

На правах рукописи



Скрипкин Сергей Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ
ОДНО- И ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЯХ В ЭЛЕМЕНТАХ
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГИДРОТУРБИНЫ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск, 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук Куйбин Павел Анатольевич

Официальные оппоненты:

Вараксин Алексей Юрьевич, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, зав. Лабораторией №8 физического моделирования двухфазных течений, г. Москва.

Никулин Виктор Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующей лабораторией вихревых движений жидкости и газа, ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 24 марта 2021 года в 9 часов 30 минут при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теплофизики СО РАН, www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 003.053.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор

Кузнецов Владимир
Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При работе гидротурбин в неоптимальных режимах, необходимых для регулирования электрической сети или при запуске гидроагрегатов поток за рабочим колесом на входе в отсасывающую трубу остается закрученным, что может приводить к формированию в нем концентрированных вихревых структур в форме спирального или мультиспирального прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Наличие ПВЯ в проточном тракте снижает эффективность и стабильность работы гидроагрегата. Совпадение частот пульсаций давления вызванных ПВЯ с собственными частотами проточного тракта может приводить к негативным последствиям, вплоть до выхода оборудования из строя. При взаимодействии с коленом отсасывающей трубы возникают синхронные пульсации всего столба жидкости, они напрямую воздействуют на рабочее колесо, вызывая пульсации мощности и признаются наиболее опасными. Возникающие в результате кавитации полости в области пониженного давления в ПВЯ также негативно сказываются на эксплуатационных характеристиках являясь дополнительным источником пульсаций давления в тракте и вызывая кавитационную эрозию на поверхности рабочего колеса и отсасывающей трубы.

Развитие методов контроля и управления подобными нестационарными явлениями с целью повышения эффективности и надежности работы гидроагрегатов невозможно без четкого представления структуры течения в различных режимах работы гидротурбин. Также получение количественной информации о структуре течения за рабочим колесом гидротурбины необходимо с точки зрения развития методов вычислительной гидродинамики (CFD) и аналитических подходов при описании многофазных закрученных потоков при наличии крупномасштабных вихревых структур. Ввиду невозможности получения экспериментальных данных на натуральных гидротурбинах используют методы экспериментального моделирования, зачастую значительно упрощая гидродинамический тракт и воспроизводя только распределение скоростей в отдельных рабочих режимах. Вследствие этого проведение систематических экспериментальных исследований на модельных объектах является важным и актуальным.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния рабочих параметров на динамику прецессирующего вихревого жгута в одно и двухфазном потоке на модельных гидротурбинных установках для достижения более глубокого понимания физических механизмов и условий формирования ПВЯ и связанных с ним пульсаций давления.

Задачи, поставленные в соответствии с целью работы:

- Экспериментальное исследование полей скорости в коническом рабочем участке моделирующим течение в отсасывающей трубе гидротурбины, работающей в различных режимах.

- Получение комплексной информации о структуре закрученного течения в модельной гидротурбине в широком диапазоне чисел Рейнольдса и варьировании закрутки потока с использованием современных экспериментальных методик. Создание обширной базы данных для верификации численных расчётов.

- Изучение явления аperiодических пульсаций давления в проточном тракте гидротурбины – выявление и анализ источника пульсаций.

- Апробация методики инъекции газовой фазы в широком диапазоне газосодержаний при варьировании закрутки потока. Изучение воздействия инъекции воздуха на структуру течения, амплитуду и частоту пульсаций давления в зависимости от среднерасходного газосодержания.

Научная новизна работы.

Получены новые обширные массивы достоверных экспериментальных данных, включающие распределения скоростей, распределения пульсаций скорости, пульсации давления на стенке, высокоскоростную визуализацию в различных рабочих режимах, необходимые для верификации численных и аналитических расчётов. Распределения скоростей, полученные на модельной гидротурбине, существенно перекрывают распределения в натуральных гидротурбинах.

Изучена зависимость параметра крутки потока от режимных параметров модельной гидротурбины, а также установлена область его применимости при варьировании расхода жидкости и скорости вращения лопаточного закручивающего устройства. Адаптирована и верифицирована новая полуэмпирическая модель, позволяющая оценить закрутку потока в отсасывающей трубе гидротурбины, основываясь на информации о параметрах режима с нулевой закруткой, расхода и скорости вращения рабочего колеса.

Впервые обнаружено явление вихревого перезамыкания, приводящее к формированию вихревых колец в модельной гидротурбине в режиме с небольшим параметром крутки потока. Установлено, что вихревые кольца являются источником значительных аperiodических пульсаций давления в проточном тракте гидротурбины.

На модели отсасывающей трубы Turbine-99 реализована система инъекции газовой фазы в поток, с целью контроля и управления ПВЯ. Получены новые систематические экспериментальные данные по зависимости безразмерного параметра - числа Струхала от среднерасходного газосодержания β с шагом 0.1% в диапазоне 0 – 5%.

Теоретическая и практическая значимость.

Результаты по экспериментальному моделированию течения за рабочим колесом гидротурбины, а также отработка методики инъекции газовой фазы были получены при выполнении хоз. договоров с ПАО “Силовые машины - ЛМЗ” и активно используются группой исследователей из Красноярского филиала ИТ СО РАН для верификации численных расчётов. В работе предложен новый сценарий возникновения аperiodических пульсаций давления в гидротурбинах, что безусловно важно при рассмотрении вопросов безопасной эксплуатации гидроагрегатов.

Работа вносит вклад в развитие аналитических способов описания и прогнозирования нестационарных вихревых структур в закрученных потоках жидкости. Также экспериментальные данные, полученные в рамках данной работы, используются для построения модели кавитационной полости, основанной на законах сохранения потоков массы, импульса и момента импульсов в конусе отсасывающей трубы для различных режимов работы турбины. Экспериментальные данные по взаимодействию вихревого кольца со стенкой ОТ используются для верификации аналитической модели, описывающей воздействие вихревых колец на плоскую поверхность, движущихся относительно нее под разными углами и необходимы для её дальнейшего развития. Данные по инъекции газовой фазы могут быть использованы для совершенствования методики контроля и управления ПВЯ в неоптимальных режимах работы гидроагрегатов, а также могут быть востребованы при дальнейшем совершенствовании аналитических подходов, описывающих характеристики газожидкостных потоков при наличии крупномасштабных вихревых структур.

