

УДК 621.438.001.2:681.3.06

Ю.Я. ДАШЕВСКИЙ, Д.Н. ПИСЬМЕННЫЙ

ГП НПКГ «Зоря»-«Машипроект», Украина

ОСОБЕННОСТИ ДВУХМЕРНЫХ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

В статье представлены особенности выполнения расчетов температурного состояния деталей сложной конфигурации в программном комплексе ANSYS с использованием элемента SHELL57. Показана возможность его применения на примере моделирования замкового соединения диска с лопаткой в 2-D постановке. Приведены результаты сравнения 3-D и 2-D расчетов для одних и тех же деталей. Освещены достоинства и недостатки применения элементов SHELL57 для выполнения подобных расчетов.

температурное состояние, моделирование, программный комплекс ANSYS, замковое соединение

Тенденция повышения температуры газа на входе в турбину газотурбинного двигателя (ГТД) требует повышения точности расчетов температурного состояния его деталей и узлов. Повышение точности расчетов, кроме этого, позволяет сократить объем натурных испытаний в период доводки ГТД, что особенно актуально для двигателей большой мощности.

При определении температурного состояния деталей и узлов как в двухмерной (2-D), так и в трехмерной (3-D) постановке, широко применяется метод конечных элементов (МКЭ) [1], реализованный в различных программных комплексах, одним из которых является ANSYS [2, 3]. Естественно, что наиболее корректными для большинства деталей ГТД являются 3-D расчеты, т.е. расчеты с использованием тепловых моделей, геометрия которых в точности соответствует натурной. Однако, такие расчеты требуют достаточно мощной вычислительной техники и значительных затрат времени на создание 3-D модели. Кроме этого, создание 3-D моделей требует достаточно глубоких конструкторских проработок, отсутствующих на начальных стадиях проектирования. По этим причинам 3-D расчеты даже в настоящее время применяются достаточно ограниченно.

Весьма распространенными при этом остаются

более простые 2-D расчеты в плоской или осесимметричной постановке. Для выполнения таких расчетов для большинства тел необходимо выполнение специальных преобразований 3-D геометрии в 2-D модель с соблюдением целого ряда условий.

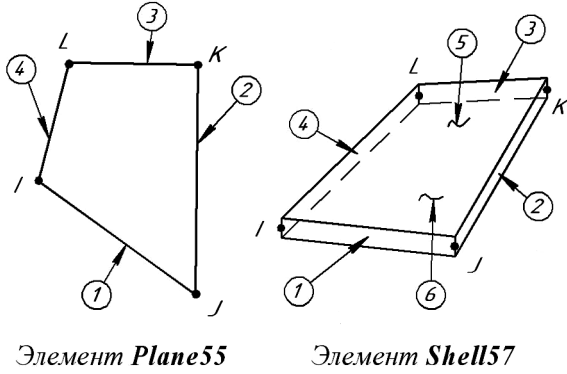
Однако, во многих случаях подобные преобразования приводят к значительным погрешностям, а зачастую даже не позволяют корректно оценить влияние тех или иных факторов на температуры деталей, что особенно важно для проектировочных расчетов. Одной из таких задач, к примеру, является расчет температурного состояния замкового соединения диска с рабочими лопатками.

Таким образом, существует потребность в относительно простом способе определения температурного состояния с помощью МКЭ с достаточной для практических целей точностью еще на ранних стадиях проектирования.

Весьма перспективным способом определения температурного состояния в таких случаях является 2-D моделирование в программном комплексе ANSYS с использованием элементов типа SHELL.

Суть предлагаемого способа заключается в использовании оболочечных элементов SHELL57 совместно с плоскими или осесимметричными элементами PLANE55. Применение элементов SHELL57 позволяет задавать толщины элемента и

граничные условия теплообмена не только на его границах, но и на его поверхностях. Сравнительная схема элементов PLANE55 и SHELL57 приведена на рис. 1.



