

На правах рукописи



**Щесняк Леонид Евгеньевич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНО-ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ  
В ЗАДАЧАХ СОПРЯЖЕНИЯ ПОТОКОВ**

2.1.6 – Гидротехническое строительство, гидравлика и  
инженерная гидрология

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Научный руководитель

**Орехов Генрих Васильевич**

доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты

**Ханов Нартмир Владимирович**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева», Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н.Костякова, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений

**Дегтярёв Владимир Владимирович**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», заведующий кафедрой гидротехнического строительства, безопасности и экологии

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н.Костякова»

Защита состоится «21» ноября 2023 г., в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть»

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте [www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru).

Автореферат разослан «\_»\_\_\_\_\_2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Бестужева А. С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В практике гидротехнического строительства наряду с традиционными конструкциями водосбросных систем гидрозвулов всё чаще стали применяться сравнительно новые схемы водосбросов с закруткой потока. Такие конструкции получили название вихревые, поскольку они используют эффекты продольно-циркуляционных (закрученных) потоков. Водосбросы с закруткой потока предназначены преимущественно для использования при высоких напорах и скоростях течения воды. Потребность в использовании таких сооружений возникает при требовании защиты обтекаемых поверхностей от кавитационной эрозии или сопряжения сбрасываемого потока с массивом воды в нижнем бьефе. Последнее часто связано с необходимостью гашения кинетической энергии потока в пределах напорного водосбросного тракта, до выхода его в нижний бьеф. Конструкции водосбросов, использующих продольно-циркуляционные потоки, могут применяться и при регулировании сбросных расходов с исключением смены безнапорных и напорных гидравлических режимов течения воды в водосбросном канале.

Всё более широкое применение закрученных потоков жидкости и газа связано с целым рядом важных свойств, которыми обладают такие течения по сравнению с обычными осевыми потоками. Интенсивный тепло- и массообмен, происходящий в закрученных потоках, повышенная турбулентность течения, используются в устройствах и аппаратах в различных областях техники, в том числе и гидротехнике. Отечественными и зарубежными исследователями, наряду с разработками в других областях, проводились многочисленные эксперименты с закрученными потоками в инженерной гидравлике для применения их в гидротехнике, гидромелиорации, гидромашиностроении, гидротранспорте. Одним из наиболее интересных направлений в изучении поведения закрученных потоков явились исследования характеристик взаимодействующих закрученных потоков жидкости и газа.

К вихревым водосбросам можно отнести шахтные водосбросы или водосбросы, выполненные по горизонтальным схемам туннельного или трубчатого

типа с вихревым затвором, с тангенциальными или спиральными завихрителями, создающими в отводящем туннеле продольно-циркуляционное течение. Такие сооружения были, например, использованы в гидроузлах Тери (Индия), Компося (Китай), а также рассматривались на этапе проектирования, как один из вариантов, на Туполангском (Узбекистан), Рогунском (Таджикистан), Тельмамском (Россия) и Лидзяся (Китай) гидроузлах. В таких водосбросных системах гашение кинетической энергии происходит плавно на всей длине отводящего тракта. С помощью продольно-циркуляционных потоков, течение которых организовано определённым образом, можно интенсифицировать процесс гашения кинетической энергии сбросного потока. В этом случае гашение может происходить быстро, на очень коротком участке водосбросного канала.

Сопряжения выходных, концевых участков водосбросов туннельного или трубчатого типов может, в зависимости от компоновки гидроузла, происходить по-разному: в виде взаимодействия выходного потока с водобойными колодцами различной конструкции, отбросом струи с использованием трамплинов или в виде затопленной струи, выходящей в массив воды нижнего бьефа.

Работа любых водосбросных систем, в том числе систем, использующих продольно-циркуляционные течения, помимо прочих параметров, характеризуется также особенностью взаимодействия сбросного потока с нижним бьефом. Сопряжения концевых участков водосбросов туннельного или трубчатого типа может, в зависимости от компоновки гидроузла, происходить по-разному. Например, в виде взаимодействия выходного потока с водобойными колодцами различной конструкции, отбросом струи с использованием трамплинов или в виде затопленной струи, выходящей в массив воды нижнего бьефа.

В процессе работы вихревых водосбросов при различных гидравлических режимах может наблюдаться выход воды в нижний бьеф не только в виде осевого, но и в виде потока с его остаточной закруткой. В этих случаях представляются важными режимы сопряжения выходящего продольно-циркуляционного потока с движущимся массивом воды нижнего бьефа.

**Степень разработанности темы диссертации.** Циркуляционные и циркуляционно-продольные течения жидкостей и газов (закрученные потоки) широко используются в различных технологических процессах, сооружениях и установках. Изучению характеристик таких потоков посвящены работы многих исследователей: И.С. Громеки, Г.Н. Абрамовича, М.А. Гольдштика, Л.Г. Лойцянского, А.А. Халатова и других. Применениями закрученных потоков в практической гидротехнике занимались также М.В. Потапов, О.Ф. Васильев, А.Д. Альтшуль.

Эффекты, возникающие в продольно-циркуляционных течениях, были применены к водосбросным сооружениям гидроузлов (Г.И. Кривченко, С.И. Остроумов). Свое дальнейшее развитие эти идеи получили в трудах Г.И. Кривченко, Е.В. Квятковской, А.П. Мордасова, В.В. Волшаника, А.Л. Зуйкова, Н.В. Ханова, А.В. Шленева, Б.А. Животовского, Н.К. Пономарева, Г.В. Орехова, Е.М. Смирнова, а также в работах ряда зарубежных авторов. В результате проведённых исследований были получены данные, которые легли в основу создания вихревых водосбросных систем различной конструкции.

В настоящее время накоплен достаточно большой объём результатов исследований гидротехнических сооружений, использующих закрутку потока как на физических моделях (А.П. Мордасов, А.Л. Зуйков, В.В. Волшаник, Г.В. Орехов), так и с помощью математического моделирования и применения различных вычислительных программных комплексов (М.Р. Петриченко, Н.С. Харьков, В.К. Ахметов и др.). Большой вклад в исследование закрученных потоков аналитическим методом применительно к гидротехническим сооружениям внёс А.Л. Зуйков.