Положения, выносимые на защиту

- результаты комплексного исследования закрученного потока в модельных гидротурбинах при варьировании определяющих параметров (число Рейнольдса и интенсивность закрутки потока S)

- результаты адаптации и верификации полуэмпирической модели, позволяющей количественно оценить интегральный параметр закрутки потока исходя из расхода и скорости вращения рабочего колеса

- результаты исследования отрыва вихревых колец от прецессирующего вихревого жгута и их взаимодействия со стенкой отсасывающей трубы, а также интерпретация этого явления в качестве источника аperiодических пульсаций давления в гидротурбинах, работающих вблизи оптимального режима нагрузки

- результаты исследования влияния объемного газосодержания на частоту и амплитуду пульсаций ПВЯ в закрученном потоке в коническом участке отсасывающей трубы при малых расходах газа

Достоверность результатов обеспечивалась использованием современных хорошо зарекомендованных измерительных методик (ЛДА, прецизионные датчики давления), предварительной настройкой и калибровкой оборудования, проведением тестовых измерений, а также воспроизводимостью результатов с учетом рассчитанных погрешностей и сопоставлением с результатами других исследователей.

Личный вклад автора заключается в участии в модернизации экспериментальных стендов и проведении пусконаладочных работ, адаптации измерительного оборудования к условиям экспериментов, написании компьютерных программ обработки экспериментальных данных, проведении экспериментальных исследований закрученного потока на различных модельных установках, обработке, анализе и интерпретации экспериментальных данных, а также подготовке научных докладов и публикаций в рецензируемых журналах.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ведущих российских и международных конференциях: 7th European Postgraduate Fluid Dynamics Conference (Ильменау, Германия, 2014), 5th International Youth Conference on Energy (Пиза, Италия, 2015), 8th European Postgraduate Fluid Dynamics Conference (Варшава, Польша, 2016), Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики (Новосибирск, 2016), 28th IAHN symposium on Hydraulic Machinery and

Systems (Гренобль, Франция, 2016), Euromech Colloquium 581 "Dynamics of Concentrated Vortices" (Новосибирск, 2016), Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии (Санкт-Петербург 2016), Нелинейные волны: теория и новые приложения (Новосибирск, 2016), IV Всероссийская научно-практическая конференция «Гидроэлектростанции в XXI веке» (Саяногорск, 2017), XXXIII Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 2017), II Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" (Ялта, 2017), The 7th IAHR Meeting of the Working Group on Cavitation and Dynamic Problems 2017, Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках (Новосибирск, 2017), 4th International Retreat on Vortical Flow and Aerodynamics (Новосибирск, 2018), XIX Международная конференция по методам аэрофизических исследований (Новосибирск, 2018), The 5th International Conference on Experimental Fluid Mechanics (Мюнхен, Германия, 2018), 15ая Международная научно-техническая конференция "Оптические методы исследования потоков" (Москва, 2019), 9th European Postgraduate Fluid Dynamics Conference (Ильменау, Германия, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 статей в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК.

Объём и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка обозначений и списка литературных источников. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, включая 68 рисунков и библиографический список из 217 наименования работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертационной работы обоснована её актуальность, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзором современного состояния исследований, посвященных сложным нестационарным процессам в закрученных потоках, имеющих место при работе гидротурбинного оборудования.

В разделе 1.1 продемонстрированы перспективы развития гидроэнергетики в мире. Показано, что в настоящее время гидроэнергетика реализует только четверть доступных гидроресурсов и имеется общемировой тренд к переходу на возобновляемые источники энергии. Также возрастает потребность в гидроаккумулирующих станциях, в которых гидротурбины могут работать в режиме насоса, перекачивая воду обратно в верхний бьеф. В больших энергосистемах гидроаккумулирующие станции успешно дополняют мощности тепловых и атомных электростанций. Использование тепловых и атомных электростанций с низкой скоростью изменения мощности, а также внедрение в электрическую сеть таких нестабильных технологий как ветряные, солнечные электростанции, приводит к тому, что на гидроэлектростанции также ложится важная регулирующая роль для поддержания стабильной работы электрической сети. Это обеспечивается работой гидротурбин в широком диапазоне режимов, зачастую далеких от оптимального, на который они изначально были спроектированы. В неоптимальном режиме работы поток за рабочим колесом на входе в отсасывающую трубу имеет избыточную закрутку (S) достижение определённого уровня которой является одним из индикаторов формирования ПВЯ в потоке. Rheingans (Rheingans 1940) одним из первых обратил внимание на проблему нестационарных явлений в проточных системах при наличии закрутки потока связав колебания мощности гидроэлектростанции с нестационарными явлениями, возникающими в проточном тракте.

В разделе 1.2 приведен накопленный опыт по экспериментальному моделированию гидротурбин. Именно использование уменьшенных и зачастую упрощенных моделей гидроагрегатов позволяет разобраться в

сложной физике закрученного турбулентного течения в натуральных установках, в некоторых работах даже упоминается замена воды воздушной средой.

В работе (Susan-Resiga et al. 2009) продемонстрирована возможность моделирования режима частичной нагрузки турбины использованием комбинации стационарного и свободновращающегося лопаточного завихрителя без воспроизведения геометрии всего тракта гидротурбины. Несмотря на то, что перенести полученные на модельных установках результаты на натурные турбины затруднительно, подобные исследования позволяют установить общие закономерности и обобщить информацию о структуре ПВЯ в различных режимах.

Раздел 1.3 посвящён применению различных методов исследования потока. Развитие современных систем диагностики потока таких как: цифровая трассерная визуализация (PIV), лазерно-доплеровская анемометрия (ЛДА), высокоскоростная визуализация способствовало значительному прорыву в вопросах изучения сложной структуры турбулентного многофазного закрученного потока, знания о котором необходимы для создания адекватных методик контроля и управления нестационарными явлениями, возникающими в проточном тракте гидротурбин. Основная сложность при проведении экспериментов заключается в отсутствии оптического доступа к проточной части, что делает использование прозрачных акриловых смол предпочтительным при изготовлении рабочих участков. Наряду с оптическими методами диагностики течения для понимания полной картины активно используют методы компьютерного моделирования, описывающие вихревую динамику численными решениями уравнения Навье-Стокса, стоит отметить, что все численные методы также требуют верификации экспериментом.

