

- конструкцій, споруд та машин: Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2010-2012 рр. – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2012. – С. 250–256.
5. *Изменение напряженного состояния барабанов котлов ТП-100 и ТГМЕ-464 при различных режимах эксплуатации и оценка их остаточного ресурса* / Ю. М. Мацевитый, Н. Г. Шульженко, В. Н. Голощапов и [др.] // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Тр. междунар. науч.-техн. конф. – Харьков: Ин-т пробл. машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 24-28 сент. 2012 г. – электрон. опт.диск (CD-ROM); цв., 12 см. – Системн. требования: Pentium; 32 Mb RAM, Windows 95, 98, 200, XP.
 6. *Шульженко Н. Г.* Применение полуаналитического метода конечных элементов для решения трехмерных задач термомеханики в цилиндрических координатах / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Т. В. Протасова // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 20. – С. 151–160.
 7. *Шульженко Н. Г.* Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований) / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Б. Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 370 с. – Напечатано в России.
 8. *Оценка остаточного ресурса барабанов котлов ТП-100 и ТГМЕ-464 для энергоблоков мощностью 200 МВт ТЭС и 100 МВт ТЭЦ с целью продления срока их эксплуатации: отчет о НИР (заключительный): б/т П-52-12 / ИПМаш НАН Украины; рук. Ю. М. Мацевитый. – Харьков, 2012. – 173 с. – № ГР 0110U006347.*
 9. *Тимошенко С. П.* Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 575 с.
 10. *Инструкция по порядку продления срока службы барабанов котлов высокого давления: СО 153–34.17.442–2003: утв. Мин-вом энергетики Российской Федерации: введ. в действие 30.06.2003. – М., 2003. – 18 с.*

Поступила в редакцию
12.01.13

УДК 539.3

А. В. Линник*

О. Н. Зеленская*

М. Г. Кузнецова*

Т. Ф. Медведовская** , канд. техн. наук

Е. Л. Медведева**

* ОАО «Турбоатом»

(г. Харьков, e-mail: lynnyk@turboatom.com.ua)

** Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: tmed@ipmach.kharkov.ua)

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ОБРАТИМЫХ ГИДРОМАШИН

Разработаны методики и пакеты прикладных программ для численного анализа статического и динамического напряженно-деформированного состояния и динамики несущих конструкций (крышек) обратимых гидромашин, работающих в диапазоне напоров 70–600 м. Приведены результаты численных исследований прочности и динамических характеристик крышек гидромашин ГАЭС производства ОАО «Турбоатом».

Розроблено методики та пакети прикладних програм для чисельного аналізу статичного й динамічного напружено-деформованого стану та динаміки несучих конструкцій (кришок) оборотних гідромашин, що працюють у діапазоні напорів 70–600 м. Наведено результати чисельних досліджень міцності та динамічних характеристик кришок гідромашин ГАЕС виробництва ВАТ «Турбоатом».

Введение

При проектировании обратимых гидромашин одной из основных проблем является обеспечение их прочности и надежности в условиях продолжительной работы под действием гидростатического и многоциклового динамического нагружения.

Обратимые гидромашин получают все большее развитие в связи с интенсивным строительством гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), предназначенных для выравнивания графика нагрузки энергосистем. Наиболее широкое применение в настоящее время получили радиально-осевые обратимые гидромашин, работающие в диапазоне напоров 70–600 м. Специфика рабочего процесса ГАЭС требует специальных проектных решений, обеспечивающих надежную работу узлов и деталей, одной из которых является крышка. Крышка гидротурбины – крупногабаритная сварная неподвижная кольцевая деталь, ограничивающая сверху проточную часть и служащая основанием для размещения деталей направляющего аппарата. Опыт эксплуатации первых гидромашин Киевской ГАЭС и их дальнейшая модернизация позволили создать надежные несущие конструкции более мощной Днестровской ГАЭС и разработать рациональную конструкцию крышки обратимой турбины Зеленчукской ГАЭС.

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 широким спектром воспринимаемых нагрузок. Очевидно, что при вариантном проектировании уникального гидротурбинного оборудования ГАЭС необходимо иметь методики оперативного определения их статического и динамического напряженно-деформированного состояния (НДС), дающие достаточную точность и простоту создания расчетной модели.

