

Тема: «Компьютерное моделирование, в сочетании с теоретическим анализом и экспериментом, турбулентных течений с сопутствующими процессами переноса (теплообмен, горение, взаимодействие фаз) на высшем уровне сложности, требуемом для моделирования процессов производства, преобразования и потребления энергии»

Состав коллектива:

к.ф.-м.н., ведущий инженер ЛМЭП НИЧ НГУ, Гаврилов А.А.,

к.ф.-м.н., инженер ЛМЭП НИЧ НГУ, Сентябов А.В.

Работа выполнена по гранту Правительства России №11.G34.31.0046 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый – К. Ханъялич, НГУ).

Научное содержание работы.

Численные исследования рабочей группы в рамках данного проекта были посвящены моделированию динамики вихревого жгута в конусе отсасывающей трубы гидротурбины и исследованию структуры потока в поворотной части отсасывающей трубы.

При работе радиально-осевых и поворотно-лопастных гидротурбин в неоптимальных режимах возникают низкочастотные гидродинамические пульсации. Как правило, они связаны с нестационарным закрученным потоком в отводящем диффузоре гидроагрегата, называемом отсасывающей трубой. Отсасывающая труба представляет собой расширяющийся канал, соединяющий турбину с нижним бьефом. Поток, покидающий рабочее колесо турбины, обладает некоторой степенью закрутки, которая растёт с отдалением режима от точки оптимума. Закрученный поток в расширяющемся канале подвержен развитию неустойчивости – прецессирующего вихревого ядра. Индуцируемые им низкочастотные пульсации передаются по всему проточному тракту. Величина пульсаций давления может достигать десятка процентов напора электростанции. Для высоконапорных ГЭС это означает огромные динамические нагрузки на конструкции гидроагрегата, создающие опасность их повреждения. Наблюдаемые вибрации связаны с прецессирующим вихревым ядром.

Исследования проводились для моделей трех гидротурбин: турбина поворотно-лопастного типа проект Turbine-99, высоконапорная турбина радиально-осевого типа и радиально-осевая турбина проекта Francis-99.

Первая рассматриваемая отсасывающая труба представляет собой часть уменьшенной модели турбины Holleforsen. Турбина относится к поворотно-лопастному типу (турбина Каплана), рабочее колесо имеет пять лопастей. Моделируемая область начинается немного ниже лопастей рабочего колеса и включает его обтекатель. Для постановки граничных условий на входе использовался двумерный профиль аксиальной и тангенциальной компонент скорости на входе на основе измерений. Для моделирования турбулентного течения использовался метод DES на основе моделей SA и k- ω SST, метод URANS и нестационарный расчет невязкого течения. Метод DES (Detached Eddy Simulation – моделирование отсоединённых вихрей) сочетает подходы RANS и LES. В областях потока, где размер вычислительной сетки Δ достаточен для разрешения больших вихрей, т.е. при $\Delta < l_t$ применяется LES, а в остальной области – уравнения Рейнольдса. Первая версия DES базировалась на модели Спаларта-Аллмареса SA. В дальнейшем метод DES был обобщен на другие модели турбулентности и появились различные его модификации. В частности, был предложен вариант метода на основе k- ω SST модели Ментера. В этом случае вводится ограничение диссипации кинетической энергии турбулентных пульсаций.

Как показали расчёты, все нестационарные методы воспроизводят прецессию вихревого ядра, что объясняется невязким характером явления (Рис. 1). Полученная частота

прецессии почти идентична для всех методов и близка к экспериментальным и численным результатам. Однако детали нестационарного течения могут заметно отличаться. Так, в методе URANS вихревой жгут быстро диссипирует, что приводит к занижению пульсаций давления по сравнению с методом DES. Наоборот, вязкий расчёт может приводить к чрезмерной генерации высокочастотных колебаний.

Анализ пульсаций давления показал сложную картину нестационарных процессов. Интенсивность пульсаций существенно зависит от положения точки записи в отсасывающей трубе, в том числе в одном и том же сечении. Такая ситуация вызвана интерференцией синхронных и асинхронных колебаний и может осложнить сопоставление интенсивности пульсаций. Синхронные колебания имеют, по крайней мере, не меньшую интенсивность, чем асинхронные и распространяются вдоль отсасывающей трубы вверх по потоку, вызывая динамические нагрузки на конструкции. По-видимому, они выражают изменение сопротивления канала вследствие периодической перестройки течения при движении вихревого жгута в колене отсасывающей трубы.

