

Медведовская Т. Ф.

УДК 539.3

Ржевская И. Е.

*Институт проблем  
машиностроения  
им. А. Н. Подгорного  
НАН Украины*

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТУРБИН

*Створено математичні моделі й програмні модулі для розрахункових схем з урахуванням геометричних параметрів, навантаження, умов закріплення робочого колеса, кришки гідротурбіни. Виконано розрахунки напружено-деформованого стану й динаміки конструкцій проточної частини Київської ГАЕС при роботі в експлуатаційних режимах.*

*The mathematical models and Computer Codes were developed for evaluation schemes taking into account the geometrical parameters, loading and boundary conditions for the water wheel and hydraulic turbine top cover. The stress-strain state and dynamics analysis for structures of Kiev hydraulic accumulation station channels at operational state was accomplished.*

**Введение.** Одной из основных проблем при проектировании гидротурбин является обеспечение их прочности и надежности в условиях продолжительной работы под действием гидростатического и многоциклового динамического нагружения. Исчерпание ресурса многих гидротурбин в Украине требует решения вопроса о продлении срока службы отдельных элементов конструкций проточной части при модернизации гидравлических машин или замене морально и физически устаревшего оборудования при повышении их мощности и эксплуатационной надежности. Это требует высокоточных, оперативных методик и программ для исследования прочности и динамики элементов конструкций гидротурбин при разных режимах эксплуатации.

Несмотря на значительные достижения в исследовании прочности циклически симметричных металлоконструкций, исследование их надежности остается актуальным. Эти конструкции характеризуются сложной пространственной геометрией, условиями закрепления, а также большим спектром воспринимаемых нагрузок.

Необходимо отметить, что для решения данной проблемы эффективен комплексный экспериментально-теоретический подход, включающий в себя как значительный объем экспериментальных исследований (анализ

эксплуатационной и ремонтной документации, контроль состояния металла, анализ наработки гидротурбины в разных режимах, исследование вибрационного состояния и т.п.), так и разработку современных высокоточных методик определения статического НДС и динамики конструкций гидротурбин, основанных на учете их реальной геометрии, условий закрепления и нагружения.

**Методика определения НДС, собственных форм и частот колебаний циклически симметричных конструкций гидротурбин.** Крышки и рабочие колеса (РК) проточной части гидротурбин представляют собой сложные уникальные пространственные конструкции, являющиеся циклически-симметричными объектами.

Крышки гидротурбин состоят из тонкостенных тел вращения (обечаек), подкрепленных системой часто расположенных ребер – меридиональных многосвязных пластин. Основное требование при проектировании крышек – обеспечение прочности и жесткости при минимальной металлоемкости. Для определения НДС и динамики крышек гидротурбин разработан программный комплекс [1,2]. Задачи решаются МКЭ в сочетании с разложениями перемещений и нагрузок в ряды Фурье по окружной координате. Векторы перемещений



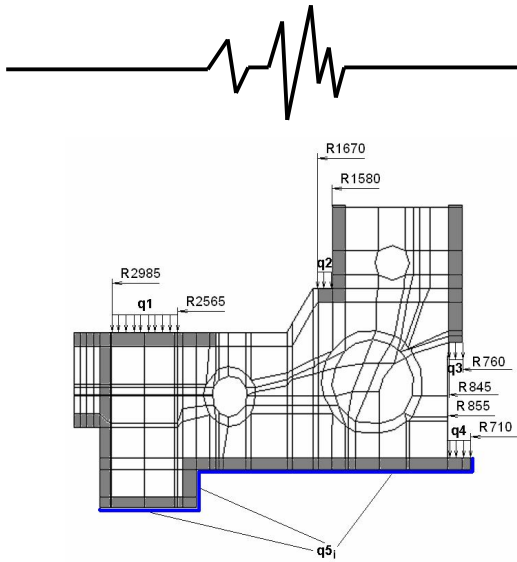


Рис. 3. Распределение нагрузки на поверхностях крышки

В табл. 1 для указанных режимов работы турбины приведены значения действующих нагрузок  $q_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) от массовых усилий, независящих от режимов работы агрегата.

Таблица 1

**Значения действующих нагрузок**

$q_i$	Распределенная нагрузка, кг/см <sup>2</sup>
$q_1$	0,596
$q_2$	1,504
$q_3$	0,467
$q_4$	0,045

Давление воды  $q_5$  на поверхностях крышки (см. рис. 3), отвечает эпюрам распределения давлений (рис. 4, а, б) в турбинном и насосном режимах.

