УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В МОДЕЛИ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЫ ГИДРОТУРБИНЫ

Скрипкин С.Г., Шторк С.И.

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

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 11-08-01063, 10-08-01096, 10-08-01093), грантов Правительства России (№11.G34.31.0046) и Минобрнауки РФ в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы» и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы».

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена экспериментальному исследованию структуры течения в модели отсасывающей трубы TURBINE–99 (T-99). По данной геометрии накоплен достаточно большой объём расчётных работ, с использованием различных алгоритмов обработки, но большинство экспериментальных данных ограничены небольшими сечениями, обусловленными спецификой рабочих участков, большинство из которых имеют лишь небольшие прозрачные фрагменты для оптического доступа. Поэтому целью работы было получение новой, более детальной информации о структуре потока, необходимой для верификации данных, полученных при численных расчётах. Эти данные в свою очередь будут использованы для оптимизации геометрии с целью повышения надёжности гидродинамического оборудования и увеличения эффективности работы отсасывающих труб. Эксперименты проводились с использованием современных измерительных систем, таких как PIV(Particle Image Velocimetery)-система и камера высокоскоростной съёмки ВИДЕОСПРИНТ.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых важных частей гидроагрегата является так называемая отсасывающая труба (ОТ). Это та часть водовода, которая позволяет отводить поток от рабочего колеса в нижний бьеф. ОТ гидротурбин оказывают большое влияние на энергетические и кавитационные показатели турбин. Тормозя поток за счёт расширения канала, ОТ восстанавливает часть потерь кинетической энергии сходящего с рабочего колеса потока, а также позволяет использовать потенциальную энергию за счёт возвышения рабочего колеса над уровнем нижнего бьефа [1].

При эксплуатации ОТ возникает ряд нежелательных явлений влияющих на эффективность и безопасность работы гидроагрегата. К таким явлениям можно отнести возникновение кавитации под лопастями рабочего колеса. При этом явлении в потоке образуются полости, заполненные водяным паром. Таким образом, сплошность потока нарушается, а граница между областью низкого давления под лопастями и высокого над ними становится неустойчива. Полости периодически попадают в область высокого давления, при этом пар мгновенно конденсируется и полость схлопывается с образованием ударной волны высокого давления, что подобно взрыву. Серия таких микровзрывов, повторяющихся с большой частотой, вызывает шум и вибрацию в турбине, а металлические поверхности в очагах кавитации быстро разрушаются. Также крайне опасным для гидроэнергетического оборудования является образование прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ), которое генерирует мощные пульсации давления в трубе с низкой частотой, близкой к собственным частотам конструкции, что создает опасность резонанса [2].

Ввиду сложности проведения эксперимента на натурных отсасывающих трубах, использу-

ются упрощённые геометрические модели. К таким моделям относится Т-99 (рис.1), повторяющая все основные геометрические особенности натурных отсасывающих труб [3]. Удобство использования этой геометрии заключается в том, что она состоит из простых элементов и имеет плоские стенки, что позволяет эффективно использовать бесконтактные (не возмущающие поле течения) оптические методы исследования. По данной геометрии имеется большое количество расчётных работ, а экспериментальные данные ограничены небольшими сечениями и не дают представления о структуре потока в целом.

На базе ИТ СО РАН был создан экспериментальный стенд, содержащий рабочий участок выполненный по геометрии Т-99. На данной модели уже был выполнен ряд экспериментальных и расчётных работ. В работе [4] были измерены профили скоростей и приведены ЛДА данные полей в некоторых сечениях.

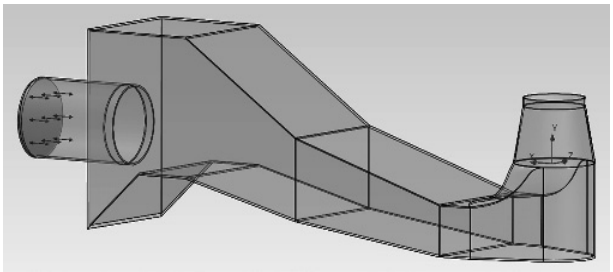


Рис.1 Геометрия TURBINE-99.

