

На правах рукописи



Суслов Даниил Андреевич

**УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ПРЕЦЕССИРУЮЩИХ ВИХРЕЙ
В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ МОДЕЛИ ГИДРОТУРБИНЫ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Шторк Сергей Иванович

Официальные
оппоненты: Катасонов Михаил Михайлович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Чаплина Татьяна Олеговна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Защита состоится 13 мая 2026 года в 09 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе ИТ СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

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

Автореферат разослан «___» марта 2026 года.

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



Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Рост мирового энергопотребления, обусловленный технологическим развитием, происходит на фоне истощения запасов невозобновляемых энергоресурсов. Возобновляемые источники энергии становятся основой будущей энергогенерации (IEA, 2025). Гидроэлектростанции (ГЭС), как наиболее управляемый вид возобновляемых источников, приобретают ключевую роль в обеспечении баланса и гибкости энергосистем. Однако частое регулирование мощности приводит к длительной работе гидротурбин в неоптимальных режимах. В таких режимах поток за рабочим колесом турбины Френсиса сильно закручен и восприимчив к гидродинамическим возмущениям (Escudier, 1987). В совокупности с расширяющейся частью отсасывающей трубы гидротурбины это приводит к формированию в потоке интенсивного прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ) спиральной формы, генерирующего значительные пульсации давления в проточной части. Это сужает рабочий диапазон агрегата, вызывает динамические нагрузки на конструкции и представляет серьезную угрозу для надежности и безопасности ГЭС (Favrel et al., 2018).

Проблема управления закрученными течениями и вихревыми структурами в них носит междисциплинарный характер и актуальна для широкого класса технических устройств и приложений (Syred, 2006; Dulin et al., 2019; Никулин, 2021; Чаплина и Кистович, 2022; Isaev et al., 2024; Катасонов и Козлов, 2025; Молочников и др., 2025). Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью повышения безопасности, надежности и эффективности работы гидроагрегатов, расширения диапазона допустимых режимов их работы. Все перечисленное требует разработки методов подавления мощных пульсаций давления, что влечет за собой развитие методов управления характеристиками ПВЯ. Это требует понимания структуры закрученного течения в проточной части гидротурбины.

Степень разработанности темы исследования

Методы управления ПВЯ делятся на пассивные и активные. Пассивные методы эффективны лишь в ограниченном интервале режимов гидротурбины и могут приводить к снижению КПД (Shtork et al., 2023). Активные методы, напротив, можно адаптировать к конкретному режиму работы и к текущим характеристикам потока. Наиболее распространено эмпирическое, методом проб и ошибок, управление ПВЯ путем инъекции струи воды через центральную часть тела обтекания рабочего колеса. Несмотря на влияние параметров струй и их пространственной ориентации

на эффективность управления ПВЯ, в литературе отсутствуют систематические данные о влиянии данных параметров на характеристики ПВЯ в гидротурбинах. Недостаточно изучен вопрос о воздействии управления на глобальные параметры закрученного потока, и внимание уделяется лишь пульсациям давления из-за ПВЯ (Shtork et al., 2023).

Целью работы является установление физических закономерностей воздействия активного управления на прецессирующее вихревое ядро в закрученном потоке за рабочим колесом модельной гидротурбины Френсиса и разработка на их основе эффективного метода подавления пульсаций давления.

Задачи, поставленные в соответствии с целью работы:

– Модернизировать экспериментальный стенд. Установить и настроить систему инъекции дополнительного управляющего расхода. Спроектировать актуаторы (инжекторы) для управления потоком. Адаптировать оборудование для диагностики потока под условия экспериментов.

– Провести комплекс экспериментальных исследований по воздействию инжектируемых струй на параметры ПВЯ в режимах работы турбины с повышенными пульсациями давления. Сформировать базу данных пространственно-временных характеристик течения.

– Установить основные безразмерные параметры, определяющие эффективность управления. Построить качественные обобщающие зависимости для описания эволюции характеристик вихревых структур под воздействием управления.

– Количественно оценить изменение осреднённых и пульсационных характеристик течения под воздействием системы управления и выявить физические механизмы стабилизации потока.

– Предложить научно-обоснованный подход по выбору оптимальных параметров управления и конфигурации устройства для его реализации в задачах эффективного подавления ПВЯ и снижения динамических нагрузок на конструкции гидротурбин.

Научная новизна:

– С опорой на результаты линейного анализа устойчивости, совместно с проведенными экспериментами, впервые предложен и обоснован с физической точки зрения оптимальный способ подачи и коэффициент потока импульса струй для наиболее эффективного подавления ПВЯ в гидротурбине. Данное исследование отличается от традиционного подхода (Altimemy et al., 2019; Bosioc et al., 2012; Khullar et al., 2022; Kirschner et al., 2010; Shtork et al., 2023; Štefan et al., 2017; Tănasă et al., 2013), когда

управление ПВЯ осуществляется с помощью метода проб и ошибок или физической интуиции.

– Проведено сравнение различных способов подачи струй с целью управления вихревыми структурами. Впервые комплексно показано влияние инъекции струй на пространственные и временные характеристики ПВЯ.

– Механизмы управления вихревыми структурами впервые описаны на основе одновременного анализа пульсаций давления и распределения скоростей за рабочим колесом.

– Показано, что безразмерный коэффициент потока импульса является ключевой характеристикой, определяющей эффективность воздействия управления на ПВЯ.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– Установлены фундаментальные закономерности взаимодействия управляющих струй с закрученным потоком и разработан эффективный метод для повышения эксплуатационной надежности и безопасности гидротурбин. Результаты исследования лягут в основу инженерно-технического решения по управлению ПВЯ за рабочим колесом гидротурбины, что подтверждается патентом на изобретение № 2831741 «Способ подавления пульсаций давления в гидротурбине», патентообладатель – ИТ СО РАН.