В настоящей работе исследование прочности и динамических характеристик крышек гидромашин проводится на базе современных эффективных методов и программ для расчета прочности и динамических характеристик сварных несущих конструкций на основе теории упругости с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в сочетании с аналитическим представлением перемещений и нагрузок рядами Фурье.

Методика определения напряженно-деформированного состояния, динамики и частот колебаний циклически симметричных конструкций гидротурбин

Крышки гидромашин представляют собой сложные уникальные циклически симметричные пространственные конструкции. Они 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. Разработана программа комплексных экспериментально-теоретических исследований определения НДС и динамики элементов конструкций гидротурбин [1, 2]. Для решения задачи используется численный МКЭ в сочетании с разложениями перемещений и нагрузок в ряды Фурье по окружной координате. Векторы перемещений тел вращения (u) и пластин (v), а также внешних нагрузок представлены рядами Фурье

$$\begin{aligned} (u_1) &= (u_1^{(0)}) + (u_1^{(1)}) \cos \varphi + (u_1^{(2)}) \cos 2\varphi + \dots, \\ u_2 &= u_\varphi = (u_\varphi^{(-1)}) \sin \varphi + (u_\varphi^{(-2)}) \sin 2\varphi + \dots, \\ (v) &= (v^{(0)}) + (v^{(1)}) \cos \varphi + (v^{(2)}) \cos 2\varphi + \dots \end{aligned}$$

Вариационное уравнение относительно неизвестных амплитудных значений перемещений тела вращения ($u^{(k)}$) и меридиональных пластин ($v^{(k)}$) имеет вид

$$\iint_F (\delta u^{(k)})^T (\bar{D})^T (N) (\bar{D}) (u^{(k)}) r dr dz + \frac{H}{2\pi} \iint_{F_\Pi} (\delta v^{(k)})^T (D_\Pi)^T (N_\Pi) (D_\Pi) (v^{(k)}) dr dz -$$

$$-\int_{\Gamma} (\delta u^k)(q^k) d\Gamma - (\delta u^{(k)})(p_i^k) = 0, \quad k = 0, 1, \dots$$

Условия непрерывности перемещений требуют $u_r^{(k)} = v_r^{(k)}$, $u_z^{(k)} = v_z^{(k)}$.

Задача динамики конструкции решается исходя из матричного уравнения свободных колебаний

$$\mathbf{K}(U) - p^2 \mathbf{M}(U) = 0,$$

где \mathbf{K} и \mathbf{M} – матрицы жесткости и масс конструкции соответственно.

Вынужденные колебания конструкции при полигармоническом во времени нагружении описываются уравнением

$$\mathbf{K}u - \omega^2 \mathbf{M}u = Q, \quad (1)$$

где u – вектор перемещений конечных элементов порядка N ; ω – частота колебаний; Q – вектор внешней узловой нагрузки, изменяющейся во времени t .

Для решения задачи строим матрицы масс \mathbf{M}_k и жесткости \mathbf{K}_k конструкции для любой k -й гармоники разложения относительно вектора амплитудных значений перемещений u_{ik} и нагрузок Q , применив разработанный [1, 2] конечноэлементный подход. Векторы перемещений и внешних нагрузок раскладываем в ряд Фурье по времени t .

Задача о вынужденных колебаниях конструкции решается методом разложения искомых перемещений по собственным формам [3] применительно к крышкам гидротурбин.

Уравнение (1) решается в два этапа.

Первый этап – находим n собственных частот и форм колебаний конструкции

$$v_s^T \mathbf{M} v_j = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases}$$

$$0 \leq \omega_1^2 \leq \omega_2^2 \leq \omega_3^2 \dots \leq \omega_n^2.$$

Уравнение (1) удовлетворяется при подстановке любого из n решений $v_i \sin \omega t$.