Элемент *Plane55* Элемент *Shell57*

Рис. 1. Схема элементов PLANE55 и SHELL57

Отличия элементов SHELL57 от элементов PLANE55 выражаются в их математических моделях. Так интегральное уравнение, основанное на первом законе термодинамики, для плоского элемента типа PLANE55 можно записать следующим образом:

$$\int_S \left(\frac{\partial(c \rho T)}{\partial \tau} - \ddot{q} \right) ds = \int_{L1} (\lambda \cdot \text{grad } T \cdot \vec{n}) dl + \int_{L2} q_0 dl + \int_{L3} \alpha \cdot (T - T_v) dl,$$

где c, ρ, λ – соответственно теплоемкость, плотность и теплопроводность материала; T – температура; \ddot{q} – удельное тепловыделение; \vec{n} – орт внешней нормали; q_0 – удельный тепловой поток на границе; α, T_v – коэффициент теплоотдачи на границе и температура окружающей среды; $L1$ – внутренний участок контура (не граничащий с окружающей средой); $L2$ и $L3$ – внешние участки контура, на которых заданы граничные условия, соответственно, второго и третьего рода.

Аналогичное уравнение для элемента типа SHELL57 отличается от уравнения для элемента PLANE55 учетом толщины (δ) и дополнительного теплового потока с поверхности элемента и имеет следующий вид:

$$\int_S \delta \cdot \left(\frac{\partial(c \rho T)}{\partial \tau} - \ddot{q} - \alpha \cdot (T - T_v) \right) ds = \int_{L1} \delta \cdot (\lambda \cdot \text{grad } T \cdot \vec{n}) dl + \int_{L2} q_0 dl + \int_{L3} \alpha \cdot (T - T_v) dl.$$

Таким образом, двухмерная модель частично приобретает трехмерные возможности.

Для верификации данного метода моделирования, перед выполнением тепловых расчетов деталей ГТД, был выполнен ряд тестовых расчетов. Для примера можно рассмотреть расчет температурного состояния оребренной трубы, выполненный как в классической постановке, так и с использованием элементов SHELL57. Этот пример хорошо показывает особенности данного метода. Расчетная конечно-элементная схема и результаты расчета приведены на рис. 2.

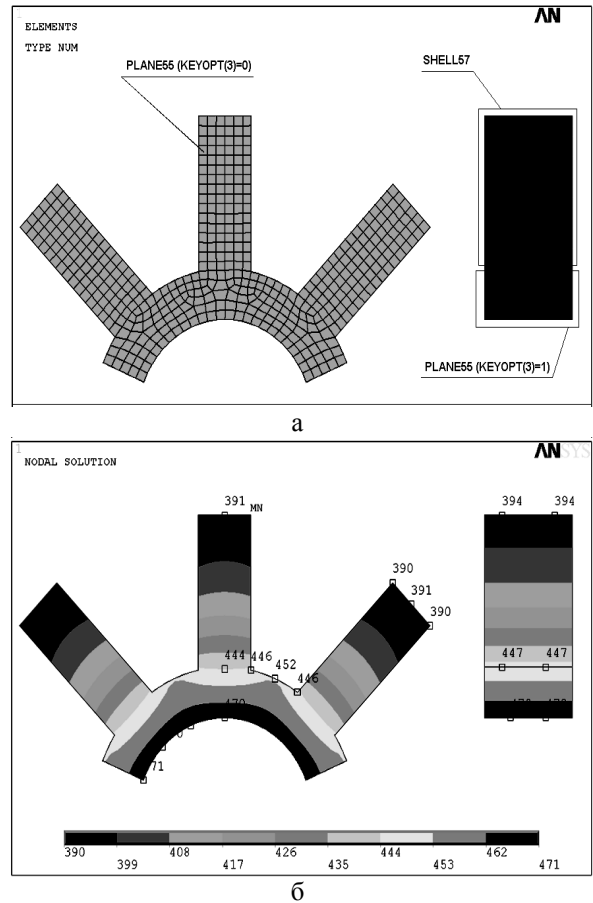


Рис. 2. Расчет оребренной стенки:
а – конечно-элементная схема;
б – результаты расчета

