

ОТЗЫВ

официального оппонента Никулина Виктора Васильевича на
диссертационную работу 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 исследования

Одним из факторов, снижающих эффективность работы гидротурбины, является прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ), образующееся за рабочим колесом, как правило, в неоптимальных режимах эксплуатации. ПВЯ вызывает в проточном тракте гидродинамические пульсации, усиливает кавитационные эффекты, увеличивающие износ рабочего колеса и стенок отсасывающей трубы. В связи с этим, для повышения эффективности и надежности работы гидроагрегатов необходимы исследования условий возникновения различных видов ПВЯ, возможностей оказания на них контролируемых воздействий. Решение данных задач требует знания структуры течения в различных режимах работы гидротурбины. Детальные исследования на реальных агрегатах невозможны, поэтому подобные исследования могут быть выполнены на лабораторных моделях, отражающих те или иные существенные особенности работы реальных гидроагрегатов. Помимо того, что полученные в лабораторных экспериментах данные могут быть перенесены на реальные объекты, они дадут информацию для апробации численных и аналитических моделей течений в гидроагрегатах, а также более общих закрученных течений с крупными вихревыми структурами. Научное значение исследований ПВЯ обусловлено их связью с такой фундаментальной проблемой гидродинамики, как динамика вихрей. Таким образом, экспериментальные исследования влияния рабочих параметров на динамику прецессирующего вихревого жгута в одно и

двухфазном потоке на модельных гидротурбинных установках, являющиеся целью диссертации, актуальны с прикладной и научной точек зрения.

Содержание работы и основные результаты.

Объем диссертационной работы составляет 132 страницы и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка обозначений и списка литературы из 210 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна работы, дана характеристика практической значимости, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе содержится обзор литературы, в котором основное внимание уделено нестационарным процессам в закрученных потоках, имеющих место при работе гидротурбинного оборудования. Различают два основных типа пульсаций давления, связанных с наличием ПВЯ, это асинхронные и синхронные пульсации. Асинхронная составляющая — это локальные пульсации давления в отсасывающей трубе, связанные с вращательным движением вихревого ядра вокруг центральной оси. Синхронная составляющая имеет одинаковую амплитуду и фазу в поперечном сечении, такие пульсации, предположительно, возникают из-за взаимодействия вихревого жгута с поворотным коленом отсасывающей трубы и распространяются по всему проточному тракту. Создавая колебания столба жидкости, они напрямую воздействуют на рабочее колесо и признаются наиболее опасными. Было установлено, что в отсасывающих трубах без поворотного колена данный тип пульсаций не наблюдается. Отмечается, что использование уменьшенных и зачастую упрощенных моделей гидроагрегатов позволяет разобраться в сложной физике закрученного турбулентного течения и в натурных установках. Описаны методы исследования потока с упором на современные системы диагностики такие как: цифровая трассерная визуализация (PIV), лазерно-доплеровская анемометрия (ЛДА), режимы течения, реализующиеся в гидротурбинах при

различной нагрузке, методы контроля и управления ПВЯ. Рассмотрены различные аналитические подходы для описания закрученных потоков вообще, так и применительно к течению в гидротурбинах. В целом, обзор достаточно полно отражает современное состояние исследований в областях, связанных с темой диссертации.

