

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.07:534.1

## Анализ локализации напряжений в системе статор–спиральная камера гидротурбин\*

Ю. С. Воробьев<sup>а</sup>, В. Н. Романенко<sup>а</sup>, Л. Г. Романенко<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина

<sup>б</sup> Харьковский национальный автомобильно-дорожный технический университет, Харьков, Украина

*На основе трехмерных конечноэлементных моделей разработана методика анализа пространственного напряженно-деформированного состояния системы статор–спиральная камера гидромашины. Методика позволяет определять напряжения и зоны их локализации в конструкциях, имеющих не только идентичные, но и подобные элементы. Схема визуализации результатов позволяет определить места локализации напряжений в системе и ее элементах.*

**Ключевые слова:** трехмерная конечноэлементная модель, напряжения, система статор–спиральная камера гидромашин.

Узел статор–спиральная камера гидроагрегата является одним из самых ответственных со сложной геометрией и большими разбросами размеров. Чтобы избежать повышенной материалоемкости конструкции, необходимо знать распределение перемещений и напряжений в ней. Поэтому при проектировании конструкций подобного типа особые требования предъявляются к прочностным расчетам.

Применение упрощенных схем расчета [1–3] узла, представляющего собой геометрически сложную единую деформируемую систему, вносит в результаты большие погрешности. Правильно поставленный эксперимент позволяет получить реальную картину распределения напряжений и деформаций в исследуемой конструкции, однако является трудоемким и дорогим. Кроме того, он может быть поставлен только после изготовления конструкции или ее модели. Поэтому, как правило, экспериментальные данные используются для проверки достоверности и усовершенствования расчетных методик. Для выбора рациональной конструкции необходимы многовариантные расчеты. Благодаря быстрому развитию вычислительной техники и численных методов можно разрабатывать новые методики, удовлетворяющие требованиям точности и для таких сложных конструкций.

\* По материалам доклада на международной научно-технической конференции “Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций” (1–4 ноября 2005 г., Киев, Украина).

Исследуемый узел статор–спиральная камера (рис. 1) представляет собой систему, которая не обладает симметрией, что позволяет существенно упростить задачу. При этом пространственный узел подвержен интенсивным статическим и динамическим нагрузкам, закон распределения которых, как правило, является сложным. В результате при эксплуатации возникают зоны напряжений, существенно отличающиеся по величине. Основную опасность для конструкции представляет не средний уровень напряжений, а их локальные всплески, обусловленные сложной формой объекта. Наиболее адекватное решение задачи прочности для таких конструкций возможно в рамках построения уточненной трехмерной математической модели. Трехмерные модели в сочетании с методом конечных элементов (МКЭ) позволяют максимально учитывать особенности геометрии конструкции, получить полную картину распределения напряжений и выявить зоны локализации напряжений [4, 5].

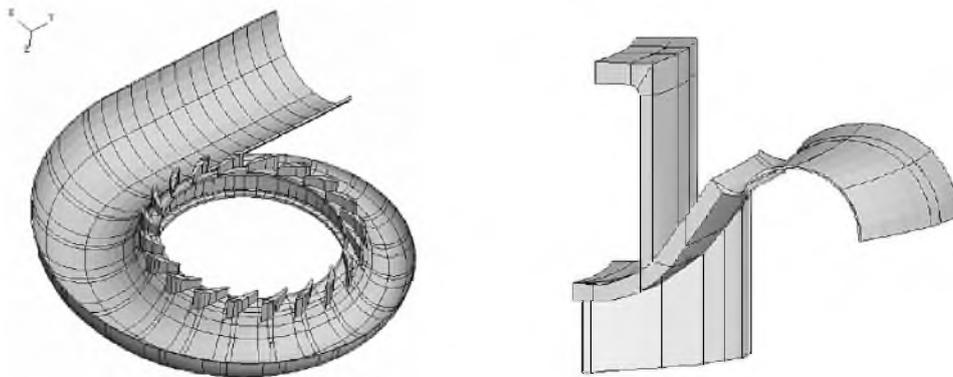


Рис. 1. Общий вид и сетка конечных элементов для расчетного узла.