При этом проблемы сопряжения закрученных потоков с нижним бьефом изучены недостаточно, что послужило основанием для выбора тематики настоящего диссертационного исследования.

**Цель диссертационной работы:** Цель работы заключается в исследовании аналитическими, физическими и математическими численными методами гидравлических характеристик сопряжения продольно-циркуляционных тече-

ний с массивом воды нижнего бьефа.

**Задачи исследования:**

- выполнить гидравлический расчет закрученных турбулентных струй, выходящих из концевых сечений вихревых водосбросов под уровень нижнего бьефа в случае выпуска струи в неподвижное пространство, в спутный или сносный поток;

- провести на экспериментальном стенде физическое моделирование условий сопряжения нижнего бьефа с закрученной затопленной струей, выходящей из вихревого водосбросного сооружения, формирующего донный режим течения;

- выполнить численным методом математическое моделирование режимов сопряжения затопленной закрученной струи с водным потоком в нижнем бьефе и последующим определением гидравлических условий течения.

**Научная новизна:** работы состоит в следующем:

1. Получены экспериментальные данные, актуализирующие дальнейшие расчеты зоны сопряжения ( $L \leq 5d$ ) слабозакрученного потока с нижним бьефом.

2. Проведена валидация данных физического эксперимента путем сравнения с математической моделью.

3. Проведен гидравлический расчёт продольно-циркуляционного потока, выходящего из вихревого водосброса под уровень нижнего бьефа.

4. С помощью программного комплекса получены результаты численного эксперимента сопряжения затопленной циркуляционно-продольной струи с нижним бьефом.

**Объект исследования:** Объектом исследования является течение в нижнем бьефе гидроузлов, в составе которых предполагается установить водосбросные системы с использованием продольно-циркуляционных течений – вихревые водосбросы.

**Предмет исследования:** Предметом исследования являются гидравлические характеристики сложных струйных течений, образующихся в результате

сопряжения продольно-циркуляционных течений, выходящих из вихревых водосбросов и течений, сформировавшихся в нижнем бьефе.

**Теоретическая значимость результатов работы:** В работе автором рассматривается аналитический подход к решению задачи сопряжения затопленного продольно-циркуляционного струйного течения с массивом воды нижнего бьефа. Аналитический метод позволяет получить основные параметры продольно-циркуляционного течения, сформировавшегося в вихревых водосбросных системах. Наряду с этим в работе использованы два других способа получения кинематических характеристик затопленной закрученной струи, взаимодействующей с массивом воды нижнего бьефа: это физическое моделирование и численный эксперимент с использованием программного комплекса. Объединение трёх указанных способов современного исследования гидравлического явления позволяет получить обоснованные и надёжные результаты.

**Практическая значимость результатов работы:** Практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы при проектировании и строительстве гидроузлов, в состав которых входят вихревые водосбросные системы, на выходе которых формируются продольно-циркуляционные течения, а также позволят повысить точность гидравлических расчетов таких сооружений.

**Степень достоверности результатов исследования:** Надёжность и достоверность полученных данных обусловлена применением разных подходов к организации проведения исследований. В работе использованы три способа получения искомых параметров сложного течения, связанного с сопряжением двух потоков. Как отмечалось выше, это аналитический, физический и математический численный способы получения необходимой информации о физическом явлении. Физическое и численное моделирование гидравлических явлений являются приближёнными способами. В настоящее время, для получения достоверных данных о сложном механическом явлении используются оба указанных подхода, которые дополняют друг друга, позволяя получить надёжные и достоверные данные.

**Методология и методы исследования.** Методологические основы настоящей работы базируются на опыте предыдущих исследований сложных течений жидкости, как закрученные потоки. Авторы некоторых, наиболее значимых работ, отражающие различные вопросы гидродинамики закрученных потоков и внедрения их в практику, перечислены выше. Диссертационная работа построена на применении основных методов, с помощью которых в настоящее время проводятся гидравлические исследования. Это методы математического (численного) и физического моделирования дополняют друг друга. При исследовании гидравлических явлений физическими методами особую роль играют методы теории подобия гидромеханических процессов.

**Положения и результаты, выносимые на защиту:**

- результаты гидравлического расчёта продольно-циркуляционного потока, выходящего из вихревого водосброса под уровень нижнего бьефа;
- результаты физического моделирования сопряжения закрученной затопленной струи в массив воды нижнего бьефа при разных углах и скоростях взаимодействия;
- результаты численного эксперимента сопряжения затопленной продольно-циркуляционной струи с нижним бьефом с помощью программного комплекса.

**Личный вклад автора** заключается в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в проведении физического эксперимента с использованием современных методов исследования потоков и лабораторного оборудования для их моделирования, построении сравнительной модели данных, полученных путем физического эксперимента, с результатами, полученными с помощью математического моделирования, анализе и обобщении научных работ по тематике диссертации, и разработке методики расчета гидравлических характеристик струи, выпускаемой под уровень нижнего бьефа.

**Апробация работы.** Апробация результатов диссертации заключалась в публикации статей и представлении автором основных положений и материа-



лов исследования на всероссийских и международных научно-практических конференциях:

- 2-nd International Congress of Scientists 2018 (ICS 2018), 03-05 May 2018. Moscow, Russia;

- International Scientific and Practical Conference Engineering Systems 2019 (ISPACES 2019), 4-5 April 2019. Moscow, Russia;

- научно-технических семинарах департамента «Строительство» инженерной академии РУДН 2017–2019 гг.;

- IV Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства», Москва, НИУ МГСУ, 26 мая 2021 г.

**Публикации по результатам исследований.** Материалы диссертации достаточно полно изложены в 8 научных публикациях, из которых 3 работы опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий), и 3 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и других научных журналах и изданиях.

#### **Структура и объём работы.**

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Объем работы: 220 страниц машинописного текста, 122 рисунка, 24 таблицы. Список литературы включает 135 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, дана оценка степени её разработанности, определены цели и задачи исследований, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, изложены методы исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности и апробации результатов.