– Результаты приводят к дальнейшему развитию научных основ управления нестационарными течениями в иных энергетических приложениях, например, для снижения вредных выбросов в горелочных устройствах, использующих закрутку потока для стабилизации горения.

– Накопленные обширные экспериментальные данные с одновременной фиксацией пульсаций давления и распределений скоростей за рабочим колесом модельной гидротурбины в различных режимах работы могут быть использованы для верификации численных расчетов течения за рабочим колесом.

– Экспериментальные данные о распределении скоростей могут быть использованы для верификации аналитической модели винтового вихря с ядром конечного размера (Kuibin et al., 2014; Алексеенко et al., 2003) и необходимы для её дальнейшего развития.

– Тематика работы полностью соответствует Стратегии НТР РФ, пункт 21 б (Указ Президента РФ № 145 от 28.02.2024 г.). Помимо этого, тематика исследования полностью относится к приоритетному направлению НТР «высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика» (Указ Президента РФ № 529 от 18.06.2024 г.).

Методология и методы исследования

В исследовании были применены признанные в мировой практике экспериментальные методы исследования, включая измерение скорости в потоке с помощью методов анемометрии по изображениям частиц (PIV) и лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Для измерения пульсаций давления также были применены акустические датчики (микрофоны) со всенаправленной, сферически-симметричной диаграммой направленности. Для анализа больших объемов экспериментальных данных использовались методы статистического анализа стохастических динамических систем, такие как метод главных компонент в спектральной модификации (англ.: Spectral Proper Orthogonal Decomposition, SPOD), а также критерии идентификации вихрей в турбулентном течении. Все начальные условия и параметры эксперимента были заданы и контролировались с использованием сертифицированного и поверенного измерительного оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

– Результаты экспериментального исследования изменения характеристик ПВЯ, формирующегося в режиме с наибольшими пульсациями давления за рабочим колесом воздушной модели гидротурбины Френсиса, при различных методиках инъекции дополнительного постоянного расхода через центр рабочего колеса.

– Результаты экспериментального исследования влияния инъекции струй постоянного расхода через центр рабочего колеса на осреднённые и пульсационные характеристики течения вблизи рабочего колеса воздушной модели гидротурбины.

– Физические механизмы стабилизации потока при инъекции струй постоянного расхода через центр рабочего колеса.

– Оптимальная, с точки зрения величины объемного инжектируемого расхода, методика инъекции дополнительного расхода для наиболее эффективного подавления ПВЯ в потоке за рабочим колесом модели гидротурбины Френсиса.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивалась использованием современных хорошо зарекомендованных измерительных методик (лазерная доплеровская анемометрия, анемометрия по изображениям частиц), предварительной настройкой и калибровкой оборудования, проведением тестовых измерений, а также воспроизводимостью результатов с учетом рассчитанных погрешностей и сопоставлением с результатами других исследователей.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ведущих российских и международных конференциях: Международная научная студенческая конференция (Новосибирск, 2019, 2020, 2021, 2022), «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2019; Сочи, 2022), «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2020), «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2019, 2021), «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Рыбинск, 2019), «Наука будущего – наука молодых» (Новосибирск, 2022), Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 2022, 2023, 2024, 2025), «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2024), «Семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям жидкости, газа и плазмы» (Санкт-Петербург, 2025).

Вклад автора в проведенное исследование

Личный вклад автора заключается в модернизации аэродинамического стенда, системы управления потоком, адаптации измерительного оборудования к условиям экспериментов, написании компьютерных программ, проведении экспериментальных исследований закрученного потока, обработке и анализе экспериментальных данных, а также в подготовке публикаций в рецензируемых журналах, патентов, научных докладов. Постановка задач и основные методы исследования были сформулированы соискателем совместно с научным руководителем, д.ф.-м.н. С. И. Шторком. Основные научные результаты и выводы, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно. Все разработки и результаты исследований, изложенные в основном тексте диссертации без ссылок на другие источники, получены лично автором. В совместных публикациях вклад автора равнозначный.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 19 работ, включая 19 статей в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК. Из данных 19 публикаций: 4 статьи опубликованы в журналах 1 уровня «Белого списка» РЦНИ и 6 статей в журналах 2 уровня «Белого списка» РЦНИ. Получен 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Финансирование работы

Разные этапы работы поддержаны проектами РНФ № 25-79-30002, № 25-79-10154, № 21-19-00769, РФФИ № 20-58-12012.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, благодарностей, источников финансирования, списка обозначений и сокращений, списка использованной литературы из 220 наименований работ и одного приложения. Работа изложена на 167 страницах машинописного текста, включая 47 рисунков, 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава является обзором современного состояния исследований, посвященных вихревым структурам и управлению их параметрами. Показано, что турбины Френсиса при работе в режимах частичной нагрузки подвержены формированию ПВЯ. Критерием возникновения ПВЯ является превышение параметром крутки значения $S \approx 0,5-0,6$. Обоснована методика экспериментального исследования, базирующаяся на физическом моделировании на воздушном стенде с применением оптических методов (ЛДА и PIV).

