УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЫ ГИДРОТУРБИНЫ

Литвинов И.В., Шандро А.И., Шторк С.И., Алексеенко С.В.

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты №№ 10-08-01096, 10-08-01093) и Министерства образования и науки РФ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена экспериментальному исследованию течения в модели отсасывающей трубы TURBINE-99 (T-99). Имеется большое количество расчетных работ, выполненных с использованием геометрии T-99, но экспериментальные данные ограничены характеристиками потока, измеренными в отдельных сечениях модели. Поэтому целью данной работы было получение исчерпывающих экспериментальных данных по полю течения в T-99, необходимых для верификации численных расчетов и разработки рекомендаций по оптимизации конструкции отсасывающей трубы для снижения потерь энергии и повышения динамической надежности работы гидротурбины. Эксперименты проводились с использованием современной измерительной техники, включая скоростную визуализацию течения и измерения полей скоростей с помощью автоматизированной системы ЛДА.

ВВЕДЕНИЕ

Отсасывающая труба (ОТ) – это часть водовода ГЭС, отводящая воду после рабочего колеса гидротурбины в нижний бьеф. Основной функцией ОТ является возвращение кинетической энергии воды, отработавшей в турбине, в энергию давления. Восстановленная таким образом энергия может составлять заметную часть от общего напора ГЭС.

При эксплуатации ГЭС возникают проблемы повышения эффективности и безопасности работы всех частей проточного тракта. Применительно к ОТ, основной проблемой является формирование гидродинамической неустойчивости за рабочим колесом при неоптимальных условиях загрузки гидротурбины [1]. Такие условия характеризуются большой остаточной закруткой потока после прохождения через рабочее колесо гидроагрегата. В результате, в ОТ возникают нестационарные явления, такие как прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ), которое генерирует мощные пульсации давления в трубе с частотой достаточно низкой для резонанса с собственными частотами конструкции [2].

В настоящее время для оптимизации геометрии ОТ с целью повышения эффективности её работы все более широко применяются методы компьютерного моделирования [3]. Однако экспериментальные исследования остаются по-прежнему актуальными, поскольку эксперимент дает необходимую эмпирическую информацию для проверки моделей, используемых для замыкания уравнений движения, и верификации результатов численного моделирования.

В ходе международного проекта “TURBINE-99” (T-99) использовалась модельная геометрия ОТ, повторяющая все основные геометрические особенности натурных установок [4]. Особенностью T-99 является то, что она состоит из базовых геометрических элементов, таких как конус, цилиндр, плоскость, что упрощает проведение численных и экспериментальных исследований. В частности, на такой геометрии более удобно использование оптических методов диагностики потока. Отметим, что по геометрии T-99 имеется большое количество расчетных работ, однако экспериментальные данные ограничены характеристиками потока, полученными в отдельных измерительных сечениях. Поэтому целью данной работы является получение более полных экспериментальных данных по характеристикам потока в геометрии T-99.

На базе ИТ СО РАН был создан экспериментальный стенд, представляющий собой замкнутый гидравлический контур, с рабочим участком, повторяющим геометрию отсасывающей трубы T-99. С помощью систем визуализации потока и ЛДА было изучено течение жидкости через коническую, поворотную и диффузорную части модели, получены надёжные результаты необходимые для верификации численных кодов. Результаты работы необходимы также для оптимизации геометрии с целью снижения потерь энергии (увеличения эффективности гидротурбины) и повышения динамической надежности работы гидроагрегатов.

© Литвинов И.В., Шандро А.И., Шторк С.И., Алексеенко С.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Гидродинамический стенд (рис.1) состоит из химического насоса Х100-80-160Т153 с номинальной производительностью 100 м3/ч и напором 3.2 атм, полиэтиленового бака цилиндрической формы объемом 600 л, соединений, выполненных из полиэтиленовых труб с внутренним диаметром 140 мм, и рабочего участка в виде модели Т-99. Стенд комплектуется частотным преобразователем Е2-8300-030Н 22 кВт 380В производства фирмы ВЕСПЕР, дающим возможность регулирования и поддержания на заданном уровне расхода воды. Контур оснащен также ультразвуковым расходомером с электронным блоком US800. Погрешность измерения расхода составляет не более 2%.