**В первой главе** приведено обоснование проблематики представленной научной работы. В состав любого гидроузла входят водосбросные сооружения различных типов и конструкций, предназначенные для сброса из верхнего бьефа в нижний бьеф или в бассейн соседней реки излишков воды в период прохождения паводков. Классификация сбросных сооружений и терминология, применяющаяся для их описания весьма разнообразна. Она зависит от напора, действующего на сооружения, способа управления сбрасываемыми расходами, заглубления водоприёмной части водосброса под уровень воды в верхнем бьефе, по конструкции, по гидравлическому режиму течения и другим отличиям. Различаются водосбросные системы применёнными способами гашения кинетической энергии потока. В главе дан обзор конструкций водосбросных систем и способов гашения избыточной кинетической энергии сбросных потоков.

В вихревых водосбросах используются продольно-циркуляционные потоки воды, то есть потоки, имеющие помимо продольной компоненты скорости течения ещё и тангенциальную составляющую. Такие сооружения называют также водосбросы с закруткой потока. Водосбросы с закруткой потока предназначены в основном для использования при высоких напорах (свыше 50 м), когда по условиям защиты обтекаемой поверхности от кавитационной эрозии (при скоростях потока более 20-25 м/с) или сопряжения потока с нижним бьефом требуется промежуточное гашение кинетической энергии потока в пределах глубинного водосбросного тракта. Водосбросные схемы с закруткой потока используют и тогда, когда необходимо заполнить водой всё сечение водосбросного канала (например, туннеля) или исключить смену режимов (безнапорного и напорного) при регулировании сбросных расходов. В вихревых системах гашение энергии осуществляется плавно на всей длине отводящего тракта. В контрвихревых схемах гашение энергии происходит в весьма ограниченной камере гашения на очень небольшой длине проточного тракта. Длина такого участка может составлять несколько диаметров цилиндрической камеры гашения, причём на этой короткой длине может гаситься до 95% всей кинетической энергии сбросного потока.

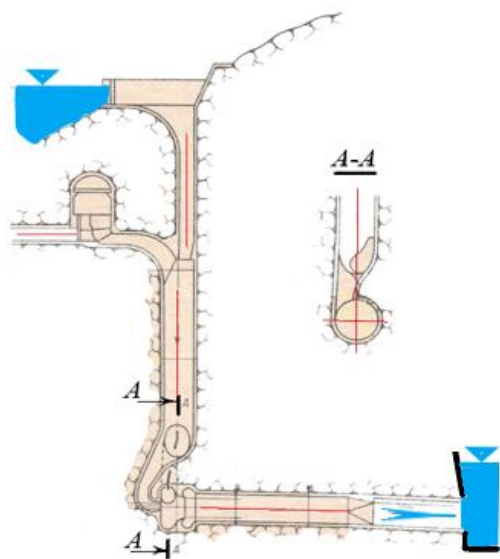


Рисунок 1. Контрвихревой водосброс на параметры:  $Q = 3380 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $H = 150 \text{ м}$ ; вертикальная бетонная шахта диаметром 16 м; диаметр камеры

Поэтому контрвихревые схемы могут иметь короткий выходной участок, который непосредственно сопрягается с нижним бьефом. Как вихревые, так и контрвихревые схемы допускают выход закрученного потока под уровень нижнего бьефа с остаточной циркуляцией. Закрученный поток может выходить в нижний бьеф в виде затопленной струи как при штатной работе водосбросной системы при регулировании расхода, так и в случае отказа узлов или конструкций, обеспечивающих штатную работу. В последнем случае в нижний бьеф может выходить поток с большим значением циркуляции, в том числе и в режиме затопленной струи (рисунок 1).

**Во второй главе** рассматриваются и анализируются аналитическим путём геометрические и кинематические характеристики затопленной закрученной струи, выходящей из вихревого водосброса под уровень нижнего бьефа. При этом возможны различные условия выпуска затопленной закрученной струи: в неподвижный массив нижнего бьефа, в спутный поток, в сносящий поток нижнего бьефа под различными углами к оси закрученного потока. В данном разделе работы аналитически определяются параметры закрученной затопленной струи в условиях неподвижного массива воды, в сносящем и спутном потоках нижнего бьефа. Получены безразмерные профили закрученной струи для осевой и продольной компонент скорости течения, при этом форма профиля зависит от степени закрутки (рисунок 2). Исходными данными для расчёта являются: средняя осевая скорость в начальном сечении затопленной закрученной струи –  $U_0$ , остаточная закрутка сбросного потока на выходе из водосброса

–  $\Pi$  и диаметр закрученной струи в начальном сечении (в выходном сечении водосброса) –  $d$ .

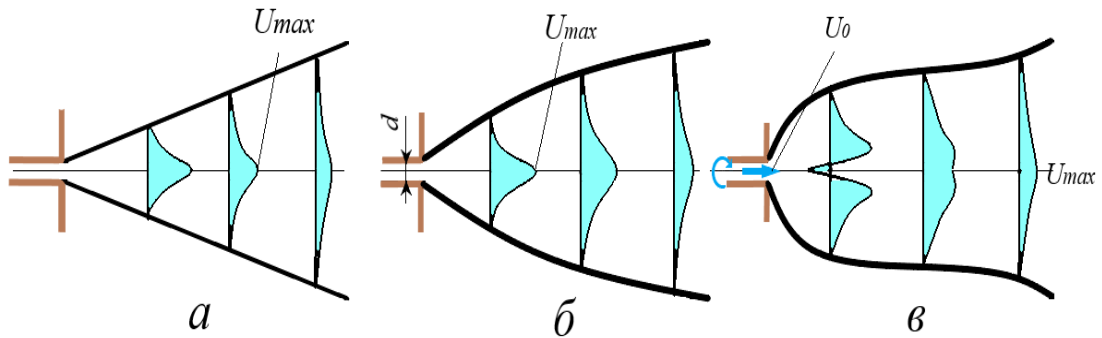


Рисунок 2. Профиль затопленной закрученной струи с различной степенью закрутки в неподвижном водном массиве: *а* – незакрученная (осевая) затопленная струя; *б* – слабозакрученная; *в* – сильнозакрученная;  $U_{max}$  – расходная скорость на оси

Расчёт позволяет определить параметры закрученного потока в неподвижном пространстве на всей длине закрученной струи.

