

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НДС ВРАЩАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ АГРЕГАТОВ ПИТАНИЯ ЖРД

В.В. Ткач

Представлены результаты расчётов напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей сложной формы агрегатов питания ЖРД с использованием их конечно-элементных моделей (КЭМ).

С целью обеспечения высокой степени точности расчётов НДС таких деталей при минимальных затратах вычислительных ресурсов предлагается построение их КЭМ производить с применением адаптивного метода разбиения на конечные элементы (КЭ).

Проведено сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными разгонных испытаний и данными, полученными с использованием метода фотоупругости.

Введение

Существующие традиционные методы оценки работоспособности вращающихся деталей ТНА ЖРД, основанные на теории оболочек, были разработаны в 80-х годах прошлого века [1, 2]. Они применимы и используются для определения работоспособности деталей простой формы, таких как осесимметричные, тонкие диски рабочих колёс турбин и крыльчатки насосов горючего и окислителя, в которых лопатки являются частью цилиндрической поверхности, а покрывной диск слабо изогнут.

При определении НДС рабочих колёс турбины и центробежных крыльчаток сложной формы с лопатками двойной кривизны, традиционные методы не позволяют достаточно точно определять НДС, вызванное как воздействием рабочих нагрузок, так и нагрузок, возникающих при разрушающих числах

оборотов. Поэтому эти методы используют для расчётов в первом приближении.

Несовершенство применяемых численных методов, большие материальные и временные затраты, связанные с экспериментальными исследованиями, делают проектирование крыльчаток и турбин длительным и экономически дорогостоящим мероприятием. В связи с этим, в настоящее время приобрели широкое применение адаптивные КЭМ [5, 6], которые позволяют с высокой точностью определять НДС деталей сложной конфигурации.

Ниже приведены примеры построения трёхмерных КЭМ с применением адаптивного метода разбиения на КЭ крыльчаток насоса горючего и рабочего колеса турбины ТНА двигателя РД170(171).

Для всех приведенных ниже расчётов, с учётом результатов экспериментальных исследований [3, 4] предполагалось, что:

– материалы, из которых изготовлены рабочий диск турбины и крыльчатки второй ступени насоса горючего, работают в области упругих деформаций, поэтому зависимость напряжения от деформаций принята линейной;

– материал крыльчатки насоса первой ступени работает в области упругопластических деформаций, поэтому его поведение описывается кривой деформирования в координатах $\sigma \sim \varepsilon$ (напряжение – деформация).

Свойства используемых материалов представлены в табл. 1, в которой используются обозначения: предел прочности – σ_B ; предел пропорциональности – σ_T ; модуль упругости – E ; относительное удлинение – δ и плотность – ρ .

Таблица 1

	Марка материала	σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	E , кгс/мм ²	δ , %	ρ , г/см ³
Крыльчатка	ВНЛ6	125	95	18500	10	7,98
Диск	ЭП741НП	130	90	20800	13	8,35

Построение адаптивных КЭМ

КЭМ, построенные с применением адаптивного метода разбиения, будем называть адаптивными КЭМ.

Предлагаемый метод построения адаптивных КЭМ деталей сложной формы включает в себя выполнение следующих операций.

1. Задают 4 – 5 вариантов чисел $KЭ$ – $N_{KЭ, i}$, где i номер варианта, и используя традиционный метод построения КЭМ (равномерная КЭ сетка строится автоматически) для каждой анализируемой детали, выполняют расчёт НДС соответствующих каждому варианту.

2. На основании анализа полученных результатов по максимальным расчётным значениям приведенных напряжений $\sigma_{i, \max}$, соответствующих каждому i -му варианту, строят график зависимости ($\sigma_{i, \max}$) от $N_{KЭ, i}$.

3. По результатам анализа расчётных значений $\sigma_{i, \max}$ для анализируемой детали определяют области с концентраторами напряжений, а по графику $\sigma_{i, \max} = f(N_{KЭ, i})$ определяют область стабилизации значений расчётных $\sigma_{i, \max}$.

На рис. 1 представлены графики зависимости расчётной величины $\sigma_{i, \max}$ от $N_{KЭ}$ для крыльчаток насосов горючего первой и второй ступени, а также для рабочего диска турбины. Из графиков видно, что область стабилизации результатов расчёта начинается при значениях $N_{KЭ} \geq 300 - 400$ тыс.

4. Путём изменения густоты сетки в выявленных по п. 3 областях с концентраторами напряжений строят адаптивную КЭМ.

В этой КЭМ в областях с концентраторами напряжений (например, входная кромка лопаток, места сопряжения лопаток с дисками) использовались КЭ с характерным размером, равным 1 мм, а в местах больших утолщений – 3 мм. Лопатки по толщине моделировались 3 – 4 слоями КЭ.

