



## Расчет НДС вращающегося теплообменника ГТД с регенерацией

### Распределение температур и деформаций в каркасе дискового теплообменника при нестационарных граничных условиях

Андрей Костюков, Михаил Крутов,  
Юрий Кустарев, МГТУ «МАМИ»

Вращающиеся теплообменники относятся к классу регенеративных теплообменников, в которых одна и та же поверхность поочередно омывается то горячим, то холодным теплоносителем. При прохождении горячего теплоносителя стенки теплопередающей матрицы (насадки) нагреваются (аккумулируют теплоту), а затем передают ее проходящему холодному теплоносителю.

Типичная схема вращающегося теплообменника транспортного газотурбинного двигателя показана на рис. 1.

Основной проблемой при конструировании вращающихся теплообменников является обеспечение малых утечек сжатого воздуха и достаточного ресурса уплотнений теплообменника.

И то и другое является следствием тепловых деформаций диска теплообменника. Эти тепловые деформации имеют весьма внушительную величину из-за больших размеров теплообменника и значительного градиента температур по толщине диска.

В данной конструкции проблема тепловых деформаций частично решена за счет каркасной конструкции дискового теплообменника с коническими теплопередающими элементами.

В таком теплообменнике уплотнения работают не по ребристой передающей матрице, а по плоским элементам (щечкам) каркаса. Благодаря конической форме теплопередающих матриц обеспечивается обдув холодным теплоносителем внутренних поверхностей каркаса, соответственно снижается его температура.

Для создания эффективной системы уплотнений и грамотной конструкции каркаса регенератора необходимо было выяснить следующие параметры:

- распределение температуры в каркасе теплообменника на номинальном и частичных режимах работы двигателя;
- уровень колебаний температуры в теплообменнике;
- величину деформаций каркаса теплообменника и напряжения в каркасе теплообменника.

В качестве объекта расчета был выбран каркас вращающегося теплообменника транспортного газотурбинного двигателя мощностью 340 кВт.

Исследуемый каркас состоит из двух плоских щек с круглыми отверстиями для прохода воздуха (газа) и тонкостенных шестигранных стаканов, припаянных к поверхностям щек. Основные геометрические размеры каркаса следующие:

- диаметр каркаса — 840 мм;
- толщина каркаса — 155 мм;

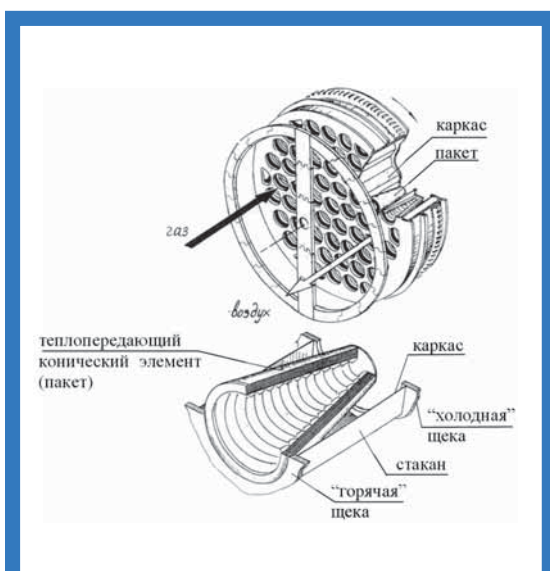


Рис. 1. Схема вращающегося регенеративного теплообменника

- толщина щеки — 5 мм;
- толщина стенки стакана — 2 мм.

Также при расчете был задан конвективный теплообмен на соответствующих поверхностях каркаса.

Для расчета циклических температурных полей авторы воспользовались конечно-элементным комплексом ANSYS.

Основной проблемой при расчете является задание нестационарных граничных условий. Граничные условия, как следует из принципа работы теплообменника, представляют собой зоны с различными коэффициентами теплоотдачи и температурами на поверхностях каркаса теплообменника. Для реализации изменения граничных условий во времени, связанных с поворотом теплообменника относительно потоков теплоносителей, была использована опция табличного задания граничных условий относительно пользовательской системы координат (эта возможность реализована в ANSYS начиная с версии 9.0).

В этом случае при задании таблицы граничных условий с помощью команды \*DIM производится указание на заранее созданную локальную систему координат: \*DIM, Par, Type, IMAX, JMAX, KMAX, Var1, Var2, Var3, CSYSID, где CSYSID — номер системы координат, относительно которой задаются граничные условия.

Таким образом, написав макрос, который определяет на каждом шаге по времени новую локальную систему координат, и задавая на каждом шаге по времени таблицу граничных условий относительно этой локальной системы координат, можно моделировать вращение поля граничных условий относительно неподвижного диска теплообменника.

