

С.Д. Васильков, Н.А. Демкович, Е.И. Яблочников

**Методические рекомендации  
по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине  
«ИПИ-технологии в приборостроении»**



Санкт-Петербург

2014

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский национальный исследовательский  
университет информационных технологий, механики и оптики»

С.Д. Васильков, Н.А. Демкович, Е.И. Яблочников

**Методические рекомендации  
по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине  
«ИПИ-технологии в приборостроении»**

Санкт-Петербург

2014

Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ по дисциплине «ИПИ-технологии в приборостроении». Сост. С.Д. Васильков, Н.А. Демкович, Е.И. Яблочников - СПб: Университет ИТМО, 2014. - 29 с.

Методические рекомендации являются частью комплекса программы «ИПИ-технологий в приборостроении», применяемые в технической и технологической подготовке приборов и систем.

Пособие содержит комплекс базовых работ по созданию 3D-моделей в САД-системе, виртуальному моделированию физических процессов (САЕ-системы), анализу и моделированию бизнес-процессов, использованию аддитивного оборудования, оформлению конструкторской документации, разработке технологических процессов, техническому контролю изделий, построению баз данных, применению PDM-системы.

Лабораторные работы методических рекомендаций относятся к междисциплинарному курсу «ИПИ-технологии в приборостроении», который является частью общепрофессионального цикла вариативной части профессионального цикла основной образовательной программы «Нанотехнологии в волоконной оптике» подготовки магистров по направлению 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

© Университет ИТМО, 2014

© С.Д. Васильков, Н.А. Демкович, Е.И. Яблочников, 2014

## Оглавление

Введение.....	5
1. Проектирование 3D-моделей в САД-системе.....	6
Лабораторная работа 1 « Разработка САД-модели изделий на основе использования эскизов и унифицированных шаблонов».....	9
Лабораторная работа 2 « Разработка САД-модели изделий на основе использования базовых примитивов».....	11
2. Инженерный анализ и комплексное виртуальное моделирование физических процессов в изделии .....	13
Лабораторная работа 3 «Прочностной расчет деталей приборов с использованием метода конечных элементов» .....	13
Лабораторная работа 4 «Исследование гравитационных деформаций узла оптического прибора».....	17
Лабораторная работа 5 « Исследование термомеханических деформаций деталей и узлов точных приборов с целью проведения оптимизационного реверс-инжиниринга» .....	18
Лабораторная работа 6 «Исследование температурных деформаций узла оптического прибора с целью проведения оптимизационного реверс-инжиниринга».....	22
Лабораторная работа 7 «Исследование термоаббераций оптических систем, возникающих в процессе механической обработки заготовок».....	24
Лабораторная работа 8 «Исследование эффекта тепловой линзы в лазерной среде для контроля и управления параметрами оптической системы» .....	26
Критерии оценивания лабораторных работ.....	28
Рекомендованная литература .....	29

## **Введение**

Данные методические рекомендации предназначены для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» в общепрофессиональном цикле вариативной части профессионального цикла основной образовательной программы «Нанотехнологии в волоконной оптике». В настоящее время в технологической подготовке производства (ТПП) используется большой комплекс компьютерных систем для решения практически всех задач подготовки производства. Многие из этих систем являются сложными и носят интеллектуальный характер. Поэтому магистры должны быть подготовленными к эффективному участию в ТПП. Для этого необходимо обладание соответствующими компетенциями как в области технологии приборостроения, так и в области информационных технологий (ИТ) для проектирования приборостроительных изделий и их инженерный анализ, в том числе полимерной оптической.

Совершенствование ТПП основано на применение современных CAD/CAE-систем, позволяющие разрабатывать и модифицировать изделия с дальнейшим моделированием различных нагрузок. Существует много различных подобных систем и в данной работе предлагается использовать CAD-систему CATIA и CAE-систему OOFELIE (ранее Samcef Field).

В данное пособие включено 8 лабораторных работ (6 основных и 2 дополнительных), направленных на изучение в первую очередь базовых функций проектирования 3D-моделей и на исследование различных нагрузок на изделия.

Основной задачей данного пособия является получение умений и приобретение практических навыков по использованию современных систем проектирования и инженерного анализа, применяемых в ТПП.