Во второй главе описаны экспериментальные методики и установки, на которых проводились исследования. Использовано два гидродинамических стенда, для моделирования различных процессов, наблюдаемых в течениях реальных гидроагрегатов. В первом, рассматривается течение закрученного потока в модели отсасывающей трубы, имеющей загиб, с геометрией, подобной реальной. При этом закрутка создается сменным стационарным завихрителем, меняя который можно создать три закрутки, создающих качественно различные течения. Целью стенда является исследование возможности воздействия на ПВЯ, возникающее в отсасывающей трубе. В работе исследуются влияния инъекции газовой фазы. Применяемая схема позволяет не изменять параметры закрутки при введении газовой фазы, что является достоинством установки. На втором стенде, моделируется поток в отсасывающей трубе, после его закрутки в спиральной камере и взаимодействия с рабочим колесом. Для этого используется два лопаточных завихрителя, один стационарный, другой может вращаться с заданной скоростью, что является существенным преимуществом установки. Еще одним достоинством является возможность управлять кавитацией в отсасывающей трубе. Это достигается вертикальной компоновкой трубопроводов, их большой общей высотой в 10м и возможностью регулировать разрежение в системе. Такие параметры делают установку уникальной. При этом отсасывающая труба имеет форму прямого усеченного конуса, т.е. эффекты, связанные с загибом трубы на данном стенде, не моделируются. Однако в такой постановке можно выделить результат взаимодействия двух завихрителей, стационарного и вращающегося, не осложненного влиянием загиба трубы.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования структуры и характеристик закрученного потока в конусе отсасывающей модельной гидротурбины. В качестве характеристики течения принят безразмерный параметр закрутки или крутки (S), что оправдано большим числом предшествующих исследований, в которых установлено, что структура закрученного течения существенно определяется величиной этого критерия. В работе, в качестве основного, используется интегральный параметр крутки, равный отношению интегральных осевых потоков момента импульса и импульса, умноженному на радиус трубы. Варьируется расход жидкости и частота вращения подвижного завихрителя. Данные величины обезразмериваются по параметрам, соответствующих нулевой закрутке. Использование безразмерных величин дает возможность переносить полученные результаты на натурные гидроагрегаты, где для обезразмеривания можно брать параметры оптимального режима, поскольку в оптимальном режиме закрутка потока мала. В координатах расход-частота вращения рабочего колеса построена карта интегрального параметра крутки. Выполнена, полезная для практического использования, проверка аналитической зависимости, предложенной Favrel и др., для расчета параметра крутки по расходу и частоте без измерения скорости. Оказалось, что до значений $S = 0.7$ аналитическая кривая согласуется с экспериментами. Интересным является результат, что структура течения не однозначно определяется абсолютной величиной S , что было показано на примере профиля осевой скорости.

Путем визуализации течения проведена классификация различных режимов течения, реализующихся в модельной отсасывающей трубе при варьировании частоты вращения рабочего колеса при фиксированном расходе жидкости. Вихревой жгут визуализируется кавитацией и мелкими пузырьками воздуха, выделяющимися из воды. Путем сопоставления с режимами течения в реальных гидротурбинах предполагается, что полученные течения соответствуют режимам с форсированной нагрузкой,

вблизи оптимума, переходному при уменьшении нагрузки, с частичной нагрузки и очень слабой нагрузкой гидроагрегата. Таким образом, охвачены основные реальные режимы. Далее был выполнен большой объем экспериментальной работы по количественным измерениям распределения осевой и тангенциальной компонент скорости, их пульсаций в отсасывающей трубе при вариации расхода и скорости вращения модельного рабочего колеса. Важным моментом является сопоставление измеренных профилей для осевой скорости с профилями, измеренными за рабочим колесом масштабной модели турбины Френсиса на ЛМЗ. Показано, что удалось достичь приемлемо близких результатов, что подтверждает корректность экспериментального моделирования. Дополнительная информация о структуре течения была получена с помощью измерения пульсаций давления на стенке отсасывающей трубы. В итоге была построена режимная карта частоты и величины пульсаций в координатах расход-частота вращения подвижного завихрителя. Наложение на данную карту изолиний параметра крутки позволяет дополнить представление о структуре течения в реальных гидроагрегатах, где отсутствует оптический доступ. В целом, по результатам главы можно сделать вывод, что параметр крутки, используемый для описания закрученного течения, не является абсолютным критерием и не позволяет однозначно установить режим течения в зависимости от его значения. Тем не менее, в схожих классах закручивающих устройств в области малых и умеренных значений S позволяет выявить определенные закономерности, а также является достаточным критерием для определения начала режима течения, в котором происходит формирование ПВЯ. Полученные экспериментальные данные будут востребованы для проверки численных расчётов, а установленное представление о структуре вихревого течения полезно для развития аналитических подходов при описании ПВЯ.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию режима течения, в котором ПВЯ нестабильно и его изменения во времени хаотичны. Такое течение наблюдается при параметрах крутки в диапазоне S

= 0.4-0.5, когда течение близко к оптимальному. Обнаружено, что в таком режиме на стенке отсасывающей трубы (ОТ) регистрируются аperiодические пульсации давления. Достижением работы является установление причины таких пульсаций. Оказалось, что при хаотической прецессии два соседних витка ядра вихря оказываются в значительной близости друг к другу и при некоторой величине сближения происходит перезамыкание двух вихревых трубок с последующим формированием вихревого кольца с кавитационным ядром. Вихревое кольцо за счет самоиндуцированного движения подходит к стенке и создает на ней импульс давления. Интересным является результат, что средняя частота образования вихревых колец коррелирует с частотой прецессии и составляет примерно 0.4 последней. Особо следует отметить то, что пульсации давления на стенке ОТ удалось зарегистрировать синхронно с высокоскоростной съёмкой. Сложность состояла в том, что процесс отрыва случаен во времени и в пространстве, поэтому зарегистрировать успешный момент прохождения вихревого кольца вблизи датчика достаточно трудоемко. Однако это удалось сделать и в результате продемонстрировать, что именно отрывающиеся вихревые кольца при подлете к стенке ОТ являются источником аperiодических пульсаций давления. Научное значение обнаруженного явления состоит в том, что оно происходит без каких-либо специальных мер, а в естественных условиях. Перезамыкание и образование вихревых колец происходит в результате нерегулярного движения ядра вихря. Данное наблюдение показывает, что подобный механизм дробления вихрей может иметь более общее значение, происходить и в других ситуациях, например, в турбулентных течениях, где движение вихрей также хаотично.

В пятой главе изучается возможность воздействия на ПВЯ с помощью введения газовой фазы. Используется установка со стационарным завихрителем и отсасывающей трубой, загнутой аналогично реальному. Здесь закрутка потока не зависит от расхода, а определяется геометрией завихрителя, т.е. расход становится независимым параметром. Оказалось, что

частота прецессии после введения газовой фазы может как увеличиваться, так и уменьшаться при разных расходах, т.е. изменение частоты не связано напрямую с закруткой. Однако амплитуда пульсаций практически всегда убывала. Важный вывод работы то, что введение газовой фазы приводит к изменению геометрии ПВЯ, поскольку изменение частоты и амплитуды пульсаций происходило при неизменном параметре крутки. Выявленный сдвиг частоты прецессии может быть, использован для управлению ПВЯ в гидротурбинах с целью погасить нежелательные пульсации давления или вывести частоту прецессии вихря из области резонанса.

В заключении диссертации представлены основные результаты работы.

Новизна, проведенных исследований.

В диссертационной работе Скрипкина С.Г. получены следующие новые результаты.

Получен значительный массив экспериментальных данных, включающий скоростную видеосъемку, измерения давления на стенке ОТ и измерения скорости, который будет полезен для верификации численных расчетов, и способствовать развитию аналитических подходов.

Установлена область применимости интегрального параметра закрутки потока для описания вихревого течения в модельных гидротурбинах. Показана применимость для описания потока лишь в области малой и умеренной закрутки.

Проверена полуэмпирическая модель, позволяющая оценить закрутку потока в отсасывающей трубе гидротурбины, не проводя измерений скорости, основываясь на знании параметров режима с нулевой закруткой. Модель удовлетворительно работает в области малой и умеренной закрутки до значений $S = 0.7$.

Впервые экспериментально зарегистрировано явление формирования и отрыва вихревых колец от прецессирующего вихревого жгута, обусловленное перезамыканием. Показано, что данное явление может

служить основным источником аperiодических пульсаций давления в проточном тракте гидротурбин.

Показано, что при сильной и умеренной закрутки потока инжекция газовой фазы, начиная с газосодержания $\beta \sim 1\%$, значительно влияет на параметры вихревой структуры, изменяя частоту и амплитуду пульсаций давления. Установлено, что рост частоты прецессии с увеличением газосодержания не связан с увеличением интегральной закрутки потока.