Второй этап – находим решение в виде разложения вектора u по собственным формам

$$u = \sum_{i=1}^n a_i v_i, \quad a_i = a_i(t).$$

Приходим к системе дифференциальных уравнений

$$[\ddot{a}(t)] + \lambda [a_i(t)] = q(t), \quad (2)$$

где λ – диагональная матрица

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_i \end{bmatrix}, \quad \lambda_i = \omega_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

В случае гармонической нагрузки, подставляя в (2) выражение

$$a_i(t) = \sum_{k=1}^n [a_{ik}] \sin \omega_k t$$

в виде гармонического ряда, приходим к совокупности не связанных друг с другом уравнений

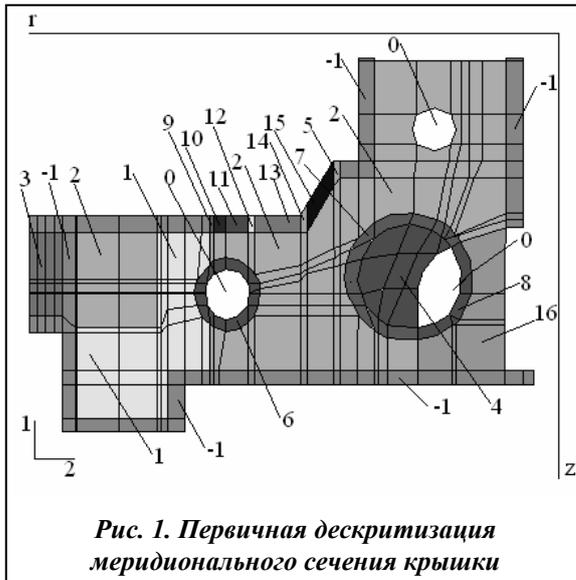


Рис. 1. Первичная дескрипция меридионального сечения крышки

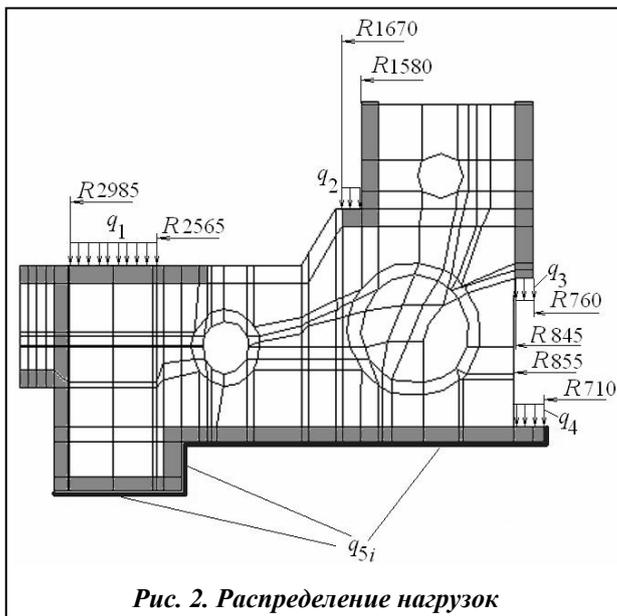


Рис. 2. Распределение нагрузок

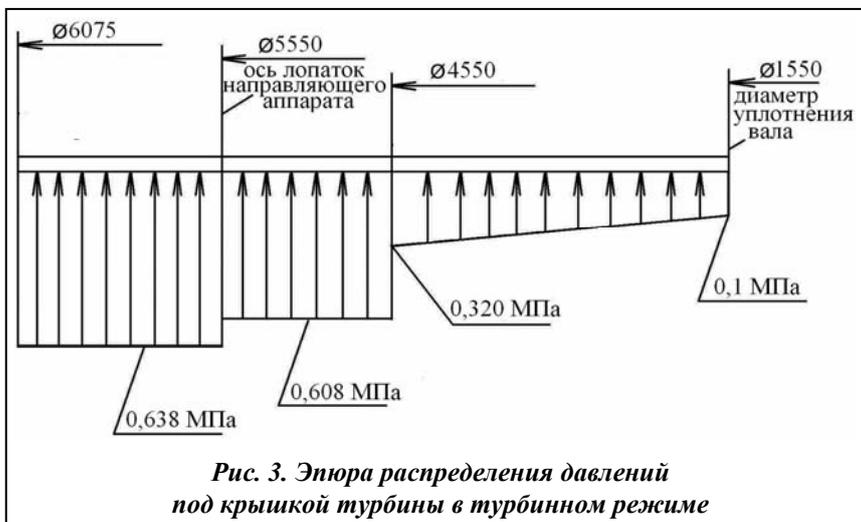


Рис. 3. Эюра распределения давлений под крышкой турбины в турбинном режиме

$$\lambda_i [a_{ik}] - \omega_k^2 [a_{ik}] = [q_k].$$

Отсюда находим элементы матрицы

$$[a_{ik}] = \frac{[q_k]}{\lambda_i - \omega_k^2},$$

где ω_k – частоты слагаемых нагрузки ($k = 1, 2, \dots, n$).