В качестве теоретической основы энергоэффективного управления рассмотрен *линейный анализ устойчивости (ЛАУ)*. Данный подход интерпретирует ПВЯ как глобальную моду неустойчивости, которая запускает внутреннюю обратную связь в закрученном течении. ПВЯ возникает в области абсолютной неустойчивости в следе за зоной рециркуляции. Подход позволяет определить наиболее чувствительные области потока к управлению. Такая область в гидротурбине Френсиса расположена около тела обтекания рабочего колеса, что дает обоснование для выбора места инъекции. Воздействуя струями малого расхода на эту область, можно эффективно побороть причину возникновения ПВЯ. Обзор показал отсутствие систематических экспериментальных данных о влиянии инъекции на характеристики ПВЯ в гидротурбине Френсиса. Также почти не изучено, как именно управление влияет на глобальные характеристики закрученного потока, а не только на пульсации давления, являющиеся следствием ПВЯ. Почти не раскрыты физические механизмы стабилизации потока при управлении ПВЯ в гидротурбине Френсиса. Устранение данных пробелов необходимо для верификации аналитических моделей и перехода от эмпирических методов к научно-обоснованному, энергоэффективному управлению ПВЯ в гидротурбине Френсиса.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик и методов анализа данных. Описан модернизированный аэродинамический стенд и актуаторы (инжекторы) для управления потоком. Описана адаптация оборудования для диагностики потока под условия экспериментов, а также методы обработки данных.

Все эксперименты были проведены на аэродинамическом стенде, в котором реализована упрощенная схема моделирования течения за рабочим колесом гидротурбины. Вместо воспроизведения всей проточной части используется комбинация двух соосных осевых завихрителей. Первый завихритель (неподвижный) моделирует направляющий аппарат, второй (вращающийся) – рабочее колесо. Такая схема (Рисунок 1) формирует на входе в диффузоре (диаметр $D = 100$ мм) отсасывающей трубы распределение скоростей, аналогичные распределениям в натурной гидротурбине. Стенд был модернизирован: установлена и настроена система инъекции дополнительного управляющего расхода. Режимные параметры стенда – частота вращения n рабочего колеса, расход Q через завихрители, расход $Q_{control}$ через актуатор. Числа Рейнольдса в диапазоне от $1,2 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^4$, в текущих экспериментах число Рейнольдса составляло примерно $2 \cdot 10^4$. Все эксперименты по управлению ПВЯ и потоком проведены в режиме частичной нагрузки модели гидротурбины с

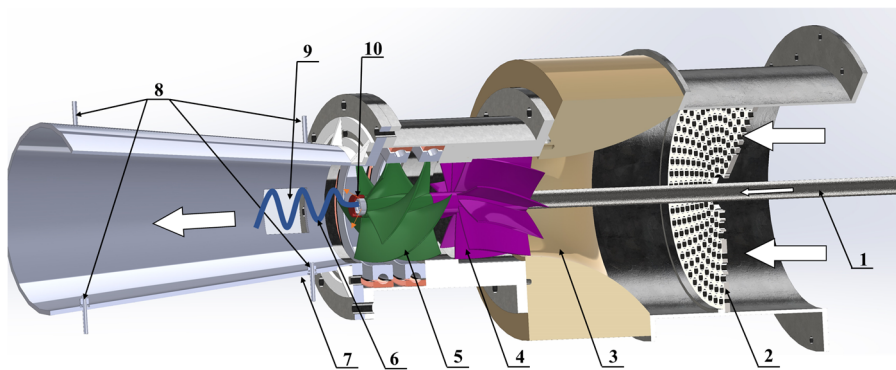


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда

- 1 — патрубок для подачи расхода через актуатор, 2 — решетка, выравнивающая поток,
 - 3 — сужающее сопло, 4 — направляющий аппарат (покоящийся завихритель),
 - 5 — рабочее колесо (вращающийся завихритель),
 - 6 — вихревая структура (схематичное изображение, не в масштабе),
 - 7 — отсасывающая труба (угол раскрытия диффузора 4°),
 - 8 — четыре отборника микрофонов (каждый указан стрелкой),
 - 9 — прозрачное окно для лучей ЛДА, 10 — актуатор;
- белые стрелки показывают направление потока воздуха.

наибольшими пульсациями давления на стенках отсасывающей трубы. Стенд достоверно воспроизводит, аналогично реальным гидротурбинам, процесс формирования ПВЯ и позволяет апробировать стратегии управления.

Концепция управления основана на возмущении потока струями в области наибольшей восприимчивости потока, полученной из ЛАУ. Струи подаются через *актуатор* с высотой $0,1D$ и диаметром $0,2D$ – сменное тело обтекания рабочего колеса, к которому по отдельному патрубку подается дополнительный воздух расходом $Q_{control}$. Исследовано управление ПВЯ с помощью 10 спроектированных актуаторов с разной пространственной ориентацией, количеством и диаметром отверстий. На Рисунке 2 показаны примеры 3 из 10 актуаторов, отличающихся направлением инъекции.

Измерения скорости методом ЛДА проводились внутри диффузора отсасывающей трубы на расстоянии в $0,3D$ от актуатора (Рисунок 3). Проведен методический эксперимент по определению размеров трассеров. Характерное число Стокса $3,5 \cdot 10^{-4}$, что подтверждает пригодность трассеров для измерений скорости методами ЛДА и PIV.

Пульсации давления на стенке диффузора измерялись акустическими датчиками, установленными либо два в ближнем следе, два в дальнем (Рисунок 1), либо все 4 в одном сечении (Рисунок 3). Предварительно акустические датчики калибровались по специально разработанной процедуре, выравнивающей сигналы в каналах. Анализ сигналов с 4 датчиков проведен с разложением на азимутальные моды, что позволяет однозначно выделить вклад ПВЯ в спектрах сигналов.

Планарная (2D) анемометрия по изображениям частиц (PIV) применена для получения мгновенных полей скорости в заданном сечении потока (Рисунок 4). Частота съемки – 100 Гц, при характерной частоте ПВЯ 15 Гц.

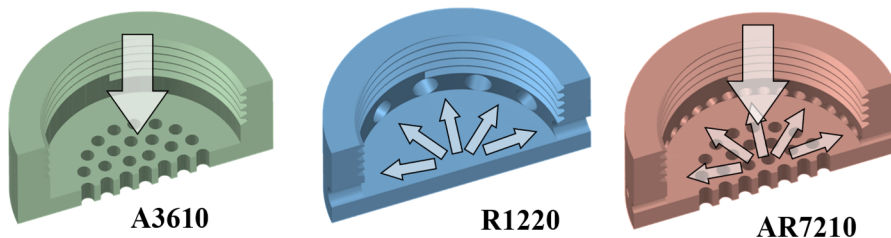


Рисунок 2 – Примеры актуаторов для управления ПВЯ.