Учебно-методическое пособие разработано на основе следующей методики преподавания. Для каждого вида компьютерных систем предполагается изучение студентами теоретического материала и проведение компьютерных занятий в дисплейном классе. Теоретический материал изучается студентами самостоятельно по основному учебно-методическому пособию.

Организация учебного процесса по проведению лабораторных работ заключается в составлении индивидуальных планов для каждого студента и разработке графика выполнения лабораторных работ с учетом аудиторных и внеаудиторных занятий.

Данное учебно-методическое пособие по лабораторным работам составлено С.Д. Васильковым, Н.А. Демкович и Е.И. Яблочниковым.

# 1. Проектирование 3D-моделей в САД-системе

## Общие сведения

Трехмерная модель (3D-модель) объекта является пространственной компьютерной геометрической моделью, которая может включать в себя также набор атрибутов, описывающих объект. 3D-модели могут создаваться на различных этапах жизненного цикла изделия (ЖЦИ), упрощенная схема которого включает в себя следующие этапы:

- маркетинг;
- проектирование;
- технологическая подготовка производства;
- производство;
- реализация;
- эксплуатация;
- ремонт и обслуживание;
- утилизация.

Оставляя в стороне этап маркетинга, рассмотрим роль 3D моделей, начиная с этапа проектирования.

**Проектирование.** Этот этап обычно разделяют на концептуальное проектирование и рабочее (детальное) проектирование. При концептуальном проектировании формируются и уточняются технические требования к изделию, осуществляются поиск и выбор принципиальных решений, обеспечивающих требуемую функциональность. При рабочем проектировании выбранные концептуальные решения конкретизируются, определяются состав узлов и деталей, точные геометрические размеры изделия, а также используемые материалы, формируется конструкторская документация.

При трехмерном проектировании резко уменьшается число ошибок в проекте ввиду следующих причин:

- конструктор может наглядно видеть результат своей работы уже в процессе проектирования;
- виды чертежа формируются на основании модели автоматически и поэтому исключаются ситуации, когда информация в одном виде не соответствует другому;
- при проектировании сборочных единиц имеется возможность проверять собираемость и выявлять ошибки на уровне моделей.

Геометрию 3D-моделей можно использовать в задачах технологической подготовки производства (ТПП). К таким задачам можно отнести:

- проектирование сложных формообразующих изделий;
- моделирование процессов литья под давлением, различных внешних нагрузок с применением CAE-систем с целью выявления возможных дефектов и их последующего устранения, а также с целью экономии материала;
- формирование управляющих программ обработки сложнопрофильных изделий на станках с ЧПУ с применением CAM-систем;
- построение операционных эскизов при разработке технологических процессов.

Различают поверхностное (каркасно-поверхностное), твердотельное и смешанное (гибридное) моделирование. В лабораторных работах рассматривается только твердотельное моделирование.

При **поверхностном** моделировании сначала строится каркас – пространственная конструкция, состоящая из отрезков прямых, дуг окружностей и сплайнов, на которую в дальнейшем «натягиваются» поверхности.

**Твердотельная** модель представляет собой целостный объект, занимающий замкнутую часть пространства. При изменении в модели любого элемента будут изменяться все другие элементы, которые связаны с ним. В результате изменится форма твердого тела, но сохранится его целостность. Твердое тело строится следующими элементами: элементы вытягивания (полученные вытягиванием плоского эскиза перпендикулярно его плоскости); элементы вращения (полученные вращением плоского эскиза вокруг заданной оси); фаски; скругления; оболочки; ребра жесткости и др. Твердотельный объект строится путем последовательного «добавления» или «вычитания» элементов. Для работы с несколькими твердотельными объектами можно выполнять булевы операции объединения, вычитания и пересечения. Также есть возможность устанавливать параметрические зависимости между элементами твердого тела или нескольких тел.

При **гибридном** моделировании обеспечивается возможность одновременной работы с твердотельными объектами и с поверхностями. Гибридное моделирование позволяет сочетать все удобства твердотельного моделирования с возможностью построения объектов сколь угодно сложной геометрической формы.