В разделе 1.4 описаны режимы течения, реализующиеся в гидротурбинах при различной нагрузке. Наибольший интерес представляют режимы течения с частичной нагрузкой. Именно в них ввиду избыточной закрутки потока за рабочим колесом турбины формируется мощный прецессирующий вихрь. Раздел 1.5 посвящен описанию методов контроля и управления ПВЯ. Среди основных можно выделить установку вертикальных ребер и крестовин различного типа в конусе отсасывающей трубы, перфорацию лопаток и конуса обтекателя, инъекцию воздуха или струи воды с периферии или

сквозь обтекатель. Раздел 1.6 рассматривает различные аналитические подходы при описании закрученного потока как в целом, так и применительно к течению в гидротурбинах. Необходимость дальнейшего развития и совершенствования аналитических моделей также подчеркивают актуальность получения количественных экспериментальных данных.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик, используемых в работе, а также гидродинамических стендов, на которых проводились исследования.

В разделе 2.1 описан замкнутый гидродинамический контур в горизонтальной компоновке с прозрачной отсасывающей трубой геометрии Turbine-99 и стационарным лопаточным закручивающим устройством вместо рабочего колеса (Рис. 1). Угол наклона лопаток отвечает за закрутку потока, а профилированные лопатки создают распределения скоростей близкое к натурным. Основной характеристикой данного завихрителя является конструктивный параметр

закрутки потока (Gupta, Lilley, and Syred 1984) $Sg = 2/3 [(1 - (d_{in}/d_{out})^3)/(1 - (d_{in}/d_{out})^2)]tg(\varphi)$, где $d_{in} = 136$ мм и $d_{out} = 210$ мм внутренний и внешний диаметр, φ – угол наклона лопаток относительно вертикальной оси. В работе было исследовано три стационарных завихрителя, создающих слабую ($Sg = 0.38$), умеренную ($Sg = 0.62$) и сильную ($Sg = 0.95$) закрутку потока с углами наклона лопаток 25, 37 и 53 градуса соответственно. Число Рейнольдса в экспериментах варьировалось в диапазоне $9 \cdot 10^4$ - $3.2 \cdot 10^5$. Поток с нулевой или близкой к нулю закруткой обычно сопоставляют с оптимальным режимом работы гидротурбины, соответственно, течение с закруткой в

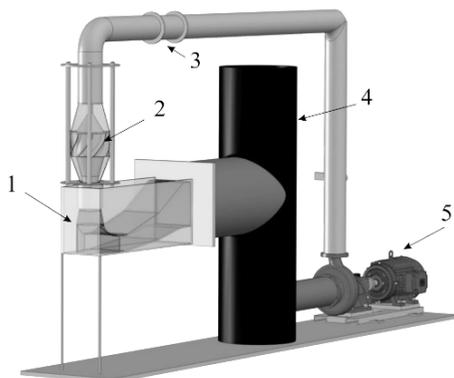


Рис. 1. Горизонтальный гидродинамический стенд, 1 – отсасывающая труба Turbine-99, 2 – стационарное закручивающее устройство, 3 – ультразвуковой расходомер, 4 – резервуар с водой, 5 – подающий насос.

отсасывающей трубе соответствует неоптимальным режимам эксплуатации при частичной нагрузке.

В разделе 2.2 описан вертикальный кавитационный стенд, основным элементом которого является коническая отсасывающая труба и система из двух лопаточных завихрителей – стационарного и вращающегося посредством внешнего привода электродвигателя (Рис. 2). Регулируя частоту вращения модельного рабочего колеса и расход в контуре можно получить распределения скоростей, близкие распределениям за рабочим колесом реальной турбины в различных режимах как частичной, так и форсированной нагрузки, что является основным отличием от работ (Muntean, Susan-Resiga, and Bosioc 2008; Muntean et al. 2016; Tanasa et al. 2011; Stefan et al. 2013) в которых рассматривался режим свободного вращения «free-runner». Всего было исследовано более 110 режимов при варьировании частоты вращения модельного рабочего колеса от 0 до 1200 об/мин, числа $Re\ 10^5\text{-}5\cdot 10^5$.

Раздел 2.3 посвящен описанию системы лазерно-доплеровской анемометрии (ЛДА). В проводимых исследованиях использовалась двухкомпонентная система ЛДА – “ЛАД 06-и”. Основные измерения скорости проводились внутри конического участка ОТ на вертикальном кавитационном стенде в 50 мм вниз по потоку от горловины (Рис. 3). Максимальная разница между показанием электромагнитного расходомера и вычисленным расходом на основе среднего профиля осевой скорости не превышает 2%. Измерения проводились преимущественно в однофазном потоке. Необходимая статистика вспышек в измерительной точке набиралась согласно (Yanta and Smith 1978) а поправка на

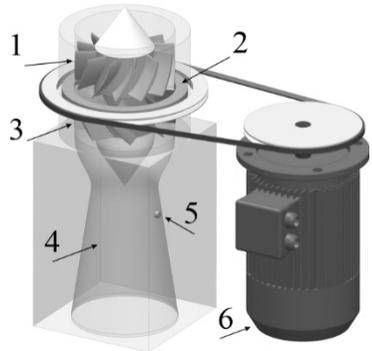


Рис. 2. Эскиз рабочего участка, 1-стационарный лопаточный завихритель, 2 – магнитная муфта, 3 – модельное рабочее колесо, 4 - прозрачный конус ОТ, 5 – датчик давления, 6 - электродвигатель.

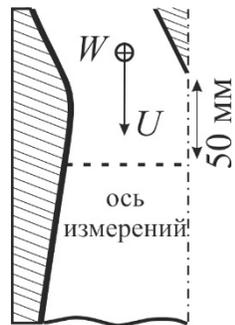


Рис. 3 Схема ЛДА измерений.

тангенциальную компоненту скорости, связанная с фокусировкой лучей в коническом диффузоре вводилась согласно (Zhang 2004).

В разделе 2.4 приводится описание используемых в работе датчиков давления и методике обработки сигнала, регистрируемого на внутренней поверхности конуса ОТ. В разделе 2.5 дано описание систем визуализации потока.