Белые стрелки показывают направление инъекции воздуха. Место установки актуаторов показано на Рисунке 1. Расшифровка названий: **A** – аксиальный, **R** – радиальный, **AR** – аксиально-радиальный. Пример: **R1220**: **R** – радиальный, **12** – кол-во отверстий, **20** – $10 \times$ диаметр одного отверстия в мм

Пространственное разрешение – 1,2 вектора скорости на 1 мм. Каждый режим – 5000 пар кадров.

Проведен эксперимент по сравнению спектров пульсаций давления от микрофонов со спектром пульсаций скоростей ЛДА и PIV. Показано совпадение пиков спектральной плотности мощности, пики соотнесены с процессами в потоке. Совместное использование PIV, ЛДА и микрофонов позволяет верифицировать получаемые результаты.

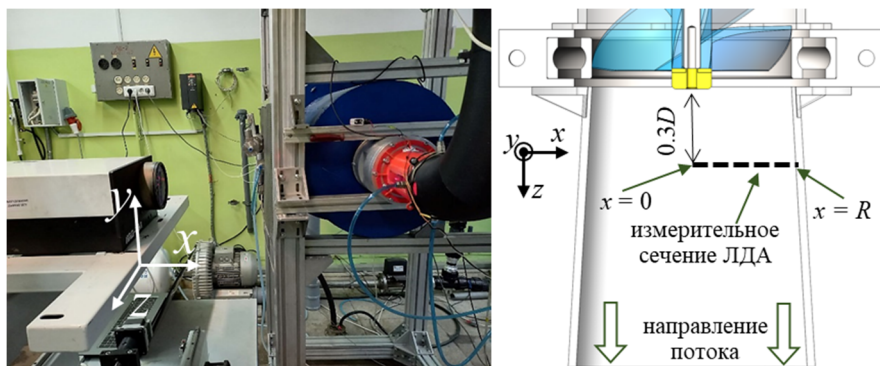


Рисунок 3 – Фотография и схема проведения ЛДА-эксперимента

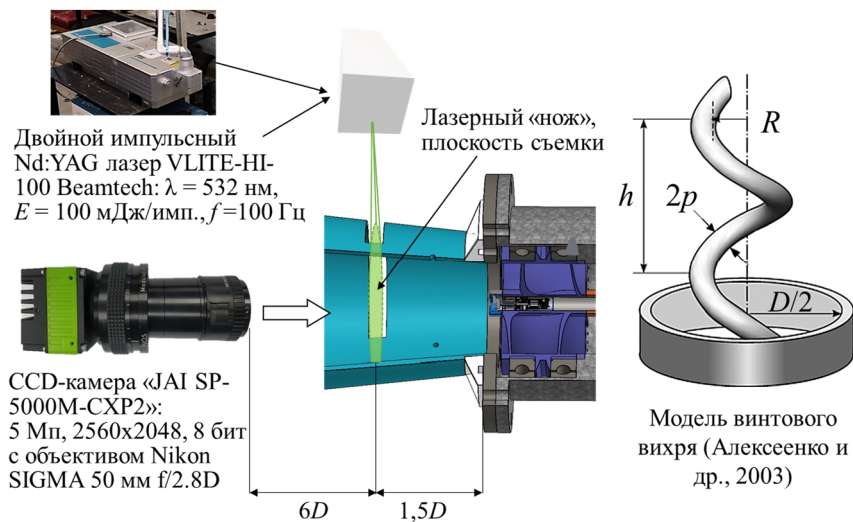


Рисунок 4 – Схема PIV-эксперимента и модель винтового вихря

Для получения характеристик ПВЯ и потока в целом к PIV-полям применен спектральный метод главных компонент (SPOD-анализ). SPOD позволяет выделить скрытые в турбулентном шуме вихревые моды. Для поиска пространственных характеристик ПВЯ используется G-критерий вихря (Graftieaux et al., 2001).

Общая относительная погрешность результатов экспериментов оценена как не превышающая 5%, что подтверждает надежность полученной обширной базы данных для исследования физики ПВЯ и разработки методов управления.

В **третьей главе** представлены результаты комплексного экспериментального исследования влияния активного управления на характеристики ПВЯ и среднего поля течения в модели гидротурбины Френсиса. Эффективность различных стратегий управления оценивается по сравнению с *базовым случаем* – режимом работы с ПВЯ и максимальными пульсациями давления в отсутствие управляющего воздействия, соответствующему режиму частичной нагрузки реальной гидротурбины Френсиса. Все представленные результаты нормированы на соответствующие параметры для базового случая, обозначенные с индексом «0». В базовом случае крутка, по профилям ЛДА, равняется $S_0 = 0,75$. Данное значение превышает необходимое S для существования ПВЯ, что также дополнительно подтверждает существование мощного ПВЯ в данном режиме. SPOD-анализ базового случая показал, что на первую пару связанных SPOD-мод приходится $K_0 = 44\%$ от всей турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) потока, что говорит о значительном вкладе ПВЯ в динамику течения.

Первоначальная оценка эффективности разработанных актуаторов и верификация результатов ЛАУ проведена на основе измерения пульсаций давления микрофонами на стенке отсасывающей трубы. Использовалась конфигурация микрофонов «4×1», установленных на расстоянии $1,5D$ от рабочего колеса (Рисунок 3). В качестве величины, характеризующей степень влияния актуатора на общий поток, впервые применительно к гидротурбинам предложено использовать *коэффициент потока импульса* C_{μ} , который является отношением потоков импульса от актуатора к потоку импульса общего течения: $C_{\mu} = (S_c/S) \cdot (W_c/W)^2$, где S_c – вся площадь отверстий актуатора, S – площадь сечения рабочего колеса, W_c и W – среднерасходные скорости инжекции и потока, соответственно.