С помощью системы PIV были получены новые данные по течению в конической и поворотной части модели трубы, которые необходимы для верификации численных кодов. Также получены данные по перепадам давления при изменении геометрии поворотного колена.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Гидродинамический стенд (рис.2) состоит из химического насоса Х100-80-160Т153 с номинальной производительностью 100 м^3/ч и напором 3.2 атм, полиэтиленового бака цилиндрической формы объемом 600 л, соединений, выполненных из поли-этиленовых 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, с помощью которого изменялась частота вращения электродвигателя насоса, тем самым контролируя расход воды в контуре. Контур оснащен также ультразвуковым расходомером с электронным блоком US800. Погрешность измерения расхода составляет не более 2%.

На входе в рабочий участок находится стационарный лопаточный завихритель с конструктивным параметром крутки S=1.2. Параметр крутки определен по геометрическим параметрам завихрителя [5]:

$$S = \frac{2}{3}\left(\frac{1-(d_1/d_2)^3}{\left(1-(d_1/d_2)^2\right)}\right)\tan(\phi) \qquad (1)$$

где d_1 и d_2 – меньший и больший диаметры кольцевого канала завихрителя, φ – угол наклона лопаток.

В реальных отсасывающих трубах параметр крутки постоянно меняется в зависимости от режима работы турбины. Исследуемые в нашей работе условия соответствуют режимам с большой остаточной закруткой, которые имеют место при неоптимальной загрузке гидроагрегата.

Для наглядного представления картины течения использовалась скоростная камера «ВидеоСпринт», позволяющая регистрировать быстрые нестационарные явления в канале трубы. Визуализация осуществлялась с помощью пузырьков воздуха, образующихся при больших расходах в контуре, подсвеченных лазерным «ножом», сформированным из светового пучка мощного твёрдотельного лазера при помощи цилиндрической линзы.

Для измерения полей скоростей течения в различных сечениях использовался PIV-метод [6]. Этот метод цифровой трассерной визуализации относится к классу бесконтактных методов измерения скорости в потоках. В ряду других инструментов для исследования структуры течений он занимает особое место благодаря возможности регистрировать мгновенные пространственные распределения скорости. Данное преимущество является особенно важным при изучении потоков, содержащих крупномасштабные вихревые структуры, информация о которых частично теряется при применении одноточечных методов диагностики. Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении за

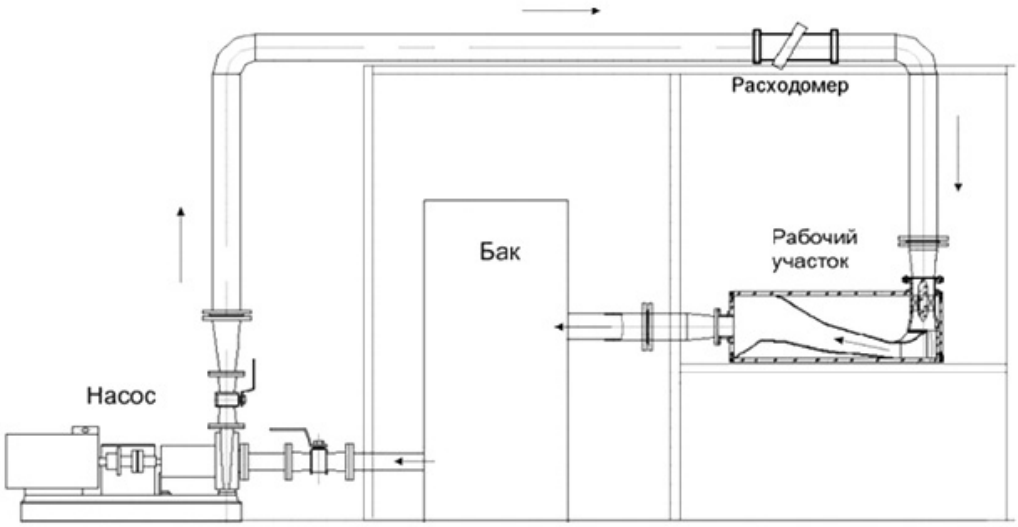


Рис.2. Схема экспериментального стенда.

