

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574  
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,  
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,  
г. Санкт-Петербург, 195251  
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Ю.В. Фомин



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого на диссертацию 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

### **Актуальность темы исследования.**

Диссертация Д.А.Сулова посвящена экспериментальному исследованию вопросов управления прецессирующими вихревыми структурами, которые возникают в закрученном потоке на входе в отсасывающую трубу гидротурбины в режиме частичной ее нагрузки. Актуальность исследований данной направленности обусловлена как фундаментальным значением углубленного понимания природы глобальных гидродинамических неустойчивостей, присущих сильнозакрученным течениям и наиболее ярко проявляющихся в развитии прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ), так и задачами разработки научных основ инженерных методов, обеспечивающих управление прецессирующими вихрями с целью повышения эффективности и надежности работы гидроагрегатов.

**Анализ содержания диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (220 наименований) и приложения. Работа изложена на 167 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и 2 таблицы, что полностью отражает объем проведенных исследований.

Во Введении обосновывается актуальность и практическая значимость темы диссертации, формулируются ее цель и конкретные задачи, дается общая

характеристика используемых для их решения методов и формулируются основные научные результаты работы и положения, выносимые автором на защиту. Описывается личный вклад Д.А.Суслова в диссертационное исследование, а также приводится список конференций и семинаров, на которых докладывались результаты работы.

В первой главе рассматриваются общие и актуальные вопросы современной гидроэнергетики, дается достаточно полный обзор современного состояния теоретических и экспериментальных исследований явлений, связанных с прецессией вихревого ядра в закрученных потоках, представлена систематизация существующих методов управления ПВЯ, как пассивных, так и активных, с обстоятельным анализом их преимуществ и недостатков, освещается важность представленных в литературе работ по линейному анализу устойчивости закрученных течений, на основе которого удастся предсказывать области наибольшей чувствительности потока к возмущениям и использовать это для разработки эффективных методов управления характеристиками ПВЯ. По итогам литературного обзора автор формулирует направления собственного диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена описанию экспериментального аэродинамического стенда и примененных методик исследования. Представленные в главе материалы позволяют сделать вывод о высоком методическом уровне работы, поставленной и проведенной соискателем работы на стенде, существенно модернизированном им с целью установки системы активного управления закрученным потоком в модели отсасывающей трубы гидротурбины. Несомненным достоинством работы является проектирование и изготовление развитого набора актуаторов различной геометрии, что в итоге позволило автору провести систематическое исследование влияния различных способов подачи управляющего потока воздуха в область входа закрученного потока в конус отсасывающей трубы. Описываются характеристики примененных автором современных методов диагностики: лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА), анемометрии по изображениям частиц (PIV) и измерений пульсаций давления на стенках с разложением на азимутальные моды. Особое внимание автор уделяет вопросам обеспечения достоверности результатов: калибровке оборудования, проверке влияния инерционности трассеров, верификации методики ЛДА по балансу расходов, перекрестной проверке результатов измерения частоты ПВЯ разными методами. В завершающей части главы описывается использованный автором современный метод обработки данных PIV измерений, известный как спектральный метод главных компонент (SPOD), а также освещаются вопросы применения G-критерия для идентификации ядра вихря.

В третьей главе излагаются и обсуждаются результаты проведенных автором измерений и их анализа. Обстоятельно обоснован выбор базового режима течения, который характеризуется формированием в потоке развитого ПВЯ, и приводятся детальные результаты измерений характеристик ПВЯ для этого режима. Далее приводятся результаты систематического исследования влияния подачи

управляющего (инжектируемого) потока воздуха через различные актуаторы (10 видов) на характеристики ПВЯ, с оценкой степени его подавления при увеличении расхода инъекции до 3% от основного расхода. Обобщающие результаты, полученные автором при обработке и обстоятельном анализе экспериментальных данных, заключаются в следующем:

- эффективность управления определяется не столько объемным относительным расходом, сколько коэффициентом потока импульса;

