

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЕ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ

СЕНТЯБОВ А.В.

*ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

e-mail: sentyabov\_a\_v@mail.ru

ГАВРИЛОВ А.А.

*ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

ДЕКТЕРЕВ А.А.

*ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

МИНАКОВ А.В.

*СФУ, Красноярск*

1 марта 2011 г.

В работе проведено численное моделирование низкочастотных пульсаций в отсасывающей трубе радиально-осевой гидротурбины методом моделирования отсоединенных вихрей. Выполнено сравнение полученных данных с экспериментальными результатами при различных режимах работы турбины. Результаты сравнения показывают удовлетворительное согласие по частотам и интенсивностям пульсаций.

## Введение

Работа гидротурбин при неполных нагрузках может сопровождаться значительными низкочастотными пульсациями давления вследствие прецессии вихря в закрученном потоке. Такие пульсации негативно сказываются на надежности работы гидроэнергетического оборудования, поэтому предпринимаются меры к их подавлению, как, например, впуск воздуха в поток или установка специальных конструкций.

Расчету отсасывающих труб посвящено немало исследований. Например, в [1] собраны экспериментальные данные и расчетные исследования по модельной турбине (стенду), в том числе по моделированию крупномасштабных пульсаций течения при режиме неполной загрузки. Крупномасштабные пульсации определялись в различных работах с помощью метода моделирования крупных вихрей (LES), метода моделирования отсоединенных вихрей (DES) и, иногда, решения нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS).

Данная работа посвящена численному моделированию энергетического стенда радиально-осевой турбины и сопоставлению полученных данных с результатами измерений пульсаций давления.

## 1. Исходные данные

Исследование нестационарного течения в отсасывающей трубе (ОТ) проводилось на примере модельного стенда высоконапорной радиально-осевой турбины. Стенд представляет собой уменьшенную копию части проточного тракта ГЭС (спиральная камера, направляющий аппарат, рабочее колесо и отсасывающая труба), в которой поддерживается постоянный статический напор.

Чтобы минимизировать влияние кавитации, для сравнения были взяты режимы при наименьшем коэффициенте кавитации  $\sigma = 0.0983$ . В расчете кавитация не учитывалась. При данной частоте исследовалось несколько режимов в зависимости от раскрытия направляющего аппарата. Характеристики режимов и пульсации давления измерялись двумя датчиками на стенке конуса отсасывающей трубы. Пульсации давления характеризуются разницей наибольшего и наименьшего давлений в данной точке за 15 с (т.н. пульсации pic-to-pic), деленной на напор (2А/Н, %). В спектрах также приводится удвоенная амплитуда гармоник, нормированная на напор.

## 2. Модель

Расчеты проводились для отсасывающей трубы стенда. Были рассмотрены три варианта расчетной области: конус отсасывающей трубы, отсасывающая труба с плоским входом (рисунок 1) и отсасывающая труба с конусообразным входом.

Расчетная область в первой постановке охватывала начальный участок отсасывающей трубы. Вход представлял собой плоскость и расположен на 1 мм выше края обтекателя. Выход располагался на входе в колено отсасывающей трубы.

Не вполне корректные граничные условия на выходе из конуса отсасывающей трубы не позволили правильно моделировать закрученное течение в такой постановке. По этой причине расчетная область была расширена до выхода в нижний бьеф (рисунок 1). Форма входа при этом была оставлена без изменений.

Третий вариант расчетной области представляет собой отсасывающую трубу до выхода в нижний бьеф, у которой вход выполнен в виде усеченного конуса с углом полураствора  $\alpha = 70^\circ - 80^\circ$ . Такая форма входа позволяет охватить всю область рециркуляции за обтекателем и начало отрыва.

Для получения граничных условий на входе расчетную область предварительно проведен расчет течения во всем проточном тракте (спиральная камера, направляющий аппарат, рабочее колесо и отсасывающая труба) при заданном динамическом напоре в приближении замороженного колеса.

Нестационарный расчет проводился по методу моделирования отсоединенных вихрей, основанному на модели Спаларта–Аллмареса [2], в которой в качестве характерного линейного масштаба турбулентности используется расстояние до стенки  $d$ . При моделировании отсоединенных вихрей этот масштаб заменяется функцией

$$\tilde{d} = \min(d, C_{DES}\Delta), \quad (1)$$

где  $C_{DES}$  – эмпирическая константа, а  $\Delta$  определяется как максимальный из трех размеров контрольного объема  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ .

Расчеты во всех постановках проводились на блочно-структурированных сетках из гексаэдральных ячеек. Расчетная сетка конуса содержала 700 тыс. ячеек. Расчетная

сетка полной трубы содержала от 40 тыс. (рисунок 1) до 800 тыс. ячеек. Расчетная сетка при конусообразном входе была построена таким же образом и содержала от 60 тыс. до 1 млн. ячеек. Ввиду высоких требований данной задачи к вычислительным ресурсам расчеты проводились на кластере центра высокопроизводительных вычислений СФУ с использованием распараллеливания путем декомпозиции расчетной области.

