

УДК 621.383

## Инженерный анализ конструкции фотоприемного устройства с интегрированной микрокриогенной системой

Д. Н. Шимко

*Проведены моделирование и инженерный анализ конструкции фотоприемного устройства (ФПУ) с интегрированной микрокриогенной системой. Для подготовки анализа была создана трехмерная модель ФПУ. Над подготовленной трехмерной вычислительной моделью был проведен инженерный расчет. Сделан обзор набора инструментария для инженерного анализа, который был применен в работе.*

PACS: 02.70.-c

*Ключевые слова:* анализ, моделирование, фотоприемное устройство, конструкция.

### Введение

В настоящее время бурно развивается новая методология научных исследований — математическое моделирование и вычислительный эксперимент. Сущность этой методологии состоит в замене исходного объекта его математической моделью и исследовании ее современными вычислительными средствами.

Широкое применение математических методов позволяет поднять общий уровень теоретических исследований, дает возможность проводить их в более тесной связи с экспериментальными исследованиями. Математическое моделирование может рассматриваться как новый метод конструирования, проектирования, который сочетает в себе многие достоинства как теории, так и эксперимента. Работа не с самим объектом, а с его моделью дает возможность безболезненно, относительно быстро и без существенных затрат исследовать его свойства и поведение в любых ситуациях (преимущества теории). В то же время вычислительные (компьютерные) эксперименты с моделями объектов позволяют, опираясь на возможности современных вычислительных методов и технических инструментов программирования, подробно и глубоко изучать объекты, что недоступно или дорого для чисто теоретических подходов (преимущества эксперимента).

Основу математического моделирования составляет триада модель—алгоритм—программа.

Математические модели реальных исследуемых процессов сложны и включают системы нелинейных дифференциальных уравнений. Ядро математической модели составляют уравнения с частными производными.

*На первом этапе* вычислительного эксперимента строится модель исследуемого объекта, отражающая в математической форме важнейшие его свойства — законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям, характеристики, параметры и свойства.

*Второй этап* связан с выбором вычислительного алгоритма для реализации модели на компьютере. Необходимо получить искомые величины с заданной точностью на имеющейся вычислительной технике. Вычислительные алгоритмы должны не искажать основные свойства модели и, следовательно, исходного объекта, они должны быть адаптирующимися к особенностям решаемых задач и используемых вычислительных средств.

Изучение математических моделей проводится методами вычислительной математики, основу которых составляют численные методы решения задач математической физики — краевых задач для уравнений с частными производными.

*На третьем этапе* используется программное обеспечение для реализации модели и алгоритма на компьютере. Программный продукт должен учитывать важнейшую специфику математического моделирования, связанную с использованием иерархии математических моделей, многовариантностью расчетов.

Опираясь на триаду модель—алгоритм—программа, исследователь получает в руки универсальный, гибкий и недорогой инструмент, который вначале отлаживается, тестируется и калибруется на решении содержательного набора пробных задач. После этого проводится широкомасштабное исследование математической модели для получе-

---

Шимко Дмитрий Николаевич, ведущий специалист.  
ФГУП «НПО "Орион"».  
Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.  
Тел. 8 (916) 981-39-53. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 16 октября 2009 г.

---

© Шимко Д. Н., 2011

ния необходимых качественных и количественных свойств и характеристик исследуемого объекта.

В данной работе был проведен инженерный анализ конструкции фотоприемного устройства с помощью вычислительного эксперимента. Первый этап математического моделирования был реализован с использованием системы проектирования SolidEdge, в котором была создана трехмерная модель конструкции ФПУ, и дополнительно с помощью программы Femap указаны ее основные физические параметры. На втором этапе в качестве вычислительного алгоритма инженерного анализа был выбран метод конечных элементов, наиболее эффективный и повсеместно применяемый для анализа конструкций. Метод конечных элементов применяется в своей реализации на третьем этапе с помощью системы инженерного анализа NX Nastran.

Расчет инженерных характеристик был проведен над достаточно точной трехмерной моделью конструкции ФПУ. Было произведено разбиение данной модели на конечные элементы, затем к модели были приложены все исходные ограничения, нагрузки, ускорения, температурные распределения и другие известные параметры. Также указаны материалы каждого из элемента конструкции (два вида сплава, керамика) с их физическими характеристиками для расчетной модели. Данный расчет позволил до стадии пробного изготовления и тестирования оценить оптимальность конструкции и ее соответствие предъявляемым требованиям по прочности и тепловым свойствам, а также провести некоторые эксперименты над конструкцией для достижения оптимального варианта.

