

**К. М. Ровний,
О. М. Зеленська**

Публічне акціонерне товариство
«Турбоатом»,
г. Харьков,
e-mail: rovkosht@gmail.com,
lynnyk@turboatom.com.ua

УДК 539.3:624.07

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАТУРНОЙ СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ ГИДРОТУРБИНЫ РО400–В–450 В НЕОБЕТОНИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Ключові слова: метод скінченних елементів, система статор – спіральна камера, гідротурбіна, напружено-деформований стан, експериментальне дослідження.

Досліджено чисельний аналіз напружено-деформованого стану системи статор – спіральна камера гідротурбіни РО400–В–450. Порівняно отримані результати з експериментальними даними. Зроблено висновок щодо можливості використання даного методу для оцінки міцності системи статор – спіральна камера.

Введение

Спиральная камера – один из наиболее ответственных узлов гидротурбины. В настоящее время в области средних и высоких напоров спиральные камеры радиально-осевых гидротурбин выполняются в виде металлической оболочки, полностью или частично воспринимающей нагрузку от потока воды, подводимой к турбине [1]. Металлическая оболочка состоит из оребренных звеньев, имеющих в радиальных сечениях круглую или эллипсообразную форму, звенья соединены между собой и статором гидротурбины сваркой.

Выбор размеров и формы сечений спирали производится специальным гидравлическим расчетом, а конструктивное решение (тип спирали, толщины стенок стальной оболочки, ребер, размеры и форма колец статора, применяемые материалы) должно обеспечивать ее надежную эксплуатацию, что гарантирует безопасную работу гидроэлектростанции [2]. Учитывая значительную массу спирали ее конструкция должна быть оптимальна с точки зрения металлоемкости. Задача обеспечения надежности в процессе эксплуатации спирали при минимальной металлоемкости связана с оценкой ее напряженно-деформированного состояния (НДС) [3]. Достоверная информация о НДС может быть получена только в результате эксперимента. В связи со сложностью конструкции узла статор – спиральная камера существенно возрастает трудоемкость экспериментальных исследований, стоимость и сроки их проведения. Поэтому экономически и методически целесообразно проведение исследований с применением расчетных моделей, при этом важна связь между экспериментом и расчетом, включающая проверку адекватности и, при необходимости, корректировку расчета.

Проведенные ранее экспериментальные исследования НДС узла статор – спиральная камера с несущей оболочкой позволили получить реальную картину распределения напряжений и деформаций в исследуемой конструкции, проверить достоверность расчетных методик [4], получить информацию для усовершенствования существующих или создания новых методов расчетов [5].

Ограниченность возможности применения точных аналитических решений для тел сложной конфигурации привела к интенсивному развитию численных и приближенных методов механики деформируемого тела, которые позволяют для широкого круга математических моделей построить достаточные по точности приближенные решения. В работах [6–8] для расчета системы статор – спиральная камера применяется трехмерная постановка с использованием метода конечных элементов (МКЭ), применяемые трехмерные конечные элементы (КЭ) позволяют учесть локализации НДС в местах сопряжения статора со спиральной камерой. Особенность разработанных методик состоит в том, что математическая модель конструкции не учитывает наличия меридиональных ребер жесткости спирали, влияющих на ее НДС, и она симметрична относительно горизонтальной плоскости, однако и в реальной конструкции нижнее и верхнее кольца статора несколько отличны по конструкции. Кроме того, в ряде случаев при сложной конфигурации системы статор – спиральная камера упомянутые методы могут оказаться неэффективными для расчета НДС из-за существенных упрощений, которые связаны с методом разбиения геометрической модели на КЭ.

© К. М. Ровний, О. М. Зеленська, 2015

Развитие вычислительной техники позволило уточнить математическую модель конструкции, разбивать ее регулярной конечноэлементной сеткой при помощи твердотельного КЭ, что дало возможность избежать соблюдения совместности конечноэлементных сеток и тех проблем, которые связаны с ними. Именно с учетом этих возможностей проведено исследование НДС математической модели статор – спиральная камера РО400–В–450 при отсутствии связи оболочки с бетонным блоком, полученные результаты сравниваются с экспериментом.