В третьей главе представлены результаты комплексного экспериментального исследования структуры и характеристик закрученного потока в конусе модельной гидротурбины (Рис. 2). В разделе 3.1 введены основные определяющие режим течения параметры – это число Рейнольдса и параметр закрутки потока S . Приведен сравнительный анализ использования различных выражений для описания интенсивности закрутки потока. В координатах расход-частота вращения рабочего колеса построена карта интегрального параметра закрутки, введённого как $S = \frac{\int_0^\infty \rho u w r^2 dr}{R \int_0^R \rho u^2 r dr}$ (Chigier and Beér 1964). Показано, что с уменьшением Q/Q_0 или с увеличением N/N_0 (где N_0 частота вращения, а Q_0 расход при нулевой крутке) параметр S линейно возрастает до значения ~ 0.7 после чего рост замедляется и параметр выходит на плато (Рис. 4). Используя полученные значения интегрального параметра крутки в различных режимах был адаптирован и апробирован подход, предложенный Favrel и др. (Favrel et al. 2017), позволяющий количественно оценить

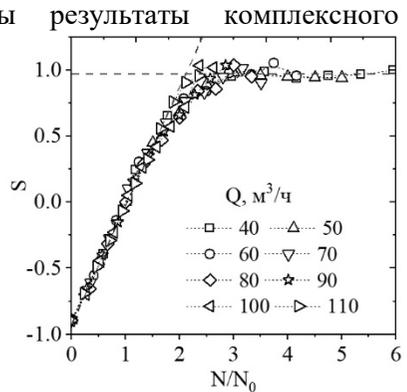


Рис. 4. Зависимость параметра S от безразмерной частоты вращения.

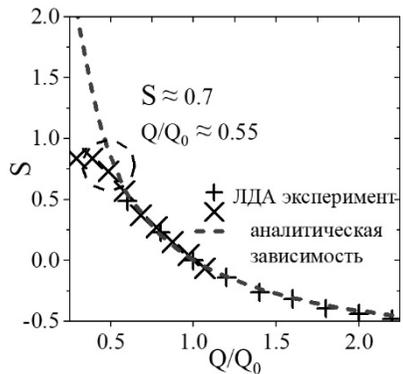


Рис. 5. Сопоставление аналитической зависимости параметра крутки и экспериментальных значений.

интенсивность закрутки потока, оперируя лишь параметрами Q и N , не производя измерения скоростей. Показано, что выражение $Sg = (R_{out}^2 + R_{in}^2)(R_{out}^2 - R_{in}^2)\pi^2 N \cdot 60 \cdot (1/Q - 1/Q_0) / R_{out}$ приемлемо описывает зависимость S от Q/Q_0 в области умеренной закрутки (Рис. 5). Начиная с $S = 0.7$ разница между аналитической кривой и экспериментальными данными становится значительной. Тем не менее возможность оценить интенсивность закрутки потока без оптических измерений скорости крайне полезна, а вышеупомянутый диапазон крутки охватывает область формирования ПВЯ в потоке, для которого в проведенных экспериментах $S_{крит} = 0.53$.

В разделе 3.2 приведена визуализация различных режимов течения, реализующихся в модельной отсасывающей трубе при варьировании частоты вращения рабочего колеса при фиксированном расходе жидкости, вихревой жгут визуализируется кавитацией и мелкими пузырьками воздуха, выделяющимися из воды.

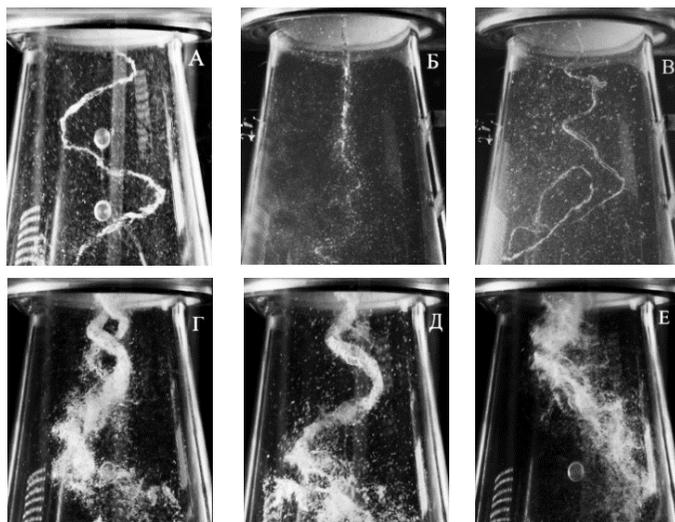


Рис. 6. Визуализация режимов течения в модельной ОТ при $Q = 70 \text{ м}^3/\text{ч}$ и различных N/N_0 .

Сопоставив данные визуализации с режимами течения в реальных гидротурбинах (Seidel et al. 2014) можно предположить, что течение на Рис. 6 - (А) соответствует режиму форсированной нагрузки, (Б) режиму вблизи оптимума, (В) - переходный режим при уменьшении нагрузки,

(Г, Д) – режим частичной нагрузки и (Е) режим с очень слабой нагрузкой гидроагрегата. Именно визуализация позволяет получить первое представление о структуре вихревого течения в различных режимах и способствует более глубокому пониманию особенностей потока за рабочим колесом модельной гидротурбины.

В разделе 3.3 обобщена информация по количественным измерениям распределения осевой и тангенциальной компонент скорости их пульсаций. Всего было исследовано более 110 режимов течения варьируя такие параметры как расход и скорость вращения модельного рабочего колеса. На Рис. 7 представлены характерные распределения скоростей в различных режимах работы модельной гидротурбины.

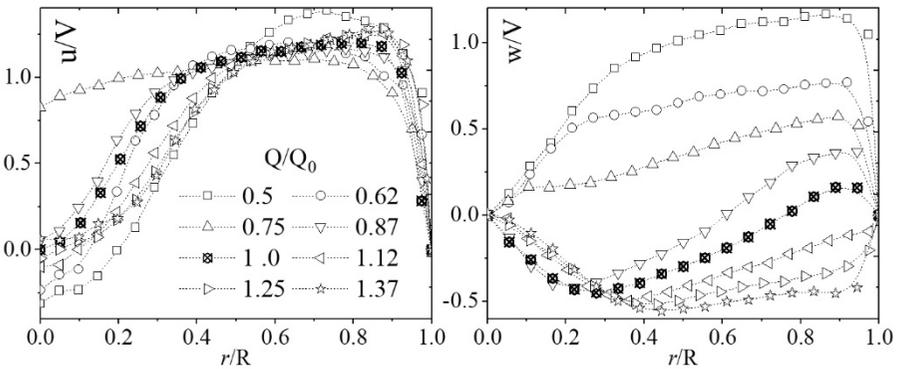


Рис. 7. Осредненные по времени нормированные на среднерасходную скорость $V = Q/S$ - осевая (u) и тангенциальная (w) компоненты скорости при различных Q/Q_0 , $N = 300$ об/мин, $Q_0 = 80$ м³/ч.