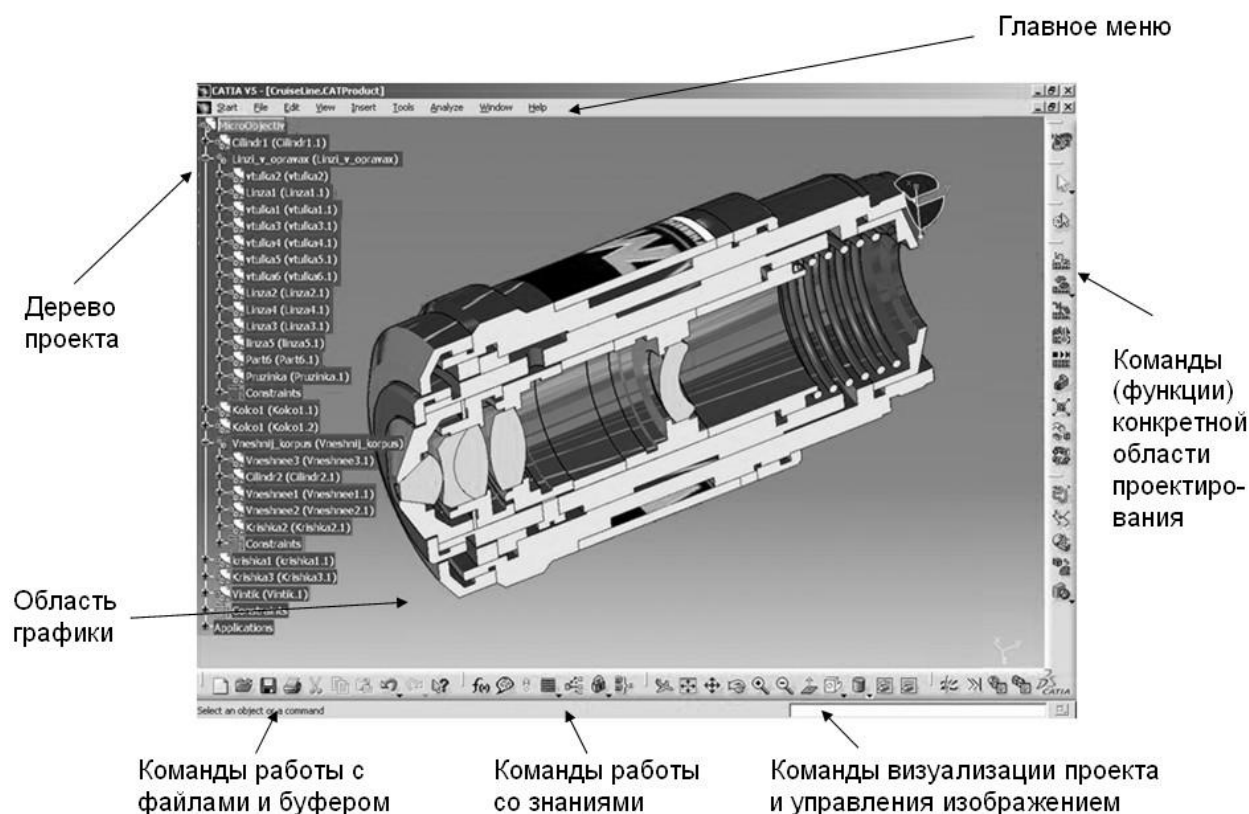
Одной из наиболее мощных CAD/CAM-систем является CATIA V5. Название CATIA является аббревиатурой от Computer Aided Three Dimensional Interactive Application, что можно (с учетом смысловых

акцентов) перевести как «компьютерный комплекс трехмерных интерактивных инженерных приложений».

Дерево проекта. Важным элементом представления информации проекта является дерево проекта. Оно содержит состав всех компонентов проекта в структурированном виде. Элементами дерева проекта являются:

- механические сборочные единицы и детали, геометрические компоненты деталей;
- чертежи, листы и виды чертежей;
- технологические процессы обработки на станках с ЧПУ (последовательность процедур и используемый инструмент);
- механические связи между элементами сборки (соосность, совмещение плоскостей, фиксация расстояний и др.);
- представление знаний – параметры, формулы, правила и базы правил;
- дополнительные средства описания проекта – 3D-аннотации, закладки, множества, сцены, гиперссылки, слайды, фильмы и др.