Стенки рабочего участка выполнены из оргстекла, что дает возможность оптического доступа ко всем частям канала и позволяет, таким образом, широкое применение оптических бесконтактных методов для изучения поля течения. Кроме того, конструкция рабочего участка, состоящего из сменных частей, дает возможность достаточно оперативно изменять внутреннюю геометрию канала, что важно для исследования влияния граничных условий на характеристики течения и оптимизации геометрии ОТ.

На входе в рабочий участок находится стационарный лопаточный завихритель с конструктивным параметром крутки S=0.4. Параметр крутки определен по геометрическим параметрам завихрителя [5]:

$$S = \frac{2}{3}\left(\frac{1-(d_1/d_2)^3}{(1-(d_1/d_2)^2)}\right)\tan(\phi),$$ где d_1 и d_2 – меньший и больший диаметры кольцевого канала завихрителя (рис.1), φ – угол наклона лопаток. Значение параметра крутки в нашей модели, равное, как и в прототипе TURBINE-99, 0.4, соответствует условиям работы натурных турбин.

Качественная картина течения исследовалась с помощью системы визуализации, включающей в себя цифровую фотокамеру высокого разрешения, а также скоростную видеокамеру для регистрации нестационарных явлений в исследуемом течении. Визуализация течения осуществлялась подсветкой вводимых в поток мелких пузырьков воздуха световым «ножом», сформированным при помощи цилиндрической линзы из светового пучка лазерного источника (твердотельный лазер постоянного излучения мощностью 3 Вт).

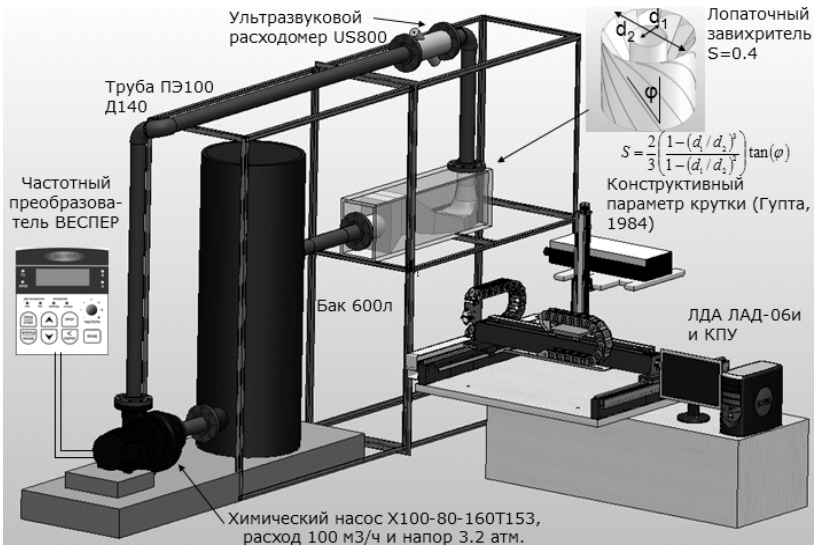

Рис.1. Схема экспериментального стенда

Измерения скоростей в различных сечениях модели производились с помощью 2-х компонентной системы ЛДА “ЛАД-06и” [6], включающей в себя КПУ (координатно-перемещаемое устройство) и компьютер с оригинальным программным обеспечением. Система ЛДА работает в режиме обратного светорассеяния. Погрешность измерения средней скорости составляет не более 0.5%. С помощью системы ЛАД-06и осуществлялась автоматизация эксперимента, т.е. измерительный объем ЛДА позиционировался в указанные точки с помощью КПУ, в них производилось измерение компонент скорости в течение времени, необходимого для набора статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате экспериментов были получены данные о скорости в конической части и в других сечениях вдоль отсасывающей трубы.

По профилю осевой составляющей скорости видно (рис.2), что за телом обтекания отсутствует зона возвратного течения, с формированием которой обычно связана генерация ПВЯ. Более того, возникает центральная струя и пристенное течение, формирующие стационарный вихрь в конусе ОТ, без образования ПВЯ.