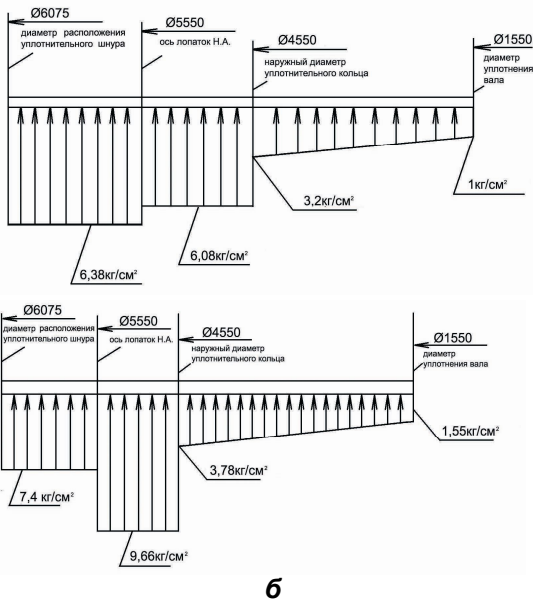


Рис. 4. Эпюры распределения давлений под крышкой турбины

Известно, что на крышку действуют гидродинамические низкочастотные нагрузки с оборотной  $f_{об}$  и кратной ей частотами  $k \cdot f_{об}$  ( $k=2$ ), а также нагрузка с жгутовой частотой  $f_{ж}$ . Возможное влияние гидродинамических усилий с лопаточной  $f_{на}$  и лопастной частотой  $f_{рк}$ . В табл. 2 приведены характерные частоты ГА Киевской ГАЭС.

Таблица 2

**Характерные частоты**

Частота, Гц				
$f_{ж}$	$f_{об}$	$k \cdot f_{об}$ ( $k=2$ )	$f_{рк}$	$f_{на}$
0,63	2,78	5,56	16,67	55,57

В табл. 3, 4 приведены данные о суммарной наработке гидроагрегата Киевской ГАЭС.

Таблица 3

**Данные станции Киевской ГАЭС**

Выработка электроэнергии, кВт ч	Время работы в генераторном режиме, ч	Время работы в насосном режиме, ч
29 622 000	895	2 603
29 620 000	871	2 098

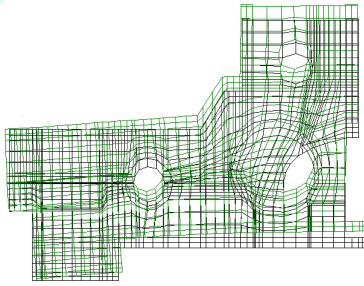
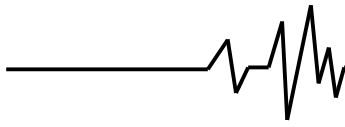
Таблица 4

**Время работы ГА после реконструкции**

Год	Время работы, ч	
	генераторный режим	насосный режим
1989	236	542
1990	961	2390
1991	972	2265
с 1992 г. по июль 2009 г.	≈965	≈2330

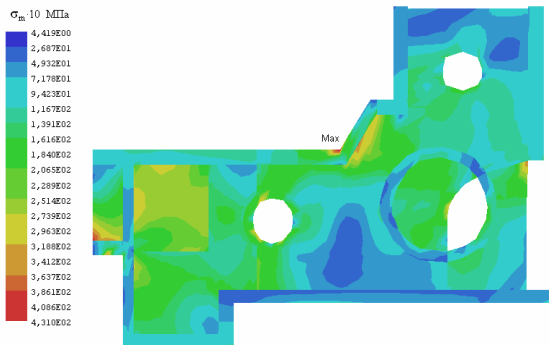
Ежегодная наработка насос-турбины за период с 1992 г. по июль 2009 г. в связи с отсутствием фактических данных прогнозируется по данным предыдущих годов эксплуатации.

Выполнены расчеты статики крышки агрегата Киевской ГАЭС при разных режимах работы. Результаты расчетов приведены для насосного режима. На рис. 5 показано деформированное состояние двухмерного сечения крышки гидротурбины.



**Рис. 5. Деформированное состояние двухмерного сечения крышки**

На рис.6 изображено распределение интенсивности напряжений в сечении крышки при статическом нагружении для четвертого режима нагрузки (см. табл. 1).



**Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений в сечении крышки при статической нагрузке**

Напряжения  $\sigma_m$  для разных режимов нагрузки принимают следующие значения: турбинный – 30,15 МПа, насосный – 43,15 МПа. Максимальная интенсивность напряжений  $\sigma_m$  равна 43,1 МПа.

Собственные частоты колебаний крышки Киевской ГАЭС приведены в табл. 5.