Первая серия экспериментов проведена при непрерывном квазистационарном изменении управляющего расхода $Q_{control}$ через актуатор для определения области интереса по $Q_{control}$. Расход $Q_{control}$

увеличивается линейно в течение 2 часов от 0,2% от Q до 2,5% от Q . Проанализированы зависимости пульсаций давления P_{max}/P_0 моды $m = 1$ от величины $Q_{control}$. Для аксиальных актуаторов при $Q_{control}$ в диапазоне до 2% от Q сначала наблюдается увеличение пульсаций давления (иногда выше $1,5P_{max}/P_0$), затем происходит их подавление. Радиальные актуаторы плавно снижают пульсации давления, аксиальные и комбинированные могут увеличивать пульсации при малых $Q_{control}$. Это указывает на нелинейный характер взаимодействия струй с ПВЯ и подтверждает важность выбора направления и расхода инжекции.

Вторая серия экспериментов проведена при $Q_{control}$ 1, 2 и 3% от Q . При $Q_{control}/Q = 3\%$, все актуаторы снижают пульсации давления ниже базового случая. Пульсаций давления обобщены от коэффициента потока импульса C_μ (Рисунок 5). Увеличение C_μ способствует эффективному снижению пульсаций давления. Наилучшее подавление пульсаций давления (на 80% от базового случая) обеспечили радиальные актуаторы, а наихудшее – комбинированные актуаторы. Все актуаторы показали увеличение частоты ПВЯ примерно на 5-10% от базовой частоты.

Третья серия экспериментов направлена на анализ пространственного шага винта h спирального ПВЯ в зависимости от типа инжекции и величины C_μ (Рисунок 6). Акустические датчики располагались друг напротив друга, два в ближнем следе, два в дальнем следе (Рисунок 1). Шаг определялся по уровню сдвига фаз между датчиками. Получено, что чем больше C_μ , тем больше шаг винта, т.е. инжекция способствует вытягиваю слабеего вихря вдоль его оси. Наибольший эффект дали радиальные актуаторы, шаг винта для которых удалось хорошо обобщить линейной зависимостью от C_μ . Осевая инжекция оказывает минимальное влияние на

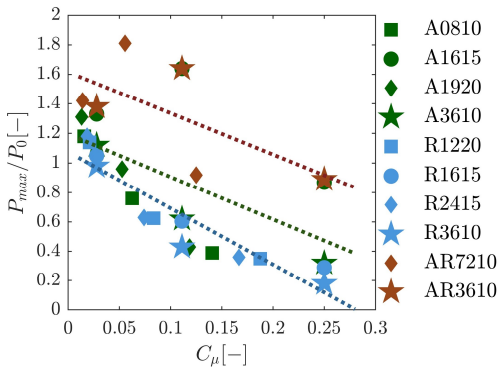


Рисунок 5 – Обобщение нормированных пульсаций давления от C_μ

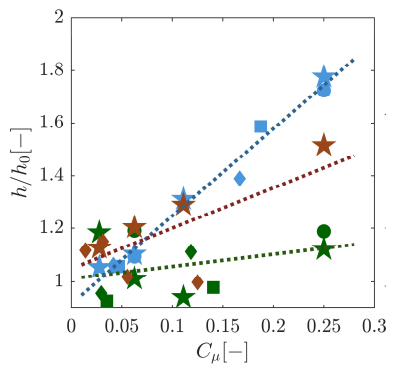


Рисунок 6 – Обобщение нормированного шага от C_μ

шаг по сравнению с радиальной. Осевые струи вовлекаются в ПВЯ, частично поддерживая его осевую когерентность и разрушают зону возвратного течения. Это ослабляет интенсивность и когерентность вихря. Радиальная инжекция, не взаимодействуя напрямую с ПВЯ в дальнем следе, воздействует на фундаментальный механизм неустойчивости, ответственный за образование ПВЯ, что приводит к его пространственному перераспределению.

Комбинированные актуаторы влияют на шаг винта вихря по-разному. AR3610 (36 отверстий под 45°) действует подобно радиальным актуаторам, но слабее, так как его струи лишь частично проникают в область наибольшей восприимчивости потока. AR7210 с независимыми радиальными и осевыми отверстиями (36+36) почти не влияет на шаг: осевые струи сами слабо влияют на шаг, а диапазон C_μ такой, что и радиальные струи также не могут заметно изменить шаг.

Перейдем к описанию результатов PIV-эксперимента, проведенном для всех 10 актуаторов при расходах управления $Q_{control}$ от 1 до 3%. Обработка PIV-полей скоростей включала: проведение SPOD-анализа, поиск связанных мод (с одинаковым спектральным содержанием), реконструкция полей скоростей, построение распределения мод по вкладу в ТКЭ потока. Получены пространственные характеристики ПВЯ, а также изучено изменение завихренности, циркуляции, пульсаций скоростей.

Построено обобщение вклада ПВЯ в ТКЭ от C_μ (Рисунок 7). При росте C_μ вклад ПВЯ в ТКЭ снижается. Радиальная инжекция наиболее эффективна для снижения вклада ПВЯ в ТКЭ, поскольку она воздействует на самоподдерживающийся контур обратной связи ПВЯ, а не только на зону возвратного течения, как в случае осевой инжекции. Полученные результаты хорошо согласуются с акустическими экспериментами (Рисунок 5).

Радиус прецессии (Рисунок 8) был извлечен из G-критерия. Радиус прецессии определяется как среднее положение области, в которой значение $G > 0,95$. Радиус прецессии уменьшается с ростом C_μ . Наиболее выраженный, линейный по C_μ эффект наблюдается для радиальной инжекции.