фиксированный интервал времени перемещения частиц-маркеров, находящихся в плоскости сечения.

Эксперимент проводился при двух различных геометриях поворотного колена (рис.3).

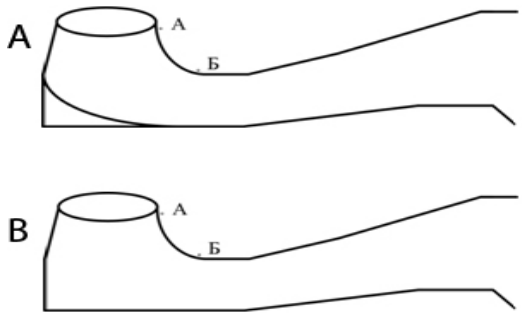


Рис.3 Варианты геометрии А) с подложкой, В) без подложки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью дифференциального тензодатчика были измерены в зависимости от расхода перепады давления между точками А-Б, изображёнными на рис.3. На рис.4 слева представлена зависимость обезразмеренного перепада давления от числа Re для варианта геометрии со сглаживающей подложкой, а справа для варианта геометрии без подложки. Число Re определено по диаметру и среднерасходной скорости в сечении точки А

Начиная с Re ~ $1.5 \cdot 10^5$ наблюдается зона автомодельности, т. е характеристики течения перестают зависеть от расхода, что позволяет проводить количественные измерения характеристик течения при Re меньшем, чем в натурных условиях [7]. Также данные показывают, что отсутствие подложки не сильно влияет на характер графиков, зона автомодельности сместилась к более низким Re, а величина обезразмеренного давления незначительно уменьшилась, что говорит об уменьшении коэффициента восстановления давления.

Вдоль левой стенки наблюдается интенсивный поток жидкости в сторону выхода, о чём говорят длинные треки (рис.5). Вдоль правой стенки и по центру канала видно хаотичное движение, включающее в себя зону возвратного течения, со средней скоростью гораздо меньшей, чем у пристеночного течения слева. По центру канала можно на-

блюдать образование крупномасштабной вторичной вихревой структуры. Исходя из анализа данных высокоскоростной съёмки можно сделать вывод об отсутствии формирования ПВЯ в конусе трубы.

Для полного представления структуры течения в канале с помощью PIV были получены поля скоростей в различных сечениях. Число Re при измерениях было $1.7 \cdot 10^5$. На рис.6 представлено среднее поле X-компоненты скорости, ось направлена вправо. Чёрными линиями обозначены примерные линии тока. Можно наблюдать зону рециркуляции, распространяющуюся от начала поворотной части модели вплоть до самого завихрителя. В начале поворотной части имеется стационарная вторичная вихревая структура. Видно, что основной поток идёт вдоль нижней стенки, а вдоль верхней наблюдается менее интенсивное возвратное течение. Обнаруживается также влияние сужения выходного отверстия, где происходит отражения потока, от левой стенки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

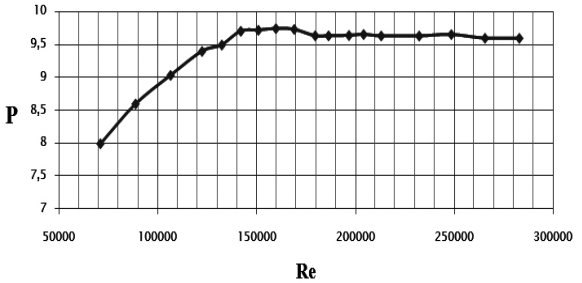
В работе проведено исследование вихревого течения в модели отсасывающей трубы TURBINE–99 с использованием различных эксперимен-тальных методов. Поля скоростей, измеренные с помощью PIV системы, а также выполненная визуализация потока в различных сечениях, дают нам наглядное представление о структуре потока в модели отсасывающей трубы.

