



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН  
Академик РАН Маркович Д.М.

«12» ноября 2020 г.  
м.п.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Исследование нестационарных явлений при одно- и двухфазных течениях в элементах проточной части гидротурбины» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Скрипкин Сергей Геннадьевич работал в лаборатории экологических проблем теплоэнергетики (7.1) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук в должности инженера-исследователя.

В 2018 году Скрипкин Сергей Геннадьевич окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. В 2019 году сдан кандидатский экзамен по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, наиболее соответствующей содержанию работы.

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Куйбин Павел Анатольевич работает в должности главного научного сотрудника в лаборатории проблем теплопереноса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### Актуальность работы.

При использовании тепловых и атомных электростанций с низкой скоростью изменения мощности, а также введении ветряных, солнечных электростанций, на гидроэлектростанции для поддержания стабильной работы электрической сети ложится регулирующая роль. При работе гидротурбин в неоптимальных режимах, необходимых для регулирования сети или при запуске гидроагрегатов поток за рабочим колесом гидротурбины на входе в отсасывающую трубу имеет высокую остаточную закрутку что приводит к формированию в потоке концентрированной вихревой структуры в форме спирального прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). ПВЯ, взаимодействуя с проточным трактом, влияет на эффективность работы гидроагрегата, а также на стабильность его

работы. Совпадение частоты прецессии с собственными частотами проточного тракта приводит к негативным последствиям, вплоть до выхода оборудования из строя. Наличие кавитации в области пониженного давления в ПВЯ также негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках. Возникающие в результате кавитации полости могут схлопываться и создавать дополнительные значительные возмущения, также вызывая кавитационную эрозию на стенках 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 гидротурбины. Также получение количественной информации о структуре течения за рабочим колесом гидротурбины необходимо с точки зрения развития методов вычислительной гидродинамики (CFD) и для дальнейшего развития 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, воспроизводя только распределение скоростей в отдельных режимах, с чем непосредственно связана данная работа.

**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 аperiodических 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 пульсаций, частоту пульсаций в зависимости от среднерасходного газосодержания.

**Научная новизна** работы.

Изучена зависимость параметра крутки потока от режимных параметров модельной гидротурбины, а также область его применимости при варьировании расхода жидкости и скорости вращения лопаточного закручивающего устройства. На экспериментальном стенде получены распределения скоростей в диапазоне параметров, существенно перекрывающим диапазоны, присущие натурным гидротурбинам. Для изучения закрученного течения, воспроизводящего течение за рабочим колесом гидротурбины в широком диапазоне определяющих параметров, была использована современная автоматизированная измерительная система ЛДА.

Адаптирована и верифицирована новая полуэмпирическая модель, позволяющая оценить закрутку потока в отсасывающей трубе гидротурбины, основываясь на информации о параметрах режима с нулевой закруткой, текущего расхода и скорости вращения рабочего колеса.

Получены обширные массивы экспериментальных данных, необходимые для верификации численных и аналитических расчётов, которые включают распределения скоростей, распределения пульсаций скоростей, пульсации давления на стенке, высокоскоростную визуализацию в различных рабочих режимах.

Впервые обнаружено явление перезамыкания на винтообразном вихре с формированием вихревых колец в модельной гидротурбине в режиме с небольшим параметром крутки потока. Установлено, что вихревые кольца являются источником значительных апериодических пульсаций давления в проточном тракте гидротурбины.

Реализована система инъекции газовой фазы в поток, с целью контроля и управления ПВЯ, что позволило систематически изучить зависимость безразмерного параметра - числа Струхала от среднерасходного газосодержания с шагом 0.1% в диапазоне 0 – 5%.

#### **Научная и практическая значимость работы.**

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 результате проведенных исследований предложен новый сценарий возникновения апериодических 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 отсасывающей трубы используются для верификации аналитической модели, описывающей воздействие плоской поверхности на вихревые кольца, движущиеся под относительно разными углами, и необходимы для её дальнейшего развития. Данные по инъекции газовой фазы полезны для совершенствования методики контроля и управления ПВЯ в неоптимальных режимах работы гидроагрегатов, также могут быть востребованы при дальнейшем совершенствовании аналитических подходов, описывающих характеристики газожидкостных потоков при наличии крупномасштабных вихревых структур.

#### **Достоверность результатов.**

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.

#### **Апробация результатов.**

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), IUTAM symposium on Dynamics and Topology of Vorticity and Vortices (Марсель, Франция, 2017), The 7th IAHN 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).

**Личный вклад** соискателя заключается в участии в модернизации экспериментальных стендов и проведение 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.

**Основные публикации автора по материалам диссертации** в научных журналах рекомендованных ВАК:

1. Скрипкин С. Г. Куйбин П.А. Шторк С.И. Влияние инжекции воздуха на параметры закрученного течения в модели отсасывающей трубы TURBINE-99 // Письма в ЖТФ, 2015, 41, вып. 13, с 48-55.
2. Скрипкин С. Г., Цой М. А., Шторк С. И. Экспериментальное исследование формирования двойного прецессирующего вихревого жгута в модельных отсасывающих трубах // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 73–82.
3. Tsoy, M. A., Skripkin, S. G., & Shtork, S. I. Experimental investigation of a twin vortex breakdown on the draft tube models. Energy (IYCE), 2015 5th International Youth Conference on (pp. 1-5). IEEE.
4. Алексеенко С.В., Куйбин П.А, Шторк С.И., Скрипкин С.Г., Цой М.А. Явление вихревого пере замыкания в закрученном потоке // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 103, № 7. – С. 516–521.
5. 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. – Vol. 54. – № 4. – P. 450–460.
6. S.V. Alekseenko, P.A. Kuibin, S.I. Shtork, S.G. Skripkin, V.I. Sonin, M.A. Tsoy and A.S. Ustimenko A novel scenario of aperiodical impacts appearance in the turbine draft tube // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 49 (2016) 082025.
7. Скрипкин С. Г., Цой М. А., Шторк С. И., Куйбин П. А. Исследование пульсаций давления в модельной отсасывающей трубе гидротурбины, вызванных вихревыми кольцами // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 4. С. 25–32.
8. Kuibin, P. A., Shtork, S. I., Skripkin, S. G., & Tsoy, M. A. (2017). On random pressure pulses in the turbine draft tube. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 813, No. 1, p. 012051).
9. Skripkin SG, Tsoy MA, Kuibin PA, Shtork SI. Study of Pressure Shock Caused by a Vortex Ring Separated From a Vortex Rope in a Draft Tube Model. ASME. J. Fluids Eng. (2017);139(8).
10. Skripkin S, Tsoy M, Kuibin P, Shtork S. Vortex rope instabilities in a model of conical draft tube. In EPJ Web of Conferences 2017 (Vol. 159, p. 00048). EDP Sciences.
11. Skripkin S, Tsoy M, Kuibin P, Shtork S. Vortex rope patterns at different load of hydro turbine model. InMATEC Web of Conferences 2017 (Vol. 115, p. 06004). EDP Sciences.
12. Skripkin SG, Tsoy MA, Kuibin PA, Shtork SI. Aperiodic pressure pulsation under non optimal hydraulic turbine regimes at low swirl number. InJournal of Physics: Conference Series 2017 Sep (Vol. 899, No. 2, p. 022016). IOP Publishing.
13. Skripkin, S., Tsoy, M., Kuibin, P., & Shtork, S. (2019). Swirling flow in a hydraulic turbine discharge cone at different speeds and discharge conditions. Experimental Thermal and Fluid Science, 100, 349-359.
14. П.А. Куйбин, С.Г. Скрипкин, М.А. Цой, С.И. Шторк Моделирование удара вихревого кольца о твердую поверхность Письма в ЖТФ, 2019, том 45, вып. 1.

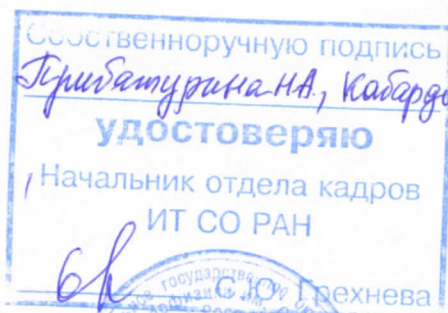
## Решение о рекомендации к защите

Диссертация «Исследование нестационарных явлений при одно- и двухфазных течениях в элементах проточной части гидротурбины» Скрипкина Сергей Геннадьевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Решение принято на проведенном в режиме видеоконференции заседании семинара «Физическая гидродинамика» под руководством чл.-корр. РАН Прибатурина Н.А. с участием членов Секции «Теплофизические основы энергетики (включая горение)» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Председатель заседания – чл.-корр. РАН Прибатурин Николай Алексеевич, зам. заведующего лаборатории проблем тепломассопереноса ИТ СО РАН. Всего присутствовали на заседании 20 чел., из них: 1 академик РАН, 2 член-корреспондента РАН, 6 докторов наук, 5 кандидатов наук.

Результаты голосования: «за» – 20 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 6 от «08» сентября 2020 г.

Председатель семинара  
Прибатурин Н. А.  
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., зам.  
заведующего лабораторией  
лаборатории проблем  
тепломассопереноса ИТ СО РАН



Секретарь семинара  
Кабардин И.К.  
к.т.н., н.с. ИТ СО РАН