Профили скоростей, соответствующие нулевой закрутке потока, обозначены черными квадратами несмотря на то, что получить профиль тангенциальной компоненты скорости имеет “S-образную” форму, помимо нулевой скорости на оси, существует ещё одна точка перегиба, значительно смещенная к стенке ОТ. При отклонении режима от $Q/Q_0 = 1$ в обе стороны по распределению тангенциальной компоненты видно, что интенсивность закрутки увеличивается. Также видно, что с уменьшением Q/Q_0 зона возвратного течения уширяется вплоть до $0.2r/R$, а дефицит скорости на оси увеличивается. Одним из важных моментов работы, является сопоставление измеренных профилей для осевой скорости с профилями измеренными за рабочим колесом

масштабной модели турбины Френсиса на ЛМЗ, полученными в работе (Sadbakov et al. 2004). На Рис. 8 приведено сопоставление трех распределений осевой скорости,

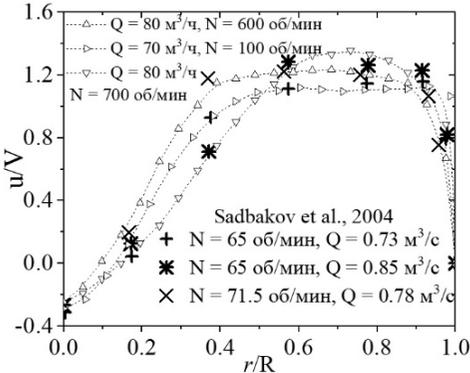


Рис. 8. Сравнение распределений скорости в конусе ОТ.

соответствующих различным рабочим параметрам (расход, скорость вращения рабочего колеса, угол открытия направляющего аппарата). Варьируя расход и скорость вращения рабочего колеса на упрощенной модели удалось достичь приемлемо близких результатов, что в совокупности с данными визуализации подтверждает корректность

экспериментального моделирования.

В разделе 3.6 количественные измерения распределений скорости дополнены пульсационными характеристиками течения. Измерения пульсаций давления проводились на стенке ОТ (Рис. 2). Для каждого режима течения на основе быстрого преобразования Фурье вычислялась частота пульсаций давления, связанная с наличием ПВЯ в потоке. Для более аккуратной интерпретации Фурье спектров расчёт частоты прецессии для некоторых реперных режимов был выполнен на основе данных высокоскоростной визуализации. Итоговым результатом измерений стало построение режимной карты (Рис. 9) в координатах $Q-N$, где цветом обозначена частота или интенсивность пульсаций давления, а поверх нанесены изолинии параметра крутки. Сопоставление данной режимной карты по интегральному параметру крутки с режимными картами гидротурбин позволяет дополнить представление о структуре течения в реальных гидроагрегатах, где полностью отсутствует оптический доступ. Видно, что максимальная частота пульсаций давлений достигается при одновременном увеличении расхода и скорости вращения рабочего колеса, в свою очередь максимальная амплитуда пульсаций смещена в сторону меньших расходов. Штриховой линией на Рис. 9 обозначены границы области, в которой ПВЯ нестабилен и однозначно определить частоту прецессии невозможно, данный режим более подробно рассмотрен в главе 4.

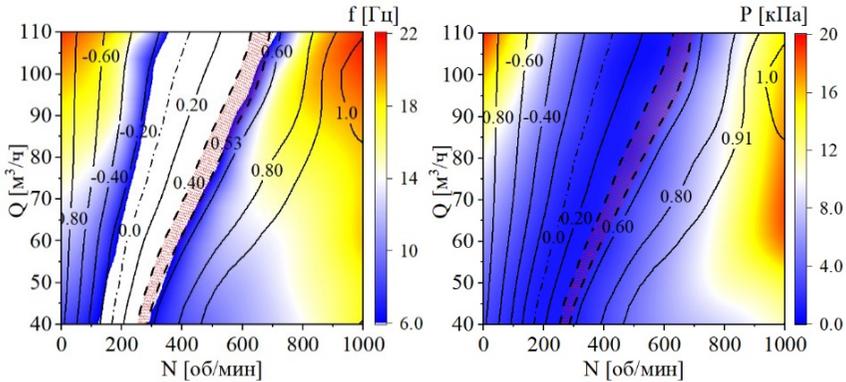


Рис. 9. Режимная карта частоты и амплитуды пульсаций давления.

Перейдя к зависимостям безразмерных величин Sh и $P/\rho V^2$ от N/N_0 удалось обобщить полученные результаты, избавившись от неоднозначности при сильной закрутке потока.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию аperiodических пульсаций давления. В ходе изучения особенностей вихревого жгута в различных режимах течения, был обнаружен режим, в котором спиральная форма ПВЯ значительно меняется во времени. Невозмущенный вихревой жгут начинает искривляться таким образом, что два соседних витка оказываются в значительной близости друг к другу, что приводит к их самоиндуцированному сближению. Результатом данного процесса является перезамыкание двух вихревых трубок с последующим формированием вихревого кольца, являющегося частью вихревой спирали между точками соприкосновения. Явление наблюдается вблизи оптимального режима при небольшом параметре крутки в диапазоне $S = 0.4-0.53$ и представляет несомненный интерес как с фундаментальной, так и с технической точки зрения. Отделившееся от спирали вихревое кольцо движется по сложной траектории, с преобладающей радиальной скоростью до стенки ОТ взаимодействуя с которой оно разрушается.

В разделе 4.1 представлена визуализация состояний вихревой системы при различных комбинациях Q и N . На Рис. 10 приведена визуализация кавитирующего вихревого жгута при фиксированных режимных параметрах, видно, что в различные моменты времени форма вихревой спирали изменяется и реализуются различные сценарии.



Рис. 10. Визуализация кавитирующего вихревого жгута при $Q = 80 \text{ м}^3/\text{ч}$, $N = 500 \text{ об/мин}$ (1) – невозмущенная спираль, (2) – изолированное вихревое кольцо, (3) – “надетое” вихревое кольцо.

Предположительно источником перезамыкания может послужить формирование длинноволновой неустойчивости и образование нелинейных возмущений называемых “бризеры” (breathers), возможность появления которых преимущественно связана с пространственными характеристиками вихря (Salman 2013).

