

УДК 539.3

И.С. ВЕРЕМЕЕНКО¹, Б.Я. КАНТОР¹, Т.Ф. МЕДВЕДОВСКАЯ¹, И.Е. РЖЕВСКАЯ¹,
С.А. АНДРЮЩЕНКО²

¹Институт проблем машиностроения им. А.М. Подгорного НАН Украины, Украина,

²ООО «Харьковтурбоинжиниринг», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРОТОЧНОГО ТРАКТА ГИДРОТУРБИН

Созданы методика уточненного расчета прочности и проектирования оптимального по массе узла «спиральная камера – статор» гидротурбины, методика анализа статике и динамики составных конструкций проточного тракта гидротурбин с учетом специфического нагружения, условий раскрепления в бетон, отрыва от бетона и т.п. Модули программ расчетов использованы при конструировании новых и модернизации существующих конструкций проточного тракта гидротурбин, а также при исследовании остаточного ресурса камеры рабочего колеса Кременчугской ГЭС.

гидротурбина, метод конечных элементов, прочность, динамика, оптимизация

Вступление

Основным требованием, предъявляемым к проектировщикам гидротурбин, является создание конструкции с максимально возможным уровнем КПД при минимальной массе, обеспечивающей надежную работу в течение 30 – 40 лет. Создание турбин с высокими характеристиками требует новых конструктивных решений для их основных узлов. В связи с этим необходимо совершенствовать существующие расчетные схемы, разрабатывать новые методики для определения НДС и оптимизации элементов конструкций проточного тракта гидротурбин.

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) узла «спиральная камера – статор» позволяют получить реальную картину распределения напряжений и деформаций в исследуемой конструкции, проверить достоверность расчетных методик, получить материал для усовершенствования существующих или создания новых методов расчетов [1].

В связи с высокой стоимостью эксперимента, длительных сроков его подготовки и проведения, а

также обработки полученных результатов, НДС узла «спиральная камера – статор» на стадии проектирования, в основном, определяют расчетным путем.

Ранее расчет на прочность спиральной камеры проводился по упрощенным методикам, основанным на мембранной теории оболочек для осесимметричной конструкции. Этот метод позволяет быстро и просто оценить уровень напряжений в оболочке спирали, но имеет недостаточно высокую точность. Так, в зоне сопряжения оболочки со статором расчетные напряжения значительно меньше напряжений, полученных экспериментальным методом.

Особое внимание уделяется деталям, формирующим проточную часть турбины, которые находятся под динамическим воздействием потока воды [3]. К ним относятся тонкостенные оребренные циклически-симметричные конструкции – элементы проточного тракта (камера рабочего колеса, облицовка сопрягающего пояса, отсасывающая труба).

1. Методика численного исследования НДС и оптимизация узла «спиральная камера – статор» гидротурбины

Одним из весьма ответственных металлоемких и трудоемких узлов гидроагрегата является узел «спиральная камера – статор». Статор турбины – несущая деталь, передающая на фундамент нагрузку от массы агрегата и осевого давления воды. Кроме того, будучи элементом проточного тракта, статор участвует в формировании потока перед рабочим колесом.

В ряде конструкций статор объединяется с металлической спиральной камерой, которая в настоящее время изготавливается сварной (рис. 1).

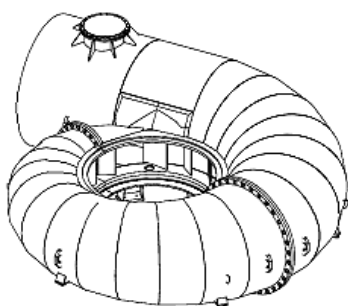


Рис. 1. Узел «спиральная камера – статор»

Существуют два основных варианта конструктивного исполнения статора: классическое – с торoidalными статорными кольцами; «UBEI» – отличительной особенностью его исполнения это плоские статорные кольца. Спиральная камера предназначена для подвода воды к реактивной турбине. С точки зрения геометрии, каждое звено сварной спиральной камеры представляет собой оболочку круглого или овального сечения, поверхность которой по форме близка к усеченному конусу. Спиральные камеры, проектируемые на ОАО «Турбоатом», частично оребрены.

Узел «спиральная камера – статор» крепится жестко к забетонированным фундаментным тумбам. Характер напряженного состояния в такой конструкции зависит от соотношения жесткостей ее элементов и параметров сопряжения.