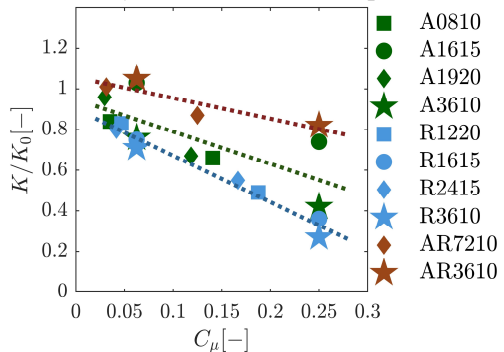


Рисунок 7 – Обобщение нормированного вклада ПВЯ в ТКЭ потока от C_μ

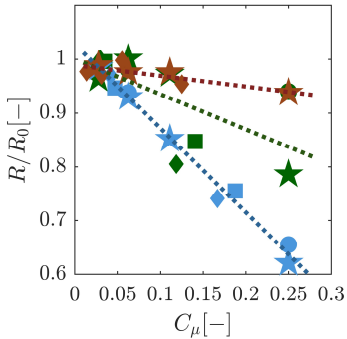


Рисунок 8 – Обобщение нормированного радиуса прецессии ПВЯ от C_μ

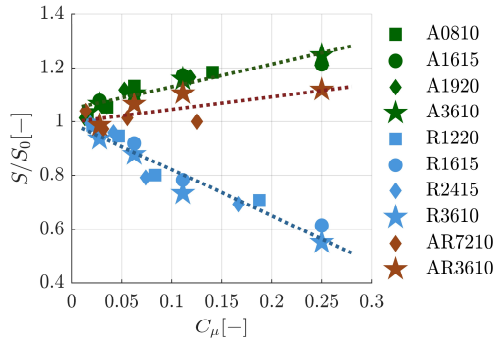


Рисунок 9 – Обобщение нормированного параметра крутки от C_μ

Сжатие траектории прецессии связано с ослаблением пульсаций давления: по мере ослабления ПВЯ сжимается к оси конуса, тем самым уменьшая своё динамическое воздействие на стенки конуса.

ЛДА-эксперимент позволил проанализировать течение в ближнем следе. По профилям скоростей вычислен интегральный параметр крутки S (Рисунок 9). Аксиальная и комбинированная инжекция увеличивают S по сравнению с базовым случаем. Радиальная инжекция снижает S ниже порога, необходимого для существования ПВЯ. Снижение крутки стабилизирует поток, отдаляя его от критической бифуркации Хопфа, из которой возникает ПВЯ. S/S_0 для каждого типа инжекции показывает линейную зависимость от C_μ . Линейное масштабирование возникает, потому что обмен импульсом, будь то добавление или изъятие углового момента, пропорционально передаётся потоку, делая отклик параметра крутки функцией управляющего воздействия.

Осевые актуаторы (например, A3610) способны эффективно подавлять ПВЯ даже при росте интегральной закрутки потока на 15–20%. Данный эффект объясняется тем, что осевая струя заполняет зону возвратного течения, которая служит гидродинамическим препятствием и областью генерации волн в контуре обратной связи ПВЯ. Ускорение потока на оси и уменьшение зоны рециркуляции нарушают пространственную структуру, необходимую для самоподдержания глобальной моды, несмотря на увеличение суммарного углового момента. Увеличение S также обусловлено вовлечением: осевая струя захватывает поток с высокой закруткой из окружающего кольцевого потока, концентрируя угловой момент вблизи оси. Отметим, что само осевое ядро струи может стать источником неустойчивости из-за сильного сдвига между ускоренной

осевой струёй и окружающим закрученным потоком. Таким образом, осевая инжекция, подавляя ПВЯ, может не полностью устранить нестационарность потока.

Эффективность осевой инжекции зависит от расположения отверстий: актуатор A3610 с централизованной подачей воздействует непосредственно на ПВЯ, тогда как A1615 с периферийными струями передаёт импульс во внешний сдвиговый слой, слабо влияя на ПВЯ. Комбинированный актуатор AR7210 практически не изменяет S из-за конкуренции радиальных (снижающих закрутку) и осевых (повышающих её) струй. Подчеркнем, что незначительное изменение глобального параметра, такого как крутка, не исключает существенной и полезной локальной перестройки неустойчивости потока.

На основе одновременного анализа пульсаций давления и PIV-измерений полей скорости установлена связь между подавлением ПВЯ и снижением динамических нагрузок на проточный тракт. Показано (Рисунок 10), что независимо от типа актуатора и величины C_{μ} , амплитуда пульсаций давления на стенке P_{max}/P_0 и вклад ПВЯ в ТКЭ K/K_0 связаны соотношением $P_{max}/P_0 = 1,37(K/K_0)^2$ с коэффициентом детерминации 0,94. Данная зависимость отражает физический механизм генерации пульсаций давления, связанный с центростремительным ускорением ПВЯ, а её квадратичный характер отражает дополнительный эффект пространственной перестройки вихря – сжатие ядра и уменьшение радиуса прецессии (Рисунок 11), усиливающие снижение динамических нагрузок при оптимальном управлении.