Пример макроса для приложения температуры в тестовой задаче показан ниже.

Необходимо обратить внимание, что таблица заполняется от минимальных координат

```

wpro,1,000000,
CSWPLA,11,0,1,1,
! Устанавливаем положение рабочей плоскости и
! пользовательской системы координат №1

FLST,2,6500,1,ORDE2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6500

*DIM,tempr,TABLE,4,1,1,X,,11 ! Задаем таблицу температур относительно
! этой системы координат
D,P51X,*stemp*s,,,TEMP,.....
*SET,TEMPER(1,0,1),-1
*SET,TEMPER(1,1,1),100
*SET,TEMPER(2,0,1),-0.01
! Заполняем таблицу значениями координат
! по X и температур
*SET,TEMPER(2,1,1),100
*SET,TEMPER(3,0,1),0.01
*SET,TEMPER(3,1,1),500
*SET,TEMPER(4,0,1),1
*SET,TEMPER(4,1,1),500

```

X к максимальным, а не наоборот. В противном случае ко всей модели будет приложена температура, относящаяся к минимальной координате (то есть в данном случае — 100).

Если включить нестационарный анализ и написать циклическое выполнение этого макроса, то можно отобразить нестационарное поле температур на тестовой задаче (листинг макроса показан справа).

В данном случае тестовая модель имеет форму диска диаметром 900 мм. Ось вращения диска ориентирована вдоль оси Z. Поверхность, образующая этот диск, покрыта КЭ-сеткой, которая состоит из 6500 элементов SHELL57.

Результат расчета тестовой задачи с применением

```

FINISH
/SOL

/DO,1,01,36,0,1

wpro,1,000000,
CSWPLA,11,0,1,1,
FLST,2,6500,1,ORDE2
FITEM,2,1
FITEM,2,-6500

*DIM,tempr,TABLE,4,1,1,X,,11
D,P51X,*stemp*s,,,TEMP,.....
*SET,TEMPER(1,0,1),-1
*SET,TEMPER(1,1,1),100
*SET,TEMPER(2,0,1),-0.01
*SET,TEMPER(2,1,1),100
*SET,TEMPER(3,0,1),0.01
*SET,TEMPER(3,1,1),500
*SET,TEMPER(4,0,1),1
*SET,TEMPER(4,1,1),500

ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMP,M0

TIME,1
/STATUS,SOLU
SOLVE

tempo**
/ENDDO

```

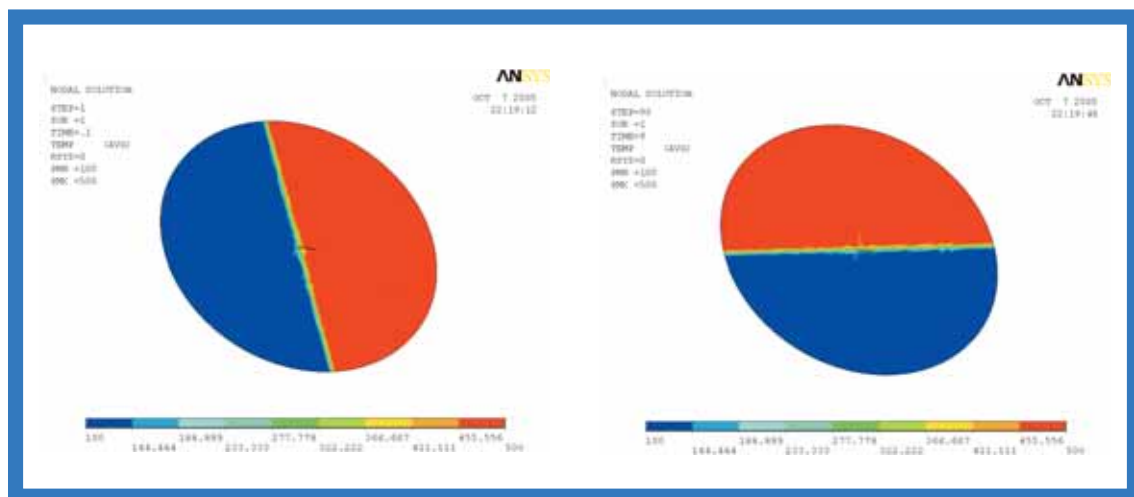


Рис. 2. Положение поля температур в различные моменты времени

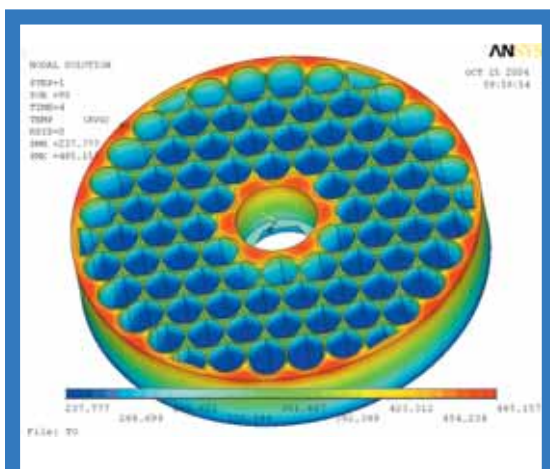


Рис. 3. Распределение температур в каркасе теплообменника на циклическом установившемся режиме