Экран системы CATIA V5 выглядит следующим образом:

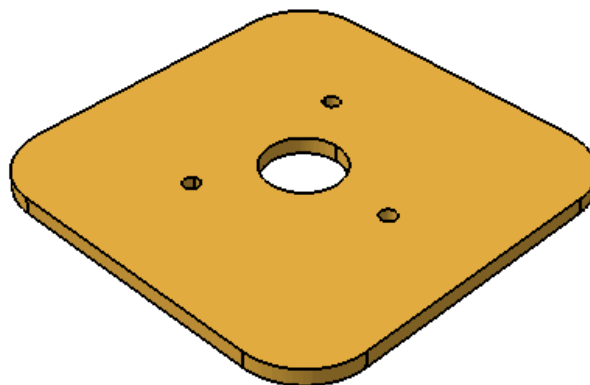
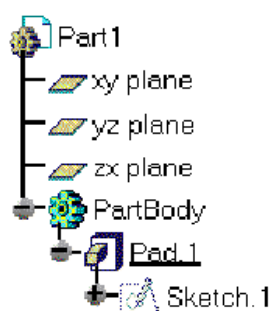


При этом расположение команд, показанное на рисунке, соответствует расположению по умолчанию. Впоследствии иконки с командами могут перемещаться пользователем на другие места экрана, скрываться и т.д.



Файл (документ) сборки в CATIA V5 имеет расширение CATProduct. Он включает в себя такие ком-поненты, как CATPart (детали), CATProduct (подборки), файлы с данными во внешних форматах (IGES, STEP, VRML и др.) и т.д. Эти компоненты структурированы в дереве спецификации.