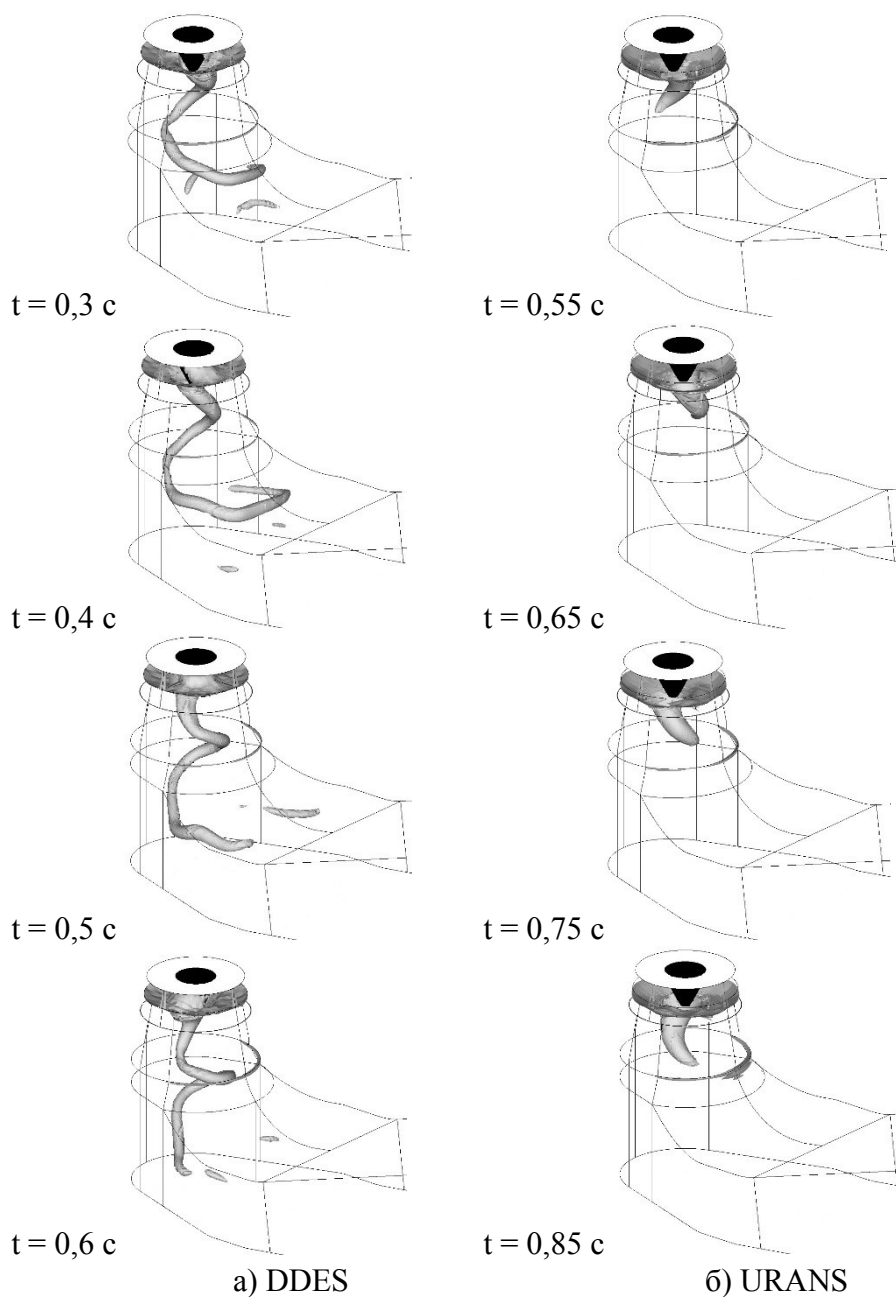


Рис. 1. Прецессия вихревого жгута

Вторая рассматриваемая турбина является уменьшенной копией высоконапорной турбины радиально-осевого типа. Расчетная область представляет собой отсасывающую трубу до выхода в нижний бьеф. Вход выполнен в виде усеченного конуса. В зависимости от уровня нестационарных явлений и связанной с этим надежности работы гидроагрегата эксплуатационную характеристику турбины разделяют на четыре зоны. В этих зонах реализуются различные механизмы генерации пульсаций в гидротурбине. Режим $q/q_{\text{опт}} = 46\%$ соответствует началу второй зоны. В этом режиме пульсации носят стохастический характер, что характерно для области низких расходов, однако интенсивность пульсаций уже велика. Вследствие высокой закрутки в отсасывающей трубе формируется обширная зона рециркуляции, а аксиальный поток прижат к стенкам. Пульсации давления имеют широкий спектр с максимумом вблизи частоты вращения рабочего колеса. Несмотря на интенсивные локальные пульсации давления, динамические нагрузки на рабочее колесо в этом режиме не столь высоки. Это объясняется тем, что интенсивные локальные пульсации давления вызваны несколькими небольшими вихрями, проходящими в непосредственной близости от стенки конуса отсасывающей трубы. Проходя мимо датчиков давления, они вызывают мощные локальные пульсации, однако их интегральный эффект не такой значительный.