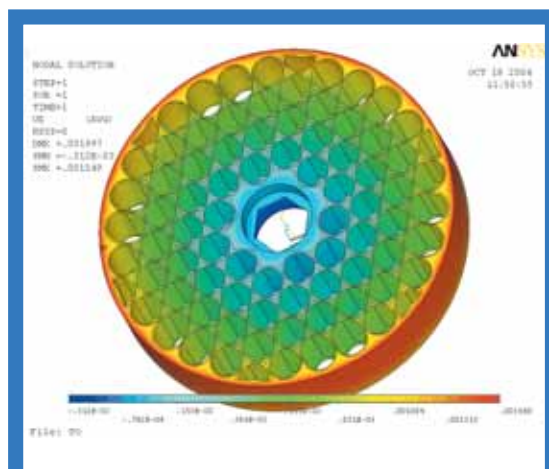


Рис. 4. Осевая составляющая деформаций каркаса теплообменника

этого макроса представлен на рис. 2. Как видно из рисунка, в процессе расчета происходит изменение граничных условий таким образом, чтобы имитировалось вращение диска. Меняя переменные IVAL, FVAL, INC цикла \*DO, можно задавать различные значения «частоты вращения диска» и расчетного времени (или числа оборотов).

Расчет реального каркаса производился аналогично представленной тестовой задаче. Только вместо температуры в узлах сетки задавались условия конвекции на поверхностях. Для этого формировались массивы граничных условий  $\alpha = f(x)$  и ТГ,  $B = f(x)$  для каждого типа поверхности — то есть отдельно для наружной поверхности горячей щеки, отдельно для наружной поверхности холодной щеки, отдельно для внутренних поверхностей и т.д.

В качестве начальных условий задавалось равномерное температурное поле на каркасе ( $T = 293 \text{ }^\circ\text{K}$ ). Расчетная КЭ-модель состояла из 30 935 элементов типа SHELL57.

Расчет производился по временным шагам. На каждом промежутке времени  $\Delta t$ , соответствовавшем одному полному обороту теплообменника вокруг своей оси (4 с), рассчитывалось температурное поле каркаса с шагом  $2^\circ$  поворота теплообменника, то есть  $4/180=0,02222$  с.

В качестве начальных условий при переходе к следующему временному интервалу брались результаты предыдущего шага.

Расчет проводился до тех пор, пока температура произвольной точки на горячей щеке каркаса на предыдущем обороте для угла  $0^\circ$  не стала отличаться от температуры на текущем шаге для того же угла менее чем на  $1 \text{ }^\circ\text{K}$ .

Для автоматизации данного процесса в макрос был внесен соответствующий код. До-

полнительно туда же был добавлен счетчик, ограничивающий максимальное число оборотов теплообменника.

Результаты расчета для установившегося режима работы теплообменника приведены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 показана картина распределения температур в каркасе теплообменника. Было установлено, что колебания температуры каркаса после выхода на стационарный режим работы теплообменника незначительны. Поэтому нестационарный прочностной расчет не проводился. Ограничились только стационарным прочностным расчетом. Деформации теплообменника в осевом направлении приведены на рис. 4.

Однако в процессе прогрева каркаса, который по времени занимал приблизительно 5 мин, рост температуры составлял  $20 \text{ }^\circ\text{K}$  и выше (максимальные колебания температуры наблюдались в начале разогрева каркаса). Поэтому логическим следующим шагом должен быть прочностной расчет каркаса в нестационарной постановке. ▣



## Полезные советы

**В чем заключается физический смысл коэффициента (упругого) восстановления (restitution coefficients) в модели частиц ANSYS CFX?**

При соударении твердой частицы с поверхностью (стенкой) величина скорости частицы изменяется в зависимости от ее скорости до соударения и так называемого коэффициента восстановления состояния. Коэффициент восстановления может принимать значения от 0 до 1 и определяется упругими свойствами частицы и материала стенки. Например, при коэффициенте восстановления равном единице, удар считается абсолютно упругим и наоборот.