Наибольшее внимание уделено режимам распространения закрученной затопленной струи в сносящем потоке нижнего бьефа. При таком сопряжении прямолинейная ось струи искривляется в сторону направления течения реки. На основе аналитических обобщений Б.А. Животовского и экспериментальных данных автора была установлена закономерность изменения продольной скорости вдоль оси затопленной струи  $U_{max}$

$$\frac{U_{max}}{U_0} = 0,14 \left( 1 - \ln \frac{y}{y_{30d}} \right)$$

где  $y$  – координата, направленная вдоль оси выходящего закрученного потока в плане,  $y_{30d}$  – параметр, соответствующий длине в 30 диаметров водосброса.

Для сносящего потока устанавливается очертание оси струи и определяются ее параметры в поперечных сечениях на основе использования приведенных методов расчета закрученной струи применительно к вихревым водосбросам.

На рисунке 3 показан результат расчёта траектории осевой линии затопленной закрученной струи в условиях её сопряжения со сносящим потоком.

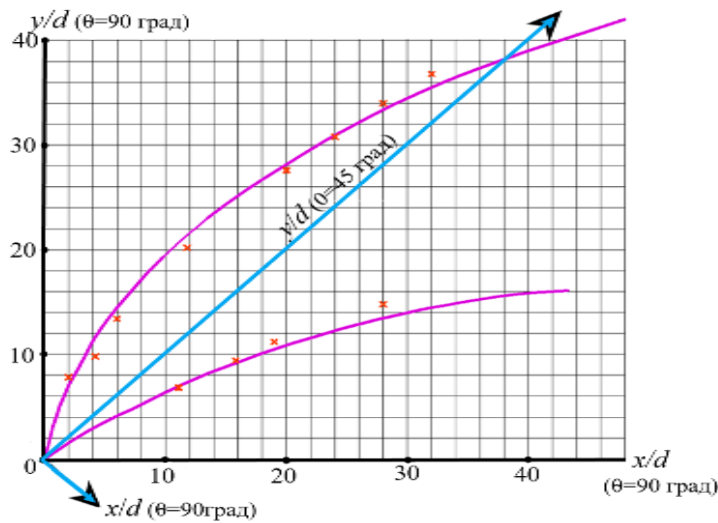


Рисунок 3. Траектория затопленной закрученной струи для сносящего потока в нижнем бьефе при  $\theta=90$  и 45 градусов

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям сопряжения затопленной закрученной струи, выходящей из водосбросной системы вихревого типа в сносящий поток воды в нижнем бьефе. Экспериментальные исследования автора были проведены в гидравлической лаборатории Российского университета дружбы народов. Установка представляла собой гидравлический лоток прямоугольного сечения с прозрачными стенками и водовод, который крепился к боковой стенке лотка. Боковой водовод имитировал выход закрученного потока в нижний бьеф при работе вихревого водосброса.

Закрученный поток формировался в круглоцилиндрическом канале (патрубке) перед его выходом в движущийся массив воды в гидравлическом лотке. Внутри патрубка был установлен завихритель в виде четырёхзаходного шнека. Закрученный поток выпускался в движущийся массив воды в гидравлическом лотке под разными углами:  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $30^\circ$  градусов по отношению к вектору расходной скорости в лотке (рисунок 4).

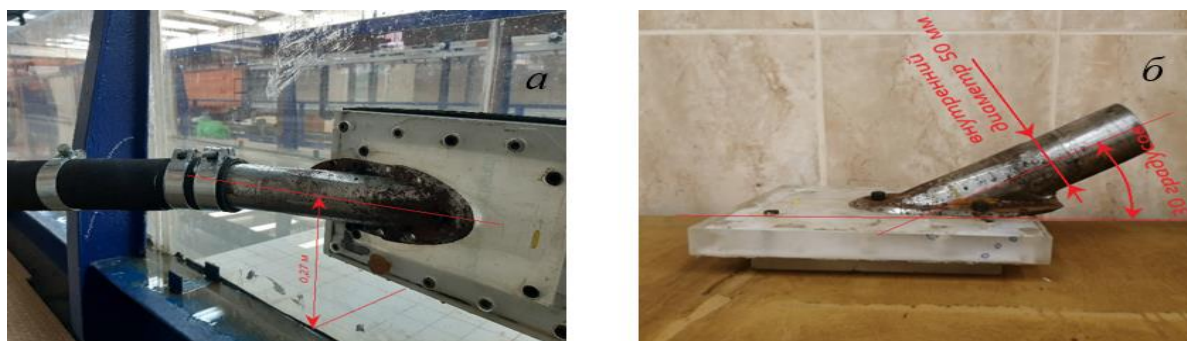


Рисунок 4. Модель цилиндрического канала с закручивающим устройством внутри, прикреплённая к боковой стенке гидравлического лотка. Закручивающее устройство шнекового типа находится внутри канала

В качестве закручивающего устройства применены завихрители шнекового типа, показанные на рисунке 5. Для определения контура границ растекания закрученной струи в гидравлическом лотке в проточную часть патрубков подавалось красящее вещество через специальные каналы с подбором концентрации.

