

УДК 629.7.036:539.4

С.М. СТЕПАНЕНКО

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

ИСПЫТАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА КОНСТРУИРОВАНИЯ

Применение численных методов расчета в практике конструирования, в частности метода конечных элементов, требует предварительного испытания программ для того, чтобы гарантировать качество получаемых результатов. В статье рассматривается пример испытания компьютерной программы расчета на прочность, применявшейся при конструировании авиационных ГТД.

качество, испытание, компьютерная программа, прочность, метод конечных элементов, напряжения, ГТД

Повсеместное внедрение систем менеджмента качества на предприятиях, периодически повторяющаяся сертификация таких систем различными независимыми инспекциями делают актуальными все вопросы, связанные с обеспечением требований к качеству выпускаемой продукции. Для проектных и конструкторских предприятий важным элементом системы менеджмента качества является обеспечение качества конструирования. В настоящее время в конструкторской практике для анализа условий работы проектируемых изделий широко используются численные методы расчетов, в частности метод конечных элементов (МКЭ). При этом все чаще применяются универсальные программные комплексы, разработанные для решения широкого класса задач, но требующие при решении частных вопросов определенного мастерства от работающих с ними исполнителей. Освоение таких комплексов исполнителями, с целью гарантированного получения качественных результатов, является важным неотъемлемым элементом системы качества конструирования.

Преимущество МКЭ перед другими численными методами (легкость в дискретизации объекта, в получении результатов расчета при одновременном рассмотрении нескольких тел из разных материалов с нерегулярными границами, возможность сгущения сетки в местах ожидаемой концентрации напряжений, простота учета различных граничных условий) делает его привлекательным для инженеров-

расчетчиков. Но, с другой стороны, такая простота может привести к получению неправильных результатов, если исполнитель не убедится в том, что он верно владеет имеющимся в его распоряжении расчетным инструментом. На необходимость испытания программ расчета МКЭ указывают многие исследователи, работающие с такими программами, например [1, 2].

Цель настоящей статьи – рассмотреть этапы проведения испытания и проверки компьютерных программ. Этапность испытаний должна определяться принципом – «от общего к частному» и включать рассмотрение работоспособности и оценки точности получаемых результатов при использовании тех элементов компьютерной программы, которые намечены к практическому применению на данном предприятии. Проиллюстрировать реализацию такого принципа можно на примере проведенного испытания программного комплекса, предназначенного для определения МКЭ упругого и упругопластического напряженно-деформированного состояния плоских и осесимметричных конструкций роторов авиационных ГТД.

Прежде всего, анализировалась зависимость результатов расчета от типа задаваемых конечных элементов, их размеров и степени их сгущения. Результаты расчетов МКЭ, полученные при использовании испытываемого программного комплекса, были сопоставлены с традиционными расчетами

дисков по известной методике Р.С. Кинасошвили [3, 4]. Расчет дисков проводился при их осесимметричном нагружении центробежными силами, контурной нагрузкой и радиальным перепадом температур. При всех сочетаниях размеров применявшихся конечных элементов расхождение результатов не превышало 5%. В результате такой проверки получено подтверждение того, что персоналу, работающему с программным комплексом, выбирает правильные размеры элементов и создает модели, обеспечивающие качество получаемых результатов.

Погрешность расчета, связанная с размерами конечных элементов, существенна при расчете напряжений в зонах концентраторов. В [1] отмечается, что при соотношении размеров конечных элементов в таких зонах с характеристическими размерами концентраторов, не превышающем величины $0,2 \dots 0,07$, обеспечивается достоверный результат даже при простейших типах конечных элементов. Справедливость этого утверждения была проверена путем расчета напряжений в местах перехода полотна диска к опорной поверхности бурта. Радиус скругления здесь был равен $R = 0,8$ мм. В результате расчетов получено, что, действительно, при соотношении линейных размеров конечных элементов λ , описывающих зону концентратора, к радиусу скругления $\lambda / R \leq 0,2$ результат расчета не зависит от размеров конечных элементов. Здесь λ – длина стороны конечного элемента.