Методика проведения экспериментальных исследований

Специалистами Харьковского турбинного завода выполнены натурные прочностные исследования оболочки спирали и колонн статора сталежелезобетонной спиральной камеры РО400–В–450 при гидроиспытании спирали давлением 1,77 МПа, когда еще ее связь с бетонным блоком отсутствует.

Исследуемые сечения выбирались в местах, наиболее опасных с точки зрения прочности, которые были выявлены ранее в процессе испытаний модели несущей металлической спиральной камеры [9].

По опыту модельных испытаний, а также по результатам расчета НДС наиболее напряженными являются звенья, расположенные у входного патрубка, а также колонны, находящиеся в данной зоне. Учитывая эти особенности, а также местные ослабления бетонного блока, для исследования были выбраны сечения, проходящие по второму и третьему звеньям спиральной камеры. Тензодатчики на оболочке спиральной камеры располагались на наружной и внутренней поверхностях оболочки в меридиональном и тангенциальном направлениях. Эти направления совпадают с направлением главных напряжений, что было установлено на основании испытаний модели несущей металлической спиральной камеры [4]. На участках, где предполагался более высокий уровень напряжений, тензодатчики устанавливались с меньшим шагом. Схема установки тензодатчиков (рис. 1) предусматривала замер напряжений в сечениях, проходящих между меридиональными ребрами жесткости – в сечениях Г–Г и Е–Е соответственно второго и третьего звеньев, и в месте сопряжения оболочки и меридионального ребра жесткости – в сечениях В–В, Д–Д второго звена спирали, проходящих соответственно через первое и второе ребра жесткости. Для определения напряженного состояния колонн исследованию подвергалась первая колонна. Для исследования НДС колонны тензодатчики были установлены в трех сечениях по высоте колонны – посередине высоты и в зоне примыкания к верхнему и нижнему кольцам статора.

В качестве измерительной аппаратуры применялась тензостанция типа Т–5, предварительно тарированная на специальном тарировочном устройстве УТС1–ВТ–12.

Полученные величины относительных деформаций были пересчитаны по формулам

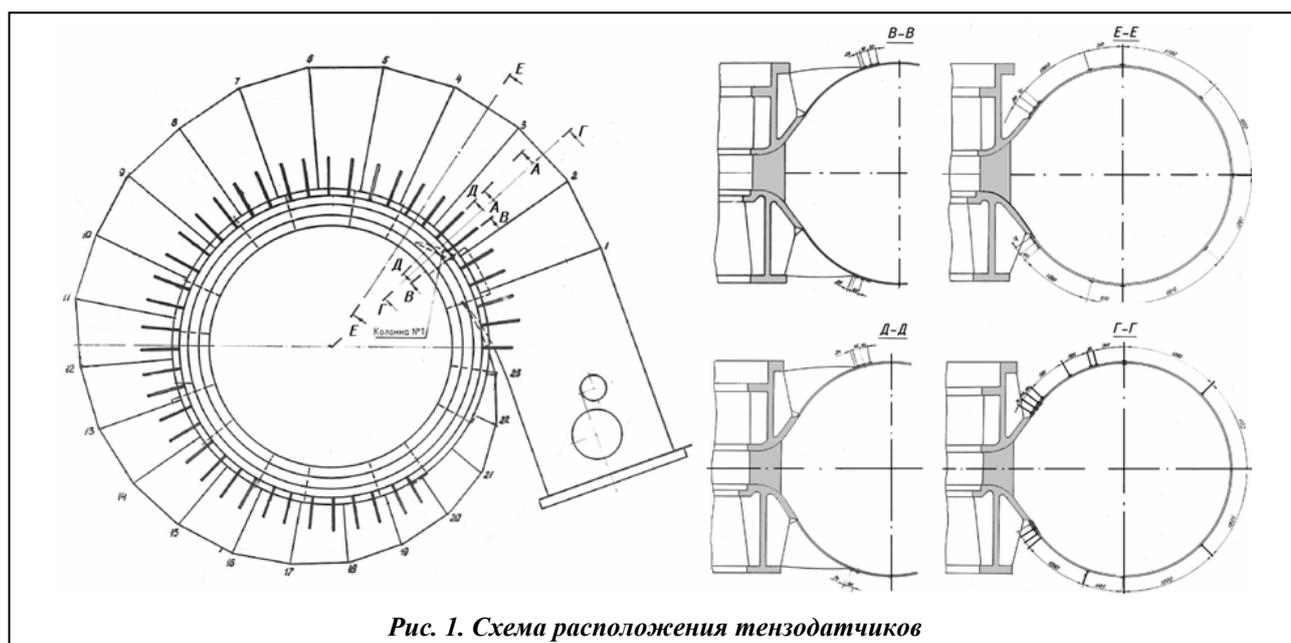


Рис. 1. Схема расположения тензодатчиков

- для одноосного напряженного состояния

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

- для плосконапряженного состояния с известным направлением главных напряжений

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \cdot \varepsilon_2), \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \cdot \varepsilon_1).$$

Методика проведения численного анализа

При исследовании НДС выполнено построение расчетной модели системы статор – несущая спиральная камера под действием напора гидроиспытания $H = 180$ м. Давление на все внутренние поверхности спиральной камеры и на колонны статора принято равномерным. Связь оболочки с бетоном отсутствует. Краевыми условиями для данной задачи является жёсткое закрепление отверстий под крепеж на фланце входного патрубка спиральной камеры и нижнего кольца статора.

Конечноэлементная сетка (рис. 2), применяемая на данной модели, является регулярной, то есть размер конечного элемента постоянен на протяжении всей конструкции. Единичной составляющей конечноэлементной сетки является высокоточный, десятиузловой, твердотельный КЭ [10]. Данный КЭ используется в задачах упругости, пластичности, ползучести, а также в задачах, где возможны большие перемещения и деформации. Криволинейные грани этого элемента позволяют наиболее точно описать конфигурацию всех сложных элементов конструкции.

Для получения надежных результатов (обеспечение сходимости) проведен ряд исследований НДС расчетной модели статор – несущая спиральная камера на различных конечноэлементных сетках при действии на ее внутреннюю поверхность постоянного давления. Определены поля перемещений и напряжений, выявлены зоны локализации напряжений.

На рис. 3, 4 приведены эпюры распределения меридиональных и тангенциальных напряжений на наружной поверхности оболочки второго ребра натурной конструкции спирали РО400–В–450 в сечениях, проходящих по меридиональному ребру (сечение Д–Д) и между меридиональными ребрами (сечение Г–Г), и нанесены результаты, полученные при численном анализе НДС математической модели узла (помечены звездочкой – *).

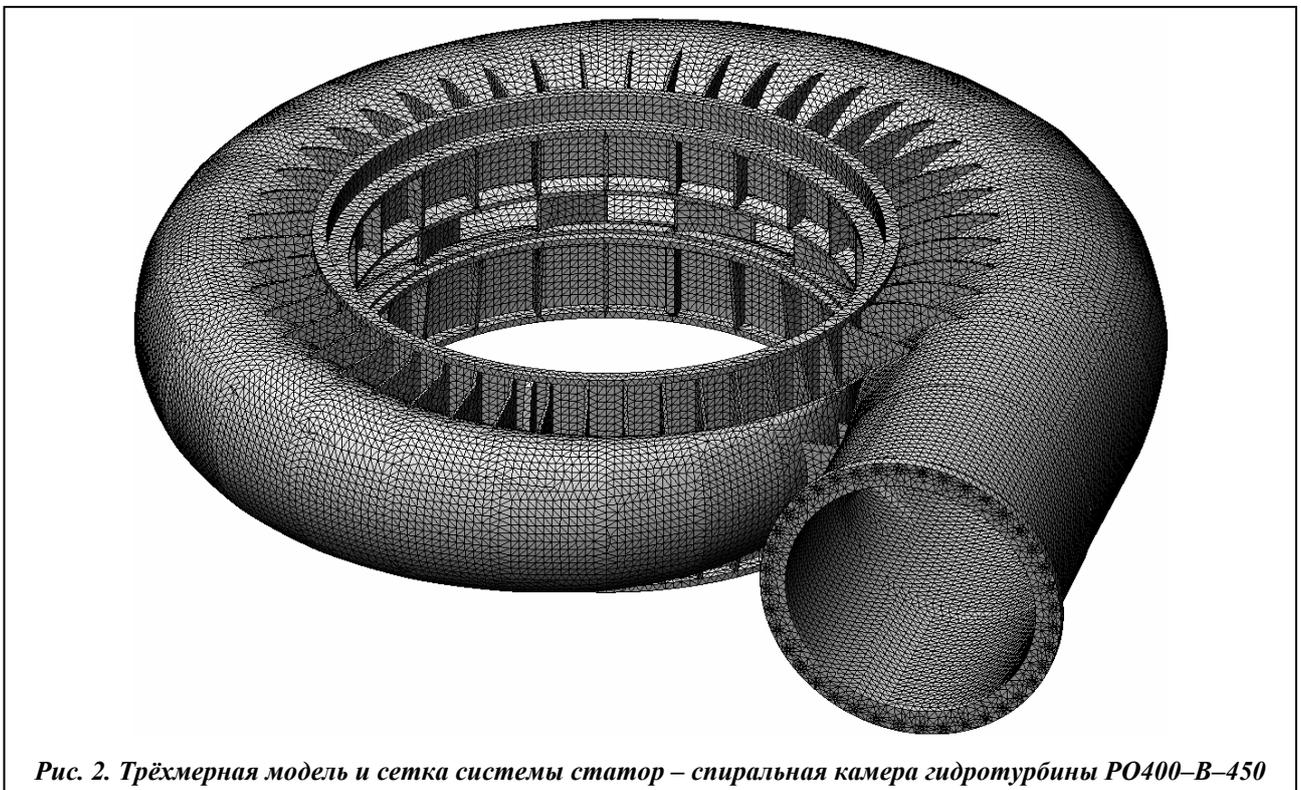
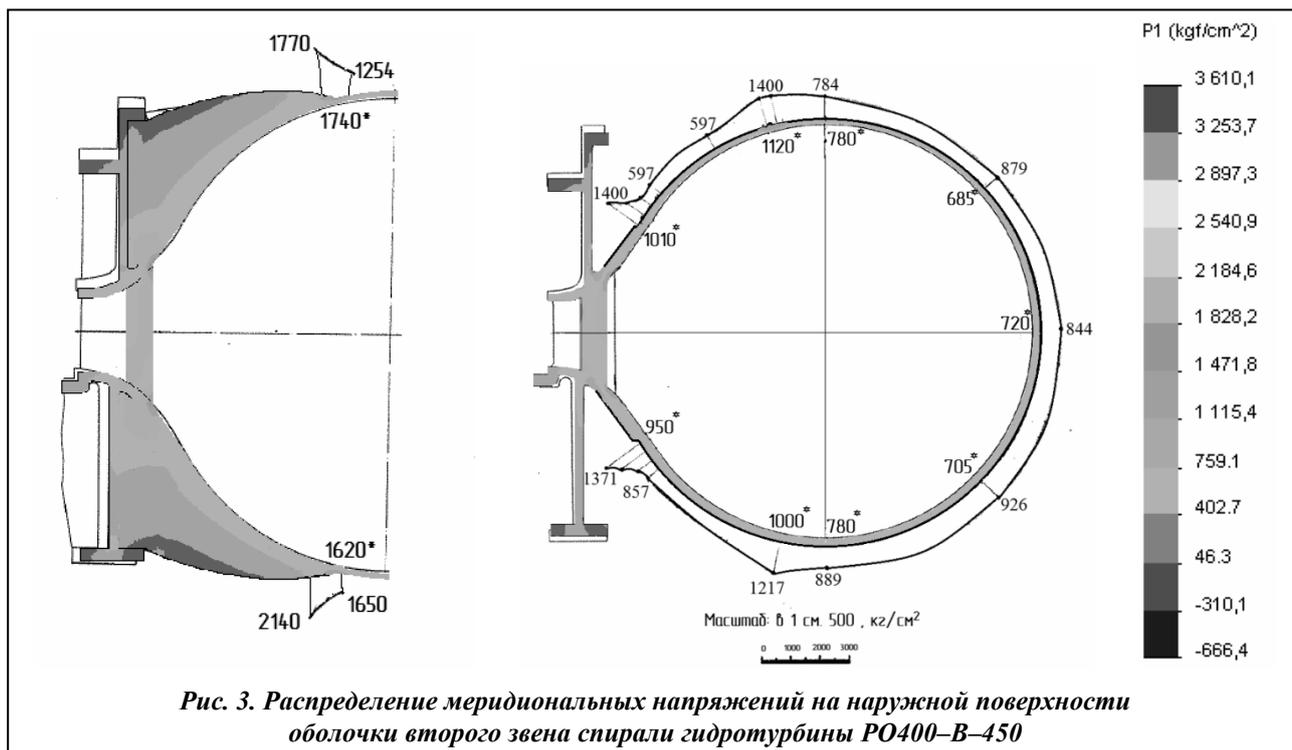