Оптимальной методикой подавления ПВЯ является радиальная инжекция. В отличие от осевой, она стабилизирует поток, снижая его интегральную закрутку, а не компенсируя последствия. Радиальные струи ослабляют сдвиговый слой, поддерживающий вихрь, и частично воздействуют на зону обратного потока с высокой восприимчивостью,

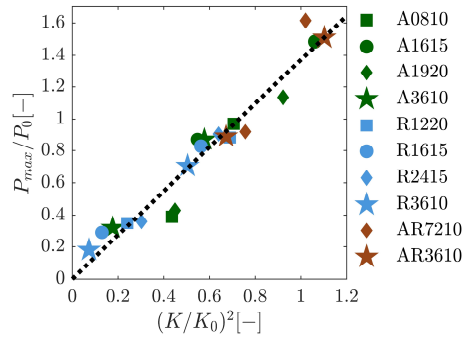


Рисунок 10 – Обобщение зависимости нормированной амплитуды пульсаций давления на стенке диффузора от нормированного квадрата вклада ПВЯ в ТКЭ общего потока

важную для контура обратной связи. В результате уменьшаются радиальный градиент тангенциальной скорости и сопутствующий градиент давления, что переводит течение в более устойчивое состояние.

На Рисунке 12 показано сравнение результатов разных научных групп с текущими результатами. Красной линией показана предлагаемая оптимальная радиальная инжекция. Видно, что предложенная радиальная инжекция требует наименьшего C_μ для снижения пульсаций давления на 80%. Выбор, основанный на ЛАУ, позволяет задействовать меньший C_μ , нежели в других работах, где, по-видимому, место и способ инжекции не были оптимальными. SPOD-анализ подтвердил, что радиальные струи разрушают контур обратной связи ПВЯ, возмущая область высокой восприимчивости вблизи тела обтекания, что согласуется с теоретической работой (Müller et al., 2022). Ключевым параметром управления служит C_μ , обеспечивающий линейное масштабирование характеристик ПВЯ в исследованном диапазоне $C_\mu \leq 0,25$. Хотя конкретные коэффициенты зависят от геометрии, качественное превосходство радиальной инжекции сохраняется для аналогичных закрученных течений.

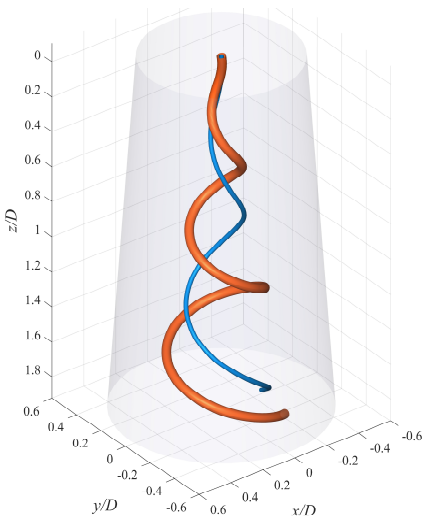


Рисунок 11 – Качественная демонстрация изменения пространственных параметров ПВЯ под влиянием инжекции. Базовый случай – красный цвет, радиальная инжекция R3610 при $C_\mu = 0,25$ – синий цвет

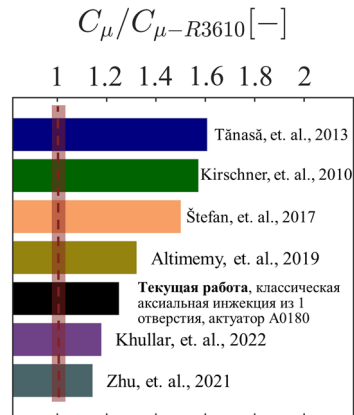


Рисунок 12 – Сравнение необходимого C_μ для снижения пульсаций давления на 80% от базового случая

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Создан и модернизирован экспериментальный стенд, включающий систему инъекции с разработанными и оптимизированными актуаторами, а также адаптированный комплекс диагностики потока. Это позволило провести высокоточные измерения пространственно-временных характеристик течения в контролируемых условиях.

2. Показано, что инъекция дополнительного расхода в области высокой восприимчивости потока к возмущениям, приводит к заметному изменению характеристик ПВЯ. Впервые получена обширная база данных, детально описывающая эволюцию вихревых структур под внешним воздействием в режимах с высокими пульсациями давления. Оптимальная инъекция приводит к значительному уменьшению интенсивности вихря, снижению радиуса его прецессии, увеличению шага винта, снижению вклада ПВЯ в турбулентную кинетическую энергию потока.

3. Выявлены физические механизмы стабилизации потока. Установлено, что инъекция приводит к ряду взаимосвязанных эффектов: нарушению когерентной структуры ПВЯ, перераспределению момента количества движения в ядре потока, а также снижению уровня пульсаций давления. Показано, что предлагаемый метод радиальной инъекции позволяет значительно снизить динамические нагрузки на проточную часть турбины. Одновременный анализ пульсаций давления и распределения скоростей за рабочим колесом позволил установить как механизмы управления вихревыми структурами, так и линейную корреляцию между квадратом нормированного вклада ПВЯ в ТКЭ и нормированной амплитудой пульсаций давления на стенке отсасывающей трубы.

4. Установлен определяющий безразмерный параметр (коэффициент потока импульса), от которого зависит эффективность управления. Построены обобщающие зависимости, позволяющие прогнозировать изменение характеристик ПВЯ в функции от заданных управляющих воздействий. На практике для подавления ПВЯ нужно стремиться достичь как можно большего коэффициента потока импульса от актуатора.

5. Научно обоснован и предложен подход к выбору оптимальных параметров системы управления (величина расхода, коэффициент потока импульса, расположение и геометрия актуаторов). Найдена методика инъекции, обеспечивающая максимальную эффективность подавления опасных вихревых структур при минимальном управляющем воздействии. Тщательный выбор оптимального направления и места подачи значительно снижает необходимый расход для подавления вихревых

структур, что положительно сказывается на общей эффективности турбины. Удалось достичь подавления пульсаций давления от ПВЯ на 80% при расходе струй, составляющем 3% от основного потока и коэффициенте потока импульса $C_{\mu} = 0,25$, что лучше соответствующих параметров, представленных в литературе.