Практическая значимость работы

Работы, связанные с экспериментальным моделированием течения за рабочим колесом гидротурбины и инжекцией газовой фазы были получены при выполнении хоз. договоров с ПАО “Силовые машины - ЛМЗ”, а также используются группой исследователей из Красноярского филиала ИТ СО РАН для верификации численных расчётов. В работе предложен новый сценарий возникновения аperiодических пульсаций давления в гидротурбинах, что безусловно важно при рассмотрении вопросов безопасной эксплуатации гидроагрегатов.

Обоснованность и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации, подтверждается 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.

Замечания.

1. На рис. 22 при $S = 0.42$ построены графики поля осевой скорости при пяти различных расходах. Данные графики оказались близки, т.е. для них параметр закрутки полностью характеризует течение. При $S = -0.42$ приведен график для одного значения расхода, который отличается от графиков при $S = 0.42$. Это означает, что абсолютное значение S не является единственной характеристикой течения, что интересно. Однако, было бы

полезно построить графики для $S = -0.42$ также при нескольких расходах. Это позволило бы увидеть, зависит ли структура течения только от знака S или могут появиться различия и при одном значении S .

2. В работе не описано поведение вихревого кольца при налете на поверхность отсасывающей трубы: изменяются ли его размеры или происходит разрушение кавитационного ядра. Данная информация была бы полезна для понимания взаимодействия кавитационного вихревого кольца с поверхностями.

3. Один из выводов диссертации в том, что с помощью инъекции газовой фазы можно влиять на параметры вихревой структуры, изменять частоту и амплитуду пульсаций давления. Однако нет анализа, как инъекция газа влияет на потери полного давления, т.е. какова цена такого влияния. Потеря полного давления скажется на КПД.

4. При исследовании пульсаций давления в загнутой отсасывающей трубе регистрировались только асинхронные пульсации. Связано ли это с тем, что синхронные пульсации не являлись объектом исследования или их не было. Если их не было то, не является ли это свидетельством того, что для возникновения синхронных пульсаций недостаточно одного взаимодействия вихревого ядра с загибом трубы, а должны быть более сложные причины.

5. В заключении к главе 5 указывается, что при одном и том же параметре закрутки потока частота прецессии при инъекции газовой фазы увеличивается. Однако это утверждение не согласуется с рис. 62, где приведен случай, когда частота уменьшается.

Приведенные замечания не касаются основного содержания диссертации и не снижают общей высокой оценки проделанной работы. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой проведен большой объем экспериментальных исследований, совокупность которых можно квалифицировать, как решение важной научной задачи, позволяющей глубже понять гидродинамику закрученных потоков и процессы, происходящие в гидроагрегатах.

Диссертация хорошо апробирована. Ее результаты докладывались и обсуждались на ведущих российских и международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 14 статей в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК.

Заключение.

Тема диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы по физико-математическим наукам. Диссертация представляет собой специально подготовленную рукопись, содержит совокупность новых научных результатов, имеет внутреннее единство.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации и позволяет составить о ней достаточно полное представление.

На основании изложенного выше можно сделать обоснованное заключение, что диссертационная работа С.Г. Скрипкина «Исследование нестационарных явлений при одно- и двухфазных течениях в элементах проточной части гидротурбины» является научно – квалификационной работой, в которой выполнены экспериментальные исследования 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. Полученные автором результаты имеют важное значение для развития приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации вносят существенный вклад в развитие промышленности России и способствуют ускорению научно-технического прогресса.

На основе изложенного считаю, что диссертация Скрипкина Сергея Геннадьевича «Исследование нестационарных явлений при одно- и двухфазных течениях в элементах проточной части гидротурбины» является законченным научным исследованием, и соответствует требованиям пункта 9

«Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в ред. от 01.10.2018 г.).

Автор диссертации Скрипкин Сергей Геннадьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией вихревых движений жидкости и газа Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы).

 Никулин Виктор Васильевич.

05. марта 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Служебный адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Ак. Лаврентьева, 15,

e-mail: nikulin@hydro.nsc.ru

служебный телефон: +7(383)3332589.

Подпись Никулина В.В. заверяю

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН,

к.ф.-м.н.



 Хе Александр Канчерович.