## Лабораторная работа 1 «Разработка САD-модели изделий на основе использования эскизов и унифицированных шаблонов»



### Цель работы

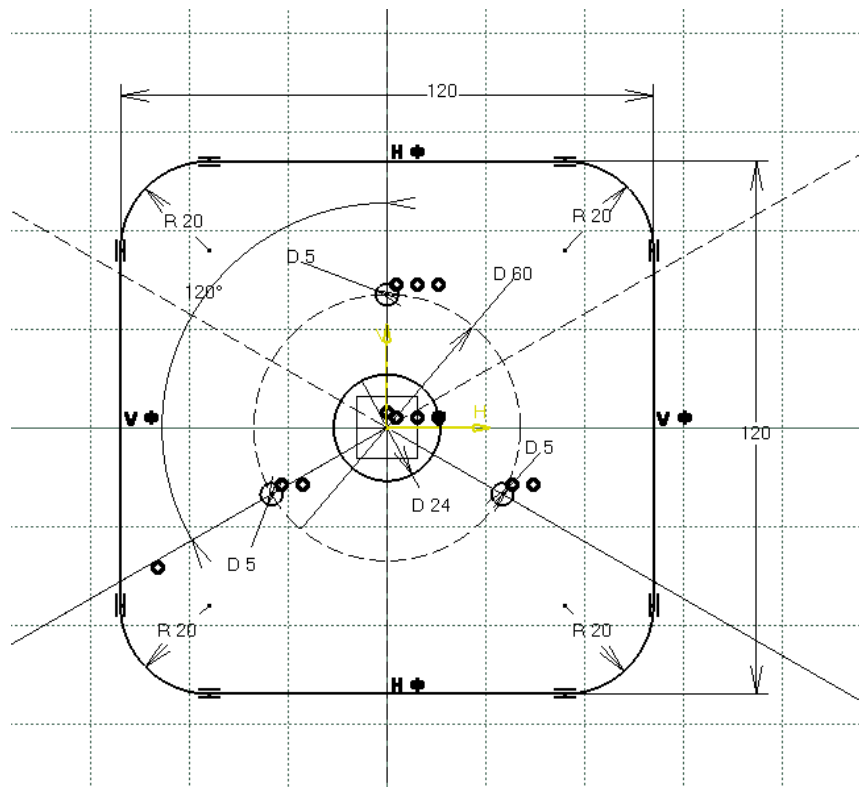
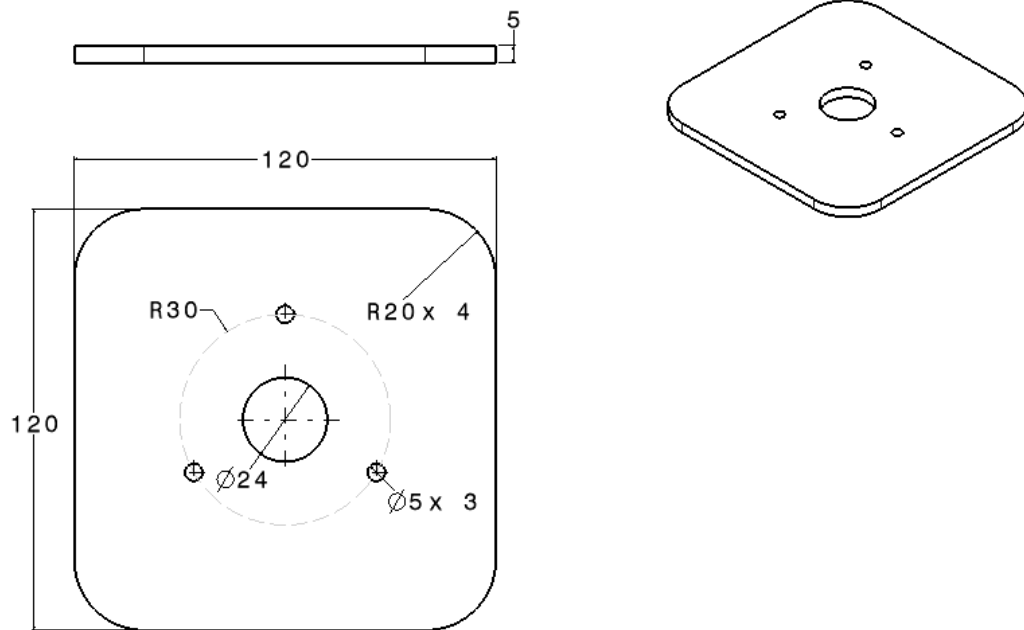
Приобретение навыков работы с системой CATIA V5, предназначенной для создания 3D-моделей конструкций приборов. Знакомство с эскизом.

### Постановка задачи

Создать 3D-модель крышки корпуса.

### План работы

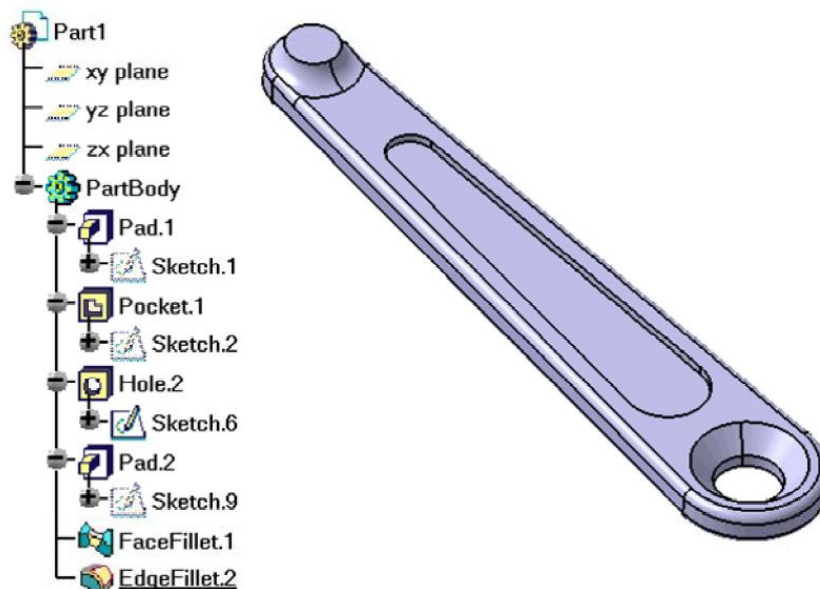
1. Построить эскиз изделия «крышка корпуса» по следующим чертежам:



2. В качестве основание эскиза задать плоскость YZ.
3. Построить геометрию эскиза.
4. Ограничить эскиз по размерным и геометрическим ограничениям.
5. Построить призму.
6. Сохранить и закрыть документ.