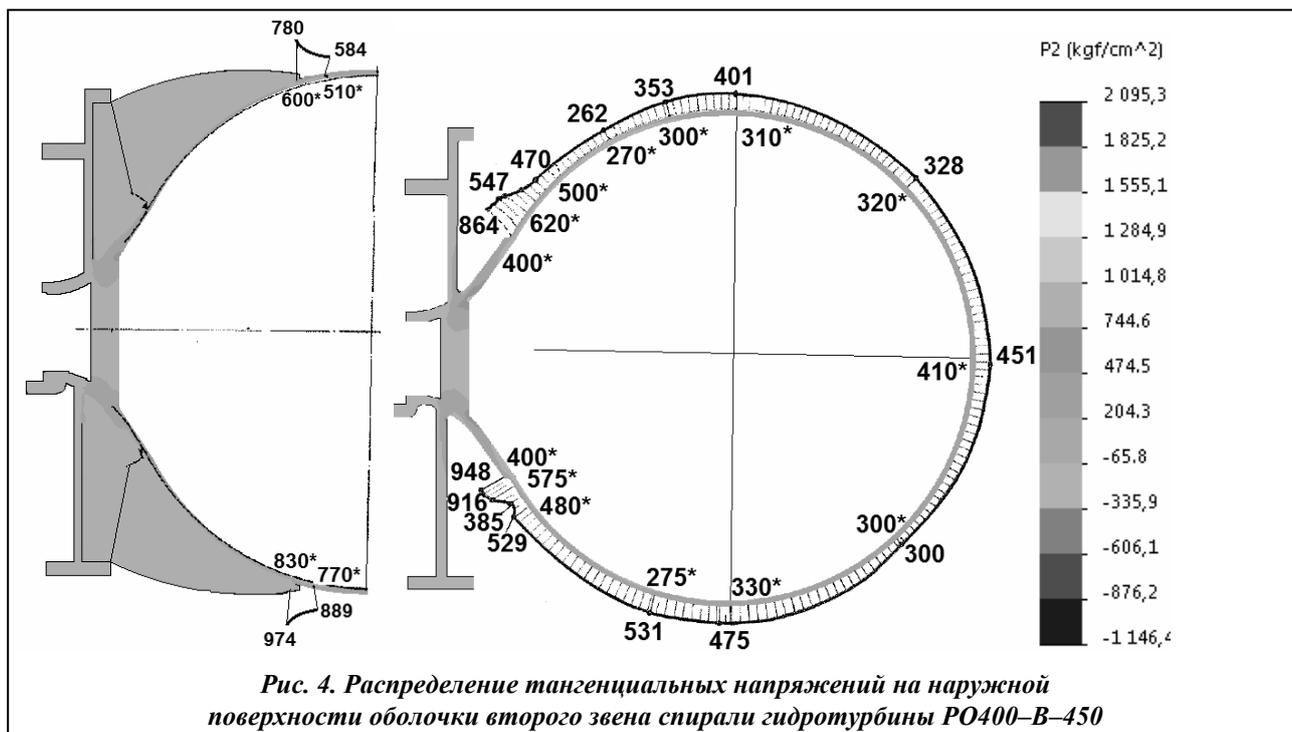