Было установлено, что отрыв колец наблюдается как при малых, так и при максимально допустимых технических возможностях стенда расходах. Основываясь на данных высокоскоростной визуализации, была рассчитана средняя частота прецессии ПВЯ, которая оказалась в 2.5-3 раза выше, чем частота прецессии при большей закрутке, когда вихревой жгут стабилизируется. Частота отрыва вихревых колец имеет не периодический характер, однако анализ данных высокоскоростной визуализации показал, что в среднем она составляет 0.4 частоты прецессии и не зависит от числа Re .

В разделе 4.2 приведены осредненные по времени распределения осевой и тангенциальной компонент скорости на нижней $S = 0.37$ и верхней $S = 0.53$ границах исследуемого режима (Рис. 11). Эти границы хорошо согласуются с диапазоном $0.85-0.95Q_{\text{ВЕР}}$ который в некоторых источниках упоминают как “ударная зона” (“shock zone”) (Fisher et al. 1980; Dörfler, Sick, and Coutu 2013).

Получение экспериментальных данных по границам режима крайне важно с точки зрения численного моделировании явления перезамыкания в гидротурбинах, так как позволяет использовать профили скоростей, измеренные на входе в ОТ в качестве граничных условий.

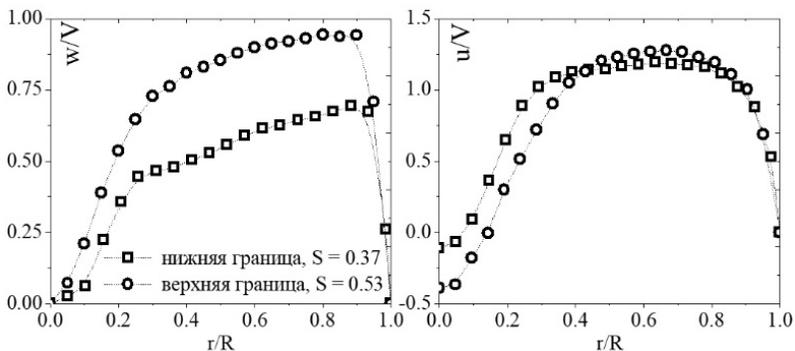


Рис. 11. Распределения тангенциальной и осевой скорости для $S = 0.37$ и 0.53 .

Основной задачей раздела 4.3 стала демонстрация того, что именно отрывающиеся вихревые кольца в конусе ОТ в исследуемом режиме являются источником значительных аperiодических пульсаций давления.

Была разработана методика позволяющая регистрировать пульсации давления на стенке ОТ синхронно с высокоскоростной съёмкой.

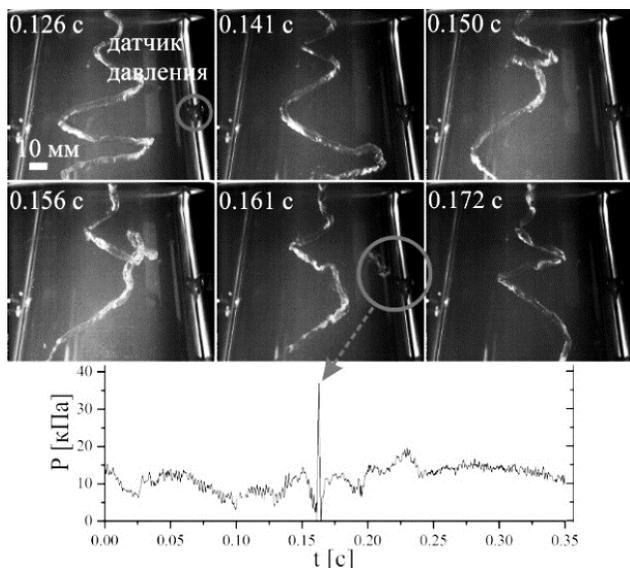


Рис. 12. Визуализация, синхронизованная с измерением давления в конусе ОТ, $Q = 150 \text{ м}^3/\text{ч}$, $N = 950 \text{ об/мин}$.

Случайность процесса отрыва вихревых колец во времени, значительно усложнила задачу, тем не менее на (Рис. 12) представлена одна из удачных серий эксперимента. Видно, что в момент времени $t=0.161$ с кавитирующее вихревое кольцо оторвавшись от вихревой спирали, генерирует значительный скачок давления на стенке ОТ. Сам процесс отрыва вихревого кольца занимает всего 5-10 мс, а вихревая спираль восстанавливается уже через 30 мс. Всего было зарегистрировано три основных формы сигнала давления, которые зависят от угла подлёта вихревого кольца к датчику давления.

Стоит отметить, что наблюдаемый режим течения не является особенностью конкретной установки, подобная форма вихревого жгута была упомянута в работе (Thierry 1993) а отрыв вихревых колец также наблюдался на уменьшенной копии турбины Френсиса (Platonov et al. 2017). Таким образом, можно предположить, что именно отрыв вихревых колец от прецессирующего вихревого жгута в гидротурбинах является источником аperiodических пульсаций давления.

В разделе 4.4 проведено сопоставление полученных экспериментальных данных о распределении давления с аналитической моделью предложенной (Куйбин и соавт. 2019), описывающей импульс давления, возникающий при прохождении вихревого кольца вблизи стенки отсасывающей трубы в зависимости от угла подлёта. Показано, что не смотря на использование невязкой аппроксимации с пренебрежением поверхностным пограничным слоем и диффузией вихря, а также, не предполагая наличия второй фазы, модель адекватно описывает взаимодействие вихревого кольца с поверхностью.

Пятая глава посвящена применению инъекции газовой фазы в закрученный поток с целью воздействия на ПВЯ. Данная методика представляется достаточно эффективной для борьбы с нежелательными нестационарными явлениями ввиду простоты реализации системы подачи воздуха в поток, а также его значительного влияния на пульсационные характеристики течения. Основной задачей становится получение надежных экспериментальных данных, которые могут послужить основой для разработки полноценной методики управления ПВЯ в гидротурбинах, а также будут способствовать дальнейшему развитию аналитических и полуэмпирических моделей газожидкостного потока при наличии концентрированных вихревых структур.

В разделе 5.1 описаны эксперименты по изучению пульсационных характеристик для однофазного потока, которые проводились на горизонтальном гидродинамическом стенде с геометрией отсасывающей трубы Turbine-99 (Рис. 1) для трёх лопаточных завихрителей с конструктивными параметрами крутки $S_g = 0.38, 0.62$ и 0.95 . Обобщенные зависимости по частоте ПВЯ представлены на Рис. 13 в безразмерном виде.