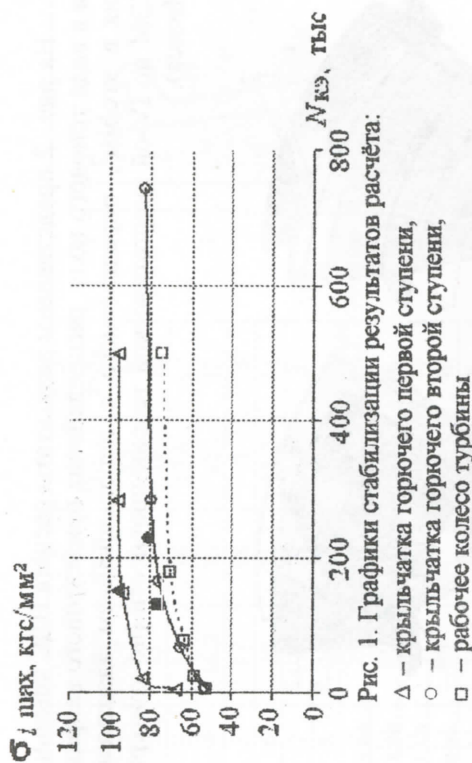


Рис. 1. Графики стабилизации результатов расчёта.

Δ – крыльчатка горючего первой ступени,
○ – крыльчатка горючего второй ступени,
□ – рабочее колесо турбины

На рис. 1 закрашенными метками показаны точки, определяющие значения $\sigma_{i, \max}$, рассчитанные с применением адаптивных КЭМ. Результаты, полученные с применением этих моделей, сравнивались с экспериментально полученными данными.

Сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными

Далее приводится сравнение НДС, рассчитанных с использованием адаптивных КЭМ, с экспериментальными данными.

1. Крыльчатка первой ступени насоса горючего

Натурная крыльчатка насоса горючего первой ступени была статически тензометрирована для определения уровня статических деформаций в барокамере с разрежённой атмосферой, в нормальных температурных условиях, при скорости вращения 15500 об/мин. Результаты экспериментов опубликованы в работе [3].

Расчётные данные для сравнения были получены с применением адаптивных КЭМ. Расчёт проводился с учётом действия нагрузок, возникающих при вращении крыльчатки со скоростью 15500 об/мин. Действие нагрузок от затяжки крыльчатки на валу не учитывалось.

На рис. 2 представлены результаты расчёта НДС крыльчатки в виде тонового поля распределения приведённого напряжения в $\text{кгс}/\text{мм}^2$, определённого с использованием адаптивной КЭМ по IV-ой энергетической теории прочности (по критерию Мизеса).

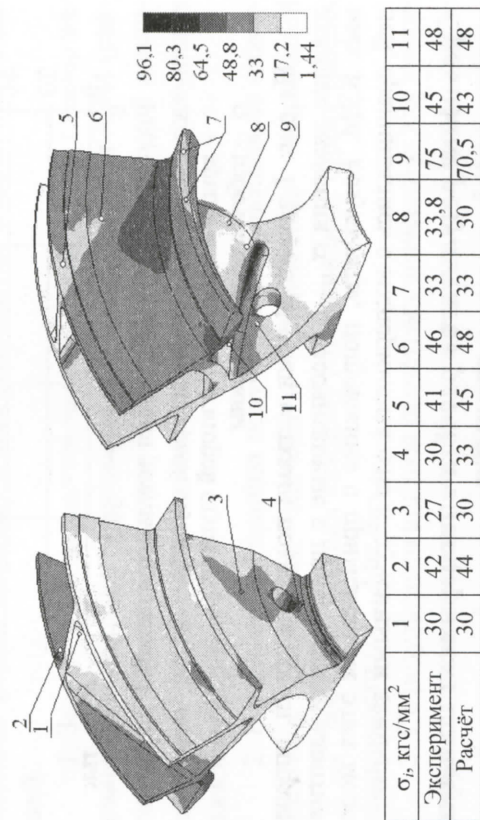


Рис. 2. Поле приведенных напряжений: вид на крыльчатку сзади (слева) и вид спереди (справа)

2. Крыльчатка второй ступени насоса горячего

Экспериментальные данные для этой крыльчатки определяют распределения меридиональных (σ_r) и окружных (σ_θ) напряжений в точках на линии пересечения поверхности крыльчатки с одним из меридиональных сечений. Эти данные получены по результатам исследований напряжений с применением фотоувеличительной модели крыльчатки, нагруженной полем центробежных сил, и метода фотоупругости [4].

Результаты численного расчёта НДС, полученные с применением адаптивной КЭМ, и экспериментальные данные представлены на рис. 3.