Для получения решения достаточно учитывать ограниченное количество собственных форм ($i = 1, 2, \dots, n; n \ll N$).

Исследование напряженно-деформированного состояния и динамики несущих конструкций обратимых гидромашин ГАЭС

Крышка гидромашины Киевской ГАЭС (напором 70 м) воспринимает нагрузки

от гидродинамического давления, действующего на ее поверхность, контактирующую с водой, и вес деталей направляющего аппарата, регулирующего кольца, деталей торцевого уплотнения вала, а также направляющего подшипника. Крышка изготовлена сварной, материал крышки – листовая углеродная сталь Ст3сп. Крышка состоит из двух частей, соединенных между собой креплениями. В каждом раземе установлено шестнадцать длинных болтов М72, два коротких М72, четыре призонных М 48 и три призонных М48 с втулкой. Крепление разема затянуто до напряжений, которые обеспечивают надежную работу крышки как единой конструкции на всех режимах работы гидротурбины. Фланец крышки крепится к статору девятнадцатью болтами М64 и

сорока пятью шпильками М64, расположенными на диаметре 5550 мм. Для ограничения сдвигов в плоскости разема фланца крышки и статора установлены четыре конических штифта.

На рис. 1 изображена первичная дескрипция сечения крышки с учетом данных о моделировании деталей по признакам зон, отвечающих соот-

ветствующим свойствам материалов, суммарной толщине пластин и их количеству в окружном направлении.

Для расчета НДС крышки определены два характерных режима работы турбины:

- турбинный – мощность турбины $N = 38$ МВт при напоре $H = 70,5$ м;
- насосный – мощность турбины $N = 45,2$ МВт при напоре $H = 74$ м.

На рис. 2 показаны участки поверхности крышки, к которым при работе турбины приложены нагрузки, определенные с учетом веса прикрепленных к ней деталей и давления воды.

Давление воды q_{5i} на поверхностях крышки отвечает эпюре распределения давлений (рис. 3, 4).

В табл. 1 приведены значения действующих нагрузок q_i ($i = 1, 2, 3, 4$) от массовых усилий, которые не зависят от режима работы агрегата.

