

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Скрипкина Сергея Геннадьевича
"Исследование нестационарных явлений при одно- и двухфазных течениях в элементах проточной части гидротурбины", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05-механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа посвящена исследованию нестационарных явлений, вызываемых формированием прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ) в элементах проточной части гидротурбины. Известно, что при работе гидротурбин в неоптимальных режимах, поток за рабочим колесом на входе в отсасывающую трубу остается закрученным и способствует формированию концентрированных вихревых структур в форме спирального ПВЯ. Наличие ПВЯ в проточном тракте снижает эффективность работы гидротурбины, а возникающие в результате кавитации полости являются источником пульсаций давления и мощности, могущими привести к негативным последствиям. Вследствие невозможности получения экспериментальных данных на натуральных гидротурбинах зачастую используют методы экспериментального моделирования. Таким образом, проведение систематических экспериментальных исследований на модельных стендах является **крайне актуальным**.

В **первой главе** приводится детальный обзор современного состояния исследований сложных нестационарных процессов в закрученных потоках, имеющих место при работе гидротурбин. В разделах этой главы анализируются результаты работ, посвященных вопросам экспериментального моделирования гидротурбин. Описаны используемые безразмерные критерии, современные системы диагностики нестационарных закрученных потоков, реализуемые режимы течения, а также развитые теоретические подходы для описания закрученных течений в гидротурбинах.

Вторая глава посвящена описанию двух гидродинамических стендов, моделирующих течения за рабочим колесом реальных гидротурбин на различных режимах.

Первый горизонтальный стенд имеет стационарное закручивающее лопаточное устройство, моделирующее рабочее колесо гидротурбины. В работе использовались три завихрителя с разными углами (25, 37 и 53 градуса) наклона лопаток, создавая тем самым слабую ($S_g=0.38$), среднюю ($S_g=0.62$) и сильную ($S_g=0.95$) закрутку потока соответственно. Течения с закруткой в отсасывающей трубе соответствует неоптимальным режимам работы, тогда как поток с нулевой или близкой к нулю закруткой обычно соотносят с оптимальным режимом работы гидротурбины.

Второй вертикальный стенд имеет коническую отсасывающую трубу и два лопаточных завихрителя, установленных на ее входе. В отличие от первого стенда один из

завихрителей (рабочее колесо) может осуществлять вращение, что добавляет еще один важный параметр помимо объемного расхода. В верхней части замкнутого контура находится резервуар с подключенным вакуумным насосом, для создания дополнительного разрежения в контуре и управления важнейшим безразмерным параметром – числом кавитации. Максимальное число кавитации, реализуемое на установке при максимальном расходе жидкости и максимальном дополнительном разрежении, находится в диапазоне 0.3-0.4, что соответствует развитому кавитационному течению.

В этой же главе описан лазерный доплеровский анемометр, разработанный в ИТ СО РАН и хорошо зарекомендовавший себя для исследования закрученных потоков жидкости. Для измерения пульсаций давления использовались пьезорезистивные датчики, а для визуализации потока – высокоскоростные камеры. Глубокая проработка методических вопросов свидетельствует о высокой **достоверности** результатов измерений, описанных в последующих главах.

В **третьей главе** представлены результаты комплексного экспериментального исследования структуры и характеристик закрученного потока в конусе модельной гидротурбины. В этой главе приведена визуализация 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. Обобщена информация по количественным измерениям распределений осевой и тангенциальной компонент скорости и их пульсаций. Всего было исследовано более 110 режимов течения путем изменения расхода и скорости вращения модельного рабочего колеса.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному изучению аperiodических пульсаций давления. В процессе исследования особенностей вихревого жгута в различных режимах течения был обнаружен режим, в котором спиральная форма ПВЯ претерпевает изменения во времени. Вихревой жгут начинал искривляться таким образом, что два соседних витка оказывались в значительной близости друг к другу, что приводило к их самоиндуцированному сближению. Результатом описанного процесса являлось перезамыкание двух вихревых трубок с последующим формированием вихревого кольца, являющегося частью вихревой спирали между точками соприкосновения.

Необходимо отметить, что получение экспериментальных данных по границам режима перезамыкания крайне важно с точки зрения численного моделирования нестационарных явлений в гидротурбинах, так как позволяет использовать профили скоростей, измеренные на входе в отводящую трубу, в качестве граничных условий.

