



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-4-322-335
УДК 532.517.2


Научная статья / Research article

Сопряжения закрученного потока с продольным течением

Г.В. Орехов^a , Л.Е. Щесняк^b 

^aНациональный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

 orehov_genrih@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 29 сентября 2022 г.

Доработана: 12 ноября 2022 г.

Принята к публикации: 15 ноября 2022 г.

Ключевые слова:

моделирование, циркуляционно-продольное течение, завихритель, скорость потока, затопленная струя, численный эксперимент

Аннотация. В практике проектирования и эксплуатации гидротехнических и водохозяйственных объектов вопросы сопряжения потоков зачастую приобретают первостепенный характер, поскольку требуют внимательного подхода к воздействию на береговую инфраструктуру водных объектов и их сооружений со стороны различного рода течений и струй. Изучено сложное течение в виде затопленной струи, образованной сопряжением циркуляционно-продольного (закрученного) потока с массивом воды, имеющим относительную продольную скорость течения. Исследования проводились посредством математического и физического моделирования. Для выполнения лабораторных экспериментов создан испытательный стенд с моделью для получения циркуляционно-продольного потока и потока с продольной скоростью течения, который формировался в гидравлическом лотке. Численный эксперимент проведен в программном комплексе ANSYS (Fluent). Получены поля и распределения скоростей результирующего течения. Сделан выбор в пользу наиболее благоприятного в плане гидродинамического воздействия на береговую инфраструктуру. Дана оценка точности расчетов численным методом на основе сравнения с результатами физического эксперимента.

Для цитирования


Орехов Г.В., Щесняк Л.Е. Сопряжения закрученного потока с продольным течением // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 322–335. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-322-335>

Interference of swirling flow with longitudinal stream

Genrikh V. Orekhov^a , Leonid E. Shchesnyak^b 

^aMoscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

^bPeoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

 orehov_genrih@mail.ru

Article history

Received: September 29, 2022

Revised: November 12, 2022

Accepted: November 15, 2022

Abstract. In the practice of designing and operating hydraulic and water management facilities, the issues of flow interference are of paramount importance, since they require close attention to the effect of various currents and jets on the coastal infrastructure of water bodies. A complex flow

© Орехов Г.В., Щесняк Л.Е., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Keywords:

simulation, circulating longitudinal flow, swirl, flow velocity, submerged jet, numerical experiment

in the form of a submerged jet, which is formed by the interference of a circulating longitudinal (swirling) flow with a water body having a relative longitudinal flow velocity, was studied. The investigation was carried out using mathematical and physical modeling. To perform laboratory experiments, a test bench with a model for obtaining swirling flow and a longitudinal stream, which was formed in a hydraulic flume, was created. The numerical experiment was carried out using ANSYS (Fluent) software. The fields and velocity distributions of the resulting flow were obtained. The most favourable one in terms of hydrodynamic impact on the coastal infrastructure was chosen. The accuracy of numerical computation is evaluated by comparing with the results of the physical experiment.

For citation

Orekhov GV, Shchesnyak LE. Interference of swirling flow with longitudinal stream. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(4):322–335. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-322-335>

Введение

В практике гидротехнического строительства, обоснования возведения различных водохозяйственных объектов и проектов преобразования водных ресурсов, рассмотрения русловых режимов рек и искусственных водных систем вопросы сопряжения потоков занимают важное место [1–6]. После создания гидроузлов нарушаются естественные условия прохождения паводков; они сбрасываются через водопропускные сооружения, геометрические размеры которых обычно меньше ширины потока в русле реки, со скоростями значительно большими, чем скорость течения воды в естественных условиях. При сопряжении бьефов гидротехнических сооружений могут сбрасываться большие расходы воды, которые при взаимодействии с водными массами оказывают силовые воздействия на сооружения и природную систему реки в нижнем бьефе.

В гидротехнике при проектировании гидроузлов с высокими напорами водосбросные системы выполняют в виде напорных трубопроводов или туннелей. К основным особенностям сопряжений трубчатых или туннельных водосбросов можно отнести:

– плавное сопряжение трубчатых водосбросов с водобойным колодцем с помощью открытых лотков, устраиваемых непосредственно за водосбросами. Течение характеризуется числами Фруда больше единицы;

– плавное сочленение концевых донных участков трубчатых и туннельных водосбросов, на выходе которых спокойное течение с устройствами нижнего бьефа. Такое течение характеризуется числами Фруда меньше единицы;

– сопряжение трубчатых водосбросов с водобойным колодцем, имеющим специальные гасители энергии;

– сопряжение глубинных водосбросов с помощью отброса струи в естественное или закрепленное русло.

Системы сопряжения различных потоков применяются не только в гидротехническом и водохозяйственном строительстве. Такие узлы сопряжений жидкостных потоков наблюдаются и в других отраслях промышленности, где широко используются различные жидкости, как правило, в напорном режиме течения.

Рассеивание («гашение») избыточной кинетической энергии потока в основном происходит за счет его турбулизации при образовании вихревых структур, соударении струй, при динамическом воздействии на препятствия и при перемещении частиц грунта русла реки при процессах эрозии (размыва) [7–10]. Значительные потери энергии сбросного потока происходят в водоворотных зонах с образованием возвратно-поступательных течений. Одними из наиболее эффективных и широко применяемых гасителей являются: устройство гидравлического прыжка, гашение кинетической энергии с помощью отброса струи и при растекании потока в плане [11–13].

При сопряжении потоков могут рассматриваться различные режимы течений. Наиболее распространенный режим сопряжения – безнапорный. В ряде случаев сопряжение может быть выполнено в виде затопленной струи, взаимодействующей с неподвижным массивом воды в нижнем бьефе или с массивом, имеющим скорость течения. Взаимодействие двух потоков

может происходить по нормали друг к другу или под углом. Различные случаи таких сопряжений могут рассматриваться при проектировании гидротехнических сооружений в процессе анализа вариантов компоновочных схем гидроузлов и водных объектов. В этих случаях на практике возникают вопросы, связанные с гидравлическими режимами и параметрами течения взаимодействующих сопрягающихся потоков.

В большинстве случаев водосбросные системы при сопряжении бьефов гидротехнических объектов формируют сбросные потоки в режиме продольного осевого течения. Однако в последнее время в ряде случаев стали применяться водосбросы с закруткой потока и созданием продольно-циркуляционных режимов течения воды в проточном тракте канала [14], что позволяет плавно по всей длине водосброса гасить избыточную кинетическую энергию потока. Такие системы также носят название вихревых. Разновидностью вихревых водосбросов являются контрвихревые системы с вращением потоков относительно различных осей или с соосным вращением потоков, которые показали высокую эффективность гашения потока внутри проточного тракта [15].