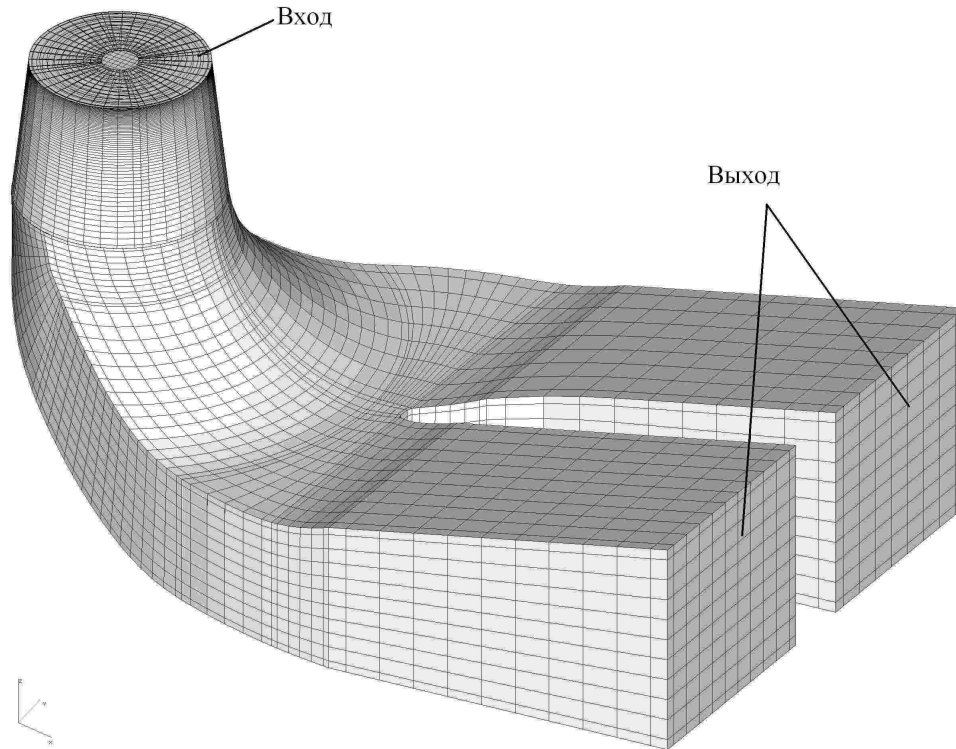


Рис. 1. Расчетная сетка

### 3. Расчет в различных постановках

В первой постановке течение рассчитывалось только в конусе отсасывающей трубы, а на выходе ставились условия сноса. Расчеты были проведены для режимов с разной степенью открытия направляющего аппарата гидротурбины  $a_0 = 26$  мм и  $a_0 = 34$  мм. Полученные частоты пульсаций показали качественное соответствие эксперименту. В режиме  $a_0 = 26$  мм выделяется один основной вихрь, который прецессирует вокруг небольшой зоны рециркуляции на оси конуса с частотой  $f/f_n = 0.2$ . Интенсивность пульсаций при этом слишком высокая для данного режима. В режиме  $a_0 = 34$  мм прямой вихрь расположен на оси конуса. Частота и интенсивность пульсаций давления соответствует экспериментальным данным. В то же время в режимах  $a_0 = 14$  мм и  $a_0 = 24$  мм развитие неустойчивости на выходе приводило к неограниченному росту пульсаций. Таким образом, расчеты в данной постановке представляются неоправданным упрощением.

Так как расчеты в первой постановке дали неудовлетворительные результаты, то были проведены расчеты во всей отсасывающей трубе (таблица 1). В режиме  $a_0 = 34$  мм расчеты показывают, что вихрь прецессирует вблизи оси конуса отсасывающей трубы.

Частота пульсаций примерно соответствует экспериментальным значениям, но интенсивность существенно меньше. В режиме  $a_0 = 24$  мм вследствие прецессии вихря появляются интенсивные пульсации. Согласно результатам расчетов зона рециркуляции на оси занимает большую долю конуса ОТ и прецессирующий вихрь проходит вблизи стенок. Пульсации имеют широкий низкочастотный диапазон с максимумом вблизи значения  $f/f_n \approx 0,3$ . Интенсивность пульсаций несколько завышается и составляет около 8%. Для режима  $a_0 = 14$  мм расчеты показывают наличие нескольких вихрей в конусе отсасывающей трубы, а спектр пульсаций получается размытым. Также как и в эксперименте, в расчете получаются пульсации с частотой вблизи  $f/f_n \approx 1$ , но также выделяется очень высокий пик на частоте  $f/f_n \approx 2$ , что не соответствует эксперименту. Интенсивность пульсаций высокая и составляет около 10%.