Для проверки применимости испытываемого программного комплекса к расчету оболочек ротора ГТД было проведено сравнение результатов расчета МКЭ с известными теоретическими решениями. Рассматривалась задача о нагружении цилиндрической оболочки по одному краю перерезывающими силами q , действующими на единицу длины окружности. Теоретическое решение такой задачи приведено в [5]. Для расчета принимались следующие значения величин: $q = 10$ Н/мм; размеры оболочки: средний радиус $R = 350$ мм, толщина $h = 1,5$ мм,

длина $L = 120$ мм; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Расчет МКЭ проводился при трех, четырех и шести слоях конечных элементов по толщине оболочки. Наибольшее отклонение от теоретического решения возникает при расчете МКЭ с тремя слоями элементов по толщине (для осевых напряжений до 22%, для окружных напряжений до 8%). Из полученного результата можно сделать практический вывод. Если при расчете МКЭ ротора ГТД, включающего диски и проставки, оболочки задаются тремя слоями элементов и расчетные окружные напряжения превышают осевые, эти напряжения могут рассматриваться в дальнейшем анализе без дополнительных уточнений. Если более высокими получаются осевые напряжения, следует просчитать оболочку с использованием более измельченной сетки.

Для расчета напряжений вблизи конструктивных концентраторов, образующихся пазами в дисках для крепления лопаток, отверстиями, галтелями, целесообразно применять конечноэлементную модель фрагмента диска, включающую анализируемый концентратор. Граничные условия для такой модели берутся из общего решения соответствующей задачи для диска в целом. На примере компрессорного диска было проверено влияние размеров расчетного фрагмента на результаты расчета напряжений в зоне межпазовых выступов. Рассматривалась плоская модель сектора диска, включающего один паз для крепления хвостовика лопатки, ограниченного по бокам двумя радиальными образующими, а снизу дугой, отстоящей от дна паза сначала на 1,5 размера его высоты, а затем на $3 \dots 3,5$ размера паза. В первом случае в зоне угловых выкружек паза максимальные напряжения получились равными $\sigma_{\max} = 280$ МПа (у одной выкружки) и $\sigma_{\max} = 201$ МПа (у другой). При удалении дуги, ограничивающей рассматриваемый фрагмент снизу до $3 \dots 3,5$ размеров паза, расчетные напряжения изменились и стабилизирова-

лись на уровне $\sigma_{\max} = 236$ МПа и $\sigma_{\max} = 217$ МПа. соответственно. Таким образом, расчетный фрагмент для решения плоских задач должен быть не менее чем в три раза больше размера паза или другой конструктивной особенности, возле которой определяется концентрация напряжений.

Важную роль при испытаниях и проверках компьютерных программ играет сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными. Рассматриваемый нами программный комплекс был применен для определения перемещений и напряжений и сравнения их с экспериментально полученными значениями при статических испытаниях диска, имитирующего центробежное колесо, и при тензометрировании вращающегося диска вентилятора. Перемещения и напряжения определялись в местах расположения датчиков перемещений и тензорезисторов. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных показали сходимость: в пределах 7 ... 12%.

В качестве одного из примеров испытания программного комплекса приведем пример рассмотрения задачи об упругопластическом изгибе стержня прямоугольного сечения изгибающим моментом $M_{\text{из}} = 16 \cdot 10^4$ Н·мм. Материал стержня – сталь 30ХГСА. Длина стержня $L = 10$ мм, размер поперечного сечения 3×4 мм, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа. Результаты расчета сравнивались со значениями, приведенными в [6]. Как стало видно из анализа полученных результатов, упругопластический расчет с использованием испытываемого программного комплекса дает заниженные значения напряжений и определяет меньшую зону пластичности по сравнению с [6], из чего последовали определенные рекомендации относительно применения данного комплекса для решения упругопластических задач.

Выводы

В результате испытания и проверки программного комплекса для расчета напряженно-деформиро-

ванного состояния элементов конструкций роторов ГТД с применением МКЭ были опробованы все основные возможности комплекса, предлагаемые его разработчиками. Были даны рекомендации исполнителям по величинам применяемых конечных элементов, особенностям расчета зон с конструктивными концентраторами, по ожидаемой точности получаемых результатов при упругом и упругопластическом расчетах.

Таким образом, проведенная предварительная работа по освоению программного комплекса способствовала обеспечению необходимого уровня качества последующего конструирования авиационных ГТД на его определенном этапе.

Литература

1. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980. – 354 с.
2. Смирнова Л.М. Прогнозирование ресурса рабочих колес турбокомпрессоров с учетом случайности расстройки и нагружения: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.09 / ХНТУ «ХПИ». – Х., 2003. – 22 с.
3. Кинашвили Р.С. Расчет на прочность дисков турбомашин. – М.: Оборонгиз, 1954. – 143 с.
4. Демьянушко И.В., Биргер И.А. Расчет на прочность вращающихся дисков. – М.: Машиностроение, 1978. – 247 с.
5. Канторович З.Б. Основы расчета химических машин и аппаратов. – М.: Машгиз, 1960. – 743 с.
6. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.В. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.

Поступила в редакцию 01.06.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.