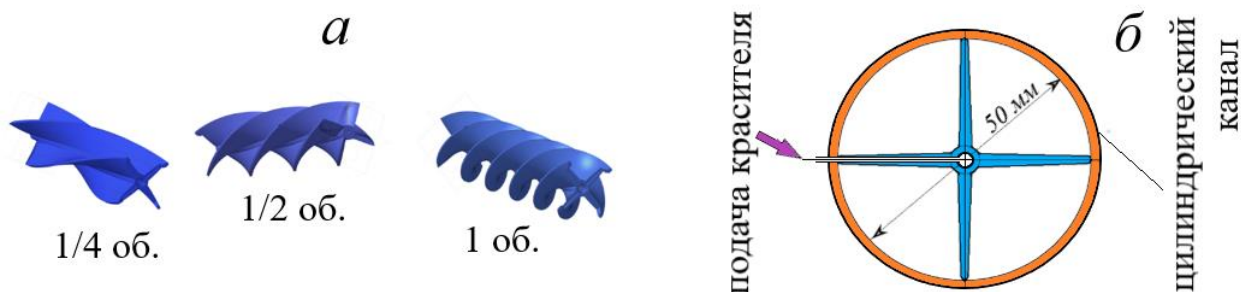


Рисунок 5. Модели закручивающих устройств: а – шнеки 1/4, 1/2 и 1 оборот крыльчатки; б – поперечное сечение канала с установленным шнековым завихрителем

Границы затопленной струи определялись визуально с помощью предварительно подкрашенной закрученной струи, которая формировала в текущей воде гидравлического лотка факел распыла затопленной струи (рисунок 6).

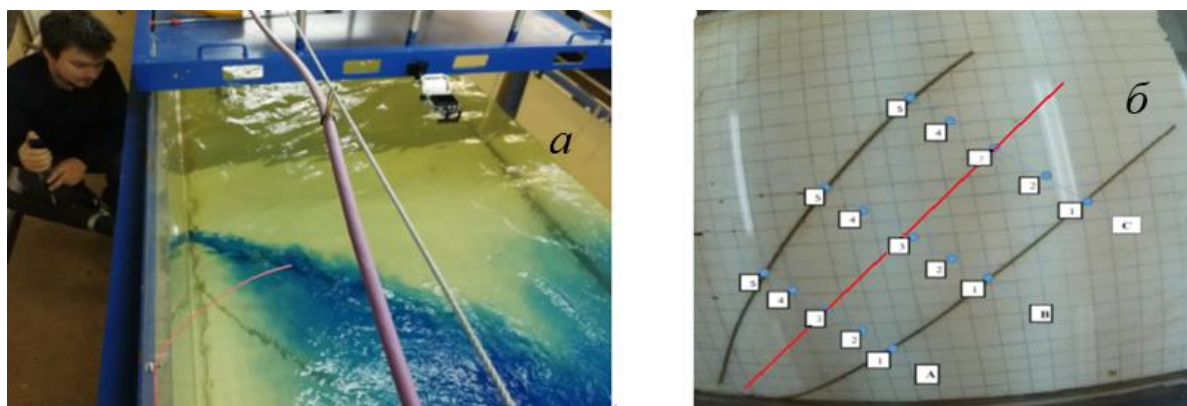


Рисунок 6. Элементы физического эксперимента: *а* – выпуск подкрашенного закрученного потока в движущийся массив воды в гидравлическом лотке с образованием затопленной струи; *б* – координатная ортогональная сетка, нанесённая на дно гидравлического лотка.

Измерение скоростей потока в области затопленной закрученной струи выполнялось ультразвуковым доплеровским измерителем скорости течения 3D FlowTracker2 LAB (рисунок 7). Вся измерительная система крепилась на специально изготовленной подвижной платформе, которая опиралась на стенки лотка и позволяла перемещать измерительную точку прибора (точка *М* на рисунке 7, б) в трёх взаимно-перпендикулярных направлениях: *X*, *Y* и по высоте *Z*.

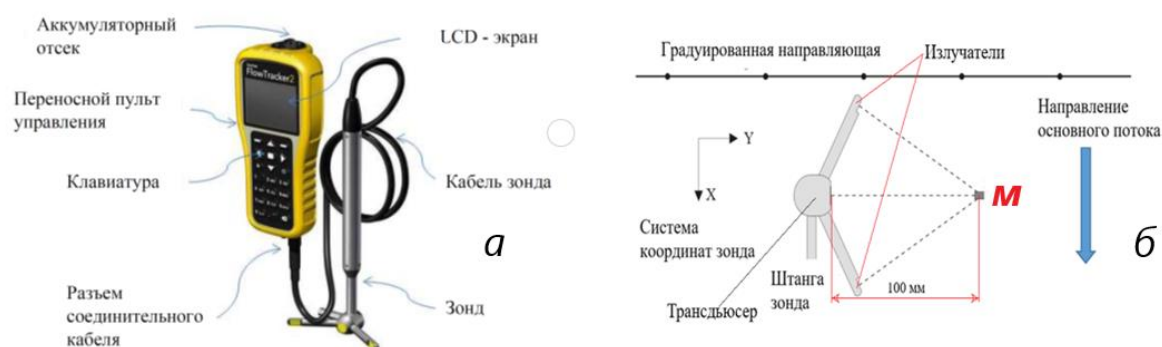


Рисунок 7. Измеритель скорости; *а* – общий вид ультразвукового доплеровского измерителя скорости течения воды 3D FlowTracker2 LAB. *б* – схема измерения скорости потока ультразвуковым измерителем скорости

Графики компонент полной скорости приведены на рисунке 8.

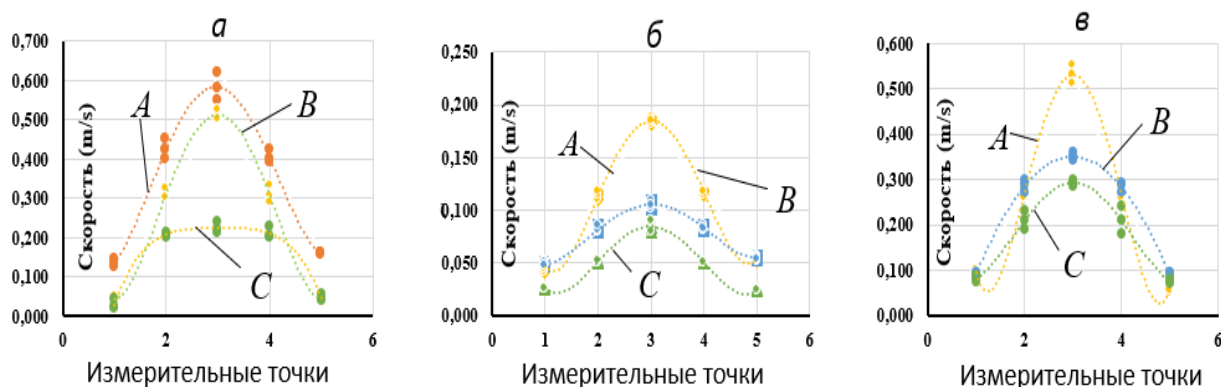


Рисунок 8. Совмещенные графики распределения компонент скорости. Угол сопряжения потоков 45 градусов: *a* – компонента скорости  $V_x$ ; *б* – компонента скорости  $V_y$ ; *в* – компонента скорости  $V_z$ ; *A*, *B* и *C* – сечения на рисунке 6, *б*

**В четвёртой главе** приводятся математические модели гидромеханики, описываются современные методы численного моделирования.