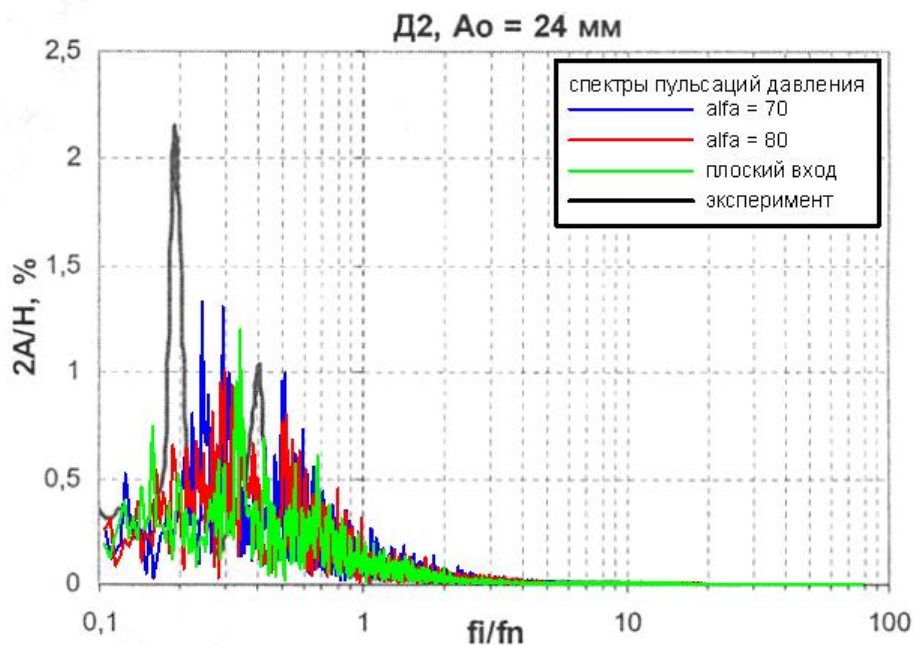


Рис. 2. Спектры пульсаций давления в различных постановках, режим  $a_0 = 24$  мм, расчеты на грубой сетке

В целом, в постановке полной отсасывающей трубы расчеты оказались устойчивее и лучше согласовывались с экспериментом. В то же время, например, в режиме  $a_0 = 24$  мм спектр пульсаций, полученных в расчете, заметно отличается от экспериментального. Это может быть связано с постановкой граничных условий на входе. В данном режиме отрыв от стенок обтекателя рабочего колеса происходит далеко за пределами расчетной области. Поскольку на прецессию вихря оказывает большое влияние область отрыва, то это может приводить к искажению результатов расчета. Чтобы проверить влияние входа были рассмотрены, помимо расчетной области с плоским входом, также и расчетные области с конусообразным входом. Угол полураствора конуса составлял  $80^\circ$  и  $70^\circ$ . При данных углах раствора угол наклона стенки обтекателя остается одним и тем же во всей расчетной области. В расчетную область попадает либо почти вся зона рециркуляции (угол  $70^\circ$ ), либо зона рециркуляции и участок перед отрывом (угол  $80^\circ$ ). Результаты расчетов в данных постановках приведены на рисунке 2 и таблице 1. Из него видно, что в режиме  $a_0 = 24$  мм максимум спектра пульсаций постепенно смещается в

Т а б л и ц а 1. Частота и интенсивность пульсаций, режимы  $a_0 = 14$  мм,  $a_0 = 24$  мм,  $a_0 = 34$  мм, расчеты на детальных сетках

	$f/f_n$	Д1, %	Д2, %
Режим $a_0 = 14$ мм			
расчет, плоский вход	0.9; 2	9.5	–
расчет, конический вход	1.6	21.4	23.4
эксперимент	0.8	10.4	10.2
Режим $a_0 = 24$ мм			
расчет, плоский вход	0.3	8.2	9.2
расчет, конический вход	0.24	6.3	6.4
Режим $a_0 = 34$ мм			
расчет, плоский вход	0.11	0.4	–
расчет, конический вход	0.13	0.69	0.66
эксперимент	0.14	1.8	1.7

сторону более низких частот, приближаясь к экспериментальному значению (рисунок 2). В режиме  $a_0 = 14$  мм исчезает очень высокий пик при  $f/f_n \approx 2$  и спектр становится ближе к экспериментальному, хотя интегральная интенсивность пульсаций увеличивается. В режиме  $a_0 = 34$  мм частота пульсаций остается близкой к экспериментальной, а их интенсивность повышается, также приближаясь к экспериментальному значению.

