



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

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого,

доктор технических наук,
член-корреспондент РАН



В. В. Сергеев

14 марта 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на диссертацию Скрипкина Сергея Геннадьевича «Исследование нестационарных явлений при одно- и двухфазных течениях в элементах проточной части гидротурбины», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы диссертационной работы. Диссертация С.Г.Скрипкина посвящена экспериментальному исследованию нестационарных явлений, обусловленных прецессией вихревого ядра в турбулентном закрученном потоке, который формируется на входе в отсасывающую трубу гидротурбины в том или ином неоптимальном режиме ее работы при регулировании нагрузки электрической сети или при запуске гидроагрегата. Актуальность исследований данной направленности обусловлена как фундаментальным значением углубленного понимания вихревой структуры одно- и двухфазных сильнозакрученных течений, так и задачами разработки научных основ инженерных методов, обеспечивающих контроль и управление нестационарными явлениями данного вида с целью повышения эффективности и надежности работы гидроагрегатов. С другой стороны, получение детальной количественной информации экспериментального характера о структуре течения за рабочим колесом гидротурбины необходимо для валидации аналитических подходов, развиваемых для описания закрученных потоков с крупномасштабными вихревыми структурам, а также методов вычислительной гидродинамики, все более широко применяемых и в области гидротурбостроения.

Цель работы С.Г.Скрипкина заключалась в экспериментальном исследовании динамики прецессирующего вихревого жгута в одно- и двухфазном потоке на модельных гидротурбинных установках, с акцентом на изучение влияния тех параметров, которые определяют структуру закрученного течения за рабочим колесом гидротурбины.

Научная и практическая значимость результатов работы. Научная и практическая значимость диссертационной работы С.Г.Скрипкина определяется тем, что полученные автором экспериментальные результаты вносят существенный вклад в базу данных, способствующих совершенствованию аналитических подходов к описанию явлений, определяемых прецессией вихревого ядра, а также могут быть использованы как тестовые при валидации вычислительных моделей сложных турбулентных течений; предложенный новый сценарий возникновения аperiodических пульсаций давления в гидротурбинах важен при комплексном рассмотрении вопросов безопасной эксплуатации гидроагрегатов. Представленные в работе данные по инъекции газовой фазы могут быть использованы для совершенствования методик контроля и управления прецессирующим вихревым ядром в неоптимальных режимах работы гидроагрегатов.

Научная новизна результатов работы состоит, прежде всего, в том, что в ней получен большой объем новых экспериментальных данных по полям закрученного одно- и двухфазного течения в модели отсасывающей трубы гидротурбины, включающие поля осредненных скоростей, скоростных пульсаций, пульсаций давления на стенке трубы, а также многочисленные результаты высокоскоростной визуализации нестационарного трехмерного течения в различных рабочих режимах. Соискателем верифицирована новая полуэмпирическая модель, позволяющая оценить закрутку потока в отсасывающей трубе гидротурбины, основываясь на информации о параметрах режима с нулевой закруткой, расхода и скорости вращения рабочего колеса. Впервые обнаружено явление вихревого перезамыкания, приводящее к формированию отделяющихся вихревых колец в отсасывающей трубе в режиме, характеризуемом небольшим значением параметра закрутки потока. Установлено, что эти вихревые кольца являются источником значительных аperiodических пульсаций давления в проточном тракте.

Структура и общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка обозначений и списка литературных источников. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, включая 68 рисунков и библиографический список из 217 наименования работ.

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. Приводятся список конференций и семинаров, на которых докладывались результаты работы, а также описывается личный вклад С.Г.Скрипкина в диссертационное исследование.