В современных программных комплексах для описания турбулентных течений замыкание расчётной системы уравнений производится с помощью основных трёх моделей турбулентности. *k*- $\epsilon$  модель в настоящее время является наиболее популярной для описания турбулентных течений и часто используется в инженерных расчётах.

Для её описания вводят помимо кинетической энергии турбулентных пульсаций  $k = \overline{v'_i v'_i} / 2$  еще одну функцию, характеризующую эти пульсации – удельную диссипацию

$$\epsilon = \nu_T \sum_{i,k} \overline{\frac{\partial v'_i}{\partial x_k} \frac{\partial v'_i}{\partial x_k}}$$

Здесь  $v'_i$  – пульсационная составляющая скорости потока. Турбулентная вязкость определяется как  $\nu_T = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ ,  $C_\mu = 0,009$ .

Рассмотрена задача по исследованию полей скоростей потока как в области выходной части вихревого водосброса, где формируется закрученная струя, так



и в области сопряжения закрученной струи со сносящим потоком нижнего бьефа – затопленной свободной струи. Для расчётов были использованы условия и геометрические характеристики, применённые для физической модели, созданной автором настоящей работы и описанной в главе 3. Выполнена серия расчётов с различными углами входа затопленной закрученной струи в движущийся поток воды в гидравлическом лотке, имитирующим массив воды нижнего бьефа.

На рисунке 9, а показана геометрия модели, на рисунке 9, б границы расчётной области и её дискретизация. Оси координат показаны на этом же рисунке.

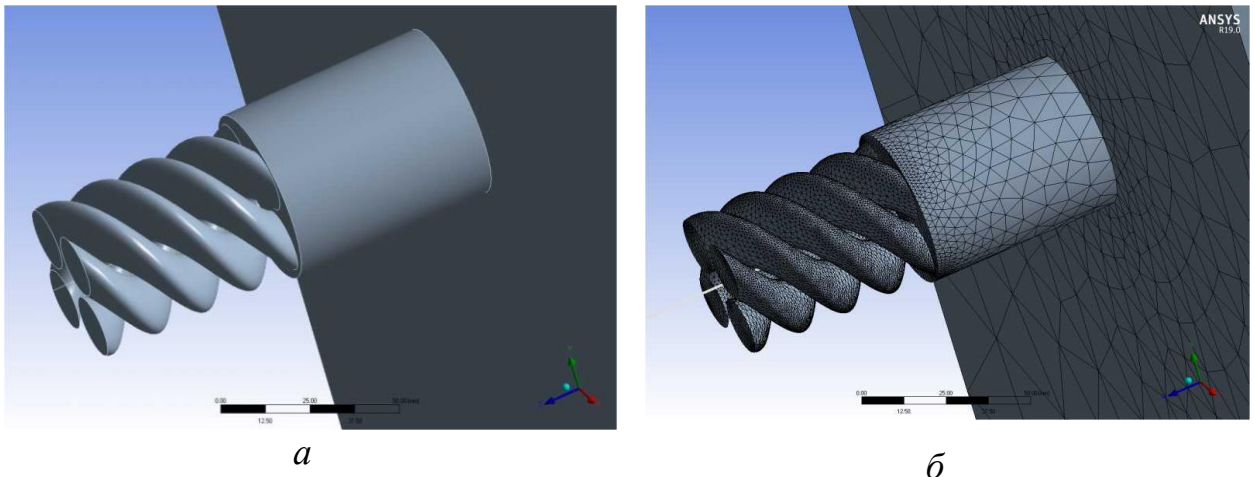


Рисунок 9. Расчётная модель; *а* – схема течения, формируемая закручивающим устройством в виде четырёхзаходного непрерывного шнекового завихрителя; *б* – дискретизация расчётной области с помощью тетраэдров

Сходимость оценивается по невязкам уравнений модели, например, для  $k$ - $\varepsilon$  –модели по невязке уравнения неразрывности, трем уравнениям для скорости, уравнения для  $\varepsilon$  и уравнения для  $k$ . По умолчанию в Ansys версии R 19.0 используется абсолютный критерий сходимости: счет останавливается, когда невязки становятся меньше  $10^{-3}$ .

В работе рассмотрены четыре варианта сопряжения продольно-циркуляционного (закрученного) потока с движущимся массивом воды в гидравлическом лотке (нижнем бьефе): закрученный поток перпендикулярен к течению в нижнем бьефе; закрученный поток сопрягается с нижним бьефом под углом 60 градусов; закрученный поток сопрягается с нижним бьефом под углом 45 градусов; закрученный поток сопрягается с нижним бьефом под углом 30 градусов.

В результате численных экспериментов получены поля скоростей затопленной струи. На рисунке 10 в качестве примера показаны результаты расчётов для углов сопряжения потоков  $\theta = 90^\circ$  и 60 градусов.