Применение таких водосбросных систем может формировать условия, при которых в водный массив нижнего бьефа, покоящийся илидвигающийся с какой-то скоростью, попадает поток с закруткой потока. При этом гидравлический режим взаимодействующих потоков будет отличаться от вышеупомянутых режимов сопряжения продольно-осевых потоков.

В настоящем исследовании рассматриваются вопросы моделирования сопряжения двух потоков: 1) в виде затопленной струи с закруткой (например, остаточная закрутка после вихревого водосброса); 2) более массивный, безнапорный, имеющий скорость течения. Расчетными случаями является варианты взаимодействия потоков под разными углами.

1. Цель

Потоки воды, являющиеся результатом взаимодействия продольно-циркуляционной струи с массивом воды, обладающим скоростью, представляют собой сложные в структурном отношении течения. Течения в зоне взаимодействия имеют высокие значения турбулентности и характеризуются пространственным полем скорос-

тей. Поэтому исследования таких течений выполняются двумя способами: математическим и физическим моделированием. Оба способа, будучи приближенными методами решения задач гидроаэродинамики, дополняют и корректируют друг друга.

Цель исследования – изучить сложное течение, формируемое двумя взаимодействующими потоками, один из которых представляет собой затопленную закрученную струю, методами физического и математического (численного) моделирования. В качестве основного измерительного метода на физической модели использован метод визуализации потока с определением скоростных характеристик современной измерительной аппаратурой, позволяющей получить основные кинематические характеристики изучаемого течения.

Решались задачи:

1) исследования на физической модели гидродинамических характеристик распространения затопленной закрученной струи:

– в неподвижном массиве воды;

– в массиве воды с относительной скоростью течения (при этом ось струи расположена по нормали к вектору скорости массива воды);

– в массиве воды со скоростью течения (при этом ось струи расположена под разными углами к направлению вектора скорости массива воды);

2) исследования методом математического моделирования (вычислительный эксперимент) сложного течения, образованного затопленной закрученной струей, и массива воды нижнего бьефа гидроузла.

2. Материалы и методы

Метод физического моделирования для решения поставленных задач

Исследования взаимодействующих потоков в области сопряжения затопленной закрученной струи и массива воды в нижнем бьефе проводились с помощью специализированного стенда, основным элементом которого является открытый гидравлический лоток, имитирующий условия течения в нижнем бьефе гидроузла. На рис. 1 показан экспериментальный гидравлический стенд для проведения серии модельных испытаний.

Исследования выполнялись в открытом гидравлическом лотке с размерами проточной части $18 \times 1,37 \times 0,8$ м, оборудованном: технологическим

баком для хранения воды и слива в него потока из лотка объемом 30 м^3 ; регулировочными задвижками (верхний и нижний затвор) на входе и выходе водослива; насосом, обеспечивающим подачу воды из технологического бака с расходом $0,0022 \text{ м}^3/\text{с}$; ультразвуковым расходомером КАРАТ-520 для измерения расхода воды через водосброс лотка. Гидравлический лоток имеет прозрачные стенки для наблюдения за результатами опытов.

На вертикальной боковой поверхности лотка смонтирован патрубок, имитирующий выходной участок водосбросной системы гидроузла. Патру-

бок укреплен на стенке лотка на расстоянии 9 м от входного сечения, через которое вода поступает в лоток через специальный мерный водослив. Назначение такой длины обеспечивает снижение до минимума турбулентных возмущений в зоне эксперимента, возникающих во входном сечении лотка. Ось цилиндрического патрубка установлена на глубине 270 мм от дна лотка.

На рис. 2 показан узел крепления патрубка к стенке гидравлического лотка под углом 30° . Всего в серии исследований рассмотрено три варианта выхода закрученного потока из патрубка в текущий в лотке поток воды: 30 , 45 и 90° .



Рис. 1. Гидравлический стенд для проведения модельных испытаний на физической модели
Figure 1. Hydraulic bench for conducting physical model tests



а



б

Рис. 2. Монтаж патрубка к стенке гидравлического лотка:
а – общий вид крепления патрубка к стенке; *б* – один из вариантов сопряжения патрубка к стенке лотка под углом 30°
Figure 2. Nozzle to hydraulic tray wall mount:
а – general view of nozzle attachment; *б* – an option for nozzle to wall mount at 30° angle

В эксперименте закрученные потоки создавались при помощи патрубков диаметром 50 мм

с плотно установленными в них завихрителями длиной 300 мм. Завихрители изготовлены с ис-

пользованием аддитивных технологий трехмерной печати на аппарате ProdwaysX4500. Путем экспериментального подбора завихрителей создавалась закрутка потока с различными параметрами. Параметр закрутки принимался в пределах 0,25–0,35, что соответствует числу Хигера – Бэра, определенному по формуле

$$Sn = \frac{M}{RI} = \frac{\int_0^R \rho r u_{\theta} u_x 2\pi r dr}{R \int_0^R \rho u_x^2 2\pi r dr},$$

где M и I – момент количества движения и количество движения циркуляционно-продольного течения соответственно; ρ – плотность жидкости; r – текущий радиус патрубка; R – внутренний радиус патрубка, принятый в проведенных опытах 25 мм; u_{θ} и u_x – тангенциальные (окружные) и осевые (продольные) скорости течения соответственно.

Момент количества движения M и количества движения I соответственно определялись по формулам

$$M = \int_0^R \rho r u_{\theta} u_x 2\pi r dr;$$

$$I = \int_0^R \rho u_x^2 2\pi r dr.$$

На рис. 3. показаны модели завихрителей, применявшихся в опытах. Завихрители выполнены в виде четырехзаходных шнековых спиралей с центральным цилиндрическим телом и разным шагом закрутки шнековых лент для изменения характеристик закрученного потока воды, выходящего в гидравлический лоток из патрубка.

Измерение скоростей потока выполнялось ручным акустическим доплеровским измерителем скорости течения 3D FlowTracker2 LAB, предназначенным для лабораторных исследований (рис. 4). Для обработки сигнала и получения необходимых данных прибор подключается к обрабатывающему компьютеру. Технические характеристики прибора приведены в таблице.

