

## ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЁТАХ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е.А. Канунникова, И.А. Мещихин  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Рассмотрены вопросы применения суперэлементов в совместных прочностных расчётах конструкций космических аппаратов. Показана эффективность применения суперэлементов для расчёта адаптера космического аппарата с кронштейнами. Проведено сравнение точности и времени счёта для суперэлементной и конечно-элементной моделей.*

**Ключевые слова:** суперэлементы, космические аппараты, расчёт на прочность.

### Введение

Прочностный расчёт сложных пространственных конструкций, например элементов космических аппаратов (КА), представляет значительную сложность. Прочностный анализ моделей большой размерности в полной постановке может занять много времени.

Одним из известных средств сокращения времени счёта является применение суперэлементов [1 – 4]. В данной статье рассмотрены вопросы эффективности применения суперэлементов при статических расчётах адаптера КА, включая анализ необходимости таких расчётов, а также точности и времени счёта.

### Постановка задачи

Адаптер служит для отделения КА от ракеты-носителя (РН), поэтому его прочность и жёсткость являются важными для успешного пуска. Рассматриваемая конструкция адаптера представляет сварную раму, которая крепится одной стороной к разгонному блоку, а другой через кронштейны пирозамков к нижнему фланцу КА.

Построение конечно-элементной модели хотя бы со «средней» подробностью приводит к размерности порядка:

- 155064 степеней свободы для адаптера на основе оболочечных элементов;
- 403983 степеней свободы для каждого из восьми кронштейнов на основе объёмных элементов.

Несмотря на экономичный подход (адаптер оболочечный, а не объёмный), прямой расчёт полной сборки конструкции на имеющемся аппаратном обеспечении занимает неприемлемо большое время, а значит, возникает необходимость в снижении размерности решаемой задачи. Таких возможностей две:

- проводить расчёт на прочность адаптера и кронштейнов отдельно;
- использовать суперэлементы.

### Раздельный расчёт адаптера и кронштейнов

Проведём раздельный расчёт адаптера и одного кронштейна при действии продольной и поперечной нагрузки. На рис. 1 показаны конечно-элементные модели адаптера и кронштейна.

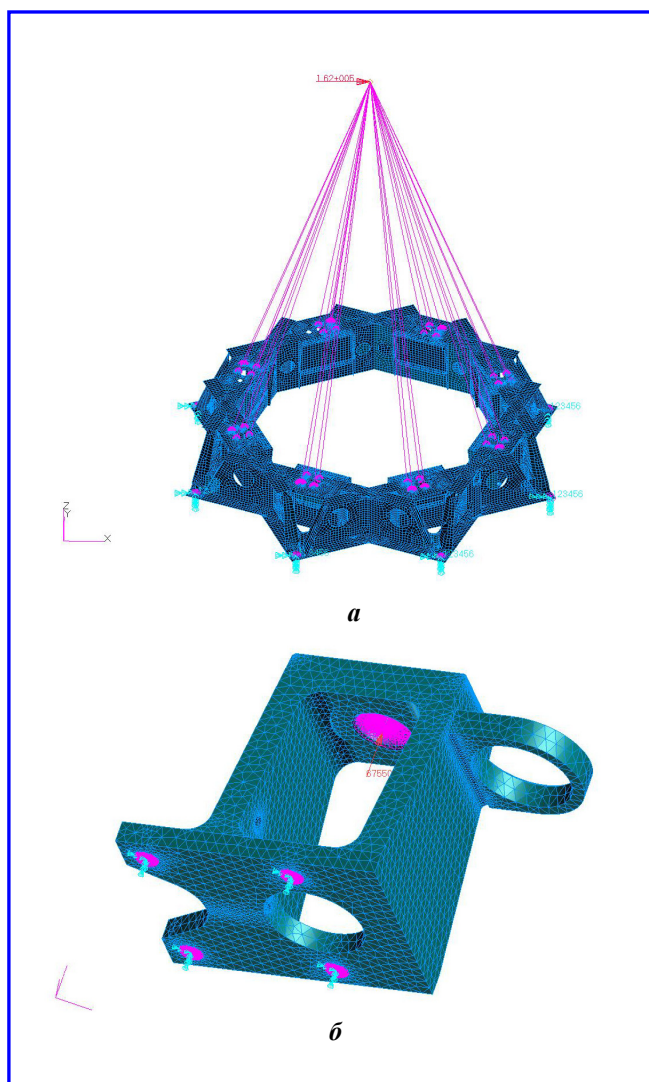


Рис. 1. Общий вид конструкции:  
а – адаптер; б – кронштейн

При расчёте адаптера нагрузка от инерционных сил, действующих на центр масс КА, передаётся через жёсткие связи непосредственно на места крепления кронштейнов. Податливость кронштейнов крепления в данном расчёте не учитывалась.

При расчёте кронштейна на прочность в качестве точек опоры выступают узлы соединения кронштейна и адаптера, а к месту крепления кронштейна и КА приложена осевая сила. Податливость адаптера в данном расчёте не учитывалась.

Проведём сравнительный анализ жёсткостей адаптера и кронштейнов при продольной (вдоль оси *OZ*) и поперечной (вдоль оси *OY*) нагрузках в 1000 Н (табл. 1).

Из данных таблицы следует, что соотношение жёсткостей кронштейна и адаптера составляют 1,23 в продольном направлении и 1,60 в поперечном направлении, т. е. значения жёсткости адаптера и суммарная жёсткость кронштейнов сопоставимы, а значит отдельный расчёт некорректен.

#### Расчёт с использованием суперэлементов

При расчёте конструкции методом суперэлементов сначала происходит сокращение размерности задачи за счёт исключения внутренних степеней свободы (редукция). Данная процедура заключается в выражении перемещений внутренних узлов конструкции через перемещения внешних узлов. Полученные таким образом матрицы жёсткости, масс и демпфирования называются редуцированными. Затем проводятся совместный расчёт на прочность редуцированной системы и восстановление решения для элементов конструкции.

Рассматриваемая задача наглядно демонстрирует преимущества применения суперэлементов – для восьми идентичных кронштейнов матрица жё-

сткости редуцируется лишь единожды, что существенно снижает время счёта. В качестве внешней структуры (части конструкции, не подлежащей редукации) был выбран фрагмент гермокорпуса и узлы закрепления модели, остальная часть редуцировалась к одному суперэлементу адаптера и 8 суперэлементам кронштейнов. Выбор в качестве суперэлементов различных элементов конструкции позволяет максимально снизить размерность решаемой задачи и количество матриц жёсткости, подлежащих редукации, а также исключить из редуцированной части точки опоры и приложения сил, что согласно [1] положительно сказывается на точности расчёта.

Каждый из суперэлементов кронштейна содержит 5 внешних узлов (30 степеней свободы), суперэлемент адаптера – 32 (192 степеней свободы), а внешняя структура насчитывает 41 424 степеней свободы. Таким образом, размерность решаемой задачи в суперэлементной постановке свелась к 41 856, что более чем в 100 раз меньше размерности полной задачи.

#### Сравнение результатов

Для верификации результатов расчёта модели с применением суперэлементов используем результаты, полученные на полной конечно-элементной модели. Отметим, что сравниваемые модели имеют идентичную сетку разбиения и параметры нагружения, поэтому отличие в результатах будет характеризовать только влияние процедуры редуцирования. На рис. 2 представлены картины напряжённого состояния адаптера при транспортировании (продольная нагрузка 11907 Н, поперечная 62755 Н) для полной и суперэлементной моделей, а на рис. 3 – в наиболее нагруженном кронштейне.

Таблица 1

Конструкция	Перемещения при продольной нагрузке, мм	Продольная жёсткость, Н/м	Перемещения при поперечной нагрузке, мм	Поперечная жёсткость, Н/м
Адаптер	3,09E-03	3,24E+08	1,23E-02	8,13E+07
Кронштейны	2,01E-02	3,98E+08*	9,29E-02	1,30E+08**

\* Суммарная продольная жёсткость восьми кронштейнов

$$C_{кр.общ} = 8C_{кр} = 8 \frac{1000}{U_{кр}}$$

\*\* Суммарная поперечная жёсткость восьми кронштейнов

$$C_{кр} = \sum_{i=1}^8 C_i = \sum_{i=1}^8 \frac{1000}{U_i}$$

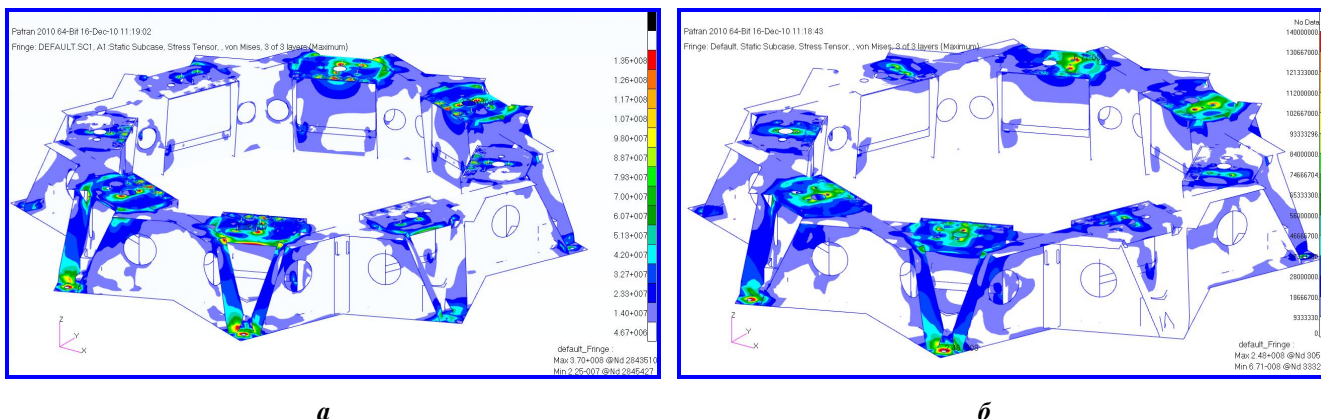


Рис. 2. Напряжения в адаптере (МПа): а – полная модель; б – суперэлементная модель

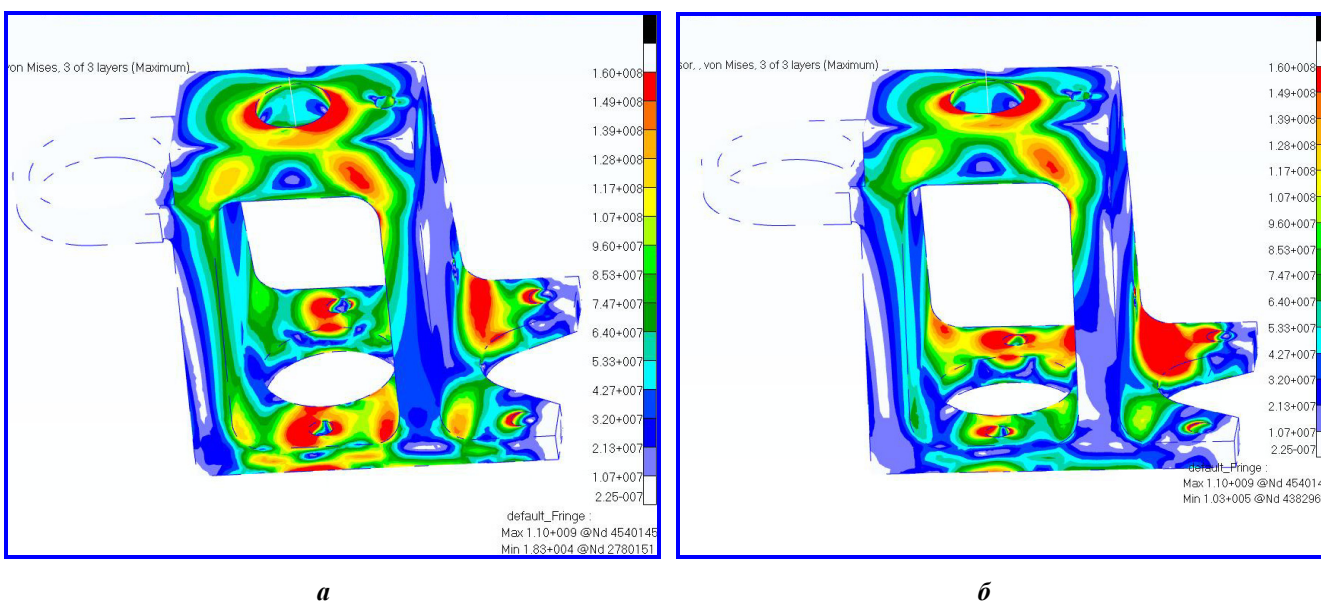


Рис. 3. Напряжения в кронштейне (МПа): а – полная модель; б – суперэлементная модель

Результаты сравнения по максимальным напряжениям и перемещениям сведены в табл. 2.

Из полученных результатов видно, что отличия результатов суперэлементной модели от полной не превышают 6% по напряжениям; 4% по перемещениям. Это не превышает погрешность задания исходных данных и решения без применения суперэлементов.

Отметим, что время решения на компьютере 2x Intel Xeon X5650 2,66 GHz, 24Gb RAM составило:

– в суперэлементной постановке 1 ч (были осуществлены редуцирование, совместный расчёт и рестарт решения);

– в полной постановке 10 ч (при этом был внесён ряд изменений в файл конфигурации Nastran, увеличивающих объём используемой физической и виртуальной памяти).

Эти цифры говорят сами за себя.

Таблица 2

Максимальные значения	Модель		Разница, %
	Полная	Суперэлементная	
Напряжения, МПа			
в адаптере	128	120	6,25
в кронштейне	220	230	4,3
Перемещения, мм			
в адаптере	2,24	2,18	2,67
в кронштейне	1,24	1,28	3,12

### Выводы

Показано, что учёт жёсткости адаптера оказывает существенное влияние на напряжения в кронштейнах и, следовательно, необходимо проводить их совместный расчёт.

Построена суперэлементная модель, включающая адаптер и 8 кронштейнов.

Проведена верификация результатов суперэлементного расчёта с результатами, полученными на полной конечно-элементной модели. Максимальная погрешность составляет 6%, что меньше погрешности исходных данных и модели.

Время счёта составило 1 ч в суперэлементной модели вместо 10 ч при прямом счёте.

Применение метода суперэлементов позволяет за приемлемое время проводить совместные расчёты механических систем большой размерности, которые невозможно провести на имеющемся ап-

паратном обеспечении без снижения числа степеней свободы задачи.

Методические подходы к моделированию конструкций КА на базе суперэлементов, применённые в данной работе, позволяют внедрить этот метод в расчётную практику предприятия.

### Литература

1. MSC.Nastran. Superelement User's Guide // MSC.Software Corporation. – 2001. – 72 с.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов / Р. Галлагер; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 428 с.
3. Вороненок Е. Я. Метод редуцированных элементов для расчёта конструкций / Е. Я. Вороненок, О. М. Палий, С. В. Сочинский. – Л. : Судостроение, 1990. – 224 с.
4. Постнов В. А. Метод суперэлементов в расчётах инженерных сооружений / В. А. Постнов. – Л. : Судостроение, 1979. – 228 с.

Поступила в редакцию 23.12.2010

*Елена Александровна Канунникова*, канд. тех. наук, начальник лаборатории.  
*Илья Александрович Мецихин*, инженер.  
Т. 366-33-61, e-mail: vniiem@vniiem.ru.