Геометрия конструкции обладает симметрией только относительно горизонтальной плоскости. Внутренняя часть узла (статор) может быть рассмотрена как циклосимметричная конструкция. Спиральная камера – это тонкостенная оболочка с переменными толщиной и внешним радиусом, и только в упрощенных расчетах ее можно рассматривать как тороидальную [1–3]. Входная часть конструкции – эллиптическая оболочка.

При решении задачи рационально использовать 20-узловой изопараметрический конечный элемент (КЭ). Такой же элемент был использован при разработке программного комплекса для решения задач статической и динамической прочности как отдельных элементов турбомашин (лопатки различной конфигурации с полками и хвостовиками, лопасти гидротурбин и т.п.), так и систем с поворотной симметрией (облопаченные диски паровых и газовых турбин, рабочие колеса гидротурбин) [4–8]. Криволинейные грани элемента позволяют наиболее точно описать конфигурацию всех сложных элементов конструкции. При сочетании в едином расчетном объекте массивных и тонкостенных элементов этот КЭ позволяет достаточно точно описать их сложную геометрию с единых позиций. С помощью трехмерных моделей в отличие от оболочечных можно более точно определять напряжения в местах

сопряжения тонкостенных элементов с массивными телами, которые, как правило, наиболее опасны в конструкциях.

В большинстве коммерческих пакетов напряжения экстраполируются в узлы, затем осредняются либо по элементам, либо по внешним граням, содержащим эти узлы. В данной работе напряжения в узлах определяются следующим образом. Находится непрерывная функция, которая аппроксимируется функциями формы. Эта функция наилучшим образом аппроксимирует напряжения в точках Гаусса в смысле среднего квадратичного отклонения. При этом  $K$  раз решается система  $N$  уравнений, где  $N$  – число точек;  $K$  – число напряжений.

При решении задачи статического деформирования конструкции использовали два подхода. Математическую модель строили как для всей конструкции, так и для отдельных подконструкций. Это позволяло проводить расчет по частям, что более рационально при ограниченных вычислительных ресурсах. Отметим, что система содержит не одинаковые, а только подобные части. Поэтому прием снижения размерности системы с одинаковыми (идентичными) элементами не может быть прямо использован. Несмотря на это, в конструкции можно выделить топологически подобные элементы, что позволяет упростить решение задачи. Каждый сектор конструкции имеет одинаковый угол раствора  $\alpha$  и внутреннюю часть – сектор (рис. 2), общий вид и сетка конечных элементов для которой представлены на рис. 1.

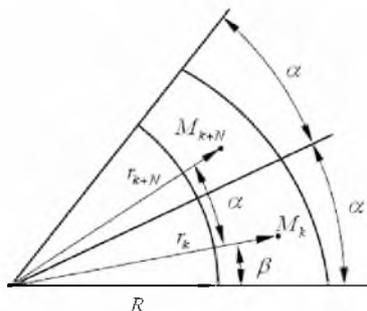


Рис. 2. Схема базового сектора.

Зная топологию базового сектора, определяем координаты точек остальных секторов при условии, что сектора одинаковы:

$$x_{k+Ni} = y_k \sin(i\alpha) + x_k \cos(i\alpha);$$

$$y_{k+Ni} = y_k \cos(i\alpha) - x_k \sin(i\alpha);$$

$$z_{k+Ni} = z_k,$$

где  $x_k, y_k, z_k$  – текущие координаты в базовом секторе;  $N$  – количество точек в секторе;  $i$  – номер рассматриваемого сектора (от 0 до 18).