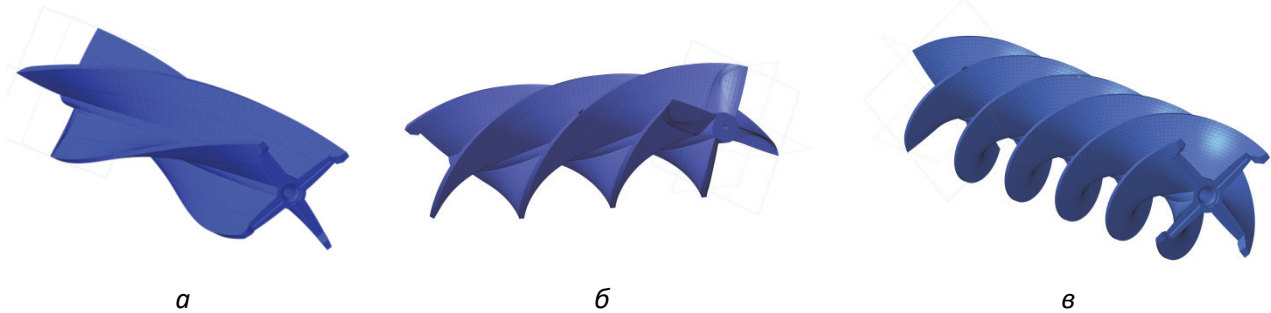


Рис. 3. Модели завихрителей для создания закрученного потока в патрубке модели диаметром 50 мм:
а – большой шаг; б – средний шаг; в – малый шаг
Figure 3. Models of swirlers for creating swirling flow in 50 mm diameter nozzle:
a – large step; б – medium step; в – small step

Принцип действия ультразвукового измерителя скорости FlowTracker2 основан на использовании эффекта Доплера. Схема измерения показана на рис. 5. Результаты измерения скорости представляются с использованием правосторонней декартовой системы координат, привязанной к зонду. Градуированная направляющая располагается перпендикулярно потоку, над сечением, в точках которого должна быть определена скорость потока. Количество точек измере-

ния зависит от ширины потока. Средний временной интервал измерения скорости в точке обычно составляет от 10 до 60 секунд и зависит от особенностей потока. Спокойный, без особых возмущений поток требует меньшего интервала времени измерения скорости в выбранной точке. Напротив, бурный поток с возмущениями и вихревыми зонами требует большего времени. Прибор делает два измерения в секунду по трем компонентам скорости: v_x , v_y , v_z .



Рис. 4. Акустический измеритель скорости потока FlowTracker2: внешний вид
Figure 4. Flow Tracker 2 acoustic flow meter: appearance

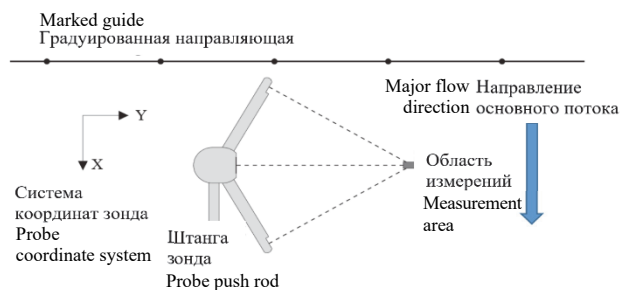


Рис. 5. Принципиальная схема измерения скорости жидкостного потока
Figure 5. Liquid flow rate measurement schematic

Основные характеристики прибора FlowTracker2

Характеристика	Значение параметров
Диапазон скорости	От $\pm 0,001$ до 4,0 м/с
Разрешение скорости	0,0001 м/с
Точность определения скорости	$\pm 1\%$ от измеренной скорости
Акустическая частота	10,0 МГц
Положение объема выборки	10 см от центра трансдюсера
Минимальная глубина погружения	0,02 м
Диапазон измерения глубины	от 0 до 10 м
Разрешение измерения глубины	$\pm 0,001$ м

Main characteristics of FlowTracker2 device

Characteristic	Parameter values
Velocity range	From ± 0.001 to 4.0 m/s
Velocity resolution	0.0001 m/s
Velocity detection accuracy	$\pm 1\%$ of measured velocity
Acoustic frequency	10.0 MHz
Position of sample volume	10 cm from transducer center
Minimum immersion depth	0.02 m
Depth measurement range	From 0 m to 10 m
Depth measurement resolution	± 0.001 m

Измерения скоростных характеристик струи в текущем потоке производились в трех сечениях и пяти точках в каждом сечении. Установка измерительного прибора в гидравлическом лотке и разметка на дне лотка точек измерения показаны на рис. 6.

Получение информации о характеристиках течения осуществлялось не только с помощью измерительного прибора, но и визуальным спо-

собом. Визуализация включала окрашивание закрученной струи воды и определение границ окрашенной зоны в области взаимодействия двух потоков. Фиксировались границы проникновения закрученной струи, выходящей из патрубка, в протекающем массиве воды в гидравлическом лотке. На рис. 7 показана технология визуализации потока применительно к решаемой задаче.

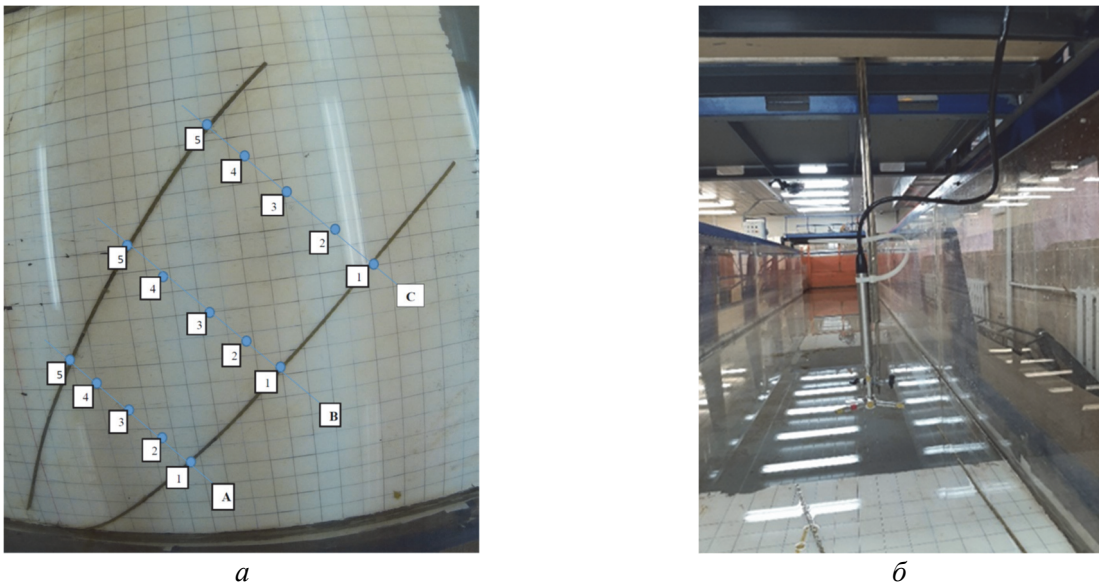


Рис. 6. Установка зонда и разметка поля измерения:
 а – разметка дна гидравлического лотка для установки измерительного прибора в точку измерения;
 б – крепление прибора к подвижной штанге, осуществляющей перемещение по горизонтали и вертикали
Figure 6. Probe setup and measurement field marking:
 a – marking of hydraulic tray bottom for installing measuring device to point of measurement;
 б – device attachment to mobile rod that moves horizontally and vertically