С целью наиболее полного понимания характера течения в диффузоре, была промерены поля скоростей течения в различных поперечных сечениях диффузора (рис.3). На рис.4 приведены изолинии продольной скорости, обезразмеренной посредством среднерасходной скорости в данном сечении канала. Измерения производилось с шагом 10 мм (измерительные точки соответствуют узлам сетки, показанной на рис.4) при расходе 13 л/с, соответствующем числу Рейнольдса порядка 10^5.

Результаты показывают, что поток у левой стенки в 2 раза превосходит среднюю скорость. Область интенсивного протока жидкости вдоль левой стенки занимает менее 1/3 сечения канала, а более 2/3 сечения канала занято застойной областью. Как видно из визуализации (рис.5), в области застойного продольного движения образуется горизонтальный вихрь, который тянется вдоль всего диффузора. Выявленная сильная неравномерность течения в диффузоре, очевидно, приводит к дополнительным потерям энергии, снижающим эффективность работы ОТ.

Полученные картины течения были сопоставлены с расчетным данными. Численные расчеты были выполнены в пакете “SIGMAFLOW” группой разработчиков в составе А.А. Дектерева и А.В. Минакова (Институт теплофизики СО РАН) [7]. Сопоставление результатов говорит о хорошем соответствии расчетной картины течения с экспериментальными данными (рис.6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе с использованием техники визуализации и детальных измерений с помощью автоматизированной ЛДА системы было проведено исследование вихревого течения в модели отсасывающей трубы гидротурбины TURBINE-99. Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов об особенностях течения в модели данной конфигурации.

Наиболее интересным результатом является то, что при данных входных параметрах с завихрителем S=0.4 и при данном расходном режиме, соответствующем турбулентному режиму течения, не образуется выраженное ПВЯ и не наблюдаются связанные с ним сильные пульсации потока. Это ясно было видно при анализе записи скоростной видеосъемки, а также спектрального анализа ЛДА сигнала. Нужно отметить, что в работах других исследователей для аналогичной конфигурации TURBINE-99 и той же степени закрутки потока прецессия вихревого жгута была зафиксирована [4]. Отсутствие ПВЯ в наших экспериментах можно объяснить конструкцией использованного завихрителя, формирующего специфичный профиль осевой скорости на входе в конус отсасывающей трубы. Генерация ПВЯ всегда сопровождается образованием зоны возвратного осевого течения под телом обтекания, однако наши входные условия формируют центральную приосевую струю (рис.2), препятствующую образованию центральной рециркуляционной зоны. В работе [8] показано что, струя воды, подаваемая из отверстия на центральном теле обтекания, может обеспечить существенное подавление ПВЯ. Особенностью нашей работы является то, что устойчивый режим течения без ПВЯ в отсасывающей трубе был получен без использования отдельного канала для подачи воды. Предполагается, что этот результат даст возможность для разработки рекомендаций по конструкции гидротурбины, не генерирующей мощные пульсации потока в отсасывающей трубе.

Другим важным результатом является обнаруженная сильная неравномерность потока за поворотным коленом. В результате того, что закрутка потока осуществлялась по часовой стрелке, а у канала было выделенное направление, то интенсивный поток прижимался к левой стенке. У противоположной стенки, где направление закрутки было противоположно направлению течения, поток тормозился, образуя обширную застойную область. Таким образом, проходное сечение в диффузоре отсасывающей трубы использовалось лишь менее чем на 1/3, что сильно снижало ее пропускную способность. Этот факт, очевидно, приводит к дополнительным потерям энергии и требует специального внимания при разработке конструкций практических гидротурбин.

Полученные результаты были использованы для верификации численных расчетов, параллельно ведущихся группой вычислителей. Продемонстрировано хорошее соответствие измерений и расчетов.

Дальнейшие исследования будут проведены для определения влияния на структуру потока, потери давления и пульсационные характеристики потока степени закрутки (параметра крутки) и геометрии поворотной части трубы. В конечном итоге, в результате исследований должны быть выработаны рекомендации по повышению КПД гидротурбины и устойчивости ее работы.