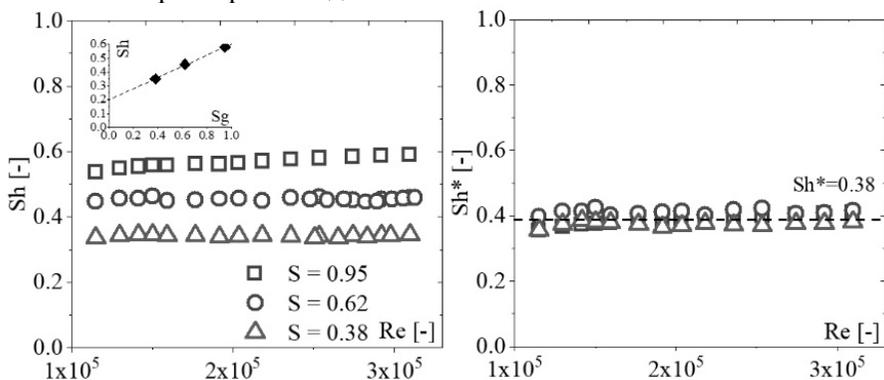


Рис. 13. Зависимость чисел Sh и Sh^* от Re для трёх закручивающих устройств.

Число Струхалия можно представить как линейную функцию $\alpha^* S_g + C$, а уточнив константу C из эксперимента ввести $S_g^* = (Sh - C) / S_g$, тем самым обобщив частотные зависимости для трёх закручивающих устройств.

В разделе 5.2 описаны результаты, полученные при инъекции газовой фазы в закрученный поток для трёх лопаточных закручивающих устройств при различных расходах жидкости. Среднерасходное газосодержание $\beta = Q_g / (Q_j + Q_g)$ варьировалось от 0 до 5%. Для повышения точности при анализе пульсаций давления использовался разностный сигнал с двух датчиков, расположенных диаметрально в конусе ОТ. На Рис. 14 для расхода $Q = 47 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $S_g = 0.62$ приведены спектры пульсаций давления для $\beta = 0; 1.2; 2.5\%$. Видно, что даже незначительное количество газовой фазы снижает пульсации давления более чем в два раза, а кроме того, смещает частоту прецессии.

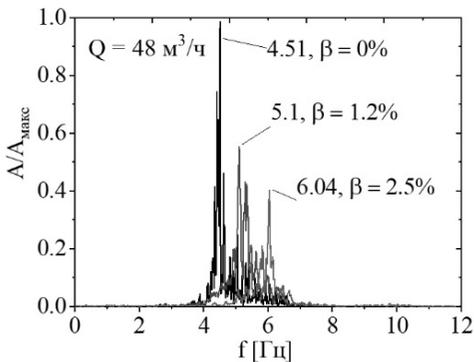


Рис. 14. Сопоставление спектров пульсаций давления для разных β .

хорошо обобщаются при переходе к числу Sh (Рис. 15). Интересным представляется то, что рост частоты прецессии обусловлен не увеличением расхода или параметра закрутки потока, который не изменяется при инъекции газовой фазы ввиду малости члена, учитывающего момент количества движения газовой фазы. Таким образом изменение частоты прецессии наиболее вероятно обусловлено изменением геометрических параметров вихря (шаг винта, размер вихревого ядра), что учитывает полуэмпирическая двухфазная модель вихревого течения (Kuibin, Pylev, and Zakharov 2012), качественное сопоставление с которой также приведено в разделе.

Можно заключить, что своевременная инъекция газовой фазы в поток с ПВЯ может не только снизить амплитуду пульсаций давления, но также сместить частоту прецессии, что может быть востребовано при угрозе эксплуатации гидроагрегата вблизи условий резонанса с низкочастотными осцилляциями ПВЯ.

Более подробно зависимость частоты пульсаций давления в ОТ от среднего газосодержания проанализирована в разделе 5.3. При малых β до 0.5% частота ПВЯ практически не изменяется для умеренной закрутки потока, а для высокой наблюдается её уменьшение в пределах 10%, однако при достижении $\beta=1\%$ в обоих случаях начинает наблюдаться практически линейный рост частоты. Данные для различных расходов

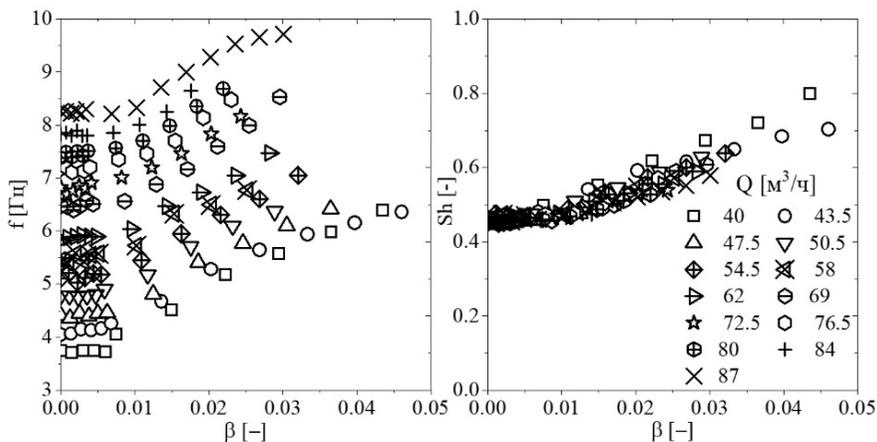


Рис. 15. Зависимость частоты прецессии и числа Струхала от среднерасходного газосодержания, $Sg = 0.62$.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы:

1. На гидродинамическом стенде подтверждена возможность экспериментального моделирования комбинацией стационарного и подвижного завихрителей различных режимов течения, соответствующих различным режимам работы гидротурбины, о чем говорят результаты сопоставления профилей скорости и визуализации течения. Накоплена обширная экспериментальная база данных, включающая цифровую визуализацию, измерения давления на стенке ОТ и измерения скорости, которая может быть использована для верификации численных расчётов, а также может способствовать дальнейшему развитию аналитических подходов.