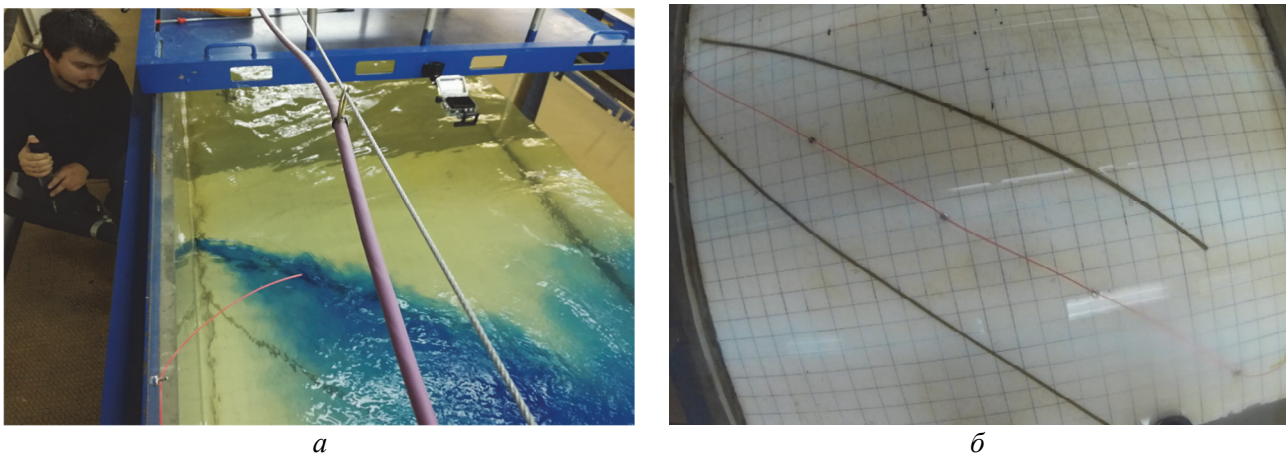


Рис. 7. Технология визуализации потока:
 а – окрашивание закрученной струи; б – разметка осевой линии и границ рассеивания закрученной струи в массиве текущей воды
Figure 7. Flow visualization technique:
 а – swirling jet coloring; б – marking of centerline and scattering boundaries of swirling jet in flowing water body

Метод математического (численного) моделирования для решения поставленных задач

В задачах гидродинамики в качестве модели используются краевые задачи для уравнений в частных производных. Такие задачи редко решаются аналитически, поэтому обычно применяют численные методы решения дифференциальных уравнений Навье – Стокса [16–20].

Применение метода сеток подразумевает, что масштабный порядок шага суммирования решения может быть хорошо аппроксимирован линейными

функциями, но в турбулентных задачах это предположение не выполняется. Методы, основанные на прямом решении уравнений Навье – Стокса, в инженерных расчетах не используются. В настоящее время поступают следующим образом. Сначала вводится разложение Рейнольдса между средней и флуктуирующей (турбулентной) компонентами, которое применяется к уравнениям Навье – Стокса, в результате чего получаются так называемые усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса [21–23]. Получается незамкнутая система диф-

ференциальных нелинейных уравнений. Способ их замыкания выполняется по-разному, что приводит к разным моделям турбулентного течения. Известные методы замыкания основаны на определенных предположениях, обоснование которых представляет значительные трудности и содержит параметры, определяемые эмпирическим путем.

Для расчетов используется стандартный пакет Fluent в ANSYS 19.0 для работы с моделями турбулентных течений. Этот программный продукт обеспечивает доступ ко многим пакетам, ориентированным на моделирование явлений из различных областей физики, но объединенным общей идеей – дискретизацией уравнений в частных производных методом конечных элементов (МКЭ). Выбор этой расчетной программы в первую очередь обусловлен тем, что компания ANSYS Inc. была создана в 1970 г. специально для разработки программного обеспечения для МКЭ и накопила большой опыт в этом вопросе. В настоящее время Fluent ANSYS является наиболее известным и универсальным программным расчетным продуктом для моделирования турбулентных течений.

Циркулярно-продольный (закрученный) поток описывается как течение в круглоцилиндрической трубе, диаметр которой равен внутреннему диаметру патрубка в физической модели, описанной выше. На входе исходного продольно-осевого потока устанавливалась численная модель завихрителей (рис. 2) для формирования продольно-циркуляционного (закрученного) потока на выходе из круглоцилиндрической проточной части. Массив воды нижнего бьефа, имеющий скорость движения, моделировался в виде прямоугольного параллелепипеда, и его размеры меньше физической модели в целях экономии вычислительных ресурсов. На рис. 8 показана картина течения в круглоцилиндрическом канале в области расположения завихрителей.

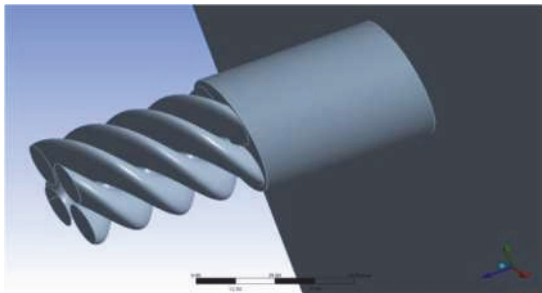


Рис. 8. Картина течения в круглоцилиндрическом канале в области расположения завихрителей
Figure 8. Flow pattern in circular cylindrical channel near swirlers

Решение задачи основано на уравнениях движения и неразрывности с усреднением по Рейнольдсу (усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса, RANS)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0;$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\delta}{\partial x_i} + \frac{\delta}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} + \rho \tau_{ij}), \quad (1)$$

где U – осредненные скорости, а

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right). \quad (2)$$

В расчетах использовались модели турбулентности k - ε и k - ω . В процессе работы с программой выбиралась более подходящая к данной задаче модель. Кинетическая энергия турбулентных пульсаций определялась как

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (3)$$

и скорость диссипации

$$\varepsilon = V \frac{\overline{\delta u'_i}}{\partial x_k} \frac{\overline{\delta u'_i}}{\partial x_k}. \quad (4)$$

В рамках модели предполагается, что тензор напряжений Рейнольдса выражается через функции следующим образом:

$$\tau_{ij} = 2\nu_T S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (5)$$

где кинематическая вязкость ν_T определяется из соображений размерности как

$$\nu_T = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon \nu_T}. \quad (6)$$

Коэффициент C_μ в (6) принимался равным 0,009.