**Таблица 5  
Спектры частот собственных колебаний крышки**

Номер гармоники	Номер частоты	Частота, Гц
0	1	79,8
	2	249,2
	3	305,8
1	1	67,8
	2	128,5
	3	203,8
2	1	106,2
	2	161,6
	3	241,7

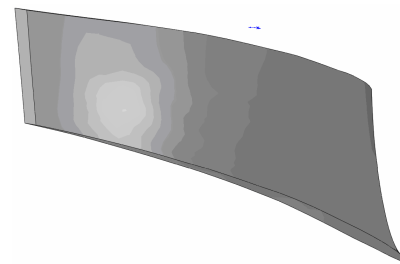
**Расчеты остаточного ресурса крышек агрегатов Киевской ГАЭС.** Крышки Киевской ГАЭС работают в насосном и генераторном режимах при частоте нагружения 2,78 Гц. Оценка остаточного ресурса выполнена на основе теории линейного накопления повреждений. Результаты расчетов приведены табл. 6.

**Таблица 6  
Остаточный ресурс крышки Киевской ГАЭС**

Режим	$\sigma_{im}$ , МПа	$\sigma_{ia}$ , МПа	Наработка, ч	Остаточный ресурс, год
насосный	43,15	4,53	56000	50
генераторный	30,15	3,21	56000	98

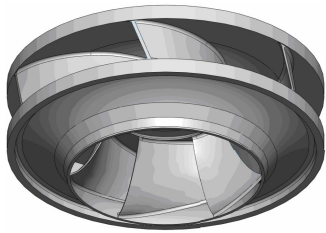
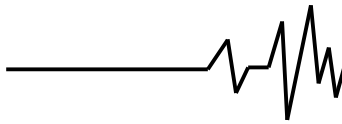
Крышки Киевской ГАЭС находятся в удовлетворительном состоянии, и срок их эксплуатации может быть продолжен приблизительно на 50 лет.

Определение НДС РК радиально-осевой гидротурбины под действием распределенной нагрузки и центробежных сил. РК представляет собой два тела вращения (ступицу и обод), объединенных между собой регулярной системой лопастей. Лопасть РК есть сложная пространственная конструкция переменной толщины (рис. 7).



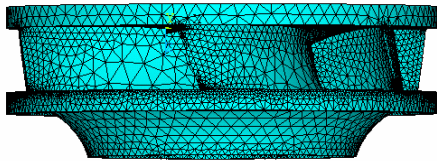
**Рис. 7. Модель пера лопасти**

Для уменьшения концентрации напряжений в зоне перехода от ступицы и обода к лопастям выполнены плавные радиусные переходы – галтели. Геометрическая модель РК Киевской ГАЭС показана на рис 8. После введения информации о типе конечного элемента, физических характеристиках материала, автоматически разбиваем конструкцию на конечные элементы.



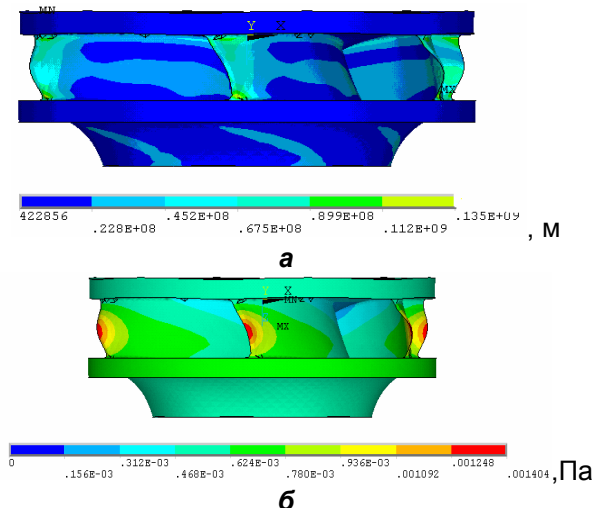
**Рис. 8. Геометрическая модель РК**

На рис. 9 показана дискретизация РК Киевской ГАЭС на конечные элементы.



**Рис. 9. Конечноэлементная модель РК**

Конструкция нагружена на перо лопасти центробежными усилиями и распределенным давлением. Исследовано НДС РК Киевской ГАЭС для турбинного и насосного режимов работы агрегата. Разработана программа для численного анализа НДС и динамики рабочих колес гидротурбин [3]. На рис. 10, а, б показаны распределения интенсивности напряжений (рис.10,а) и суммарного перемещения (рис.10, б) точек конструкции для турбинного режима работы гидроагрегата. Выделены зоны максимальных значений.



**Рис. 10. Распределение интенсивности напряжений и суммарного перемещения точек конструкции**

Максимальные значения интенсивности напряжений (насосный режим – 142 МПа, турбинный, – 135 МПа) значительно меньше предела текучести, равного 550 МПа.