2. Установлена область применимости интегрального параметра закрутки потока для описания вихревого течения в модельных гидротурбинах. Показано, что общепринятые определения позволяют описывать поток лишь в области малой и умеренной закрутки. При наличии в потоке больших радиальных градиентов давления параметр крутки перестает быть определяющим при идентификации режима течения.

3. Адаптирована и верифицирована полуэмпирическая модель, позволяющая оценить закрутку потока в отсасывающей трубе

гидротурбины, не проводя измерений скорости, основываясь на знании параметров режима с нулевой закруткой, текущего расхода и скорости вращения рабочего колеса. Модель удовлетворительно работает в области малой и умеренной закрутки, показывая значительное расхождение при $S > 0.7$. Возникновение прецессирующего ядра в потоке, согласно данным визуализации соответствует $S \approx 0.4$, а периодические пульсации скорости и давления начинают регистрироваться с $S = 0.53$ что несколько меньше критического значения $S = 0.6$, встречаемого в литературе.

4. Впервые экспериментально зарегистрировано явление формирования и отрыва вихревых колец от прецессирующего вихревого жгута, обусловленное перезамыканием. Данное явление наблюдается в диапазоне $S = 0.4-0.53$, в котором вихревой жгут нестабилен и его пространственные характеристики меняются во времени. На основе данных цифровой визуализации, синхронизованной с измерением давления на стенке ОТ, а также сопоставлении с результатами других авторов, предлагается рассматривать данное явление как основной источник аperiodических пульсаций давления в проточном тракте гидротурбин.

5. Исследовано влияние инъекции газовой фазы на пульсационные характеристики вихревого течения в модели отсасывающей трубы гидротурбины. Показано, что при сильной и умеренной закрутки потока инъекция газовой фазы, начиная с газосодержания $\beta \sim 1\%$, значительно влияет на параметры вихревой структуры, изменяя частоту и амплитуду пульсаций давления. Установлено, что рост частоты прецессии с увеличением газосодержания не связан с увеличением интегральной закрутки потока.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Skripkin S., Tsoy M., Shtork S., Hanjalic K. Comparative analysis of twin vortex ropes in laboratory models of two hydro-turbine draft-tubes //Journal of Hydraulic Research. – 2016. – V. 54. – №. 4. – P. 450-460. (из перечня ВАК)
2. Skripkin, S., Tsoy, M., Kuibin, P., & Shtork, S. Study of pressure shock caused by a vortex ring separated from a vortex rope in a draft tube model

- //Journal of Fluids Engineering. – 2017. – V. 139. – №. 8. – P. 081103. (из перечня ВАК)
3. Skripkin, S., Tsoy, M., Kuibin, P., & Shtork, S. Swirling flow in a hydraulic turbine discharge cone at different speeds and discharge conditions //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2019. – V. 100. – P. 349-359. (из перечня ВАК)
4. Скрипкин С.Г., Куйбин П.А., Шторк С.И. Влияние инжекции воздуха на параметры закрученного течения в модели отсасывающей трубы TURBINE-99 //Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41. – №. 13. – С. 48-55. (из перечня ВАК)
5. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Шторк С.И., Скрипкин С.Г., Цой М.А. Явление вихревого перезамыкания в закрученном потоке //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2016. – Т. 103. – №. 7. – С. 516-521. (из перечня ВАК)
6. Куйбин П.А., Скрипкин С.Г., Цой М.А., Шторк С.И. Моделирование удара вихревого кольца о твердую поверхность //Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45. – №. 1. – С. 38-41. (из перечня ВАК)
7. Скрипкин С.Г., Цой М.А., Шторк С.И. Экспериментальное исследование формирования двойного прецессирующего вихревого жгута в модельных отсасывающих трубах //Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2015. – Т. 10. – №. 2. – С. 73-82. (из перечня ВАК)
8. Скрипкин С.Г., Цой М.А., Шторк С.И., Куйбин П.А. Исследование пульсаций давления в модельной отсасывающей трубе гидротурбины, вызванных вихревыми кольцами //Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2016. – Т. 11. – №. 4. – С. 25-32. (из перечня ВАК)
9. Tsoy M. A., Skripkin S. G., Shtork S. I. Experimental investigation of a twin vortex breakdown on the draft tube models //5th International Youth Conference on Energy (IYCE). – IEEE, 2015. – P. 1-5. (из перечня ВАК)
10. Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Shtork S.I., Skripkin S.G., Sonin V.I., Tsoy M.A. and Ustimenko A.S. A novel scenario of aperiodical impacts appearance in the turbine draft tube //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2016. – V. 49. – №. 8. – P. 082025. (из перечня ВАК)
11. Kuibin, P. A., Shtork, S. I., Skripkin, S. G., & Tsoy, M. A. On random pressure pulses in the turbine draft tube //Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 813. – №. 1. (из перечня ВАК)

12. Skripkin, S., Tsoy, M., Kuibin, P., & Shtork, S. Vortex rope instabilities in a model of conical draft tube //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – V. 159. – P. 00048. (из перечня ВАК)
13. Skripkin, S., Tsoy, M., Kuibin, P., & Shtork, S. Vortex rope patterns at different load of hydro turbine model //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – V. 115. – P. 06004. (из перечня ВАК)
14. Skripkin, S., Tsoy, M., Kuibin, P., & Shtork, S. Aperiodic pressure pulsation under non optimal hydraulic turbine regimes at low swirl number //Journal of Physics. Conference Series, 2017. – V. 899. – №. 2. (из перечня ВАК)
15. Шторк С.И., Скрипкин С.Г., Цой М.А., Литвинов И.В. Экспериментальное моделирование вихревого течения в отсасывающей трубе гидротурбины // Современные проблемы моделирования энергетических процессов. Под ред. проф. К. Ханъялича, чл.-корр. РАН Д.М. Марковича, к.ф.-м.н. Д.Ф. Сиковского. Новосибирск, Изд-во НГУ, 2016. - 452с. - ISBN 978-5-4437-0572-9. - тираж 250 экз. – С. 144-172.
16. Алексеенко С.В, Куйбин П.А., Шторк С.И., Скрипкин С.Г., Цой М.А., Наблюдение вихревого перезамыкания в закрученном потоке// Вихревые явления и их влияние на процессы переноса. Под ред. С.В. Алексеенко и И.В. Наумова. Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. – 366 с. - ISBN978-5-4437-0808-9. - тираж 300 экз. – С. 146-163.

Подписано к печати 2021 г. Заказ №
Формат 60×84/16. Объем 1 уч.-изд. л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН 630090,
Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1