Динамика энергии K описывается уравнениями

$$\frac{\delta k}{\delta t} + U_j \frac{\delta k}{\delta x_j} = \tau_{ij} \frac{\delta U_i}{\delta x_j} - \varepsilon + \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(v + \frac{v_T}{\delta k} \right) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right];$$

$$\frac{\delta \varepsilon}{\delta t} + U_j \frac{\delta \varepsilon}{\delta x_j} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(v + \frac{v_T}{\delta \varepsilon} \right) \frac{\delta \varepsilon}{\delta x_j} \right], \quad (7)$$

где $\varepsilon = 1,0$, а коэффициенты в (7) равны $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

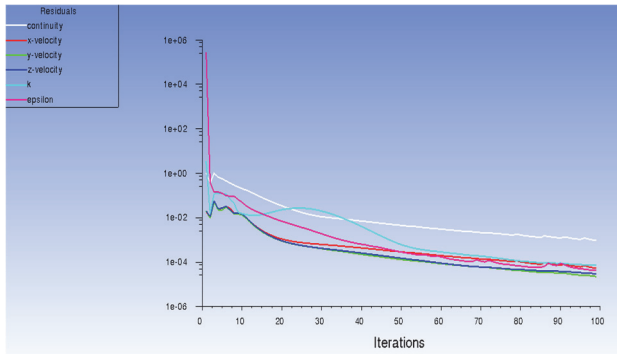


Рис. 9. Сходимость k – ε модели для псевдопереходного решателя

Figure 9. Convergence of k – ε model for pseudo-transient solver

Рассмотрены две модели турбулентности k – ε и k – ω . Модель k – ω показала неудовлетворительные результаты по сходимости. Модель k – ε имеет лучшие результаты по сходимости решений. На рис. 9 представлен график, иллюстрирующий характер сходимости итерационных процессов. Применение псевдопереходного решателя позволяет достичь сходимости по всем невязкам уже за 100 шагов.

3. Результаты и обсуждение

Результаты численного эксперимента по исследованию сопряжения двух потоков показаны на рис. 9–11. На этих диаграммах приведены результаты расчетов выхода закрученного потока в массив воды, имеющий скорость продольного течения в плоскости x – z , совпадающей с

осью закрученного потока. Масштаб диаграмм отображает полную скорость течения, равную

$$U = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

На рис. 10, *a* показана картина течения при входе закрученного потока в массив движущейся воды под прямым углом. Циркуляционно-продольный (закрученный) поток, сформированный завихрителем в круглоцилиндрическом канале (трубе), взаимодействуя с текущим продольным массивом в канале, образует факел распределения скоростей, изгибающийся в направлении течения в канале. Видно, что скорости в факеле уменьшаются по мере удаления от условной осевой, показанной на рис. 10, *a* красной линией. В непосредственной близости от выхода продольно-циркуляционного потока из патрубка наблюдается проявление закрутки на характер распределения скоростей в факеле струйного течения.

При изменении угла взаимодействия двух потоков, картина меняется. На рис. 10, *b* показана диаграмма распределения полных скоростей U при наклоне выходного патрубка в плоскости x – z до 60° . Из диаграммы следует, что общий вид струйной области не изменился по сравнению с диаграммой на рис. 10, *a*, но область на выходе из патрубка приобрела большую длину со скоростями порядка 0,8 м/с.

На рис. 11 показаны диаграммы распределения полных скоростей струйного течения с углами взаимодействия потоков 45° и 30° . Общая структура струйного течения остается неизменной, но области проникновения продольно-циркуляционной струи в массив движущейся воды в канале увеличиваются. Это особенно видно на рис. 11, *a* при входе закрученного потока в канал под углом 30° .

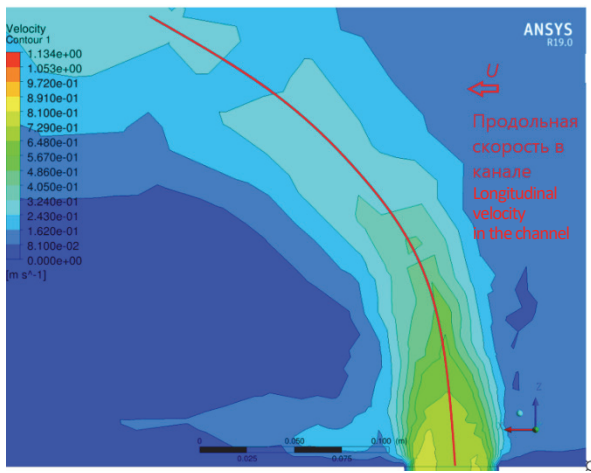
На рис. 12 показаны диаграммы распределения компоненты полной скорости v_y и линии тока. На диаграмме хорошо видно распределение скоростей на участке течения «выходной» патрубков – массив сносящего потока» в канале. Параметры закрутки циркуляционно-продольного течения за счет вязкого трения довольно быстро полностью вырождаются на длине струи, равной 3–4 диаметрам патрубка.

Закрученный поток, взаимодействуя с течением реки, формирует траектории, зависящие от

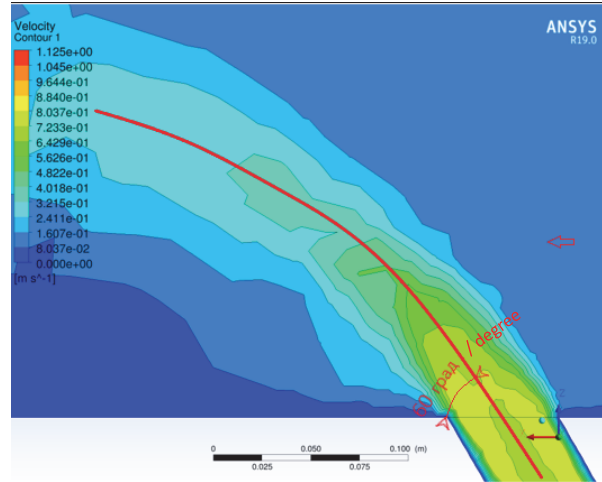
угла сопряжения водосброса с массивом воды в нижнем бьефе гидроузла.