Одним из важных результатов работы является отсутствие выраженной прецессии вихревого ядра и связанных с этим явлением крупномасштабных пульсаций потока, несмотря на большой параметр закрутки потока S = 1.2 и наличие центральной рециркуляционной зоны в конической части отсасывающей трубы. Наличие центральной рециркуляционной зоны, которая приводит к дополнительным потерям в контуре, объясняется тем, что при высокой интенсивности закрутки (S > 0,6) возникают большие градиенты давления в радиальном и осевом направлениях, что приводит к появлению осевой рециркуляции, отсутствующей при более низких уровнях закрутки [6]. Также нужно отметить, что в работах других исследователей для аналогичной конфигурации TURBINE-99, но при меньшем параметре закрутки потока прецессия вихревого жгута была зафиксирована [3]. Отсутствие прецессирующего вихревого ядра может быть объяснено геометрией завихрителя, который создает специфичный входной профиль скорости.

В поворотной части отсасывающей трубы было обнаружено наличие вторичных вихревых структур. При этом основной поток сильно прижат к левой стенке. Таким образом, была оценена реальная рабочая область в поворотном колене. Проведенные оценки показывают, что она составила около 30% от поперечного сечения канала. Остальная часть канала занята возвратным течением и застойными областями, что, безусловно, приводит к дополнительным потерям энергии в отсасывающей трубе.

Из-за установки сглаживающей подложки в модель отсасывающей трубы, конец зоны рециркуляции сместился в сторону выходного отверстия, причем коэффициент восстановления давления в присутствие подложки увеличился на 5%.

Полученные экспериментальные данные будут использованы для тестирования результатов численных расчетов, которое параллельно ведутся в ИТ СО РАН. Результаты совместного физического и математического моделирования будут в дальнейшем использованы для оптимизации геометрии отсасывающих труб, с целью увеличения КПД и надёжности работы гидротурбин.



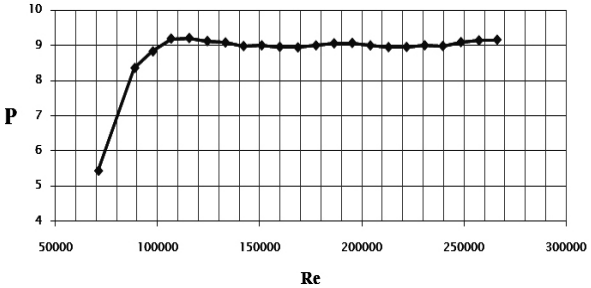


Рис.4 Перепад давления от числа Re.