Рис. 2. Трёхмерная модель и сетка системы статор – спиральная камера гидротурбины РО400–В–450



В таблице приведен разброс экспериментальных и расчетных значений главных напряжений в элементах узла спираль – статор в сечениях второго и третьего звеньев спиральной камеры Г–Г, Е–Е, Д–Д, В–В и показаны максимальные главные напряжения P_1 в первой колонне статора.

Следует отметить, что характер распределения НДС для конечноэлементной модели полностью совпадает с экспериментальным исследованием. Разница в значениях главных напряжений, полученных в месте сопряжения оболочки спирали со статорным кольцом, связана с тем, что в местах сопряжения элементов разной толщины возникает трёхмерное НДС и попытка выделить в трехмер-



ной модели характерные составляющие напряжений, соответствующие плоскому НДС, приводят к отличию результатов эксперимента и численного анализа.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

Метод определения напряжений	Значения главных напряжений в элементах конструкции, МПа				Колонна № 1, зона сопряжения с верхним кольцом статора
	Спиральная камера				
	Вид напряжения	Сечение			
		Разброс значений в пределах оболочки	Г–Г, Е–Е Зона сопряжения со статорным кольцом	Д–Д, В–В Зона сопряжения с ребром спирали	
МКЭ, (размер КЭ 100 мм)	меридиональные напряжения	65,7–91,2	85,5–99	134,4–203,5	146,1
	тангенциальные напряжения	24,5–41,2	39,3–80,5	50–84,4	
данные натурального исследования	меридиональные напряжения	68,6–88,3	137,3–154	155,4–210	142,8 (входная кромка)
	тангенциальные напряжения	29,5–44,1	84,3–93,1	70,5–107	

Выводы

Проведенное сравнение результатов расчета модели НДС узла статор – спиральная камера гидротурбины РО400–В–450, учитывающей особенности конструкции – наличия меридиональных ребер жесткости и отсутствие симметрии относительно горизонтальной плоскости спирали, влияющих на ее НДС, показало хорошее совпадение с результатами натурального исследования, дает возможность с достаточной степенью точности оценивать НДС всей конструкции.

Результаты выполненного численного исследования позволили выявить особенности НДС узла статор – спиральная камера гидротурбины РО400–В–450 при гидроиспытании, уточнить распределение главных напряжений и зоны локализации максимальных напряжений в местах соединения колонн статора и статорного кольца, а также в местах сопряжения оболочки со статорным кольцом и меридиональных ребер жесткости с оболочкой спирали.

Литература

1. Лисичкин, С. Е. Совершенствование схем армирования массивных турбинных блоков со спиральными камерами различной конструкции / С. Е. Лисичкин // Гидротехн. стр.-во. – 2003. – № 2. – С. 7–11.
2. Фридман, Л. И. Об определении основных конструктивных размеров спиральных камер высоконапорных радиально-осевых гидротурбин / Л. И. Фридман // Гидравл. машины. – 1969. – № 3. – С. 102–105.
3. Кантор, Б. Я. Анализ напряженно-деформированного состояния узла «спиральная камера – статор» гидротурбины / Б. Я. Кантор, С. А. Андрущенко // Вестн. НТУ «ХПИ». – 2002. – Т. 12, № 9. – С. 93–99.
4. Воробьев, Н. П. Экспериментальное исследование модели металлической несущей спиральной камеры для гидротурбин Ингурской ГЭС / Н. П. Воробьев Т. Е. Пулко // Энерг. машиностроение. – 1967. – № 1. – С. 39–42.
5. Исследование напряженно-деформированного состояния и оптимизация элементов конструкции проточного тракта гидротурбин / И. С. Веремеенко, Б. Я. Кантор, Т. Ф. Медведовская и др. // Авиац.-косм.-ая техника и технология. – 2006. – № 8 (34). – С. 104–109.
6. Метод расчета НДС узла статор–спиральная камера гидротурбин / И. С. Веремеенко, Ю. С. Воробьев, В. Н. Романенко и др. // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования : Сб. науч. тр. – Харьков : ИПМаш НАН Украины. – С. 498–501.
7. Воробьев, Ю. С. Анализ прочности элементов системы статор корпус турбомашин / Ю. С. Воробьев, В. Н. Романенко, Л. Г. Романенко // Вібрації в техніці та технологіях : Зб. наук. пр. – 2004. – № 6. – С. 45–48.
8. Воробьев, Ю. С. Анализ локализации напряжений в системе статор–спиральная камера / Ю. С. Воробьев, В. Н. Романенко, Л. Г. Романенко // Пробл. прочности. – 2007. – № 1. – С. 132–137.

