

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕНТА**

на диссертацию Суслова 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

### **Актуальность избранной темы исследования**

Диссертационная работа Суслова Д.А. посвящена одной из важных проблем современной гидродинамики и гидроэнергетики – управлению крупномасштабными вихревыми структурами, возникающими в закрученных потоках за рабочим колесом гидротурбины. Актуальность темы обусловлена как фундаментальным интересом к природе глобальных гидродинамических неустойчивостей, так и острой практической потребностью в расширении рабочего диапазона и повышении надежности гидроагрегатов. Несмотря на многолетние исследования, проблема создания эффективных и энергетически выгодных методов подавления ПВЯ до сих пор не решена. Существующие подходы (как пассивные, так и активные) часто основаны на эмпирическом поиске и не имеют под собой строгой теоретической базы, что ограничивает их эффективность и приводит к неоправданным энергозатратам.

Диссертация Суслова Д.А., в которой управляющее воздействие выбирается на основе результатов линейного анализа устойчивости (ЛАУ), а его влияние исследуется с помощью современного комплекса оптических методов, безусловно, является актуальной.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверность**

Научные положения, выводы и практические рекомендации, сформулированные в диссертации, являются глубоко обоснованными и достоверными.

**Теоретическая обоснованность** работы опирается на фундаментальные положения механики жидкости и газа, включая теорию закрученных течений, модель винтового вихря и, что особенно важно, современные методы линейного анализа устойчивости. Выбор места для управляющего воздействия (вблизи края тела обтекания) выполнен не интуитивно, а строго обоснован результатами глобального ЛАУ, проведенного для той же геометрии. Это переводит задачу управления из разряда эмпирических в разряд научно-обоснованных и придает выводам особую убедительность.

**Экспериментальная обоснованность** и достоверность обеспечены высоким методическим уровнем проведения исследований. Автором лично модернизирован аэродинамический стенд, разработан и изготовлен набор актуаторов. Применен комплекс взаимодополняющих прецизионных и бесконтактных методов диагностики:

- Лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) для получения надежных данных о средних и пульсационных характеристиках скорости.
- PIV-измерения для визуализации мгновенных полей скорости с высоким пространственным разрешением.
- Многоканальные измерения пульсаций давления с разложением на азимутальные моды для количественной оценки вклада ПВЯ в пульсации давления.

Обработка данных выполнена с использованием современных математических методов: спектральный метод главных компонент (SPOD) для выделения когерентных структур и G-критерий для идентификации границ вихревого ядра. Все это обуславливает высокую степень достоверности полученных результатов и выводов. Помимо перечисленного, достоверность полученных результатов обеспечивалась предварительной настройкой и калибровкой оборудования, проведением тестовых измерений, а также воспроизводимостью результатов с учетом рассчитанных погрешностей и сопоставлением с результатами других исследователей.

### **Новизна результатов**

Научная новизна четко прослеживается по тексту диссертации и автореферата и заключается в следующем:

1. Впервые экспериментально реализован подход к управлению ПВЯ в модели гидротурбины, при котором место воздействия (область высокой восприимчивости) определено на основе результатов линейного анализа устойчивости (ЛАУ).
2. Показано, что эффективность подавления ПВЯ в модели гидротурбины определяется не просто долей инжектируемого расхода (как ранее характеризовали в литературе), а безразмерным коэффициентом потока импульса. Это фундаментальный результат, позволяющий универсально масштабировать управляющее воздействие.
3. Раскрыты принципиальные различия в механизмах воздействия струй разной пространственной ориентации:
  - Радиальная инжекция напрямую снижает интегральный параметр закрутки ниже критического порога, стабилизируя поток за счет смещения от точки бифуркации. Радиальные струи ослабляют сдвиговый слой, поддерживающий вихрь, и частично воздействуют на зону обратного потока с высокой восприимчивостью, важную для контура обратной связи. В результате уменьшаются радиальный градиент тангенциальной скорости и сопутствующий градиент давления, что переводит течение в более устойчивое состояние.
  - Осевая инжекция подавляет ПВЯ за счет заполнения зоны возвратного течения, но при этом может увеличивать закрутку, что делает этот механизм менее

эффективным.

— Комбинированная инъекция показала наименьшую эффективность из-за конкуренции разнонаправленных механизмов.

4. Впервые с помощью G-критерия получены количественные зависимости изменения радиуса прецессии, размера ядра, циркуляции и шага винтовой структуры от коэффициента потока импульса. Особо значимо, что все перечисленные параметры для радиальной инъекции линейно обобщаются от введенного автором коэффициента потока импульса. Установлено, что под действием управления вихрь поджимается к оси, растягивается вдоль потока и теряет свою когерентность.
5. Проанализирована взаимосвязь полей скорости и пульсаций давления на стенке диффузора отсасывающей трубы. Удалось найти линейную корреляцию между квадратом вклада ПВЯ в турбулентную кинетическую энергию (ТКЭ) и амплитудой пульсаций давления на стенке. Она имеет важное значение, показывая, что динамическая нагрузка на стенку диффузора обусловлена комбинацией энергии, заключенной в когерентном вихревом движении, и пространственными изменениями вихря вследствие инъекции.

**Научная значимость** работы заключается в существенном прогрессе в понимании физики прецессирующего вихревого ядра как объекта управления. Установленные закономерности масштабирования пространственных и энергетических характеристик вихря от коэффициента потока импульса имеют характер физических обобщений и могут быть использованы для верификации модели винтового вихря. 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. Автором предложен, обоснован и запатентован способ подавления пульсаций давления в гидротурбине, который позволяет снизить амплитуду пульсаций давления на 80% при относительно небольшом расходе управляющих струй. Разработанные рекомендации по выбору оптимальной конфигурации актуатора могут быть использованы при модернизации существующих и создании новых гидротурбин.

#### **Оценка содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Структура работы логична и полностью отражает ход исследований соискателя.

Первая глава представляет собой глубокий анализ современного состояния проблемы. Автор демонстрирует отличное знание предмета, рассматривая вопросы

гидроэнергетики, физики закрученных течений и ПВЯ, существующих методов управления. Особый интерес представляет анализ работ по линейной теории устойчивости, который служит теоретическим фундаментом для собственных экспериментов автора. Обзор позволяет квалифицированно обосновать выбор направления исследования.

Вторая глава является методологической основой работы. В ней детально описан экспериментальный стенд, принципы моделирования течения в гидротурбине, разработанные актуаторы. Важным является подробное описание измерительных методик (ЛДА, PIV, акустика), процедур калибровки и оценки погрешностей. Особого внимания заслуживает раздел, посвященный SPOD и G-критерию – современным инструментам анализа, адекватность применения которых в контексте текущих исследований убедительно обоснована соискателем.

Третья глава содержит основные научные результаты. Проведен детальный анализ базового режима с ПВЯ. Систематически исследовано влияние актуаторов и расхода инжекции на пульсации давления, осредненные профили скорости (ЛДА), параметр крутки, энергетические моды (SPOD) и пространственные характеристики вихря (G-критерий). Выявлены физические механизмы стабилизации потока. Установлена связь между снижением ТКЭ и падением пульсаций давления. Глава завершается обоснованными рекомендациями по выбору оптимальной стратегии управления, что демонстрирует прикладную направленность работы.

В заключении подведены итоги, которые полностью соответствуют поставленным задачам и полученным результатам.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает основное содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в 19 научных работах, включая статьи в ведущих рецензируемых журналах первого квартиля, и прошли апробацию на многочисленных конференциях. Практическая направленность работы подкреплена полученными РИД по теме диссертации.

Несмотря на общую положительную оценку диссертации и проделанной соискателем значительной работы, у меня возникли следующие **вопросы**:

- В какой степени выводы, сделанные на основе использованной упрощенной аэродинамической модели, применимы к полномасштабным гидротурбинам?
- Эксперименты проводились при числе Рейнольдса порядка  $2 \cdot 10^4$ . В каком диапазоне чисел Рейнольдса масштабируются сделанные в работе выводы?
- Насколько локализовано влияние инжектируемых струй на течение вдоль диффузора отсасывающей трубы?

Указанные вопросы не снижают общей высокой оценки работы, а скорее уточняют полученные результаты, а также определяют направления для дальнейших исследований.

Диссертация Суслова Даниила Андреевича «Управление характеристиками прецессирующих вихрей в проточной части модели гидротурбины» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная задача – установлены физические закономерности воздействия активного управления на прецессирующее вихревое ядро и на их основе разработан эффективный метод подавления пульсаций давления. Диссертация полностью соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (пункты 9, 10, 11, 13, 14), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы (физико-математические науки) по пункту 13 «Струйные течения и кавитация» и по пункту 14 «Гидродинамическая устойчивость».

На основе изучения диссертации и опубликованных работ по теме диссертации считаю, что автор диссертации, Суслов Даниил Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

**Официальный оппонент:**

Чаплина Татьяна Олеговна, доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы», ведущий научный сотрудник лаборатории геомеханики

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН)

Отзыв составлен и подписан 27 марта 2026 г.

Электронная почта официального оппонента: [tanya75.06@mail.ru](mailto:tanya75.06@mail.ru)

Почтовый адрес организации: 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Телефон организации: +7-495-434-00-17

Электронная почта организации: [ipm@ipmnet.ru](mailto:ipm@ipmnet.ru); официальный сайт организации: [ipmnet.ru](http://ipmnet.ru)

Подпись официального оппонента Чаплиной Татьяны Олеговны заверяю:

Ученый секретарь ИПМех РАН,  
кандидат физико-математических наук



Котов Михаил Алтаевич