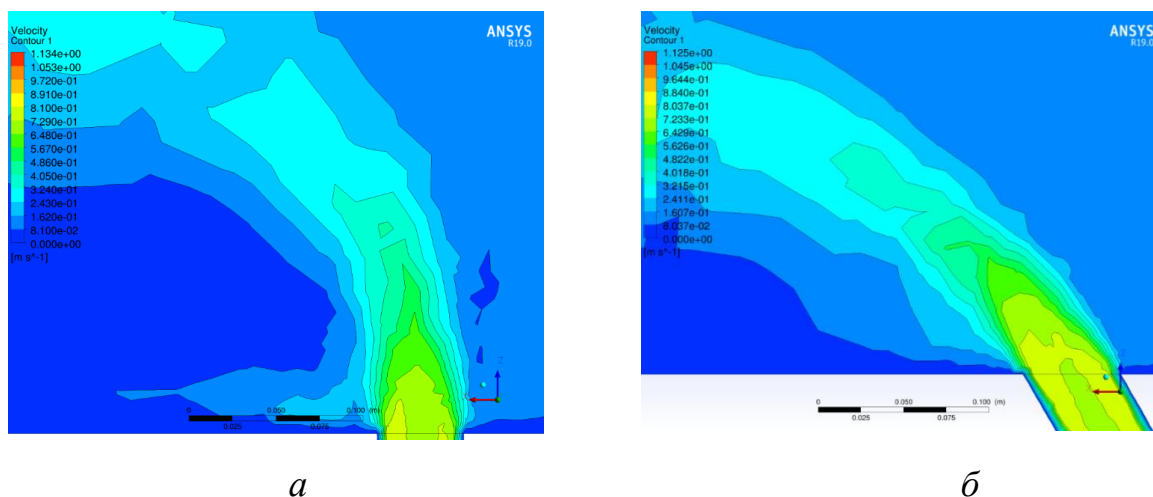


Рисунок 10. Распределение результирующего вектора скорости  $V$ ;  
*a* – угол сопряжения закрученного потока и сносящего 90 град.; *б* – тоже, 60 град.

В работе было выполнено сравнение результатов численного и физического экспериментов. Некоторые примеры этих сравнений приведены на рисунке 11. Информация представлена в виде совмещённых графиков распределения скоростей по выбранным точкам при лабораторном эксперименте в створах *A*, *B* и *C* (см. главу 3).

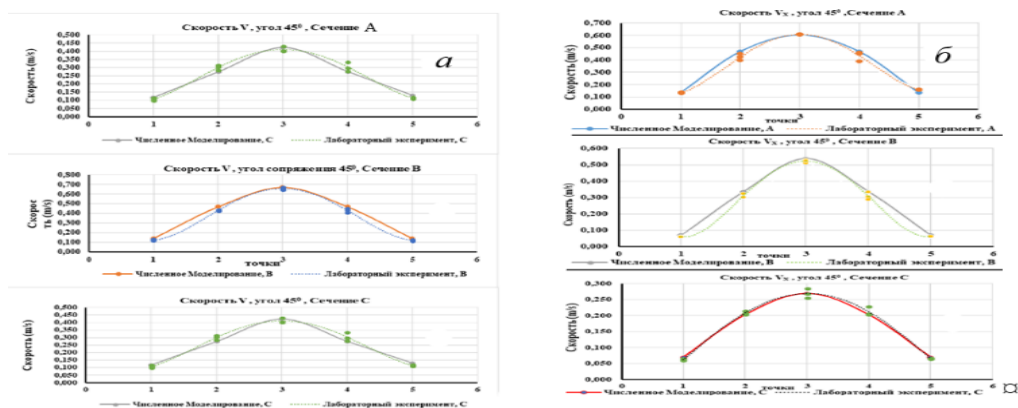


Рисунок 11. Сравнительные графики распределения результирующей скорости  $V$  в сечениях. Угол сопряжения потоков  $45^\circ$ :  $a$  – значения результирующей скорости в сечениях  $A$ ,  $B$  и  $C$ ;  $b$  – значения компоненты скорости  $V_x$  в сечениях  $A$ ,  $B$  и  $C$

Погрешности значений эксперимента и расчётных данных для выбранных точек для полной скорости лежит в диапазоне  $3,64 \div 13,35$  %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявленная проблематика диссертационной работы показала, что при использовании вихревых водосбросов возможно несколько вариантов гашения кинетической энергии, в том числе выход закрученного потока под уровень нижнего бьефа.

2. В результате выполненных теоретических исследований получены результаты гидравлического расчёта продольно-циркуляционного потока, выходящего из вихревого водосброса под уровень нижнего бьефа. Определены базовые характеристики затопленной закрученной струи в виде характеристик для условий ( $U_p=0$ ) струи в безграничном пространстве, включающие распределение максимальной продольной скорости на оси струи и скорости по поперечным сечениям струи. Уточнены базовые характеристики струи путем прибавления к продольной скорости струи компоненты скорости воды нижнего бьефа  $U_p \cos \theta$ .

3. Кроме того, получены очертания криволинейной оси струи, которая принимается за координатную ось без изменения масштаба длины и ширины

струи в плане по требуемой скорости на границе струи  $U_{гр}/U_0$  с помощью профилей продольной скорости в поперечном сечении струи (рекомендуемые значения  $U_{гр}/U_0=0.05\div 0.1$ ).

4. В диссертации представлены результаты физического моделирования сопряжения закрученной затопленной струи в массив воды нижнего бьефа при разных углах и скоростях взаимодействия. При изучении сложных гидравлических явлений важное место занимает физическое моделирование, которое позволяет получить необходимые данные в лабораторных условиях с помощью экспериментального стенда.

5. Для проведения лабораторных исследований был создан экспериментальный стенд, состоящий из двух блоков. Первый блок моделировал закрученный поток, который выпускался в водный массив и сопрягался с течением в гидравлическом лотке. Этот блок включал напорный трубопровод с насосом и модель закручивающего устройства. Второй блок имитировал поток воды в нижнем бьефе. Этот блок включал открытый гидравлический лоток и необходимую инфраструктуру для замкнутой работы системы.

6. С целью получения продольно-циркуляционного течения в цилиндрическом канале изготовлено закручивающее устройство, выполненное из пластика. Закручивающее устройство в виде четырёхзаходных шнеков изготовлено на 3D принтере. Было выполнено три типа закручивающих устройств одного диаметра, отличающихся шагом спиральной закрутки.

