs // *Journal of Hydraulic Research*. 2001. Vol. 39. No. 1. Pp. 73–82.

17. Butakov A.N. Equations for the flow coefficient of a weir and the conjugation radius of the overflow surface and the downstream bottom // *Hydrotechnical Construction*. 1995. Vol. 29. No. 9. Pp. 538–543.

18. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов. М. : Стройиздат, 1969. 462 с.

19. Остякова А.В. Сопряжение водосливной поверхности с водобоем для водосливов безвакуумного профиля // *Вестник МГСУ*. 2011. № 5. С. 306–310.

20. Ostyakova A.V., Borovkov V.S. Analysis of merge between spillway surface and toe basin for spillways with curvilinear vacuum-free profile // *Power Technology and Engineering*. 2014. Vol. 1. No. 48. Pp. 6–9.

Поступила в редакцию 18 декабря 2017 г.

Принята в доработанном виде 15 мая 2018 г.

Одобрена для публикации 27 июня 2018 г.

О Б АВТОРАХ: Соловьев Александр Алексеевич — доктор физико-математических наук, профессор, академик РИА, заведующий НИЛ возобновляемых источников энергии географического факультета, **Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)**, 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, корп. 19, a.soloviev@geogr.msu.ru;

Соловьев Дмитрий Александрович — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Лаборатории взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений, **Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН)**, 117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36, solovev@ocean.ru;

Шилова Любовь Андреевна — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, **Научно-исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, ул. Ярославское шоссе, д. 26, ShilovaLA@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Chanson H., James D.P. Historical development of arch dams: from cut-stone arches to modern concrete designs. *Australian Civil Engineering Transactions*. 2001, vol. 43, pp. 39–56.

2. Sobeih M.F., Helal E.Y., Nassralla T.H., Abdelaziz A.A. Scour depth downstream weir with openings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012, vol. 3, no. 1, pp. 259–270.

3. Mahtabi G., Arvanaghi H. Experimental and numerical analysis of flow over a rectangular full-width

sharp-crested weir. *Water Science and Engineering*. 2018, vol. 11, issue 1, pp. 75–80.

4. Mohammadzadeh-Habili J., Heidarpour M., Afzalimehr H. Hydraulic characteristics of a new weir entitled of quarter-circular crested weir. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013, vol. 33, pp. 168–178.

5. Clemmens A.J., Tony L. Wahl, Bos M.G., John Replogle. *Water measurement with flumes and weirs*. 2001, 28 p.

6. Creager W.P. *Engineering for masonry dams*. New York, J. Wiley & sons, Incorporated. 1917, 273 p.

7. Sangsefidi Y., Mehraein M., Ghodsian M. Experimental study on flow over in-reservoir arced labyrinth weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2018, vol. 59, pp. 215–224.
8. Goodarzi E., Farhoudi J., Shokri N. Flow characteristics of rectangular broad-crested weirs with sloped upstream face. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2012, vol. 60, no. 2, pp. 87–100.
9. Ofitserov A.S. *Gidravlika vodoslivov* [Hydraulics of spillways]. Moscow, ONTI, 1938. (In Russian)
10. Kiselev P.G. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam*. 4 edition. Moscow, Energy publ., 1972, 312 p. (In Russian)
11. Shabanlou S., Khorami E. Study of the hydraulic properties of the cylindrical crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013, vol. 33, pp. 153–159.
12. Chugayev R.R. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Ch. 2 Vodoslivnyye plotiny*. Moscow, Higher school, 1978, 352 p. (In Russian)
13. Pavlovskiy N.N. *Gidravlicheskiy spravochnik*. Moscow, ONTI, 1937, 890 p. (In Russian)
14. Chanson H., Montes J.S. Overflow characteristics of circular weirs: effects of inflow conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1998, vol. 124, no. 3, pp. 152–162.
15. Solov'yev A.A. *Rechnaya gidravlika*. Moscow : Al'tair, 2004, 145 p. (In Russian)
16. Oliveto G., Biggiero V., Fiorentino M. Hydraulic features of supercritical flow along prismatic side weirs. *Journal of Hydraulic Research*. 2001, vol. 39, no. 1, pp. 73–82.
17. Butakov A.N. Equations for the flow coefficient of a weir and the conjugation radius of the overflow surface and the downstream bottom. *Hydrotechnical Construction*. 1995, vol. 29, no. 9, pp. 538–543.
18. Chou V.T. *Gidravlika otkrytykh kanalov* [Open channel flow]. Moscow, Stroyizdat, 1969, 462 p. (In Russian)
19. Ostyakova A.V. Sopryazhenie vodoslivnoy poverkhnosti s vodoboem dlya vodoslivov bezvakuumnogo profilya [Spillway surface conjugation with the apron slab]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 5, pp. 306–310. (In Russian)
20. Ostyakova A.V., Borovkov V.S. Analysis of Merge Between Spillway Surface and Toe Basin for Spillways with Curvilinear Vacuum-Free Profile. *Power Technology and Engineering*. 2014, vol. 1, no. 48, pp. 6–9.

Received December 18, 2017.

Adopted in final form on May 15, 2018.

Approved for publication on June 27, 2018.

ABOUT THE AUTHORS: **Solovyev Aleksander Alekseevich** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of the RIA, Faculty of Geography, Renewable Energy Research Laboratory, **Lomonosov Moscow State University (MSU)**, 1 Bldg. 19 Lenin Hills, Moscow, GSP-1, 119991, Russian Federation, a.soloviev@geogr.msu.ru;

Solovyev Dmitriy Aleksandrovich — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, **Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (IO RAS)**, 36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russian Federation, solovev@ocean.ru;

Shilova Liubov Andreevna — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer Department of Information Systems Technology and Automation in Construction, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, ShilovaLA@mgsu.ru.