Работа выполняется по электронному пошаговому руководству, размещенному на учебном компьютере.

## Лабораторная работа 2 «Разработка САД-модели изделий на основе использования базовых примитивов»



### Цель работы

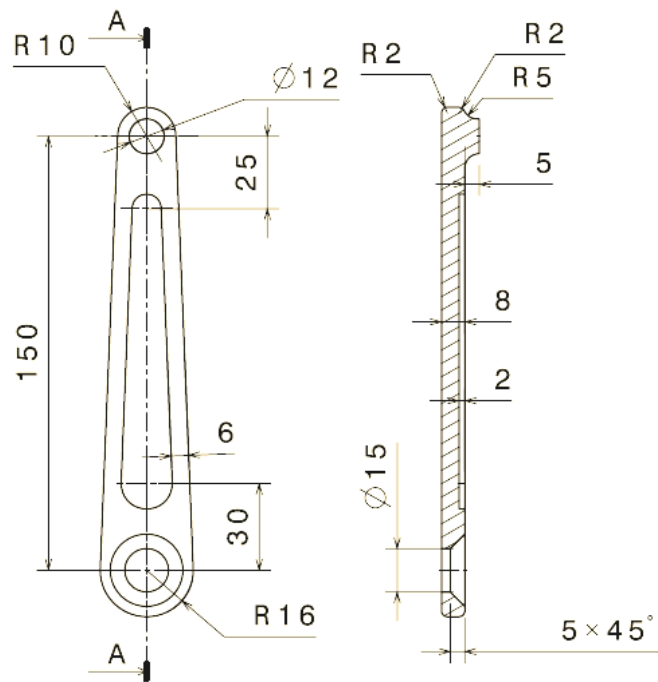
Приобретение навыков работы с системой CATIA V5, предназначенной для создания 3D-моделей конструкций приборов. Знакомство с базовыми примитивами.

### Постановка задачи

Создать 3D-модель поворотной ручки.

### План работы

1. Построить эскиз изделия «поворотная ручка» по следующему чертежу:



2. Создать карман.
3. Создать призму.
4. Создать отверстие, обработанное зенкованием.
5. Получить скругление ребра.
6. Сохранить и закрыть документ.

Работа выполняется по электронному пошаговому руководству, размещенному на учебном компьютере.

## **2. Инженерный анализ и комплексное виртуальное моделирование физических процессов в изделии**

### **Лабораторная работа 3 «Прочностной расчет деталей приборов с использованием метода конечных элементов»**

#### **Теоретические сведения**

При проектировании современных приборов и систем различного назначения особое внимание уделяется обеспечению надежности конструкции, так как эксплуатация изделий происходит в жестких условиях, а их ремонт затруднен или невозможен. Для обеспечения требуемой надежности конструкции при проектировании новых изделий используются специализированные программные комплексы, предназначенные для инженерного анализа и комплексного моделирования физических процессов в изделии. Использование технологий комплексного виртуального моделирования в процессе проектирования позволяет оптимизировать конструкцию изделия, минимизировать вес, увеличить прочность, улучшить другие эксплуатационные характеристики. Кроме того, моделирование условий эксплуатации на ранних стадиях разработки нового изделия дает возможность существенно сократить затраты на проектирование и производство опытных образцов для испытаний.

Расчетная часть программных комплексов для решения инженерных задач чаще всего основана на численных методах решения дифференциальных уравнений, в частности, на методе конечных элементов, так как среди численных методов он наиболее универсален для численного расчета полей. Он обладает высокой гибкостью, прост в программировании, хорошо подходит для интерпретации физики изучаемых явлений.