При прямом угле сопряжения закрученный поток сохраняет свое направление на расстоянии, равном примерно трем диаметрам патрубка. Далее он получает отклонение в результате взаимодействия с продольным течением и достигает противоположной границы канала. При этом в

реальных условиях может происходить размыв береговой линии, что потребует проведения берегоукрепительных мероприятий. В районе выходного сечения патрубка и выхода закрученного потока в канал появляются две характерные области: область с большой по модулю скоростью располагается над осью потока, а область с почти нулевой скоростью – под осью.



а



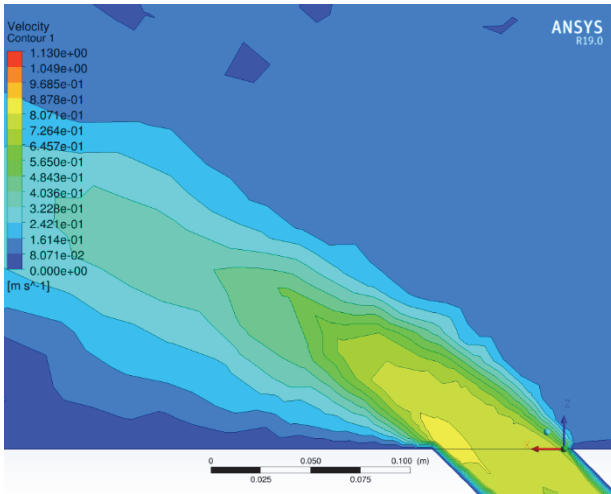
б

Рис. 10. Диаграммы распределения полных скоростей в горизонтальной плоскости $x-z$:

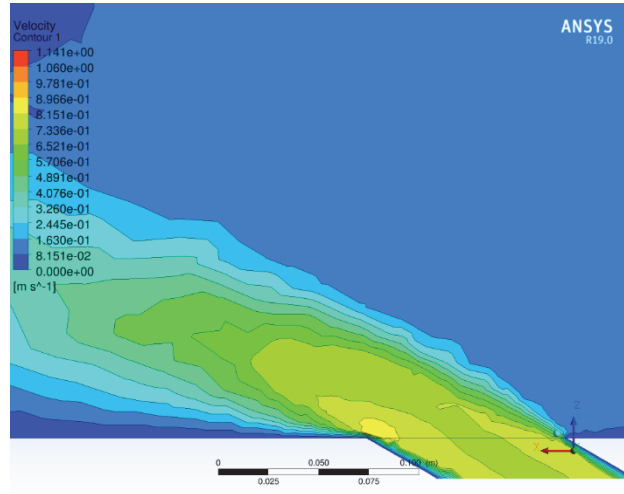
а – выход затопленного закрученного потока в движущийся массив под прямым углом; б – выход затопленного закрученного потока в движущийся массив воды под углом 60° ; угол образован стенкой канала и осью циркуляционно-продольного (закрученного) потока

Figure 10. Diagrams of total velocity distribution in horizontal $x-z$ plane:

а – 90° nozzle-stream angle flow; б – 60° nozzle-stream angle flow; angle is formed by channel wall and longitudinal axis of submerged swirling jet



а



б

Рис. 11. Диаграммы распределения полных скоростей в горизонтальной плоскости $x-z$:

а – выход затопленного закрученного потока в движущийся массив под углом 45° ; б – выход затопленного закрученного потока в движущийся массив воды под углом 30° ; угол образован стенкой канала и осью циркуляционно-продольного (закрученного) потока

Figure 11. Diagrams of total velocity distribution in horizontal $x-z$ plane:

а – 45° nozzle-stream angle flow; б – 30° nozzle-stream angle flow; angle is formed by channel wall and longitudinal axis of submerged swirling jet

При углах сопряжения 60° и 45° закрученный поток отклоняется от своей первоначальной тра-

ектории и не соприкасается с границами канала. Такое распространение потока является предпо-

читительным. При угле сопряжения 30° закрученный поток сильно отклоняется от первоначальной траектории таким образом, что его граница соприкасается с ближней границей канала.

С точки зрения минимизации влияния кинетической энергии закрученной струи на русло канала углы сопряжения 60° и 45° представляются предпочтительными. Поэтому для более подробного рассмотрения был выбран угол сопряжения 45° , для которого построены сравнительные графики распределения компонент скоростей по сечениям струи (см. рис. 5, а).

Выполнено сравнение результатов численного и натурного экспериментов. На рис. 12 и 13

показаны значения компонент v_x , v_y , v_z полной скорости в принятой ортогональной координатной системе $x - y - z$, полученные на физической модели и с помощью численного эксперимента. На представленных трех графиках зависимости значений компонент скорости в выбранных точках сплошной линией показаны результаты численного эксперимента, а пунктирными линиями – физического.

Сравнение результатов физического и математического экспериментов показали, что они достаточно хорошо совпадают. Отклонения составляют не более 7 %, что соответствует требованиям к погрешности результатов инженерных расчетов.

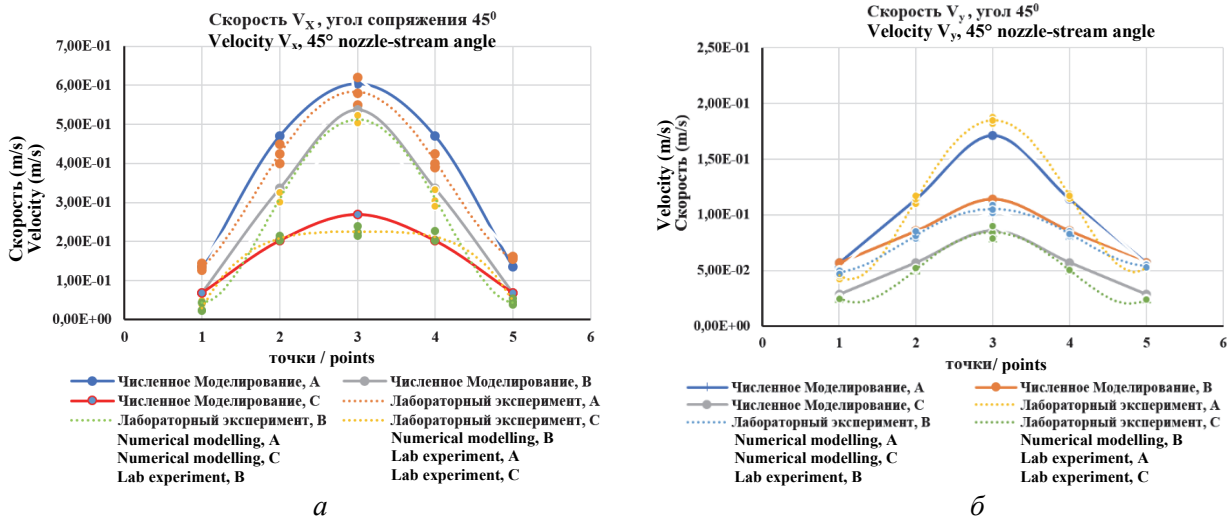


Рис. 12. Совмещенные графики распределения компоненты скорости по выбранным на физической модели точкам при угле сопряжения потоков 45° :