Для анализа НДС и собственных частот колебаний узла гидротурбины используем трехмерную теорию упругости.

рию упругости.

Рассмотрим равновесие произвольного трехмерного тела, нагруженного поверхностными q^S , объемными q^V и сосредоточенными силами f^i . Эти силы имеют три компоненты, соответствующие трем координатным осям.

На основе принципа возможных перемещений имеем

$$\int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int_V \delta u^T q^V dV + \int_S \delta u^{ST} q^S dS + \sum_i \delta u^i f^i.$$

Уравнения равновесия для ансамбля элементов примут вид

$$Ku = r, \quad (1)$$

где $r = r_v + r_s + r_i$;

K – матрица жесткости конструкции

$$K = \sum_m \int_{V^{(m)}} B^{(m)T} C^{(m)} B^{(m)} dV^{(m)}.$$

Вектор нагрузки r включает в себя влияние объемных сил

$$r_v = \sum_m \int_{V^{(m)}} H^{(m)T} q^{V^{(m)}} dV^{(m)},$$

поверхностных нагрузок

$$r_s = \sum_m \int_{S^{(m)}} H^{S^{(m)T}} q^{S^{(m)}} dS^{(m)}$$

и сосредоточенной силы $r_i = f$.

Уравнения (1) определяют статическое положение равновесия элементов.

Необходимость создания сложных конструкций с повышенными требованиями к их прочности, надежности, долговечности при минимуме затрат на изготовление и эксплуатацию выдвигает проблему оптимального проектирования на одно из важных мест в механике деформируемого твердого тела.

Задача нелинейного программирования ставит целью определение минимума функции $C(X)$ при ограничениях вида

$$\varphi_i(X) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, r;$$

зистатических задач для гармоник, фиксированных по времени

$$\left[K_k - \omega_i^2 M_k \right] u_{ik} = Q_{ik}.$$

3. Минимизация по массе узла «спиральная камера – статор» гидротурбины

При проектировании радиально-осевой гидротурбины исследовались прочностные характеристики узла «спиральная камера – статор» и проведена его оптимизация по массе.

Узел «спиральная камера – статор» (см. рис.1) представляет собой конструкцию, состоящую из сопряженных элементов: колец, колонн и оболочки. Согласно методике расчета, спиральная камера рассматривается как торообразная оболочка с круговым или овальным сечением. Рассматривается циклически симметричная модель тора, сектор с одной колонной (22,5°). Расчеты выполнены методом конечных элементов для следующих режимов: эксплуатационный (сброс нагрузки) и гидроиспытание. Незменными параметрами в радиальном сечении узла «спиральная камера – статор» являются: $R1$ – радиус установки выходной кромки колонны, $R2$ – радиус сечения спирали, профиль колонны в виде набора точек, угол установки колонны, высота колонны, количество колонн по всей конструкции, давления в разных режимах работы гидротурбины. На рис. 3 показаны параметры оптимизации: s – толщина оболочки спиральной камеры; $H1$ – толщина статорного кольца; $H2$ – высота сопряжения оболочки спирали; $L3$ – радиус точки сечения; $L4$ – радиус точки сечения; $R3$ – радиус установки сечения спирали.

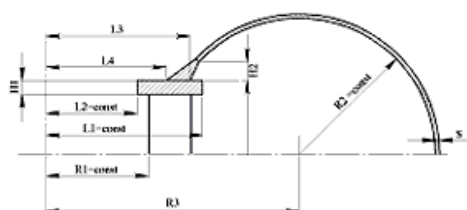


Рис. 3. Параметры оптимизации

Ограничения: конструкционные, прочностные (интенсивность напряжений в узлах сетки конечного элемента оболочки и статора выбраны из руководящего нормативного документа).

В результате оптимизации получена конструкция с минимальной массой сектора. Параметры оптимизации приняли следующие значения: $s = 0,012$ м, $R3 = 2,2$ м, $H1 = 0,065$ м, $H2 = \text{мало}$, $L3 = 0,012 \approx L4$.

Близость параметров $L3$ и $L4$ (расхождение на толщину оболочки) привело к выбору нового вида радиального сечения узла «спиральная камера – статор». В табл. 1 сведены результаты расчета для различных режимов работы.