Режимы $q/q_{\text{опт}} = 68\% - 81\%$ соответствуют области формирования прецессирующего жгута. В этих режимах также формируется обширная зона рециркуляции, которая, тем не менее, захватывает всё меньшую и меньшую область в рабочем колесе с ростом расхода. В отличие от режима $q/q_{\text{опт}} = 46\%$ формируется интенсивный вихревой жгут, прецессирующий вокруг зоны возвратного течения. Он порождает интенсивные пульсации давления и вызывает динамические нагрузки на рабочее колесо – как радиальные, так и аксиальные. В спектре пульсаций давления это выражается острым и интенсивным пиком на частоте $f/f_n \approx 0,2$. Максимальная интенсивность пульсаций приходится на режим $q/q_{\text{опт}} = 68\%$, что соответствует мощности около 50% от максимальной. Частота прецессии вихревого жгута почти не меняется с изменением режима. Данную закономерность можно объяснить тем, что частота пропорциональна числу Струхаля и расходу, в то время как число Струхаля линейно растет с ростом закрутки. Поскольку с ростом расхода параметр закрутки падает (режим приближается к точке оптимума), то их влияние оказывается разнонаправленным и частота меняется слабо. Режим $q/q_{\text{опт}} = 114\%$, для которого мощность составляет 93% от максимальной, попадает в третью зону эксплуатационной характеристики. В этом режиме формируется небольшой вихревой жгут под обтекателем рабочего колеса. Пульсации в этом режиме незначительны.

В рамках проекта Francis-99 была предпринята попытка организовать тест для отработки моделирования течения в гидротурбине радиально-осевого типа. Организаторами семинара были предоставлены и геометрические и режимные данные и результаты измерений скорости в двух сечениях в отсасывающей трубе и пульсаций давления в нескольких точках. Рассматривались три режима: частичной нагрузки (PL), оптимальный режим (BER) и режим повышенной нагрузки (HL). Расчетная область включала в себя рабочее колесо диаметром 0,349 м и отсасывающую трубу. Результаты расчетов показывают хорошее соответствие экспериментальным данным. В режиме частичной нагрузки различие очень маленькое. В оптимальном режиме расчет показывает большее значение тангенциальной компоненты скорости возле оси. В то же время, закрутка потока в этом режиме очень мала и, соответственно, решение чувствительно к входным условиям. В режимах оптимальной и повышенной нагрузки расчет показывает за рабочим колесом застойную зону, которая почти не наблюдается в эксперименте. Среднеквадратичные пульсации компонент скорости в режиме частичной нагрузки также согласуются экспериментальными данными для нижнего сечения. В верхнем сечении пульсации недооцениваются, по-видимому, вследствие недостаточного разрешения сетки рабочего колеса.

С помощью кластера НГУ проводились расчеты течения вихререзающими моделями турбулентности, требующие значительных вычислительных ресурсов.

Публикации:

1. Платонов Д. В., Минаков А. В., Дектерев А. А., Сентябов А. В. Численное моделирование пространственных течений с закруткой потока. Компьютерные исследования и моделирование. 2013, Т. 5 № 4 С. 635–648.
2. Д.В. Платонов, А.В. Минаков, А.А. Дектерев, А.В. Сентябов, И.М. Пылев Математическое моделирование нестационарных явлений в гидротурбине Саяно-Шушенской ГЭС. Труды Академэнерго, №1, 2013, 73-84.
3. А.В. Сентябов, А.А. Гаврилов, А.А. Дектерёв, А.В. Минаков Анализ RANS моделей турбулентности на примере расчёта стационарного течения в отсасывающей трубе гидротурбины Turbine-99. Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – с. 86-93.
4. Г.А. Семёнов, А.Ю. Смирнова, А.А. Дектерёв, А.В. Минаков, А.В. Сентябов Численное исследование конструктивных способов подавления низкочастотных пульсаций давления в отсасывающей трубе гидротурбины. Труды Академэнерго, 2013, №3, с. 26-40.
5. Minakov A.V., Sentyabov A.V., Platonov D.V., Dekterev A.A., Gavrilov A.A. Numerical modeling of flow in the Francis-99 turbine with Reynolds stress model and detached eddy simulation method // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 579. doi:10.1088/1742-6596/579/1/012004
6. Minakov A.V., Platonov D.V., Dekterev A.A., Sentyabov A.V., Pylev I.M., Zakharov A.V., Use of Methods of Mathematical Modeling to Analyze Low-Frequency Pressure Pulsations in the Continuous Run of High-Head HPP // Power Technology and Engineering, 2015 July, Volume 49, Issue 2, pp. 90 – 97. DOI: 10.1007/s10749-015-0580-8.