### Обзор инструментария

Для инженерного анализа были созданы объемные модели конструкции ФПУ в системе SolidEdge, взятой на вооружение предприятием для трехмерного проектирования и расчетов.

В работе были использованы следующие возможности системы трехмерного конструирования SolidEdge:

- создание трехмерных моделей проектируемых деталей;
- создание файлов трехмерных моделей типовых элементов для различных проектов;
- создание из разработанных моделей трехмерных сборочных конструкций, отражающих реально проектируемые сборки;
- разработка проектов трехмерных конструкций для данного типа задач с помощью эскизов сечения и монолитных элементов;
- прямое редактирование импортированной и существующей геометрии с использованием средств анализа и исправления геометрии.

Инженерный расчет разработанных трехмерных моделей деталей и сборок проводился с помощью системы NX Nastran.

Для расчетов применялись следующие возможности системы инженерного анализа NX Nastran:

- импортирование файлов типовых элементов для расчетов из системы конструирования SolidEdge и других систем трехмерного моделирования;
- создание новых и использование инструментов редактирования существующих, в том числе импортированных трехмерных моделей проектируемых конструкций для реальных расчетов деталей и сборок;
- использование типовых алгоритмов расчета нагрузок, вибрационных свойств, ударных воздействий, тепловых режимов и т. д.;
- анализ статике и динамики конструкций, теплопередачи и возможности оптимизации конструкций с учетом закреплений, ограничений, нагрузок, температур и физических параметров предполагаемых в проекте материалов;
- анализ вибрационных и ударных воздействий на конструкцию, нагрузок, учет деформаций, напряжений, смещений и т. п.;
- анализ тепловых режимов работы конструкции в реальных условиях, т. е. с учетом внешних тепловых нагрузок, устройств охлаждения и т. д.;
- представление результатов расчетов в виде наглядных трехмерных моделей с отображаемыми деформациями, зонами нагрузок и распределениями температур, а также в виде графиков.

### Исследуемая модель

При инженерном анализе трехмерной модели было учтено, что различные части конструкции изготавливаются из различных материалов. При конструировании данного ФПУ были использованы материалы: сталь 12X18H10T, керамика ВК94-1, сплав 29НК-В4. На этапе разбиения модели на конечные элементы для последующего вычисления различным узлам конструкции были соответственно материалам присвоены различные физические свойства и характеристики. Например, для вибрационного анализа и удара указывались плотность материала, упругость, жесткость, для термического анализа — такие параметры как теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплового расширения.

Модель исследовалась на устойчивость к вероятному максимальному удару 75g. Возможная вибрация, подлежащая проверке конструкции ФПУ, должна находиться в спектральной полосе от 10 до 500 Гц, при этом максимальная вибрация подразумевалась равной 5g.

### Подготовка и выполнение вычислительного эксперимента

Подготовка вычислительного эксперимента является нетривиальной задачей. Множество программных пакетов значительно упрощают и ускоряют этот процесс, но в нем остается множество тонкостей, связанных с техническими сторонами применяемых программ, особенностей используемого моделирования, а также технических проблем с самими моделями.

На первом этапе создания трехмерной модели необходимо уяснить насколько модель должна точно и полно соответствовать предполагаемому изделию. Для упрощения и ускорения создания трехмерного объекта, а также ускорения вычисления на данном этапе в модели можно допустить некоторые упрощения. Например, не прорисовывать мелкие и незначительные детали, не определяющие конструкцию элемента, мелкие отверстия, совсем тонкие части, не влияющие на прочность конструкции и не служащие проводниками тепла. Предполагается, что эти незначительные детали не могут повлиять на результаты вычисления, а иногда могут воспрепятствовать его скорости и точности и потому могут быть опущены. Тем не менее реалистичность эксперимента при этом снижается, но экономия сил и времени вычисления при этом оказываются в соответствии с точностью.

Другой проблемой на первом этапе является некоторое несоответствие поведения объектов в физической реальности и в виртуальном пространстве компьютера. В программной среде моделирования могут существовать такие нефизические явления, как абсолютно тонкие плоскости и поверхности, пересечение тел, разрывы в поверхностях и пр. Эти объекты могут появляться в модели ошибочно и случайно, поэтому следует следить за проведением различных тестов, иначе на третьем этапе эксперимент может потерпеть неудачу.