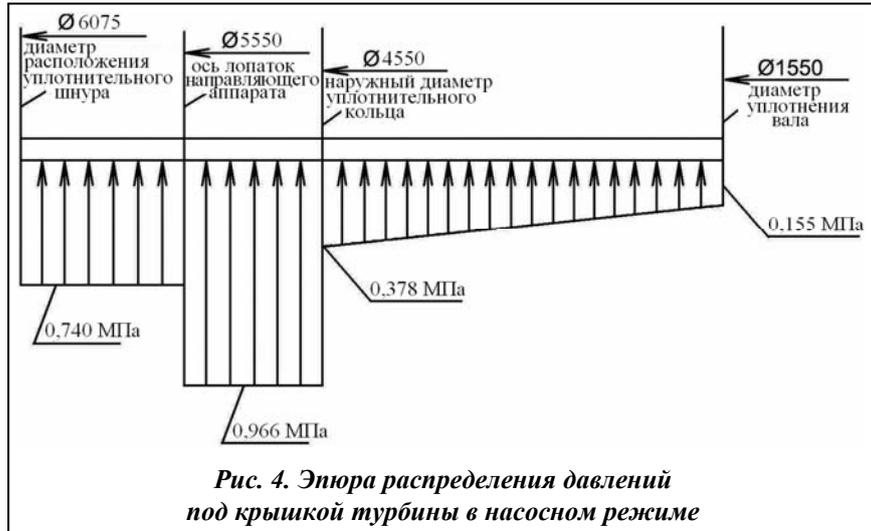


Рис. 4. Эпюра распределения давлений под крышкой турбины в насосном режиме

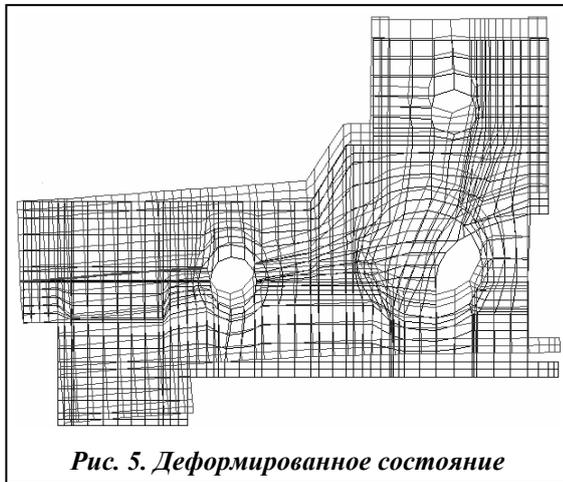


Рис. 5. Деформированное состояние

Таблица 1. Значения действующих нагрузок для характерных режимов работы турбины

Режим работы	Распределенная нагрузка, МПа			
	q_1	q_2	q_3	q_4
турбинный	0,596	1,504	0,467	0,045
насосный	0,596	1,504	0,467	0,045

Рассмотрим результаты расчетов статических напряжений крышки агрегата Киевской ГАЭС. Для крышки гидромашины расчеты выполнены при разных режимах работы.

На рис. 5 приведено деформированное состояние крышки, а на рис. 6 – распределение интенсивности напряжений в двухмерной области крышки в насосном режиме. Напряжения σ_m для разных режимов работы нагрузки принимают следующие значения: в

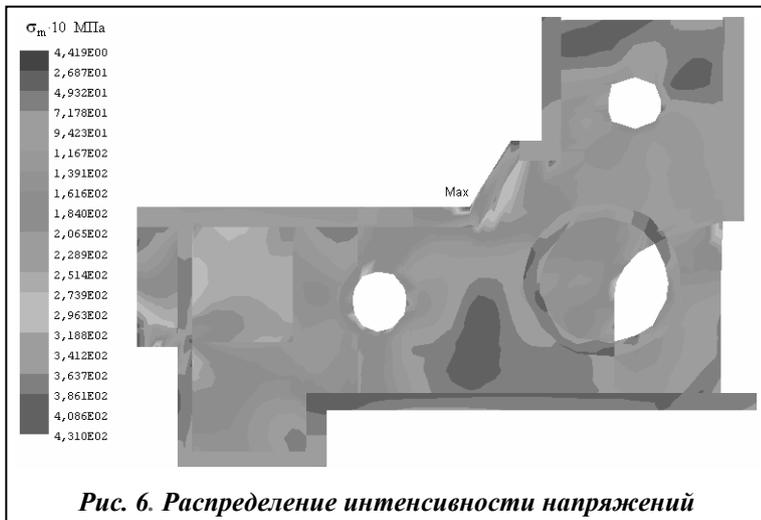


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений

Таблица 2. 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

Таблица 3. Средние и амплитудные значения интенсивности напряжений при динамической нагрузке

Режим работы	σ_m , МПа	σ_a , МПа		
		ω_1	ω_2	ω_3
турбинный	30,15	3,21	3,30	4,51
насосный	43,15	4,53	4,62	6,34

Выводы

С целью обеспечения прочности и надежности несущих конструкций обратимых гидромашин производства ОАО «Турбоатом», работающих при напорах от 70 до 600 м, с использованием МКЭ разработаны экспериментально-теоретические методики и пакеты прикладных программ, позволяющие на практике проводить комплексный анализ их статических и динамических характеристик и отстройку от резонансных частот. Созданные методики рекомендованы для использования при проектировании новых конструкций, учитывая при этом возможность изменения гидродинамических нагрузок. На базе разработанных методик создан нормативный документ [5].

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вильсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 445 с.
4. Разработка рациональной конструкции крышки гидротурбины при модернизации высоконапорной ГЭС / Т. Ф. Медведовская, О. Н. Зеленская, А. В. Линник, А. Г. Гелеверя // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2011. – Вип. 34. – С. 139–147.
5. Розрахунок залишкового ресурсу елементів проточної частини гідротурбін ГЕС та ГАЕС. Методичні вказівки: нормативний документ / Б. Кантор, О. Стрельнікова, Т. Медведовська, І. Ржевська, О. Еселева, О. Линник, О. Зеленська. СОУ-Н МЕН 40.1 – 21677681–51: 2011: утв. Мін. енергетики та вугільної пром-сті України: ввод в действие 07.07.11. – К.: Мін. енергетики та вугільної пром-сті України, 2011. – 76 с.

Поступила в редакцию
15.08.12