#### 4. Влияние детализации сетки

Существенное влияние на пульсационные характеристики оказывает детализация расчетной сетки. На рисунке 3 приведено сравнение спектров пульсаций давления на различных сетках. Данные о частоте и интенсивности сведены в таблицу 2. Все данные получены с использованием третьей постановки с коническим входом. В данной постановке, в отличие от постановки с плоским входом детализация сетки существенно улучшает совпадение с экспериментом как по спектру пульсаций, так и по их интенсивности.

Т а б л и ц а 2. Частота и интенсивность пульсаций, режим  $a_0 = 24$  мм

	$f/f_n$	Д1, %	Д2, %
60 тыс. ячеек	0.25; 0,5	9.9	11.5
69 тыс. ячеек	0.25	11.2	11.2
117 тыс. ячеек	0.28	10.6	10.7
221 тыс. ячеек	0.23	8.6	8.7
285 тыс. ячеек	0.23	7.5	9.0
589 тыс. ячеек	0.24	7.8	8.8
1 млн. ячеек	0.24	6.3	6.4
Эксперимент	0.2	7.3	5.8

В целом, для определения частоты пульсаций потребовалась расчетная сетка 200 – 300 тыс. ячеек, детализированная и, примерно, изотропная на входе. Определение интенсивности пульсаций требует использования сетки, содержащей около 1 млн. ячеек.

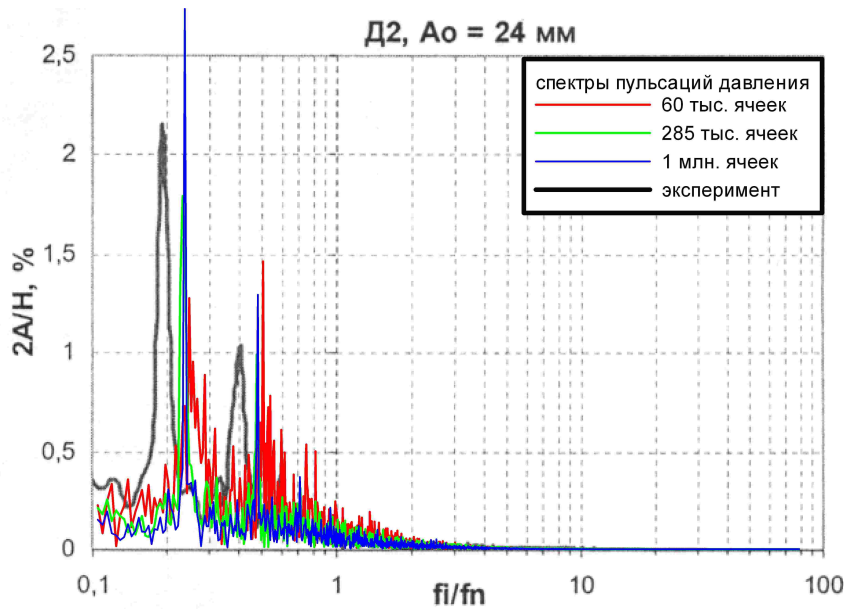


Рис. 3. Спектры пульсаций давления, режим  $a_0 = 24$  мм

Основное значение имеет детализация расчетной сетки в конусе отсасывающей трубы и, особенно, на входе, в области отрыва и образования слоя смешения между потоком и зоной рециркуляции.

## Заключение

Результаты расчетов показывают, что наибольшее влияние на низкочастотные пульсации оказывает область вблизи входа. При расчете режимов течения, в которых образуется обширная зона рециркуляции, для правильного определения частоты и интенсивности пульсаций давления необходимо было моделировать отрыв от обтекателя рабочего колеса. В данном случае, по-видимому, значение имеет разрешение вихрей, образующихся в этой области, так как помимо положения входа расчетной области большое влияние оказывает детализация расчетной сетки вблизи, причем сетка должна быть равномерной по всем направлениям. В режиме неполной загрузки детализация расчетной сетки вблизи входа приводила к изменению спектра пульсаций. В нем выделялась основная частота, а пик спектра приближался к экспериментальному значению. Интенсивность пульсаций также существенно зависит от детализации расчетной сетки и уменьшалась с ростом детализации.

## Список литературы

- [1] PROCEEDINGS OF THE THIRD IAHR/ERCOFTAC WORKSHOP ON DRAFT TUBE FLOWS TURBINE 99.
- [2] SPALART P.R., JOU W.-H., STRELETS M., ALLMARAS S.R. Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid, RANS/LES approach // Proc. of 1AFOSR Inter. Conf. on DNS/LES, Ruston, LA, August, 4-8, Greyden Press, Columbus, OH. 1997. P. 137–147.