В результате расчета получено, что в данном случае разность плотностей тепловых потоков меж-

ду классическим расчетом и с использованием элементов SHELL57 не превышает 0,1 %. Необходимо отметить, что данный расчет выполнен для геометрических размеров и граничных условий, характерных для большинства узлов ГТД. При этом погрешность подобного расчета зависит от соотношения геометрических параметров и величины тепловых потоков.

Аналогичное сочетание элементов PLANE55 SHELL57 может быть использовано и при моделировании теплового состояния многих деталей и узлов ГТД.

Рассмотрим применение такого метода при моделировании замкового соединения диска турбины с неохлаждаемой рабочей лопаткой.

При таком моделировании плоская модель лопатки и модель диска в замковой части разбиваются на элементы типа SHELL57 с заданием соответствующей суммарной толщины на каждом участке, а модель диска в остальной части – осесимметричными элементами типа PLANE55.

Для обеспечения тепловой связи между диском и лопаткой обе конечно-элементные сетки соединяются дополнительными перемычками из элементов SHELL57 с суммарной толщиной, соответствующей площади контакта в замковом соединении из формального материала. Свойства такого материала перемычек определяются из условия сохранения величины коэффициента теплопроводности контакта.

В созданных таким образом моделях, к элементам типа SHELL57, граничные условия задаются как на гранях (позиции 1 – 4 на рис. 1), так и на их поверхностях (позиции 5, 6 на рис. 1). При этом значение коэффициента теплоотдачи необходимо корректировать коэффициентом моделирования, определяемого как отношение фактической площади теплообмена к площади теплообмена в модели.

В тоже время, к боковым поверхностям диска, заданным элементами PLANE55 прикладываются фактические граничные условия без учета какой-

либо коррекции коэффициентом моделирования.

Для оценки погрешности, связанной с применением данного метода, при моделировании температурного состояния узла замкового соединения было выполнено моделирование диска турбины газотурбинного двигателя как в 2-D постановке с помощью вышеуказанного метода, так и в 3-D постановке без какого-либо упрощения геометрии. Результаты этих расчетов приведены на рис. 3 и 4.