С помощью установленных координат определяем для каждой точки ее расстояние до оси конструкции. Для точек, у которых это расстояние больше  $R$  (рис. 2), находим новое (реальное) расстояние до оси вращения, используя при этом специальный множитель:

$$R'_{k+Ni} = R + (R_{k+Ni} - R)f(\alpha),$$

$$f(\alpha) = (\arctg(y_{k+Ni}/x_{k+Ni}) - 1,5)/6.$$

Далее определяем координаты для этих точек:

$$x_M = x + \Delta x f(\alpha);$$

$$y_M = y + \Delta y f(\alpha);$$

$$z_M = z f(\alpha).$$

Значения  $\Delta x$  и  $\Delta y$  определяют разницу между радиусом рассматриваемой точки и внешним радиусом статора ( $R$ ). Внутренняя часть узла статор–спиральная камера гидротурбины представляет собой циклосимметричную конструкцию, координаты точек которой определяются путем простого поворота на угол  $\alpha Ni$ . В этом случае использованы все преимущества циклосимметричности при хранении информации при расчетах.

Представление конструкции в виде связанных элементов (секторов) удобно, поскольку каждый конструктивный элемент определяется относительно небольшим числом геометрических параметров. Это дает возможность автоматизировать задание исходных данных, что для расчетов МКЭ является одной из главных задач. Программный пакет позволяет учитывать особенности геометрии узла статор–спиральная камера гидротурбины, различные варианты граничных условий, обеспечивает графическое представление исходных данных и результатов расчетов. В работе большое внимание уделяется визуализации математической модели объекта и его напряженно-деформированного состояния в виде полей перемещений и напряжений, благодаря чему можно наглядно представить результаты и упростить их анализ. Используется также цифровое указание значений перемещений и напряжений в характерных точках. Визуализация является единственно возможным методом анализа напряженно-деформированного состояния при расчете таких конструкций МКЭ.

Был проведен расчет конструкции при действии на ее внутреннюю поверхность постоянного давления. Определены поля перемещений и напряжений, выявлены наиболее опасные зоны. Симметрия конструкции относительно горизонтальной плоскости позволяет демонстрировать ее половину. В результате проведенного расчета обнаружены большие градиенты перемещений в области соединения тонкостенных элементов спиральной камеры с массивными элементами статора.

Рис. 3 иллюстрирует распределение полей напряжений в наиболее нагруженной части конструкции. Максимальные напряжения соответствуют зонам наибольших градиентов перемещений и возникают в местах соединения спиральной камеры со статором, а также в области соединения наименьшего сечения спиральной камеры с входным патрубком (в области “зуба” спиральной камеры). Характер распределения напряжений в вертикальном сечении спиральной камеры соответствует результатам расчетов по известным методикам [1–3]. Однако использование данного метода позволяет увидеть всю картину полей напряжений в конструкции с учетом геометрических особенностей элементов и их взаимодействия.

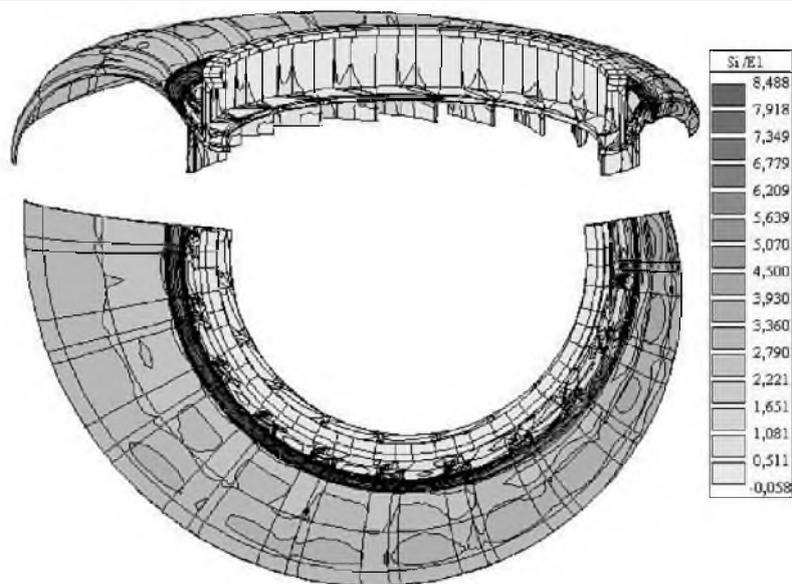


Рис. 3. Поля напряжений в наиболее нагруженной части конструкции.