Пятая глава посвящена вопросам применения инъекции газовой фазы в закрученный поток с целью воздействия на ПВЯ. Указанный метод представляется достаточно эффективным для борьбы с нежелательными нестационарными явлениями

вследствие относительной простоты реализации системы подачи воздуха в поток, а также его существенного влияния на пульсационные характеристики течения. Основной задачей являлось получение надежных экспериментальных данных, могущих служить основой для разработки полноценной методики управления ПВЯ в гидротурбинах, а также способствующих дальнейшему развитию аналитических и численных моделей газожидкостного потока при наличии концентрированных вихревых структур.

По результатам каждой главы сделаны выводы, подчеркивающие наиболее важные и новые результаты, а также сформулированы общие выводы по диссертации.

Получен целый ряд оригинальных результатов, определяющих **научную новизну и практическую значимость** диссертации: 1) впервые экспериментально зарегистрировано явление формирования и отрыва вихревых колец от прецессирующего вихревого жгута, обусловленное перезамыканием; 2) адаптирована и верифицирована полуэмпирическая модель, позволяющая оценить закрутку потока в отсасывающей трубе; 3) установлена область применимости интегрального параметра закрутки потока для описания вихревого течения в модельных гидротурбинах; 4) подтверждена возможность экспериментального моделирования комбинацией стационарного и подвижного завихрителей различных режимов течения, соответствующих разным режимам работы гидротурбины; 5) исследовано влияние инъекции газовой фазы на пульсационные характеристики вихревого течения в модели отсасывающей трубы гидротурбины.

Обоснованность выводов диссертации не вызывает сомнения. Полученные результаты по исследованию нестационарных явлений в элементах проточной части гидротурбины находятся в согласии друг с другом, формируя цельную и непротиворечивую картину.

По содержанию диссертации можно высказать следующие **замечания**:

1. Не очень понятно, из каких соображений выбирается геометрия (количество лопаток, хорда лопатки) модельного закручивающего устройства?
2. В работе незаслуженно мало внимания уделено анализу возможных конкурентных преимуществ метода инъекции газовой фазы по сравнению с другими методами управления ПВЯ.
3. Из каких соображений для измерений профилей скоростей было выбрано сечение, отстоящее на 50 мм вниз по потоку от кончика обтекателя (с. 45)?
4. В работе не уделено должного внимания обоснованию места инъектирования воздуха.
5. Важнейшими характеристиками газожидкостного потока (помимо среднерасходного газосодержания) являются размер пузырей и их скорость. Например, не понятно размер пузырей оказывает какое-либо влияние на процесс последующей сепарации в области пониженного давления или нет?

6. Не очень ясно, что автор подразумевает под понятием «своевременная инжекция газовой фазы» (с. 110)?

Приведенные замечания носят характер рекомендаций и не снижают общую высокую оценку работы. Диссертация Скрипкина Сергея Геннадьевича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой исследованы нестационарные явления при одно- и двухфазных течениях в каналах, моделирующих проточную часть гидротурбин. Проведенный автором анализ результатов способствует углублению понимания физики сложных нестационарных процессов в элементах гидротурбин и закладывает базу для развития новых, физически обоснованных, теоретических моделей. Все основные результаты работы опубликованы преимущественно в журналах из перечня ВАК, а также в трудах международных конференций. Автореферат диссертации адекватно отражает содержание и основные выводы работы.

Диссертация Скрипкина Сергея Геннадьевича «Исследование нестационарных явлений при одно- и двухфазных течениях в элементах проточной части гидротурбины», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Скрипкин Сергей Геннадьевич, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией ОИВТ РАН,
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

А.Ю. Вараксин

18.02.2021

Сведения о составителе отзыва:

Вараксин Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН; почтовый адрес: 111558, Москва, Федеративный пр-т, д.38, к.1, кв.61; адрес электронной почты: varaksin_a@mail.ru; наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН); должность: заведующий лабораторией.

Подпись А.Ю. Вараксина заверяю

Ученый секретарь ОИВТ РАН,
д.ф.-м.н.



Р.Х. Амиров

Адрес организации: 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13 стр.2, тел.: +7(495)4858345