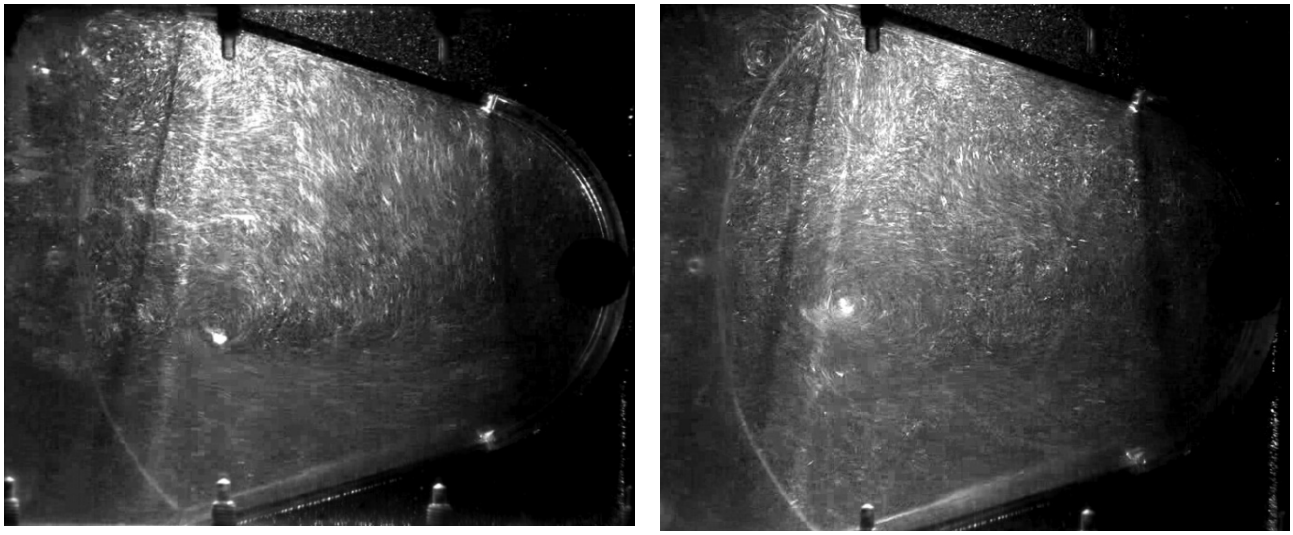


Рис.5 Визуализация течения в вертикальном сечении.

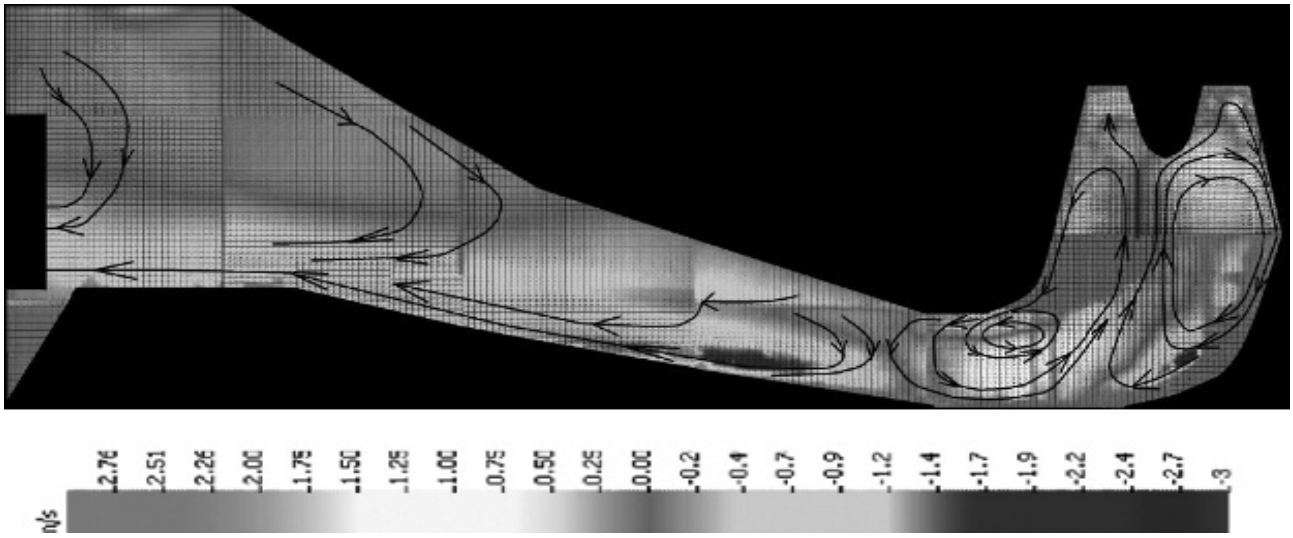


Рис.6 Среднее поле X-компоненты скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильиных. И.И. Гидростанции: учебник для техникумов – М.: Энергоиздат, 1982, 192 С
2. Губин М. Ф. Отсасывающие трубы гидроэлектростанций. – М.: Энергия, 1970, 270 С.
3. 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.
4. Алексеенко С.В., Дектерев А.А., Литвинов И. В., Минаков А.В., Пылев И.М., Шандро А.И., Шторк С.И.. Численное и экспериментальное моделирование течения в отсасывающей трубе гидротурбины. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 5 (2011 4) 489-503
5. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987, – 590 С.
6. Руководство пользователя программы «ActualFlow», Версия 1.16 – 1 декабря 2008.
7. Кутателадзе С. С., Ляховский Д.Н., Пермяков В.А Моделирование теплоэнергетического оборудования. – М.-Л., Энергия, 1966, 351 С.