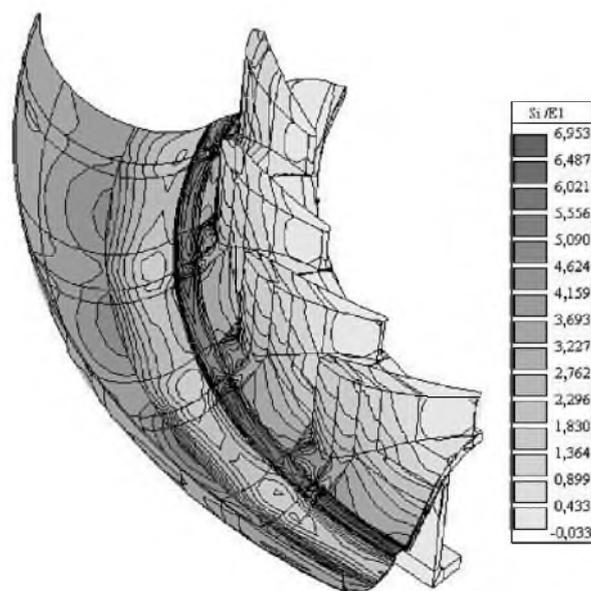


Рис. 4. Распределение напряжений в зонах сопряжения статора, колонн и спиральной камеры.

На рис. 4 показаны поля напряжений в отдельных частях конструкции, где локализация напряжений обнаруживается наиболее явно.

## Выводы

1. На основе трехмерных конечноэлементных моделей разработана методика анализа пространственного напряженно-деформированного состояния системы статор–спиральная камера турбомашин.

2. Для повышения эффективности метода используются приемы расчета сложной системы по частям и наличие подобных частей системы.

3. Расчеты реальной конструкции позволяют выявить зоны локализации напряжений и влияние на их уровень конструктивных особенностей системы.

## Резюме

На основі тривимірних скінченноелементних моделей розроблено методику аналізу просторового напружено-деформованого стану системи статор–спіральна камера гідромашин. За допомогою методики можна визначати напруження і зони їхньої локалізації в конструкціях, що мають не тільки ідентичні, але й подібні елементи. Візуалізація результатів дозволяє визначити місця локалізації напружень у системі та її елементах.

1. Аронсон А. Я., Гримзе Л. Б. и др. Некоторые результаты расчетов напряженного состояния спиральных камер гидротурбин // Гидротурбостроение. – 1969. – № 12. – С. 214 – 224.
2. Ковалев Н. Н. Проектирование гидротурбин. – Л.: Машиностроение, 1974. – 278 с.
3. Фридман Л. И., Болотников А. А. К расчету на прочность статора высоконапорной гидротурбины // Гидравлические машины. – 1971. – Вып. 4. – С. 109 – 114.
4. Воробьев Ю. С., Шепель А. И., Романенко Л. Г. и др. Конечноеэлементный анализ собственных колебаний статически напряженных лопаток турбомашин // Пробл. прочности. – 1990. – № 7. – С. 88 – 94.
5. Веремеенко И. С., Воробьев Ю. С., Иосевич И. И., Канило С. П. Влияние локализации напряжений на ресурс рабочих колес радиально-осевых турбин // Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций: Тр. междунар. конф. (6–9 июня 2000). – Киев. – С. 573 – 578.
6. Веремеенко И. С., Воробьев Ю. С., Канило С. П. и др. Метод расчета на прочность и колебания колес радиально-осевых гидротурбин: Сб. науч. тр. ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 7. – Ч. 3. – С. 15 – 21.
7. Веремеенко И. С., Воробьев Ю. С., Канило С. П. и др. Численный анализ локализации напряжений в рабочих колесах радиально-осевых гидротурбин // Авиаци. косм. техника и технология. – 1999. – Вып. 9. – С. 420 – 423.
8. Веремеенко И. С., Воробьев Ю. С., Романенко В. Н., Канило С. П. Метод расчета НДС элементов узла статор–спиральная камера гидротурбин // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Сб. науч. тр. ИПмаш НАН Украины. – Харьков. – С. 498 – 501.

Поступила 04. 11. 2005