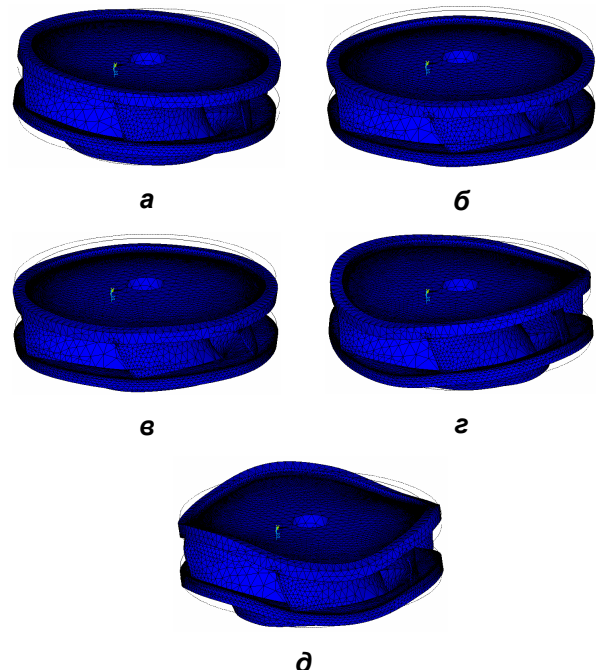
**Численный анализ динамических характеристик РК Киевской ГАЭС.** Для определения собственных частот колебаний РК гидротурбины использовали МКЭ. Выполнен численный анализ динамических характеристик РК Киевской ГАЭС. Получены собственные частоты колебаний РК, приведенные в табл. 7, парные частоты подчеркнуты.

**Таблица 7  
Собственные частоты упругих колебаний РК**

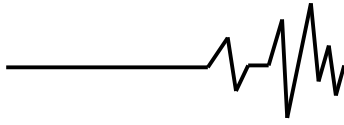
Номер частоты	Частота, Гц
1-2	<u>59,32</u>
3	79,85
4	107,73
5-6	<u>108,16</u>
7	169,92

На рис.11, а, б, в, г, д показаны формы колебаний РК гидротурбины Киевской ГАЭС.

Кратным частотам отвечают собственные формы, которые отличаются расположением главной диаметральной плоскости. Первым двум частотам отвечает «балочная» форма, когда ось колеса изгибается как консольный стержень, третьей и четвертой частотам – крутильные формы колебаний вокруг оси вращения колеса по часовой и против часовой стрелки соответственно.



**Рис. 11. Формы колебаний РК: а – первая (вторая); б – третья; в – четвертая; г – пятая (шестая); д – седьмая формы колебаний агрегата**



Второй группе частот (пятая и шестая) отвечает колебание колеса как тела вращения по второй гармонике Фурье, седьмой частоте – по четвертой гармонике Фурье. Конструкция отстроена от резонанса так как полученные собственные частоты колебаний не совпадают с характерными частотами сил возмущения.

### **Выводы**

С использованием МКЭ разработаны комплексные экспериментально-теоретические методики исследования НДС и динамических характеристик элементов конструкций проточной части гидротурбин: крышек и РК гидроагрегатов. Разработанные пакеты прикладных программ для расчета статики и динамики элементов конструкций гидротурбин дают возможность на практике проводить комплексный анализ статических, динамических характеристик конструкций с учетом их изменившегося во время эксплуатации технического состояния. С целью обеспечения надежности несущих конструкций и РК гидротурбин и отстройки от резонансных частот можно рекомендовать при проектировании новых конструкций учитывать

возможность изменения спектра частот собственных колебаний, чтобы вибрации в осевом и радиальном направлениях отвечали существующим нормам.

### **Литература**

1. Метод конечных элементов в задаче определения радиальной жесткости циклически симметричных несущих конструкций гидротурбин / Т.Ф. Медведовская, А.В. Медведовский, Е.В. Еселева, О.Н. Зеленская // Пробл. машиностроения. – 1999. – Т.2, № 1–2. – С. 58–62.
2. Зеленская О.Н. Анализ динамических характеристик тонкостенных элементов проточного тракта гидротурбин / О.Н. Зеленская, Т.Ф. Медведовская, Е.В. Еселева // Пробл. машиностроения. – 2003. – Т. 6, № 2. – С. 121–130.
3. Веремеенко И.С. Прочность и собственные колебания рабочих колес радиально-осевых гидротурбин / И.С. Веремеенко, Б.Я. Кантор, И.Е. Ржевская // Пробл. машиностроения.– 1999.– Т. 2, N. 1–2.– С. 8–16.