Одно из основных препятствий на втором этапе — рациональное разбиение модели на конечные элементы. Трехмерная модель конструкции содержит как крупные элементы, состоящие из обширных правильных фигур и ровных поверхностей, так и мелкие, округлые и неровные. Для крупных элементов можно выбрать разбиение на крупные конечные элементы, а для неровных — мелкие. Выбор правильного разбиения может значительно повлиять на точность результата эксперимента и время его выполнения. Недопустимо разбивать всю конструкцию на одинаковые конечные элементы. Это связано с тем, что если разбить на крупные конечные элементы всю конструкцию ФПУ, то ее

расчет в мелких и неровных частях будет крайне неточен, а также могут произойти ошибочное разбиение и срыв опыта с затратой большого количества времени. Если вся конструкция будет разбита на мелкие конечные элементы, то в крупных частях модели это не повысит точности результата, а в общем для вычислительного эксперимента значительно увеличит время расчета — от нескольких раз до нескольких десятков раз.

Другая трудность — присвоение различным частям конструкции ФПУ различных физических характеристик в соответствии с материалами, из которых они состоят. Кроме указания самих параметров следует внимательно подойти к соединению частей между собой. Механические и термальные воздействия должны передаваться между ними, иначе расчет будет неверным.

На третьем этапе наибольшее значение имеет материальный вопрос. Мощность аппаратной поддержки эксперимента должна быть достаточной, чтобы он мог быть не только реализован, но и выполнен в приемлемые сроки. На этом этапе скорость окончательного расчета конструкции ФПУ сильно зависит от подготовки ее модели на предыдущих этапах. Время, которое потребуется компьютеру для вычисления результата, зависит не только от его параметров и мощности, но и от упрощений модели, сделанных на первом этапе, и оптимальности разбиения на конечные элементы на втором этапе. Нужно быть готовым к тому, что даже на современных мощных рабочих компьютерных станциях вычисления со средней точностью могут занять до нескольких часов.

### Результаты исследования

Исследованы вибрационные свойства конструкции ФПУ с интегрированной микрокриогенной системой.

- Рассчитаны собственные частоты и собственные формы модели. Предварительно к модели ФПУ были предъявлены конструкционные ограничения, отражающие реально существующие в проектируемой конструкции. Также на подготавливаемой модели подробно показаны крепления ФПУ к микрокриогенной системе. Было проверено, находятся ли собственные частоты разрабатываемого ФПУ в диапазоне спектральной полосы внешнего воздействия на ФПУ во избежание появления резонанса в случае совпадения.

- Получены результаты: диапазон собственных частот, определенный при вычислении, составлял от 2300 Гц до 10 кГц и далее в область высоких частот. Этот диапазон не пересекается с возможным диапазоном вибраций, заданным по условиям и равняющийся спектральной полосе 10—500 Гц.

Несовпадение диапазонов показывает эффективность данной конструкции в устойчивости к вибрациям данного вида, так как не произойдет резонанса частоты внешнего воздействия с собственной частотой, что может привести к большим деформациям и значительным нагрузкам.

#### Первые десять собственных частот конструкции ФПУ

Номер моды	Частота моды, Гц
1.....	2361,50
2.....	2399,79
3.....	4761,18
4.....	4833,87
5.....	5036,10
6.....	5217,20
7.....	6150,20
8.....	6391,26
9.....	10282,23
10.....	10310,01

Пример деформации конструкции на одной из своих собственных частот (мода 5) в разрезе приведен на рис. 1.

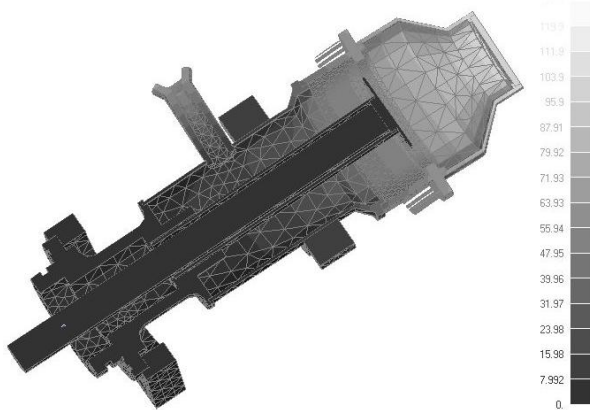


Рис. 1. Деформации конструкции на одной из своих собственных частот (мода 5) в разрезе

• Оценена прочность конструкции, рассмотрены спектр отклика и деформация конструкции при ударном воздействии. При возможном ударе в 75g конструкция ФПУ не подвергается критическим перегрузкам и деформациям (рис. 2).