9. Ровный, К. Н. Исследование возможности использования существующего узла статор–спиральная камера турбины РО230/821 для условий эксплуатации насос–турбины ОРО230–В–221 / К. Н. Ровный // Вісн. НТУ «ХП». Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2015. – № 15. – С. 146–150.
10. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др. – Спб: БХВ-Петербург, 2005. – 780 с.

Поступила в редакцию 24.10.15

Н. Г. Шульженко,
д-р техн. наук,
П. П. Гонтаровский,
канд. техн. наук,
Н. Г. Гармаш,
канд. техн. наук
И. И. Мележик,
канд. техн. наук

Институт проблем машино-
строения им. А. Н. Подгорного
НАН Украины,
г. Харьков, e-mail:
shulzh@ipmach.kharkov.ua

УДК 539.4

ОЦЕНКА РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ МНОГОРЕЖИМНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАССЕЯННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛА

Наведені результати аналізу розвитку тріщини при багаторежимному циклічному навантаженні із застосуванням концепції розсіяних пошкоджень для плоских і осесиметричних елементів конструкцій: пластини й циліндра. Напружено-деформований стан елементів визначається на різних режимах методом скінченних елементів, розмахи пружнопластичних деформацій – за принципом Нейбера, пошкодження – по кривих малоциклової втоми гладких зразків з використанням гіпотези лінійного підсумовування ушкоджень. Результати порівнюються з даними, отриманими методами механіки крихкого руйнування на основі рівнянь Періса. Узгодження отриманих результатів свідчить про можливість використання запропонованого підходу для оцінки тріщиностійкості плоских і осесиметричних елементів конструкцій.

Ключові слова: розвиток тріщини, пластина та циліндр, циклічне навантаження, розсіяні пошкодження, принцип Нейбера.

Введение

В [1] предложена инженерная методика расчета кинетики трещин в плоских или осесимметричных объектах при многорежимном циклическом нагружении, основанная на концепции накопления рассеянных повреждений в материале. Поврежденность материала от малоциклового усталости определяется на основе методики [2], которая рекомендуется для оценки ресурса роторов и корпусов турбин [3, 4] по данным испытаний гладких образцов. Применяемые обычно кинетические диаграммы усталостного разрушения Перриса [5] при этом не используются.

Метод расчета кинетики трещины

Суть методики [1] заключается в следующем. Упругое термонапряженное состояние конструкции в области развития трещины для различных режимов нагружения определяется методом конечных элементов. Для получения размахов эквивалентных упругопластических деформаций при расчетной температуре, в качестве которой принимается максимальная температура в области трещины на стационарном режиме эксплуатации, используется метод Нейбера [3]. По ним с помощью экспериментальных кривых усталости при изотермическом симметричном цикле нагружения определяется количество циклов N до появления трещины. Для оценки поврежденности в точке x_i при многорежимном циклическом нагружении за один обобщенный цикл от всех режимов нагружения используется гипотеза линейного суммирования повреждений [6]

$$\Delta\Pi(x_i) = \sum_j \frac{1}{N_{pj}(x_i)} d_{Nj},$$

© Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Н. Г. Гармаш, И. И. Мележик, 2015