**Список публикаций автора диссертации, в которых
отражены основные научные результаты диссертации:**

1. **Suslov D. A.**, Skripkin S. G., Shtork S. I. Effect of multi-jet flow control on the vortex core in a simplified Francis turbine model // *Physics of Fluids*. – 2025. – Vol. 37. – №. 9. – 095116. -13 p. **(УБС 1)**
2. **Suslov D. A.**, Skripkin S. G. Manipulation of vortex core characteristics in an expanding swirling flow by multijet injection // *Physics of Fluids*. – 2026. – Vol. 38. – №. 2. – 025150. -14 p. **(УБС 1)**
3. **Suslov D.**, Skripkin S. Active control of the precession frequency of the vortex core using rotating jets // *Energies*. – 2026. – Vol. 19. – №. 3. – P. 719. **(УБС 2)**
4. **Суслов Д. А.**, Скрипкин С. Г., Шторк С.И. Использование модели Скалли для определения параметров вихревого ядра в гидротурбине Френсиса // Письма в журнал технической физики – 2025. – Т. 51. – №. 17. – С. 12-16. **(УБС 1)**
5. **Суслов Д. А.**, Скрипкин С. Г., Цой М. А., Гореликов Е. Ю., Шторк С.И. Активное управление вихревыми структурами за рабочим колесом модели гидротурбины Френсиса // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2024. – Т. 31. – №. 4. – С. 803-815. **(УБС 2)**
6. **Suslov D.**, Skripkin S., Shtork S. Features of the precessing vortex control in the Francis turbine model via jet injection // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2024. – Vol. 578. – P. 01035. -6 p.
7. Litvinov I., **Suslov D.**, Tsoy M., Gorelikov E., Shtork S., Alekseenko S., Oberleithner K. Active control of the vortex induced pressure fluctuations in a hydro turbine model via axial and radial jets at the crown tip // *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. – 2023. – Vol. 16. – №. 4. – P. 320-331. **(УБС 3)**
8. Shtork S., **Suslov D.**, Skripkin S., Litvinov I., Gorelikov E. An overview of active control techniques for vortex rope mitigation in hydraulic turbines // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – №. 13. – P. 5131. **(УБС 2)**
9. **Suslov D.**, Litvinov I., Gorelikov E., Shtork S., Wood D. Laboratory modeling of an axial flow micro hydraulic turbine // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – №. 2. – P. 573. **(УБС 2)**
10. Skripkin S. G., **Suslov D. A.**, Litvinov I. V., Gorelikov E. U., Tsoy M. A., Shtork S. I. Comparative analysis of air and water flows in simplified hydraulic turbine models // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2150. – №. 1. – P. 012001.
11. **Суслов Д. А.**, Литвинов И. В., Гореликов Е. Ю. Сравнительный анализ пульсаций давления, вызванных спирально-вихревыми структурами в проточной части модели гидротурбины // *Вестник Южно-Уральского государ-*

ственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21. – №. 3. – С. 49-56. (УБС 2)

12. Litvinov I., **Suslov D.**, Gorelikov E., Shtork S. Experimental study of transient flow regimes in a model hydroturbine draft tube //Energies. – 2021. – Vol. 14. – №. 5. – P. 1240. (УБС 2)
13. **Suslov D.A.**, Litvinov I.V., Gorelikov E.U., Shtork S.I. The swirl number as a method for determining the optimal operating mode of the micro hydro turbine // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 2119. – №. 1. – P. 012160.
14. Litvinov I. V., **Suslov D. A.**, Gorelikov E. U., Shtork S.I. Swirl number and nozzle confinement effects in a flat-vane axial swirler // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2021. – Vol. 91. – P. 108812. (УБС 1)
15. **Суслов Д. А.**, Литвинов И. В., Гореликов Е. Ю., Шторк С. И. Поиск оптимальных режимов работы посредством изучения полей скорости в воздушной модели микрогидротурбины // Сибирский физический журнал. – 2020. – Т. 15. – №. 2. – С. 73-83 (УБС 4)
16. **Suslov D. A.**, Litvinov I. V., Shtork S. I. Frequency response of swirl flow behind an axial swirler // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – Vol. 2211. – №. 1. – P. 030012.
17. **Suslov D. A.**, Litvinov I. V., Gorelikov E. U., Shtork S. I. Transient phenomena in the draft tube model of a Francis hydro-turbine // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1359. – №. 1. – P. 012016.
18. **Суслов Д. А.**, Литвинов И. В., Шторк С. И., Гореликов Е. Ю. Влияние переходных режимов на нестационарные вихревые явления в модели отсасывающей трубы гидротурбины //Сибирский физический журнал. – 2019. – Т. 14. – №. 4. – С. 55-68. (УБС 4)
19. Litvinov I., **Suslov D.**, Gorelikov I., Sadbakov O., Shtork S. Swirl number analysis in the air hydroturbine model // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Vol. 2027. – №. 1. – P. 040057.

Список РИД по теме диссертации:

1. **Суслов Д.А.**, Скрипкин С.Г., Гореликов Е.Ю., Цой М.А., Шторк С.И. «Способ подавления пульсаций давления в гидротурбине». **Патент на изобретение** № 2831741 от 12.12.2024 г.
2. **Суслов Д.А.**, Литвинов И.В. «Программа для анализа синхронной и асинхронной составляющей, разложения на азимутальные моды пульсаций давления, вызванных спирально-вихревыми структурами». **Свидетельство о регистрации программы ЭВМ** № 2021666229 от 11.10.2021 г.
3. Гореликов Е. Ю., Литвинов И.В., **Суслов Д. А.**, Шторк С.И. «Стенд для моделирования режимов течения в отсасывающей трубе гидротурбины». **Патент на полезную модель** № 202408 от 16.02.2021 г.

Подписано к печати 11.03.2026 г. Заказ № 3
Формат 60×84/16. Объем 1 уч.-изд. л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.