- существуют принципиальные различия в физических механизмах воздействия струй разной ориентации: радиальная инъекция снижает параметр закрутки ниже критического порога, стабилизируя поток, в то время как осевая инъекция в зону возвратного течения разрушает контур обратной связи ПВЯ, и при этом может даже приводить к увеличению интегральной закрутки; комбинированная инъекция показывает наименьшую эффективность из-за конкуренции механизмов;

- применение G-критерия позволило получить зависимости пространственных характеристик ПВЯ от коэффициента потока импульса: вследствие радиальной инъекции вихрь сжимается к оси, растягиваясь вдоль потока, а его ядро теряет когерентность;

- SPOD-анализ позволил количественно оценить снижение вклада ПВЯ в турбулентную кинетическую энергию (ТКЭ) потока; актуаторы с радиальной инъекцией обеспечивают максимальное подавление (доля моды ПВЯ снижается на 70% при коэффициенте потока импульса 0,25), что сопровождается практически полной потерей гармонической корреляции мод;

- существует линейная корреляция между квадратом нормированного вклада ПВЯ в ТКЭ и нормированной амплитудой пульсаций давления на стенке; это соотношение имеет важное практическое значение для проектирования систем управления.

В Заключении сформулированы основные научные результаты и выводы, полученные в ходе диссертационного исследования.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

**Оценка изложения результатов диссертационного исследования.** Текст диссертации логично структурирован. Постановки задач, описание применяемых методов измерений и алгоритмов для обработки данных представлены корректно и соответствуют общепринятым нормам.

**Научная новизна исследования** основывается на новых постановках задач исследования. Новизна основных результатов заключается, прежде всего, в следующем: (1) с опорой на результаты линейного анализа устойчивости и на полученные данные проведенных экспериментов, впервые предложен и обоснован с физической точки зрения оптимальный способ подачи струй инжектируемой жидкости для наиболее эффективного подавления ПВЯ в гидротурбине; (2) проведено систематическое сравнение различных способов подачи струй с целью

управления прецессирующими вихревыми структурами и впервые комплексно показано влияние инъекции струй на пространственные и временные характеристики ПВЯ; (3) впервые механизмы управления вихревыми структурами описаны на основе результатов одновременного анализа пульсаций давления и распределения скоростей за рабочим колесом; (4) показано, что безразмерный коэффициент потока импульса является ключевой характеристикой, определяющей эффективность воздействия управления на ПВЯ.

**Степень достоверности результатов, изложенных в диссертации.** Достоверность полученных результатов обеспечивалась использованием современных, хорошо обоснованных измерительных методик (лазерная доплеровская анемометрия, анемометрия по изображениям частиц), предварительной настройкой и калибровкой оборудования, проведением тестовых измерений и воспроизводимостью результатов с учетом рассчитанных погрешностей.

**Полнота изложения материалов диссертации в публикациях.** По теме диссертации опубликовано 19 работ, все – в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК. Из данных 19 публикаций 4 статьи опубликованы в журналах 1-го уровня «Белого списка» РЦНИ и 6 статей в журналах 2-го уровня «Белого списка» РЦНИ. Получены 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Значимость полученных результатов для развития отрасли науки.** Результаты диссертационной работы Д.А. Сулова в совокупности представляют собой решение актуальной научной задачи в области механики жидкости и газа, прежде всего, в ее разделах, охватывающих вопросы гидродинамической устойчивости закрученных течений и управления когерентными вихревыми структурами. Работа представляет собой продуктивный пример экспериментальной реализации подхода к управлению, основанного на предсказаниях, полученных в рамках линейного анализа устойчивости (ЛАУ). Это служит подтверждением адекватности ЛАУ для описания глобальных неустойчивостей типа ПВЯ и открывает новые перспективы для развития методов оптимального управления в гидродинамике сложных потоков. Результаты диссертации демонстрируют эффективность комплексного подхода к экспериментальным исследованиям сложных турбулентных течений, включающего применение современных оптических методов диагностики (ЛДА, PIV) и передовых алгоритмов обработки данных (SPOD, анализ G-критерия).

**Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы.** Полученные в диссертационной работе результаты имеют высокую практическую значимость и могут быть рекомендованы к использованию в следующих областях:  
- предложенный и запатентованный способ подавления пульсаций давления путем радиальной инъекции через актуатор может быть рекомендован проектным

организациям для модернизации существующих и проектирования новых гидротурбин Френсиса.

- результаты работы могут быть использованы при проектировании систем активного управления для других типов гидравлических машин (насосы, насос-турбины), а также для устройств с закрученными потоками (циклоны, сепараторы, вихревые горелки, элементы ракетных двигателей).

- полученная экспериментальная база данных (поля скорости, измеренные методами ЛДА и PIV, пульсации давления) могут служить материалом для валидации подходов к численному моделированию турбулентных закрученных течений.

- результаты диссертации могут быть использованы для постановки и проведения родственных исследований в СПбПУ, ИТ СО РАН, ИТПМ СО РАН, МЭИ, МГТУ, НГТУ, МГУ и в других организациях соответствующего профиля.

**Замечания по работе.** При прочтении диссертации возникли следующие замечания:

1. На стр. 19 автор пишет: «Под «распадом вихря» понимается исчезновение осесимметричности вихря по причине прогрессирующего в потоке гидродинамических неустойчивостей». Это не вполне точно, так как под «распадом вихря» понимается также и образование центральной зоны возвратного течения в случае относительно сильно закрученного осесимметричного потока в трубе, а также в некоторых других случаях.
2. На стр. 121 диссертации присутствует неясное заключение вида: «Перераспределение, показанное на рисунке 44, напрямую изменяет важный параметр устойчивости – интегральный параметр крутки  $S$ ». Почему здесь параметр крутки (определяющий параметр потока в целом) именуется «параметром устойчивости»?
3. Подпись к рисунку 46, данная в виде «Обобщение зависимости нормированной амплитуды пульсаций давления на стенке диффузора от нормированного квадрата вклада ПВЯ в ТКЭ общего потока» неудачна в отношении использования термина «зависимость». Ни одна из величин, значения которых отложены по осям графика, не является аргументом или функцией в обычном смысле. Фактически на графике сопоставляются значения двух функционалов.

Высказанные замечания относятся к представлению материала на страницах диссертации и не изменяют общего положительного впечатления о работе, выполненной Д.А. Суловым.

**Заключение.** Диссертация Сулова Д. А. является законченной научно-квалификационной работой, соответствует паспорту научной специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы» (физико-математические науки) и профилю ведущей организации. Выявленные Д.А. Суловым физические закономерности воздействия активного управления на прецессирующее вихревое ядро в закрученном потоке за рабочим колесом модельной гидротурбины Френсиса и разработанный на их основе эффективный метод подавления пульсаций давления


представляют собой в совокупности решение актуальной научной задачи в области механики жидкости и газа, имеющей существенное значение для развития таких ее разделов как гидродинамическая устойчивость пространственных течений, управление вихревыми потоками и смежные разделы. Диссертация «Управление характеристиками прецессирующих вихрей в проточной части модели гидротурбины» 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. Автор диссертации Суслов Даниил Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв заслушан и одобрен на заседании Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики (Протокол № 03-26 от «25» марта 2026 г.). Присутствовало 25 чел. «За» 25 чел.; «против» - нет; «воздержалось» - нет.

Отзыв составили:

СМИРНОВ Евгений Михайлович


(Ф.И.О.)

13.04.2026   
(дата) (подпись)

Профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Физико-механического института, доктор физико-математических наук, профессор

ФРОЛОВ Максим Евгеньевич

(Ф.И.О.)

13.4.26   
(дата) (подпись)

Директор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Физико-механического института, доктор физико-математических наук, доцент

Составители отзыва дают согласие на обработку своих персональных данных, связанных с защитой диссертации и оформлением аттестационного дела Сулова Д.А.

#### Данные организации

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

**Адрес:** 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б

**Телефон:** 7(812) 552-60-80, +7 (812) 297-20-95, 8 (800) 707-18-99

**Сайт:** <https://www.spbstu.ru/>

**Адрес электронной почты:** [office@spbstu.ru](mailto:office@spbstu.ru)