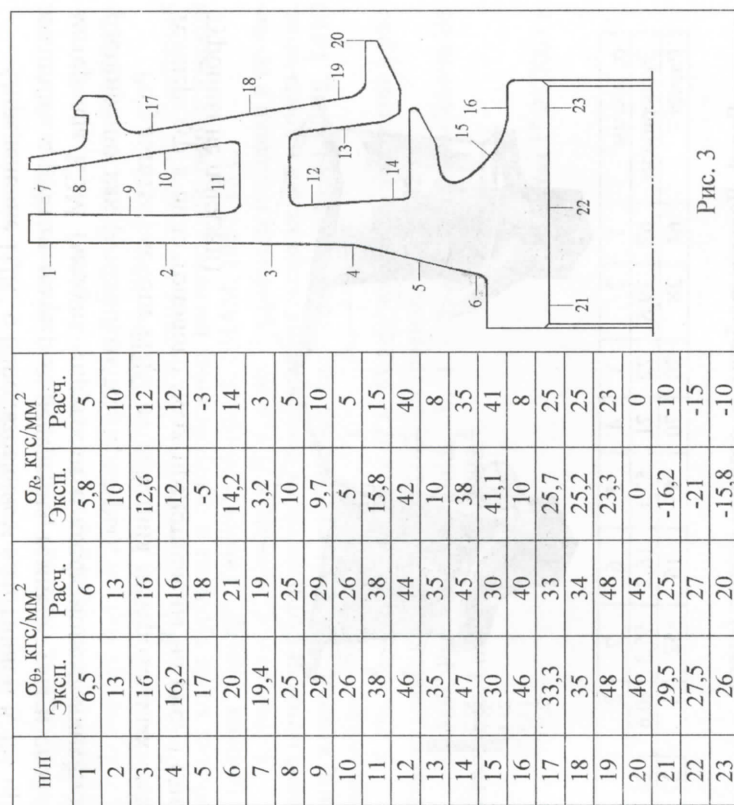


Рис. 3

Сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными свидетельствует об их достаточно хорошем согласовании.

Несовпадение расчётных эпюр напряжений, во втулочной части и на спинке крыльчатки с экспериментом можно объяснить тем, что в КЭМ не учитывалась затяжка крыльчатки на валу.

3. Рабочее колесо турбины

Натурное рабочее колесо турбины было статически тензометрировано в барокамере при воздействии центробежных сил и переменного поля температур в диапазоне от -190° до $+350^\circ\text{C}$ соответственно у оси и периферии [3].

Адаптивная КЭМ была построена с учётом круговой симметрии для 1/33 части рабочего колеса (соответственно числу лопаток). Затяжка диска на валу не моделировалась.

Определение НДС с использованием адаптивной КЭМ проводилось с учётом поля распределения температуры и свойств материала КЭМ (модуль упругости и коэффициент линейного расширения как функций от температуры).

Результаты расчёта НДС от действия центробежных сил и температур в виде тонового поля представлены на рис. 4 (диск турбины не показан).

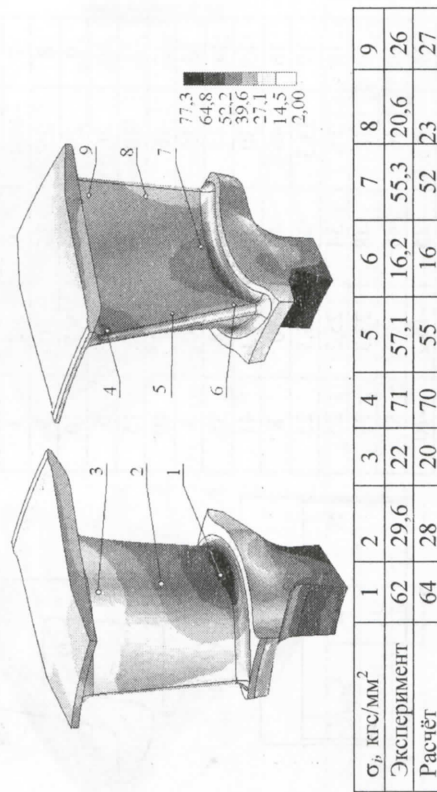


Рис. 4. Лопатка турбины: со стороны спинки (слева), со стороны корытца (справа)

Выводы

1. Создана методика построения адаптивных конечно-элементных моделей, использование которой для расчёта напряжённо-деформированного состояния вращающихся деталей сложной формы обеспечивает существенную экономию вычислительных ресурсов и высокую точность по сравнению с традиционными, неадаптивными моделями.

2. Результаты расчётов НДС хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными, что позволяет рекомендовать адаптивные КЭМ для прогнозирования НДС деталей проектируемых агрегатов питания ЖРД, с которым связана возможность сокращения объёма экспериментальных исследований.

Литература

1. ОСТ 92-9608-82. Колёса и диски агрегатов подачи. Методика расчёта напряжённо-деформированного состояния.
2. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б., Шорр Б.Ф. Расчёт на прочность деталей машин. Справ. М.: Машиностроение, 1993. 639 с.
3. Буянов В.А., Суржин В.С. Результаты циклических испытаний рабочих колёс турбины и центробежных нагнетателей энергетической установки "Барьер". Техотчёт № 10829, ЦИАМ. 1987. 18 с.
4. Анохин А.А., Клепиков И.А. и др. Разработка методики и проведение методом фотоупругости исследования напряжений в крыльчатке, нагруженной полем центробежных сил. Техотчёт № 14-89/95, НПО Энергомаш. 1989. 74 с.
5. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчётах судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974. 342 с.
6. MSC/Patran User's Guide, V. 1 – 3, The MacNeal-Schwendler Corporation, Los Angeles CA, 1998.

Поступила 15.03.2003 г.