

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Сулова Даниила Андреевича на тему: «Управление характеристиками прецессирующих вихрей в проточной части модели гидротурбины», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Сулова Д.А. посвящена решению важной научно-технической проблемы – разработке методов подавления опасных низкочастотных пульсаций давления в гидротурбинах, вызванных прецессирующим вихревым ядром (ПВЯ). **Актуальность темы исследования не вызывает сомнений и обоснована автором весьма подробно.**

Во-первых, в современной энергетике наблюдается глобальный тренд на интеграцию в энергосистему нестабильных возобновляемых источников генерации электроэнергии (в том числе солнечной и ветровой). Нестабильность подразумевает зависимость выработки энергии от внешних неконтролируемых факторов: силы ветра, количества солнечных дней, уровня воды в реках и пр. Поэтому, применительно к гидротурбинам, а именно гидротурбине Френсиса, рассматриваемой в настоящей работе, требуется способность гибкого регулирования мощности, что неизбежно связано с эксплуатацией в неоптимальных режимах частичной нагрузки. Именно в этих режимах формируется прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ), генерирующее значительные пульсации давления, снижающие КПД и надежность оборудования, а в предельных случаях – угрожающие целостности гидроагрегата (как пример - авария на Саяно-Шушенской ГЭС 2009 г.).

Во-вторых, проблема управления закрученными течениями и крупномасштабными вихревыми структурами является междисциплинарной и актуальна для широкого класса технических устройств: вихревых расходомеров, сепараторов, камер сгорания и элементов ракетных двигателей. Таким образом, результаты, полученные в работе, имеют фундаментальное значение для механики жидкости и газа.

В-третьих, как убедительно показано в обзоре литературы (Глава 1), существующие методы управления ПВЯ (как пассивные, так и активные) зачастую основаны на эмпирическом подходе «проб и ошибок», характеризуются узким диапазоном эффективности, снижением КПД или высокими энергозатратами. Отсутствует систематическое понимание того, как параметры управления (расход, импульс, ориентация струй) влияют на пространственно-временную структуру вихря. Диссертация Сулова Д.А. направлена на восполнение этого пробела.

Представленные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации являются хорошо обоснованными и достоверными. Это обеспечивается следующими факторами:

1. Теоретическая база. Выбор места и способа управляющего воздействия выполнен не эмпирически, а на основе результатов линейного анализа устойчивости (ЛАУ), что является

строгим научным подходом к задаче оптимального управления глобальной гидродинамической неустойчивостью.

2. Комплексная экспериментальная методика. Работа выполнена на высоком методическом уровне с использованием современных и взаимодополняющих методов диагностики: лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА), анемометрии по изображениям частиц (PIV) и многоканальных измерений пульсаций давления с разложением на азимутальные моды.
3. Корректность эксперимента. Автором проделана большая работа по модернизации стенда, калибровке оборудования и верификации данных. Корректность ЛДА-измерений подтверждена балансом расходов, а частота ПВЯ перекрестно проверена по данным давления, ЛДА и PIV. Достоверность обеспечена стабильностью режимных параметров, оценкой погрешностей и воспроизводимостью результатов.
4. Применение современного математического аппарата. Обработка данных PIV с помощью спектрального метода главных компонент (SPOD) и надежная идентификация вихревого ядра с помощью G-критерия позволили автору выделить когерентные структуры на фоне турбулентного шума и количественно оценить их трансформацию под действием управления.

Сформулированные выводы логично вытекают из полученных экспериментальных данных, не противоречат известным физическим представлениям о закрученных течениях и согласуются с результатами других исследователей при сопоставлении.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые предложен и экспериментально обоснован способ активного управления прецессирующим вихревым ядром, основанный на целенаправленном возмущении потока в области наибольшей восприимчивости, предсказанной линейным анализом устойчивости, что принципиально отличает его от традиционного эмпирического подбора параметров. В работе впервые проведено систематическое экспериментальное сравнение влияния пространственной ориентации (аксиальная, радиальная, комбинированная), расхода и импульса струй на характеристики ПВЯ, и показано, что ключевым параметром эффективности является безразмерный коэффициент потока импульса, а не просто объемный расход. С помощью PIV-измерений и G-критерия вихря впервые количественно охарактеризовано изменение под действием управления пространственных параметров вихря – радиуса прецессии, размера ядра, шага винтовой структуры и циркуляции, и получены их обобщающие зависимости от коэффициента потока импульса. Комплексный анализ полей скорости и пульсаций давления позволил впервые раскрыть физические механизмы воздействия различных типов инъекции: показано, что радиальная инъекция стабилизирует поток, снижая параметр закрутки ниже критического порога, тогда как осевая инъекция подавляет ПВЯ за счет заполнения зоны возвратного течения, но при росте закрутки. Наконец, установлена прямая линейная корреляция между квадратом нормированного вклада ПВЯ в турбулентную

кинетическую энергию потока и нормированной амплитудой пульсаций давления на стенке отсасывающей трубы, что имеет важное практическое значение для проектирования систем управления.