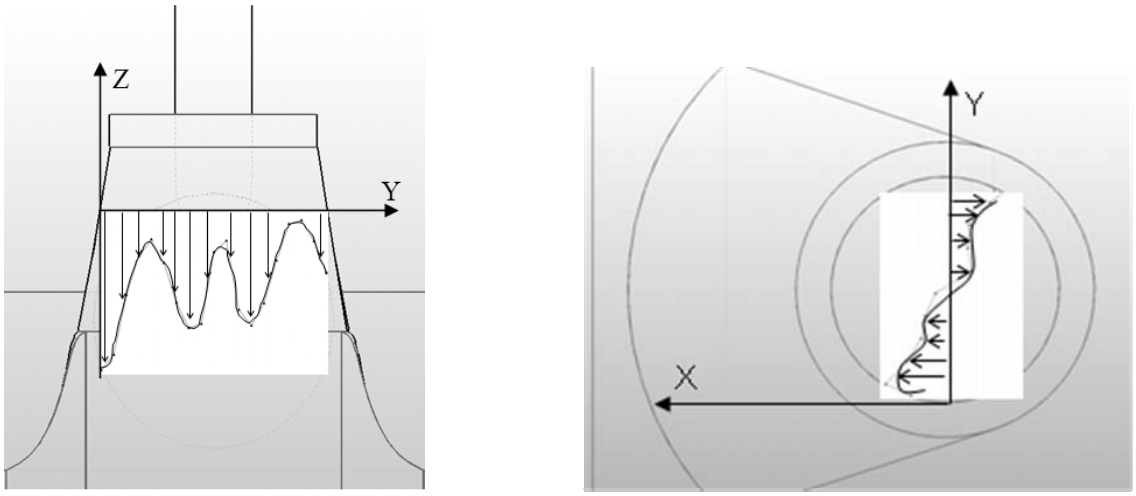

Рис.2. Профили осевой (вдоль оси Z) и тангенциальной (вдоль оси X) компонент скорости под телом обтекания завихрителя

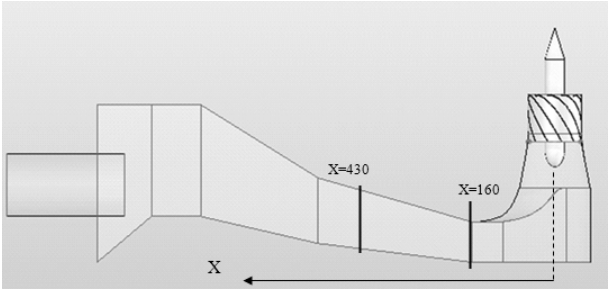

Рис.3. Схема измерительных сечений в диффузоре ОТ

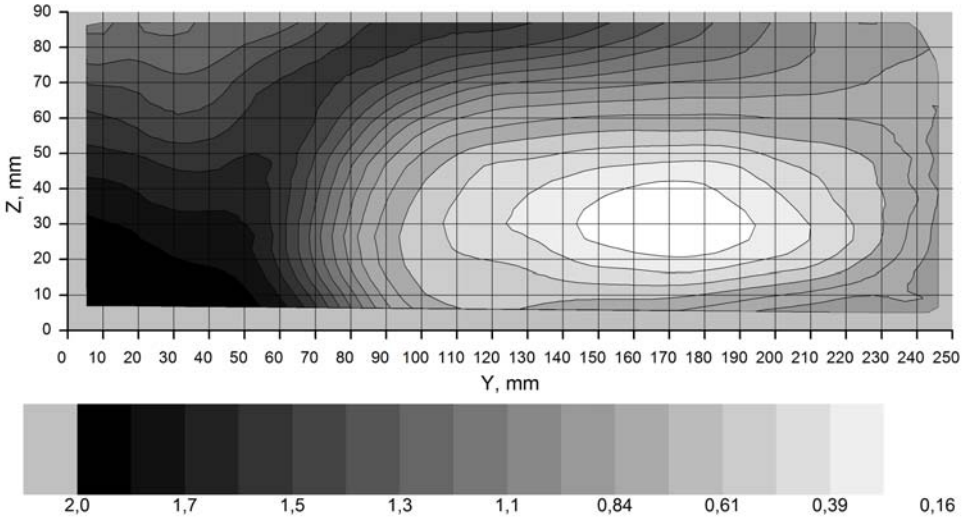

Рис.4. Изолинии продольной скорости в сечении X=160 мм в безразмерном виде, обезразмеривание произведено через среднерасходную скорость в данном сечении (0.6 м/сек)