Таблица 1

Максимальные напряжения для различных режимов работы

Режим	Напряжения, МПа		
	колонна	статор	оболочка
сброс нагрузки	93	50	94,5
гидроиспытание	128	62	91,8

4. Расчет статики и динамики камеры рабочего колеса действующей ГЭС

Для определения уровня напряжений в конструкции (см. рис.2) решены задачи статики под действием максимальной статической нагрузки $P_{cm} + P_{\partial}$ и динамики полосы обечайка-бетон под действием гидродинамического давления. Максимальное значение статического напряжения $\sigma_{i \max} = 6,61$ МПа. Исследуемые узлы составной конструкции: узел 161 – ось разворота лопастей, 240 – нижняя часть камеры, 257 – место соединения камеры с сопрягающим поясом, 1655 – середина сопрягающего пояса. На рис. 4, 5 показаны график зависимости интенсивности напряжений σ_i от времени и распределение максимальных динамических напряжений в момент $t = 0.49$ с в наиболее нагруженном узле 257,

в котором наибольшее значение интенсивности амплитудных напряжений $\sigma_{ia}=3,75$ МПа.

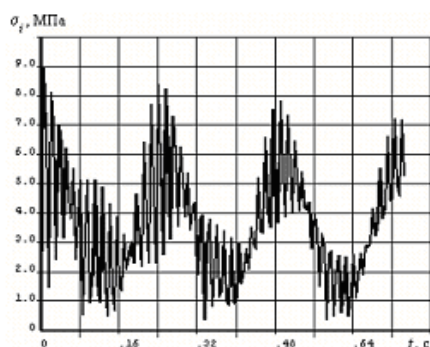


Рис. 4. Динамические напряжения в узле 257

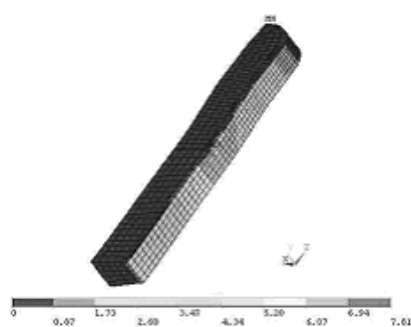


Рис. 5. Максимальные напряжения

Аналогичные расчеты проводились для второго и третьего вариантов расчета при наличии частичного отслоения обечайки от бетона и полного отсутствия связи обечайки с бетоном.

В табл. 2 приведены значения максимальной $\sigma_{i\max}$, минимальной $\sigma_{i\min}$ интенсивности напряжений, амплитудное σ_{ia} и среднее σ_{im} напряжения.

Таблица 2
Напряжения в характерных узлах
составной конструкции

Вариант	Узел	$\sigma_{i\max}$, МПа	$\sigma_{i\min}$, МПа	σ_{ia} , МПа	σ_{im} , МПа
1	161	5,03	0,12	2,395	2,575
	240	6,82	0,28	3,27	3,55
	257	7,81	0,31	3,75	4,06
	1655	7,14	0,025	3,56	3,58
2	181	9,20	1,05	4,075	5,12

3	1655	39,25	14,40	12,42	26,82
---	------	-------	-------	-------	-------

Выводы

Необходимо отметить, что комплексный подход для решения данной задачи включает как значительный объем экспериментальных исследований (анализ эксплуатационной и ремонтной документации, контроль состояния металла, анализ наработки гидротурбины в различных режимах, исследование вибрационного состояния и т.п.), так и разработку современных высокоточных методик определения статического и динамического состояний конструкций гидротурбин, основанных на учете их реальной геометрии, условий закрепления и нагружения. Работа ориентирована на эффективное применение на предприятиях энергетического комплекса при вариантном проектировании нового оборудования, а также реконструкции отработавшей ресурс ГЭС. В ней намечено получение новых научных результатов, особенно важных для решения задач гидротурбостроения в рамках национальной энергетической программы Украины.

Литература

1. Staehle M. Experimental Verification of Strength Calculation for a Field-fabricated Hydro Turbine Spiral Case // Sulzer technical review. – 1985. – № 3. – P. 36-39.
2. Комплексный экспериментально-теоретический анализ ресурса закладных частей гидротурбины / И.С. Веремеенко, Б.Я. Кантор, Т.Ф. Медведовская, Е.А. Стрельникова, О.Н. Зеленская, С.В. Гладышев // Проблемы машиностроения. – 2000. – Т. 3, № 1–2. – С. 16-28.
3. Динамика конструкций при воздействии кратковременных нагрузок / С.С. Кохманюк, А.С. Дмитриев и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 304 с.

Поступила в редакцию 1.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук Ю.С. Воробьев, ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.