Обобщая, можно сказать, что **научная значимость** работы состоит в углублении понимания физической природы прецессирующего вихревого ядра как глобальной гидродинамической неустойчивости и механизмов его подавления. Полученные количественные зависимости эволюции пространственно-временных характеристик вихря от параметров управляющего воздействия вносят существенный вклад в механику закрученных течений и могут служить основой для верификации теоретических моделей и численных расчетов. **Практическая значимость** работы определяется разработкой научно обоснованного подхода к выбору оптимальных параметров системы активного управления для подавления пульсаций давления в гидротурбинах. Показано, что радиальная инжекция при расходе 3% от основного потока и коэффициенте потока импульса 0,25 позволяет снизить амплитуду пульсаций давления на 80%. Этот результат лучше соответствующих параметров, представленных в литературе, и может быть использован при модернизации существующих и проектировании новых гидроагрегатов. Результаты защищены патентом на изобретение, полезную модель и свидетельством о регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации:

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем работы составляет 167 страниц, включая 47 рисунков, 2 таблицы и приложение. Список литературы содержит 220 наименований, что свидетельствует о глубокой проработке соискателем темы работы.

- **Во введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.
- **В первой главе** представлен подробный обзор литературы по гидротурбинам, физике ПВЯ, методам его экспериментального моделирования и существующим подходам к управлению с помощью пассивных и активных методов. Особое внимание уделено перспективам применения линейного анализа устойчивости, что логично подводит к постановке задач исследований соискателя.
- **Во второй главе** детально описан экспериментальный стенд, разработанная система управления и измерительные методики (ЛДА, PIV, акустические измерения). В данной главе, что немаловажно, автор уделяет большое внимание калибровкам, оценке погрешностей и верификации данных (сделана проверка свойств трассеров, баланс расходов, частота ПВЯ проверена перекрестным методом), что подтверждает высокую достоверность результатов и высокий уровень владения соискателем техникой эксперимента. Подробно изложены современные методы обработки данных: SPOD, G-критерий, метод Ломба-Скаргла. Дополнительной гарантией достоверности результатов является тот факт, что работа

выполнена на экспериментальных установках и в коллективе ИТ СО РАН, занимающего лидирующие позиции в области экспериментальных исследований и диагностики потоков.

- **Третья глава** является ключевой. В ней последовательно представлены результаты исследования. Сначала охарактеризован базовый режим течения с максимальными пульсациями давления. Затем проведен анализ влияния различных стратегий управления на пульсации давления, выявлена роль коэффициента потока импульса. Дан анализ влияния инъекции на осредненные параметры потока (профили скорости, параметр закрутки), на энергонесущие моды (SPOD-анализ) и на пространственные характеристики ПВЯ (G-критерий). Выявлены физические механизмы стабилизации потока и установлена связь между снижением вклада ПВЯ в ТКЭ потока и падением амплитуды пульсаций давления. Логичным завершением данной главы являются обоснованные рекомендации по выбору оптимальной конфигурации управления ПВЯ.

Содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации.

При общей высокой оценке работы у меня имеются **вопросы**:

1. Насколько чувствительны пространственные характеристики ПВЯ к небольшим изменениям (в пределах 5%) параметра закрутки на входе в измерительный участок?
2. В работе использовался конус с углом раскрытия 4° . Насколько влияет изменение угла раскрытия конического диффузора на формирование и стабильность ПВЯ? Чем обусловлен выбор именно такого значения угла раскрытия?
3. Насколько чувствительны выявленные положения ПВЯ для определения среднего радиуса прецессии к выбранному размеру окна (64 на 64 и 32 на 32) при обработке методом PIV?
4. Сохраняется ли линейная зависимость параметров вихря, наблюдаемая при радиальной инъекции, при более высоких значениях коэффициента потока импульса, чем те, что были заданы в рамках текущего исследования?

Указанные вопросы носят уточняющий характер и не снижают общей высокой научной и практической ценности диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Сулова Даниила Андреевича «Управление характеристиками прецессирующих вихрей в проточной части модели гидротурбины» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи – разработка эффективного метода подавления прецессирующего вихревого ядра в гидротурбинах на основе установления физических закономерностей его взаимодействия с управляющими струями. По актуальности, научной новизне, практической значимости и объему выполненных исследований **диссертация соответствует всем критериям, установленным «Положением о**

присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (пп. 9-11, 13, 14), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Основываясь на изученном тексте диссертации, автореферата и опубликованных соискателем работ по теме диссертации **считаю, что автор диссертационной работы, Суслов Даниил Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.**

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,

(01.02.05 -Механика жидкости, газа и плазмы),

Ведущий научный сотрудник лаборатории аэрофизических

исследований дозвуковых течений Федерального государственного

бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной

механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения

Российской академии наук (ИТПМ СО РАН).

Электронная почта: mikhail@itam.nsc.ru



Катасонов Михаил

Михайлович

17 апреля 2026 г.

Подпись, ученую степень и должность Катасонова М. М. заверяю

Ученый секретарь ИТПМ СО РАН,

кандидат физико-математических наук



Кратова Юлия

Владимировна

17 апреля 2026 г.

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1

Телефон организации: +7 (383) 330-42-68

Адрес электронной почты: admin@itam.nsc.ru

Адрес официального сайта организации: <http://www.itam.nsc.ru/>

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения

Российской академии наук (ИТПМ СО РАН).

Я, Катасонов Михаил Михайлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Суслова Даниила Андреевича, и их дальнейшую обработку.