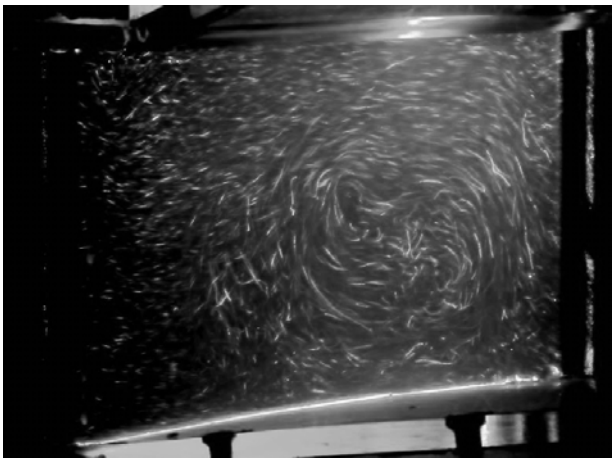

Рис.5. Визуализация течения в вертикальной плоскости в сечении X=160 мм

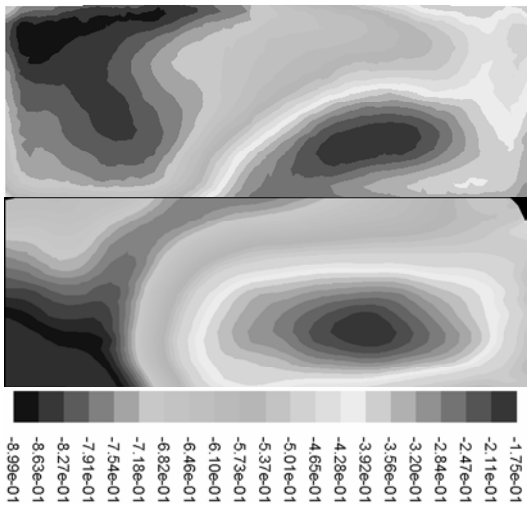

Рис.6. Сравнение расчетной и экспериментальной картины течения продольной компоненты скорости в сечение X=160 mm (вверху - расчет по модели DES M-SST, внизу - эксперимент)

ЛИТЕРАТУРА

1. Губин М.Ф. Отсасывающие трубы гидроэлектростанций. – М.: Энергия, 1970, – 270 С.
2. Cassidy J.J., Falvey H.T. Observation of unsteady flow arising after vortex breakdown // Journal of Fluid Mechanics 41 – 1970, P. 727-736.
3. Marjavaara B.D., Doctoral Thesis, CFD Driven optimization of Hydraulic turbine draft tube using surrogate model // Lulea University of Technology, 2006.
4. Cervantes M.J., Engström T.F., Gustavsson L.H., Proceedings of the third IAHR/ERCOFTAC Workshop on draft tube flows. Turbine-99 III // Lulea University of Technology, 2005.
5. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987, – 590 С.
6. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЛАД 06-и, Новосибирск: Институт оптикоэлектронных информационных технологий, 2006 (URL:http://www.ioit.ru)
7. Dekterev A.A., Gavrilov A.A., Minakov A.V., Finnikov K.A. Numerical simulation of unsteady cavitating turbulent flow in water turbine // Proc. of 6th International Symposium On Turbulence, Heat and Mass Transfer, Rome, Italy, 14-18 September. - 2009. -. P. 835-838.
8. Muntean S. , Susan-Resiga R. , Bosioc A. Pressure measurements in a conical diffuser with swirling flow and axial jet control. Center for Advanced Research in Engineering Sciences, National Center for Engineering of Systems with Complex Fluids, “Politehnica” University of Timioara, Romania (URL: http://www.acadtim.tm.edu.ro/iSMARTflow/pdf/Muntean_4GRoWTH.pdf), 2008.