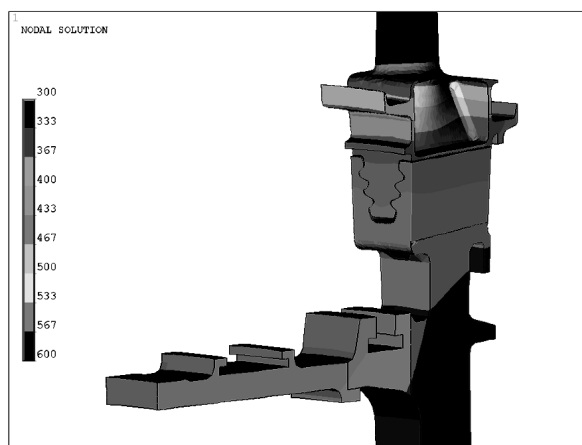


Рис. 3. Результаты расчета температурного состояния в 3-D постановке

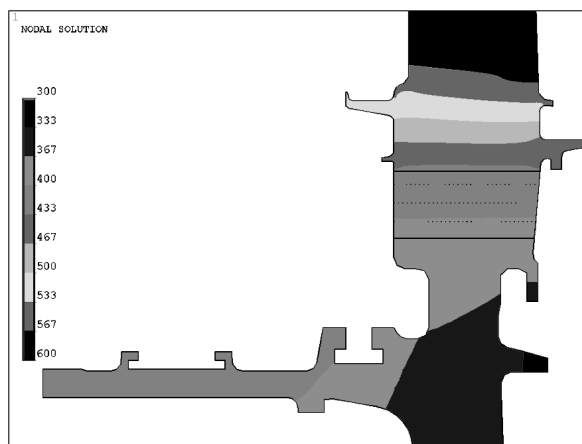


Рис. 4. Результаты расчета температурного состояния в 2-D постановке

На рис. 5 в графическом виде приведено сравнение результатов расчетов. Как видно из рисунков, 2-D модель очень хорошо отражает осредненные по толщине температуры лопатки и диска. При этом необходимо отметить, что для рис. 5 температуры из 3-D расчета принимались для диска в плоскости между лопатками (т.е. минимальные), а для лопат-

ки – в плоскости оси замка лопатки (т.е. максимальные). Из рис. 5 видно, что погрешность определения температуры замковой части диска и лопатки из-за приведения задачи к двумерной постановке не превысила 5 ... 7°C, что вполне приемлемо для проектировочных расчетов.

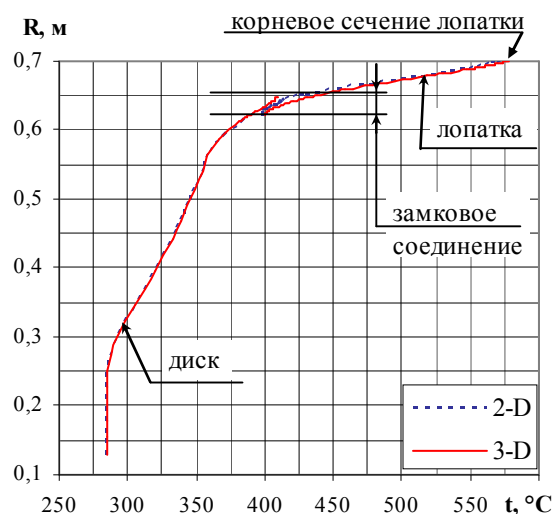


Рис. 5. Сравнение результатов расчета

При этом необходимо отметить существенную разницу во времени выполнения данного расчета в 3-D и 2-D постановке, что особенно актуально при выполнении нестационарных расчетов. Кроме этого, расчет этой задачи в двумерной постановке не требует применения достаточно мощных компьютеров.

Применение данного метода моделирования возможно также и для случаев с охлаждаемыми лопатками, где для профиля лопатки задается теплообмен как от газа, так и от охлаждающего воздуха. Однако в данном случае число участков с разными эквивалентными толщинами и граничными условиями существенно возрастает.

К недостаткам данного метода расчета температурного состояния следует отнести необходимость определения эквивалентных толщин стенок и коэффициентов моделирования для прикладываемых в качестве граничных условий коэффициентов теплоотдачи. Кроме этого, в результате расчета определяются только осредненные по окружности (по толщине) температуры.

Основное достоинство данного способа моделирования заключается в возможности с достаточной степенью точности определять температурное состояние деталей сложной формы на ранних этапах разработки конструкции без создания 3-D моделей. Также необходимо отметить простоту создания модели и изменения ее геометрических параметров. Так, например, без редактирования конечно-элементной модели можно изменить толщину пера или ножки лопатки, площадь контакта лопатки с диском, а также в короткое время выполнить расчеты задачи с разными наборами исходных данных, что необходимо для определения влияния тех или иных факторов на температурное состояние деталей. Кроме этого можно выполнить расчет температурного состояния всего ротора ГТД, результаты которого затем можно использовать для выполнения прочностных расчетов.

Анализ достоинств и недостатков расчетов температурного состояния в 2-D постановке с помощью элемента типа SHELL57 в программном комплексе ANSYS показывает целесообразность широкого применения данного способа наряду с расчетами в 3-D постановке.

Литература

1. Локай В.И., Бодунов М.Н., Жуйков В.В., Щукин А.В. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
2. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
3. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.

Поступила в редакцию 9.06.2005.

Рецензент: д-р техн. наук В.И. Романов, ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев.