

Мургазин В.М., Малыхина О.И., Кирпичёв В.А.

**ОБОБЩЁННЫЙ ПОДХОД ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
РАСЧЁТА КОРПУСНЫХ УСИЛИЙ БАЛОЧНЫХ И ОБОЛОЧЕЧНЫХ
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

При создании модели полезного груза (ПГ) могут быть использованы различные методики. Самыми распространёнными из них является разработка подробной конечно-элементной модели и создание упрощённой балочной модели.

Балочная модель является наиболее простой для использования. Применение для проведения расчётов балочных моделей ПГ характеризуется низким уровнем трудозатрат как при создании объединённой конечно-элементной модели РН-ПГ, так и при обработке полученных результатов. Сама модель содержит сравнительно небольшое число степеней свободы, что благоприятно отражается на скорости проведения расчётных работ. Такая модель в явном виде содержит параметры массово-жесткостных характеристик изделия, но не раскрывает детальных конструктивных особенностей изделия и может отвечать некоторым требованиям конфиденциальности при необходимости обмена данными между организациями-соисполнителями.

За время эксплуатации ракет-носителей (РН) типа «Союз» была накоплена достаточно большая база данных по результатам расчёта нагрузок на типовые космические аппараты дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), модели которых были разработаны по балочной схеме, что значительно облегчает анализ адекватности результатов современных КА ДЗЗ, имеющих аналогичную конструкцию. Однако, при всех указанных выше достоинствах балочная модель является всё же значительно упрощённой моделью. Применение её в расчётах не позволяет учитывать ряд особенностей конструкции, наличие местных динамических эффектов и возможное их влияние на динамическое нагружение конструкции, возможность появления внутренних резонансных явлений. Кроме того, разработка такой модели является трудоёмким и ответственным этапом проектирования, требующим от разработчика достаточно высокой квалификации. В этой связи в последнее время данные упрощённые модели используются достаточно редко и уступают место подробным конечно-элементным моделям.

Подробная конечно-элементная модель любого КА ДЗЗ содержит большое число конечных элементов различного типа. Чаще всего к ним относятся:

- одномерные балочные элементы, моделирующие ферменные конструкции и другие силовые элементы;
- двумерные элементы, моделирующие тонкие оболочки;
- массовые элементы, моделирующие приборы;
- одноступенные или многоступенные упругие элементы;
- жёсткие элементы и т.д.

Большое число элементов, а, следовательно, и большое число степеней свободы является необходимым условием высокой точности при проведении расчётов методом конечных элементов, но вместе с тем это является и источником ряда особенностей, возникающих при работе с подобными моделями.

К таким особенностям, влияющим на точность моделирования, относятся:

- высокая вероятность возникновения ошибок и неточностей при разработке моделей, а также сложность их выявления и контроля адекватности модели;
- затруднения при объединении с динамической моделью РН, обусловленные высокой вероятностью появления идентичной нумерации узлов и элементов объединяемых моделей;
- значительное время на проведение расчёта, что особенно актуально в совокупности с большим числом расчётных случаев;
- большой объём выходных данных, который делает весьма трудоёмким обработку полученных результатов и ведёт к необходимости подробного описания конечно-элементной модели, выделение областей интереса, формирование соответствующих групп элементов и узлов в модели или списков номеров элементов и узлов в описательной документации.

Учитывая указанные выше факторы, изначально разработанная подробная оболочечная конечно-элементная модель КА ДЗЗ часто впоследствии подвергается значительному упрощению. Среди методов, которые могут быть использованы для упрощения (редукции) модели КА ДЗЗ, можно выделить: метод статической конденсации, метод динамической редукции (Крейга-Бэмптона [1]), построение механических аналогов [2]. Проведение процедуры редуцирования позволяет снизить размерность расчётной модели. Редуцированная модель позволяет достаточно точно моделировать динамическое поведение конструкции и при этом не содержит данных о конструкции изделия.

Достаточно часто конструкция КА ДЗЗ состоит из отдельных блоков (рис.1), разделяемых по своему функциональному назначению и взаимному расположению. Весьма важными характеристиками при проведении прочностного расчёта являются

нагрузки, рассчитанные в сечениях, расположенных на стыке блоков КА ДЗЗ. По этой причине редукция часто проводится к узлам, расположенным на стыке блоков КА ДЗЗ, а нагрузки рассчитываются в элементах, моделирующих межблочные связи с помощью упругих одноступенных или многоступенных пружин, обладающих заданной жёсткостью. При проведении расчётов с использованием полноразмерной конечно-элементной модели нагрузки в первую очередь выводятся в аналогичных элементах.

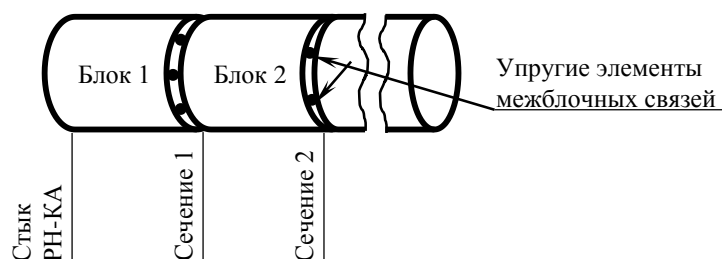


Рис.1. Схема модели КА ДЗЗ

Данное преобразование результатов расчёта, считая деформацию самих сечений малыми, для проекций перерезывающих сил Q_z , Q_y и продольной силы N проводится с помощью простого суммирования соответствующих силовых факторов по всем элементам рассматриваемого сечения:

$$Q_z = \sum_e (Q_z^e), \quad Q_y = \sum_e (Q_y^e), \quad N = \sum_e (N^e).$$

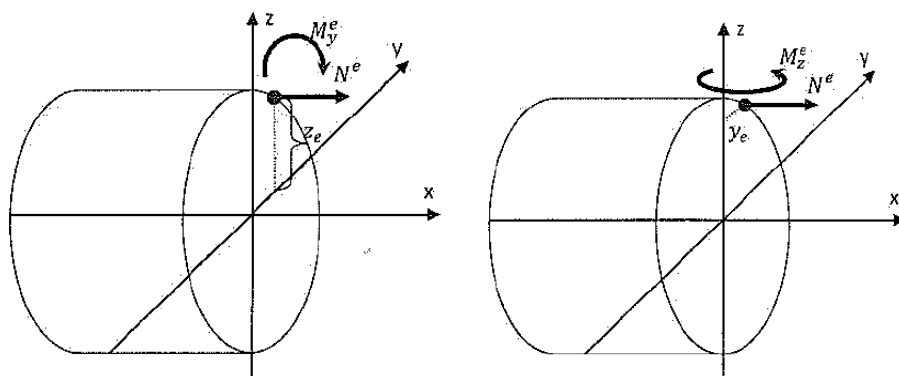


Рис.2. Определение суммарных изгибающих моментов в центральной точке сечения

В соответствии с рис. 2 находим проекции изгибающих моментов M_z и M_y :

$$M_z = \sum_e (M_z^e - N^e \cdot y^e), \quad M_y = \sum_e (M_y^e + N^e \cdot z^e).$$

Можно заметить, что в приведённых выше формулах для изгибающих моментов составляющие, содержащие моменты растягивающих сил, соответствуют известным

аналитическим выражениям моментов сил относительно координатных осей [3], что является подтверждением их корректности.

В приведённых выше формулах нижний индекс обозначает название оси, соответствующей рассматриваемой проекции силового фактора; верхний индекс обозначает номер упругого элемента; знак суммы обозначает суммирование по всем упругим элементам рассматриваемого сечения.

Решение задачи преобразования результатов расчёта нагрузок, полученных по оболочечной модели КА ДЗЗ к нагрузкам в центре интересующих сечений, позволяет:

1. Получить результаты расчёта по оболочечной модели КА ДЗЗ в виде, сопоставимом с результатами расчётов, проведённых ранее в балочном виде. Это позволяет проводить сравнительный анализ влияния конструктивных изменений КА ДЗЗ, а также выявлять наличие ошибок, допущенных в процессе конечно-элементного моделирования.

2. Представить результаты в более компактном виде, что позволяет оперативно выявлять ошибки и неточности расчётов путём анализа соответствия полученных результатов ожидаемым с точки зрения физической обоснованности.

Библиографический список

1. Жидяев, К.А. Использование метода динамического синтеза (Крейга-Бемптона) в MSC.NASTRAN [Текст] /К.А. Жидяев // Методические материалы MSC.Software, 1999. – 23 с.

2. Кармишин, А.В. Основы отработки прочности ракетно-космических конструкций. [Текст] / А.В. Кармишин, А.И. Лиходед, Н.Г. Паничкин, С.Н. Сухинин. – М.: Машиностроение, 2007. – 480 с.

3. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики. Часть I. Статика. Кинематика. [Текст] / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: Высшая школа, 1964. – 432 с.