В главе 1 дан достаточно полный обзор современного состояния исследований явлений, связанных с прецессией вихревого ядра (ПВЯ) в закрученных потоках, начиная с первых попыток описания явления в середине XX века и заканчивая рассмотрением весьма широкого круга недавно выполненных работ, как фундаментального, так и

прикладного характера. Значительная часть обзора посвящена тем экспериментальным исследованиям прецессии вихревого ядра, в которых используются современные бесконтактные методики, такие как лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) и метод измерения скорости по изображениям частиц (PIV). Справедливо подчеркивается, что именно эти методики позволили получить данные, проясняющие сложную пространственную структуру нестационарных сильнозакрученных течений и существенно продвинуть уровень понимания процессов, связанных с прецессией вихревого ядра. Освещаются также успехи последних лет в численном моделировании данного явления. Специальное внимание уделено немногочисленным аналитическим попыткам описания явления. Среди них особый интерес вызывает модель винтового прецессирующего вихря, которая может служить основой для построения инженерных методик расчета частоты прецессии в реальных потоках. Обосновывается необходимость получения дополнительной экспериментальной информации о закрученных течениях с прецессирующим вихревым ядром, в том числе для развития инженерных методик, базирующихся на модели винтового вихря.

Глава 2 посвящена описанию экспериментальных стендов и методик измерений, использованных в работе. Представлен замкнутый гидродинамический контур в горизонтальной компоновке с прозрачной отсасывающей трубой геометрии Turbine-99 и стационарным лопаточным закручивающим устройством, которое формирует поток, по кинематике схожий с реализующимся за рабочим колесом гидротурбины в отдельных режимах. Далее детально представлен рабочий участок для моделирования трехмерных полей течения в вертикально расположенной конической части модели отсасывающей трубы гидротурбины и описана оригинальная методика создания подходящих распределений входной скорости посредством комбинации неподвижной закручивающей вставки и вынужденно вращающегося завихрителя. Изложена апробированная методика ЛДА-регистрации распределения компонент вектора скорости закрученного потока в данной модели отсасывающей трубы. Отдельное внимание уделено описанию систем высокоскоростной визуализации потока, а также изложению применяемого метода измерения давления и методике обработки сигнала, регистрируемого на внутренней поверхности конуса отсасывающей трубы.

В третьей главе приводятся экспериментальные данные для средних и пульсационных полей скорости и давления в конической части модели отсасывающей трубы гидротурбины, полученные при варьировании входных распределений скорости, при этом условия на входе формировались расположенными выше по потоку статорной и роторной закручивающими вставками так, чтобы моделировать различные режимы работы гидротурбин. Проведен сравнительный анализ результатов, получаемых при вычислении параметра закрутки потока по различным предложенным в литературе формулам (определениям). Представлены многочисленные результаты визуализации

различных режимов течения, реализующихся в модельной отсасывающей трубе при варьировании частоты вращения рабочего колеса при фиксированном расходе жидкости. Результаты количественных измерений распределений осредненной скорости дополнены данными о пульсационных характеристиках течения, включая пульсации давления на стенке отсасывающей трубы. С применением быстрого преобразования Фурье для каждого режима течения была вычленена частота пульсаций давления, связанная с наличием ПВЯ в потоке.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию аperiodических пульсаций давления. В ходе изучения особенностей вихревого жгута в различных режимах течения соискателем был обнаружен режим, в котором спиральная форма ПВЯ может меняться во времени кардинальным образом. Убедительно показывается, что в этом режиме невозмущенный вихревой жгут начинает искривляться таким образом, что два соседних витка оказываются в значительной близости друг к другу и при этом создаются условия для их самоиндуцированного сближения. Результатом данного процесса является перезамыкание двух вихревых трубок с последующим формированием отделяющегося вихревого кольца, захватывающего часть вихревой спирали между точками соприкосновения. Данное явление наблюдается вблизи оптимального режима в относительно узком интервале значений параметра крутки, и представляет несомненный интерес, как с фундаментальной, так и с технической точек зрения.

В пятой главе излагаются данные, полученные при использовании метода инъекции газовой фазы в закрученный поток с целью воздействия на ПВЯ. Данная методика представляется достаточно эффективной для борьбы с нежелательными нестационарными явлениями ввиду простоты реализации системы подачи воздуха в поток, а также его значительного влияния на пульсационные характеристики течения. Получены новые экспериментальные данные, которые дают важный вклад в научные основы по разработке полноценной методики управления ПВЯ в гидротурбинах и способствуют дальнейшему развитию аналитических и полуэмпирических моделей газожидкостного потока при наличии концентрированных вихревых структур.

В Заключении формулируются основные результаты работы.

В качестве **замечаний** по диссертации можно отметить следующее.

1) Упоминание в обзоре (глава 1) возможности моделирования течения в проточных частях гидротурбины на воздушных стендах ограничивается двумя ссылками, первая из которых дана на зарубежную работу 1969 года. Автор, по-видимому, не знаком с исследованиями, выполнявшимися в течение многих лет (с конца 30-х до начала 60-х годов) в Ленинградском политехническом институте на крупномасштабном воздушном стенде данной направленности. Частично результаты этих работ описаны в монографии

(Повх И. Л. Моделирование гидравлических турбин в воздушных потоках: М.–Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 148 с.).

2) В работе не приводятся профили (измеренных) рейнольдсовых напряжений, а они, очевидно, использовались при вычислении параметра закрутки по формуле (3.5).

3) Формульные выражения для явного вычисления параметра закрутки по измеренным (или «восстановленным») профилям скорости и давления во многих местах неудачно именуются «уравнениями».

4) Термин «радиус прецессии» в работе не поясняется, особенно этого не хватает для иллюстрируемых в работе случаев вихревой спирали с переменным по оси радиусом ядра.

5) Высказанное на стр. 58 утверждение о том, что «Данные по параметру крутки хорошо качественно и количественно согласуются с данными за рабочим колесом турбины Френсиса [77], а также с результатами работы Литвинова и др. [23], полученными на аэродинамической модели гидротурбины», явно не подкреплено какими-либо свидетельствами.

6) В работе имеется немало синтаксических погрешностей. В (сплошном) списке литературы ссылка на монографию И.Н. Смирнова дана дважды (позиции 2 и 21).

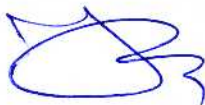
Высказанные замечания относятся к представлению материала на страницах диссертации и не изменяют общего положительного впечатления о работе, выполненной С.Г.Скрипкиным. Она представляет собой законченное научное исследование актуальной проблемы современной гидродинамики и содержит ряд существенных новых научных результатов, имеющих важное практическое значение. Работа прошла широкую апробацию на конференциях и семинарах, а ее основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание и основные результаты.

Таким образом, можно констатировать, что работа С.Г.Скрипкина удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, С.Г.Скрипкин, заслуживает присуждения искомой степени.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы в российских образовательных и научных организациях, проводящих исследования в области экспериментального и численного моделирования сложных турбулентных течений (МЭИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, СПбПУ, Крыловский научный центр и др.), а также в научно-промышленных центрах, непосредственно связанных с проектированием энергетического оборудования (ОАО «Силовые машины» – ЛМЗ, АО «ТяжМаш», ВТИ, ОАО «НПО ЦКТИ» и др.).

Отзыв рассмотрен и одобрен на семинаре научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) гидроаэродинамики Института прикладной математики механики (ИПММ) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), состоявшемся 26 февраля 2021 года в СПбПУ (протокол №2 от 26.02.2021).

Заведующий НИЛ гидроаэродинамики ИПММ СПбПУ,
кандидат физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)



Иванов Николай Георгиевич

тел. +7 (812) 552-6621, email: ivanov_ng@spbstu.ru

Гл. научный сотрудник НИЛ гидроаэродинамики ИПММ СПбПУ,
профессор Высшей школы прикладной математики
и вычислительной физики ИПММ СПбПУ,
доктор физико-математических наук – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор



Евгений Михайлович Смирнов

тел. +7 (812) 552-6621, email: smirnov_em@spbstu.ru

Сведения об организации:

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

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

+7 (800) 707-18-99; office@iamm.spbstu.ru; <http://www.spbstu.ru>