Figure 12. Combined graphs of velocity distribution over selected points in physical model at 45° nozzle-stream angle: а – компонента скорости v_x ; б – компонента скорости v_y

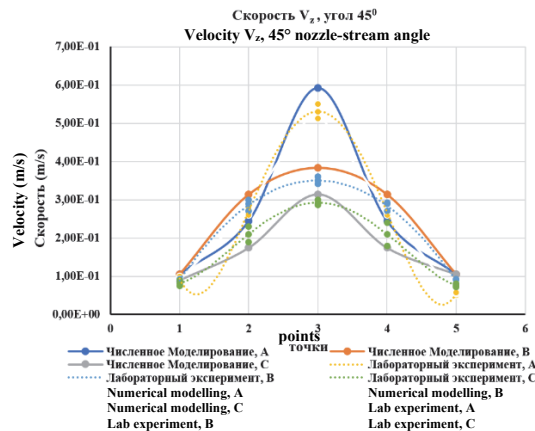


Рис. 13. Совмещенные графики распределения компоненты скорости v_z по выбранным на физической модели точкам при угле сопряжения потоков 45°
Figure 13. Combined graphs of velocity component v_z distribution over selected points in physical model at 45° nozzle-stream angle

Заключение

В выполненном исследовании реализован комплексный подход к решению гидравлической задачи сопряжения циркуляционно-продольного течения с массивом воды, имеющим продольное перемещение, который заключается в получении экспериментальной информации о течении с помощью физического и математического моделирования.

Исследовались различные режимы сопряжения двух потоков, отличающихся параметрами циркуляционно-продольного течения, углами взаимодействия и скоростями продольного течения.

Сравнение результатов расчетов течения численным методом показало хорошую сходимость с результатами, проведенными на физической модели. Невязка полученных данных двумя способами лежит в пределах допустимых для инженерных расчетов.

Верификация результатов математического моделирования с помощью физического эксперимента дает основание утверждать, что расчеты по выбранной программе Fluent ANSYS носят обоснованный и достоверный характер.

Выявлены отличия распространения криволинейной струи закрученного потока в массиве воды с относительной продольной скоростью. На основании полученных данных и характера распределения скоростей по длине струи установлено, что наибольший эффект от воздействия струи на границы водного массива наблюдается при углах установки выходного патрубка, равных 90 и 30°. При этих углах струя наиболее интенсивно воздействует на береговые откосы и гидротехнические сооружения нижнего бьефа, передавая им свою кинетическую энергию.

С точки зрения минимизации влияния кинетической энергии закрученной струи на русловую инфраструктуру нижнего бьефа углы сопряжения 60 и 45° представляются наиболее предпочтительными.

Список литературы

1. *Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А.* Гидротехнические сооружения: в 2 ч. Ч. 1. М.: Изд-во АСВ, 2008. 576 с.

2. *Слисский С.М.* Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986, 304 с.

3. *Бестужева А.С.* Гидроэкология: в 2 ч. Ч. 2. Природоохранные сооружения речной гидротехники. М.: Изд-во МГСУ, 2017. 196 с.

4. *Гурьев А.П., Ханов Н.В., Волгин Н.А.* Влияние конструктивных параметров водобойного колодца на гашение энергии потока // Гидротехническое строительство. 2015. № 4. С. 48–51.

5. *Аубакирова Ф.Х.* Гашение избыточной энергии потока в водосбросных сооружениях при различных режимах сопряжения бьефов // Природообустройство. 2015. № 1. С. 37–41.

6. *Prokofev V.A., Sudolskii G.A.* Hybrid simulation of hydrodynamics of hydroelectric power plant spillway structures // Power Technology and Engineering. 2022. Vol. 55. Pp. 714–719. <https://doi.org/10.1007/s10749-022-01421-8>

7. *Слива И.В., Ланин Г.Г.* Авария на водосбросных сооружениях гидроузла Оровилл. Гидротехническое строительство // Гидротехническое строительство 2017. № 11. С. 44–51.

8. *Волианик В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В., Чурин П.С.* Пропуск холостых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС: в 2 ч. Ч. 1 // Гидротехническое строительство. 2013. № 4. С. 51–56.

9. *Волианик В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В., Чурин П.С.* Пропуск холостых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС (часть 2) // Гидротехническое строительство. 2013. № 5. С. 32–40.

10. *Ахметов В.К., Волианик В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В.* Моделирование и расчет контрвихревых течений. М.: Изд-во МГСУ, 2012. 252 с.

11. *Брянская Ю.В., Маркова И.М., Остякова А.В.* Гидравлика водных и взвешенных потоков в жестких и деформируемых границах. М.: Изд-во АСВ, 2009. 264 с.

12. *Карелин В.Я., Кривченко Г.И., Мордасов А.П., Волианик В.В., Зуйков А.Л., Ахметов В.К.* Физическое и математическое моделирование гидравлических процессов при исследовании крупных гидроузлов комплексного назначения. Л.: ВНИИГ, 1989.

13. *Zhang W., Liu M., Zhu D. Z., Rajaratnam N.* Mean and turbulent bubble velocities in free hydraulic jumps for small to intermediate Froude numbers // Journal of Hydraulic Engineering. 2014. Vol. 140. Issue 11. Article 04014055. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000924](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000924)

14. *Mahzari M., Schleiss A.* Dynamic analysis of anchored concrete linings of plunge pools loaded by high velocity jet impacts issuing from dam spillways // Dam Engineering. 2010. Vol. 20. Issue 4. Pp. 307–327.

15. *Собин В.М., Ершов А.И.* Исследование структуры и гидравлического сопротивления турбулентного закрученного потока в коротких трубах // Вестник

АН БССР. Серия: Физические и энергетические науки. 1972. № 3. С. 56–61.

16. Sangwha Y. Exact solution of Navier – Stokes equations // *International Journal of Advanced Research in Physical Science*. 2019. Vol. 6. Pp. 39–43.