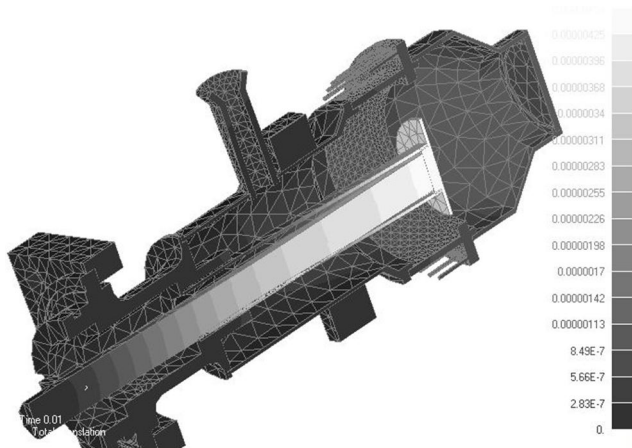


Рис. 2. Конструкция ФПУ при возможном ударе в 75g, не подвергавшаяся критическим перегрузкам и деформациям

• Проведен термический анализ ФПУ на предмет распределения температур в рабочих режимах, чтобы проиллюстрировать возможности данного анализа в вычислениях различных случаев использования ФПУ и в соответствующих задачах.

Распределение температур на модели конструкции ФПУ в рабочем режиме приведено как пример на рис. 3.

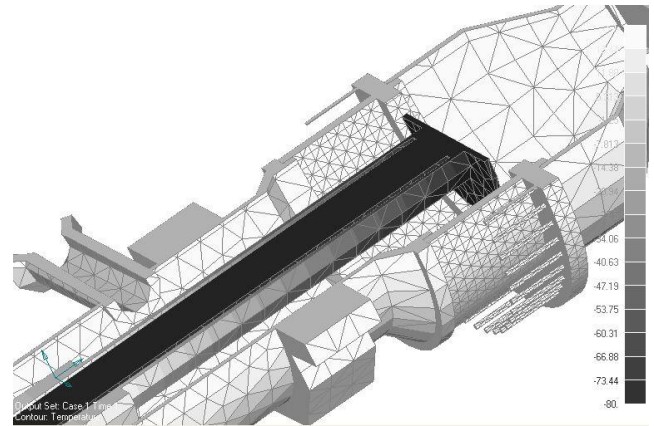


Рис. 3. Распределение температур на модели конструкции ФПУ в рабочем режиме

• Оценена скорость производимого вычисления на рабочих станциях. На компьютерах с частотой процессора 2,2 ГГц, оперативной памятью 1 Гб вычисления протекали от 0,5 ч (собственные частоты, тепловое исследование) до 1,5 ч (ударное воздействие).

## Заключение

Инженерный анализ конструкции ФПУ позволяет еще до изготовления опытных образцов оценить механическую и тепловую оптимальность конструкции и внести необходимые изменения для увеличения прочности и устойчивости к нагрузкам, ударным воздействиям и тепловым режимам. Моделирование конструкции и проверка их математическими алгоритмами имитации физических процессов дают возможность повысить экономическую эффективность проектирования конструкций, раньше обнаруживать недостатки и недочеты в проекте и исправлять их в самом начале, избегая дорогостоящего изготовления большого числа опытных образцов. Инструментарий для инженерного анализа может быть различным, используемый набор является одним из самых эффективных и удобных, предоставляя широкие возможности как в создании и подготовке проектных моделей конструкций, так и в расчете, исследовании проверяемых моделей в широком диапазоне физических воздействий как механических, так и термальных.

## Л и т е р а т у р а

1. Рычков С. П. MSC.visualNASTRAN для Windows. — М.: ИТ Пресс, 2004.
2. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. — М.: ДМК Пресс, 2003.
3. Хорри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. — М.: Мир, 1981.

## Engineering analysis of photo-receiving device's construction with micro cooler

*D. N. Shimko*

Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*Modeling and engineering analysis of photo-receiving device's construction with micro cooler have realized. For analyze, 3-dimension model of photo-receiving device in details of its construction was preparing. At the prepared computing model engineering valuation has done. Review of engineering analysis tool suit that was employ in this work has presented.*

PACS: 02.70.-c

*Keywords:* modeling, analysis, photo-receiving device, construction.

Bibliography — 3 references.

*Received October 16, 2009*