7. Разработана авторская методика проведения эксперимента с использованием измерителя скорости течения с помощью ультразвукового доплеровского измерителя скорости, который мог перемещаться в толще воды по трём ортогональным координатам. Массив данных получен путём разбиения всего измерительного объёма на контрольные точки.

8. Анализ условий физического моделирования установившихся вязких закрученных потоков показал, что корректная система их динамического подобия ограничивается четырьмя критериями:

$$Re \geq Re_{ГР}, Fr = \frac{V^2}{gR} = idem, Eu = \frac{P_0}{\rho V^2} = idem, Ai = \frac{M_i}{2R_{Гi}I_i} = idem.$$

9. В результате проведённого эксперимента получены кинематические характеристики затопленной закрученной струи в сносящем потоке. На основе полученных экспериментальных данных построены графики распределения скорости течения для разных углов сопряжения закрученной затопленной струи с потоком воды в лотке.

10. Выполнены расчёты сопряжения затопленной циркуляционно-продольной струи с нижним бьефом с помощью программного комплекса. Дан обзор основных моделей турбулентного течения. Разработана модель сопряжения циркуляционно-продольного течения с движущимся массивом воды в нижнем бьефе, которая реализована в системе Ansys Fluid. Показано, что среди линейных RANS-моделей имеется, по крайней мере, две –  $k-\varepsilon$  – модель и SST  $k-\omega$  – модель, пригодные для моделирования сопряжения затопленной закрученной струи с движущимся транзитным потоком. По результатам выполненного анализа сходимости моделей, реализованных в ПК Ansys R 19.0, пакет Fluent, установлено, что для решения поставленной задачи могут быть использованы: стандартная  $k-\varepsilon$  – модель и SST  $k-\omega$  – модель. Обе эти модели обеспечивают сходимость решения. При этом SST  $k-\omega$  – модель обеспечивает монотонную сходимость при меньшем числе итераций. Применение псевдо переходного решателя, реализованного в новых версиях Ansys Fluent, позволило ускорить процесс сходимости для поставленной задачи почти в три раза.

11. Выполнено сравнение результатов гидравлического расчета, полученного по моделям  $k-\varepsilon$  и SST  $k-\omega$ , показавшее, что характер течения и его числовые параметры совпадают. Заметим, что полученные результаты являются автомодельными по числу Рейнольдса для  $Re = (1,5 \div 15) \times 10^4$  и моделям турбулентности  $k-\varepsilon$  и SST  $k-\omega$ . В дальнейших расчетах была использована стандартная  $k-\varepsilon$  – модель, как хорошо зарекомендовавшая себя в исследованиях, выполненных рядом авторов.

12. Результаты численных экспериментов продемонстрировали, что существует диапазон углов сопряжений вихревого водосброса с нижним бьефом, позволяющий минимизировать негативное влияние закрученных потоков на берега и русло реки, а также инженерные сооружения гидроузла. Рекомендуемые углы сопряжения должны находиться в диапазоне  $45 \div 60$  градусов.

13. Для верификации построенной модели автором проведен ряд лабораторных экспериментов по определению компонент скоростей, а также закономерностей распространения закрученных потоков в течение нижнего бьефа. Сравнение данных, полученных на физической модели, с данными численного эксперимента показали, что совпадение лежит в диапазоне  $4 \div 13$  %, что является хорошо согласующимся результатом.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Основное направление дальнейших исследований связано с актуализацией и распространением полученных данных лабораторного и численного экспериментов в рамках расчетно-теоретического обоснования проектных решений и их сравнении с натурными данными на реальных гидротехнических сооружениях.

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»:**

1. Пономарев Н.К., Щесняк Л.Е. К вопросу о гидравлическом расчете основных параметров продольно-циркуляционных течений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Том 19. №1. С. 59-66. DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-1-59-66.

2. Пономарев Н.К., Щесняк Л.Е. Сопряжение вихревого водосброса с нижним бьефом путем отброса струи // Строительная механика инженерных

конструкций и сооружений. 2018. Том 14. №2. С. 142-153. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-2-142-153

3. Синиченко Е.К., Грицук И.И., Щесняк Л.Е. Современные тенденции развития оборудования, снижающего вредные колебания давления в трубопроводных системах // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2018. Том 19. №2. С. 228-234. DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-2-228-234

**Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science:**

4. Evgeniy K. Sinichenko, Ilya I. Gritsuk, Fedor V. Rekach, Leonid E. Schesnyak. Discharge Curves  $Q=f(H)$  as an Active Factor of Riverbed-Forming Processes // Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences, 2019. vol. 1s. pp. 491-498. [http://www.journalimcms.org/special\\_issue/discharge-curves-qfh-as-an-active-factor-of-riverbed-forming-processes/](http://www.journalimcms.org/special_issue/discharge-curves-qfh-as-an-active-factor-of-riverbed-forming-processes/) DOI: 10.26782/jmcms.2019.03.00049

5. Schesnyak L.E. Modeling of the conjugation of vortex flows with downstream in ANSYS // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 675(1), 012026. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/675/1/012026>

6. Boumazza, B., Chekushina, T.V., Vorobyev, K.A., Schesnyak, L.E. Assessment of Water Quality in Groundwater, Surface and Spring Water in Phosphorite Mining Area of Tebessa (Algeria) // Journal of Environmental Accounting and Management, 2023, 11(1), pp. 23–39. DOI:10.5890/JEAM.2023.03.002

**Статьи и тезисы, опубликованные в других научных журналах и изданиях:**

7. Орехов Г.В., Щесняк Л.Е. Сопряжения закрученного потока с продольным течением // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2022. №4. Том 23. С. 322-335. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-322-335>

8. Щесняк Л.Е. Моделирование продольно-циркуляционных течений при сопряжении с нижним бьефом в условиях высоких напоров // В сборнике материалов конференции «Современные проблемы гидравлики и гидротехническо-

го строительства». М.: НИУ МГСУ, 2021. С. 99-100.

<https://repository.rudn.ru/ru/records/article/record/79105/>