17. Vellando P., Puertas J., Bonillo J., Fe J. Finite element solution of the Navier – Stokes equations using a SUPG formulation // *Advances in Computational Engineering and Sciences*. Tech Science Press, 2000. Pp. 856–861.

18. Alam M., Saha S. Normal stress differences and beyond – Navier – Stokes hydrodynamics // *The European Physical Journal Conferences*. 2017. Vol. 140. Article 11014. <http://doi.org/10.1051/epjconf/20171401101>

19. Ramm A.G. Solution of the Navier–Stokes problem // *Applied Mathematics Letters*. 2019. Vol. 87. Pp. 160–164. <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.07.034>

20. Willis A.P. The open pipe flow Navier – Stokes solver // *Software X*. 2017. Vol. 6. Pp. 124–127. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.05.003>

21. Westerweel J. Advanced experimental methods for turbulent shear flows // *Proceedings of the 6th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*. Seoul; 2009. p. 1003–1009. <https://doi.org/10.1615/TSP6.1600>

22. Teresa P., Perez J.R., Szasz R.Z., Rodriguez M.A., Castro F. Numerical modelling of flow pattern for high swirling flow. *EPJ Web of Conferences*. 2015. Vol. 92. Article 02059. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159202059>

23. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб., 2001. 108 p.

References

1. Rasskazov LN, Orekhov VG, Aniskin NA. *Hydraulic structures* (part 1). Moscow: DIA Publ.; 2008. (In Russ.)

2. Slissky SM. *Hydraulic calculations of high-pressure hydraulic structures*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1986. (In Russ.)

3. Bestuzheva AS. *Hydroecology. Part 2. Environmental protection structures of river hydraulic engineering*. Moscow: MGSU Publ.; 2017. (In Russ.)

4. Gurev AP, Hanov NV, Volgin NA. The influence of design factors of the stilling basin on the energy dissipation of the. *Prirodoobustrojstvo*. 2015;(4):48–51. (In Russ.)

5. Aubakirova FK. Dissipation of excess flow energy in spillway structures under various conditions of pools conjugation. *Prirodoobustrojstvo*. 2015;(1):37–41. (In Russ.)

6. Prokofev VA, Sudolskii GA. Hybrid simulation of hydrodynamics of hydroelectric power plant spillway structures. *Power Technology and Engineering*. 2022;55: 714–719. <https://doi.org/10.1007/s10749-022-01421-8>

7. Sliva IV, Lapin GG. Accident at the spillway structures of the Oroville hydroelectric complex. Hydro-

technical construction. *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 2017;(11):44–51. (In Russ.)

8. Volshanik VV, Zuikov AL, Orekhov GV, Churin PS. Idling flow through the turbine unit of a medium- or high-pressure HPP (part 1). *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 2013;(4):51–56. (In Russ.)

9. Volshanik VV, Zuikov AL, Orekhov GV, Churin P.S. Idling flow through the turbine unit of a medium- or high-pressure HPP (part 2). *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 2013;(5):32–40. (In Russ.)

10. Akhmetov VK, Volshanik VV, Zuikov AL, Orekhov GV. *Modeling and calculation of counter-vortex flows*. Moscow: MGSU Publ.; 2012. (In Russ.)

11. Bryanskaya YuV, Markova IM, Ostyakova AV. *Hydraulics of water and suspended flows in rigid and deformable boundaries*. Moscow: ASV Publ.; 2009. (In Russ.)

12. Karelin VYa, Krivchenko GI, Mordasov AP, Volshanik VV, Zuikov AL, Akhmetov VK. *Physical and mathematical modeling of hydraulic processes in the study of large hydraulic units for complex purposes*. Leningrad: B.E. Vedenev VNIIG Publ.; 1989. (In Russ.)

13. Zhang W, Liu M, Zhu DZ, Rajaratnam N. Mean and turbulent bubble velocities in free hydraulic jumps for small to intermediate Froude numbers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2014;140(11):04014055. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000924](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000924)

14. Mahzari M, Schleiss A. Dynamic analysis of anchored concrete linings of plunge pools loaded by high velocity jet impacts issuing from dam spillways. *Dam Engineering*. 2010;20(4):307–327.

15. Sobin VM, Ershov AI. Investigation of the structure and hydraulic resistance of turbulent swirling flow in short pipes. *Bulletin of the Academy of Sciences of the BSSR. Series: Physical and Energy Sciences*. 1972;(3):56–61. (In Russ.)

16. Sangwha Y. Exact solution of Navier – Stokes equations. *International Journal of Advanced Research in Physical Science*. 2019;6:39–43.

17. Vellando P, Puertas J, Bonillo J, Fe J. Finite element solution of the Navier – Stokes equations using a SUPG formulation. *Advances in Computational Engineering and Sciences*. Tech Science Press; 2000 p. 856–861.

18. Alam M, Saha S. Normal stress differences and beyond – Navier – Stokes hydrodynamics. *The European Physical Journal Conferences*. 2017;140:11014. <http://doi.org/10.1051/epjconf/201714011014>

19. Ramm AG. Solution of the Navier – Stokes problem. *Applied Mathematics Letters*. 2019;87:160–164. <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.07.034>

20. Willis AP. The open pipe flow Navier – Stokes solver. *Software X*. 2017;6:124–127. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.05.003>

21. Westerweel J. Advanced experimental methods for turbulent shear flows. *Proceedings of the 6th International*

Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena. Seoul; 2009. p. 1003–1009. <https://doi.org/10.1615/TSFP6.1600>

22. Teresa P, Perez JR, Szasz RZ, Rodriguez MA, Castro F. Numerical modelling of flow pattern for high

swirling flow. *EPJ Web of Conferences*. 2015;92:02059. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159202059>

23. Belov IA, Isaev SA. *Modeling of turbulent flows*. St. Petersburg; 2001. (In Russ.)

Сведения об авторах

Орехов Генрих Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6900-2704, Scopus Author ID: 6602666140, eLIBRARI SPIN-код: 1166-7682; orehov_genrih@mail.ru

Щесняк Леонид Евгеньевич, директор центра аддитивных и порубежных технологий, Институт инновационных инженерных технологий, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-8075-9487; shchesnyak-le@rudn.ru

About the authors

Genrikh V. Orekhov, Doctor of Engineering Science, Professor of the Hydraulics and Hydraulic Engineering Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6900-2704, Scopus Author ID: 6602666140, eLIBRARI SPIN-code: 1166-7682; orehov_genrih@mail.ru

Leonid E. Shchesnyak, Director of the Additive and Edge Technology Center, Institute of Innovative Engineering Technologies, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8075-9487; shchesnyak-le@rudn.ru