Фундаментальный принцип метода конечных элементов заключается в разбиении изучаемой области на элементарные области конечных размеров. В каждой из этих областей, называемых конечными элементами, неизвестная функция аппроксимируется полиномом, степень которого меняется в зависимости от задачи, но остается обычно невысокой (от 1 до 6). Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ. Так как каждый из элементов связан с ограниченным

количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает её решение. В общем случае в каждом узле имеется шесть степеней свободы (три линейных перемещения и три поворота), но для конкретной задачи какие-то из них могут оказаться не нужны. Например, при исследовании объемного напряженно-деформированного состояния конструкции применяются объемные трехмерные элементы, узлы которых имеют по три степени свободы. Подробное изложение теоретических основ метода конечных элементов можно найти в дополнительной литературе.

Используя метод конечных элементов, дискретные уравнения движения конструкции можно представить в виде матричного уравнения (1).

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}, \quad (1)$$

где  $\{u\}$  – вектор узловых перемещений для всего тела,  $\{\ddot{u}\}$  и  $\{\dot{u}\}$  – векторы ускорений и скоростей точек тела,  $[K]$ ,  $[C]$ ,  $[M]$  – «глобальные» матрицы жесткости, демпфирования и масс для всего тела,  $\{F\}$  – вектор эквивалентных узловых сил для всего тела.

Одним из основных видов анализа, которые выполняются на этапе проектирования изделий для оценки прочностных и эксплуатационных характеристик конструкции, является линейный статический анализ.

Целью линейного статического анализа является определение отклика конструкции на статическую нагрузку. Статическая нагрузка – это нагрузка, величина, направление и точка приложения которой изменяются во времени незначительно. При прочностных расчетах можно пренебречь влиянием сил инерции, обусловленных такой нагрузкой. Статической нагрузкой, например, является вес конструкции. При проведении линейного статического анализа вычисляемыми параметрами являются смещения, силы реакции, напряжения и деформации. Кроме того, при проведении линейного статического анализа жесткость конструкции считается постоянной.

При этом для статического анализа в уравнении движения все зависящие от времени слагаемые равны нулю, и уравнение движения принимает вид (2).

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

Модальный анализ проводится для определения частот и форм (мод) собственных колебаний конструкций. Также модальный анализ может быть первым шагом для других видов динамического анализа, таких, как анализ переходных процессов, гармонический и спектральный анализ.

При проведении модального анализа предполагается, что внешние силы и демпфирование равны нулю. Уравнение свободных колебаний конструкции в матричной форме имеет вид (3).

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (3)$$

Для оценки прочностных характеристик конструкции результаты расчета напряжений в конструкции прибора представляются в виде распределения эквивалентных напряжений фон Мизеса.

Критерий максимального напряжения по Мизесу основывается на теории Мизес-Хенки, также известной как теория энергии формоизменения.

Для главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  напряжение по Мизесу выражается формулой (3):

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (3)$$

Пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. В большинстве случаев в качестве предельного напряжения используется предел текучести (4).

$$\sigma_{\text{vonMises}} \geq \sigma_T \quad (5)$$

В рамках лабораторной работы исследование отклика конструкций деталей приборов на действие статической нагрузки будет проводиться с помощью системы OOFELIE, разработанной компанией Open Engineering, Бельгия.

Расчетный модуль системы OOFELIE основан на методе конечных элементов.

Система OOFELIE позволяет проводить линейный и нелинейный статический, модальный и гармонический анализ конструкции, а также анализ переходных процессов в системе. При этом при построении модели могут учитываться одновременно протекающие в модели тепловые, механические и электрические процессы. Кроме того, OOFELIE позволяет моделировать распространение акустических волн в бесконечных акустических средах, возникновение электрических полей в диэлектрических средах, электромагнитные явления в системе, пьезоэлектрический, пироэлектрический, пьезорезистивный эффект. Возможности OOFELIE расширяются за счет интеграции с другими программными продуктами, такими как Moldex3D, Zemax и Fine/Open.

Система OOFELIE применяется для проектирования приборов и систем различного назначения: гидроакустических преобразователей и антенн, прецизионных оптических систем, микроэлектромеханических систем, акселерометров, гироскопов, датчиков давления и расхода.

### **Цель работы**

Знакомство с интерфейсом системы OOFELIE. Приобретение навыков работы с системой OOFELIE на примере прочностного расчета детали прибора. Знакомство с методикой проведения линейного статического анализа конструкции.

## Постановка задачи

Выполнить прочностной расчет детали «Кронштейн».

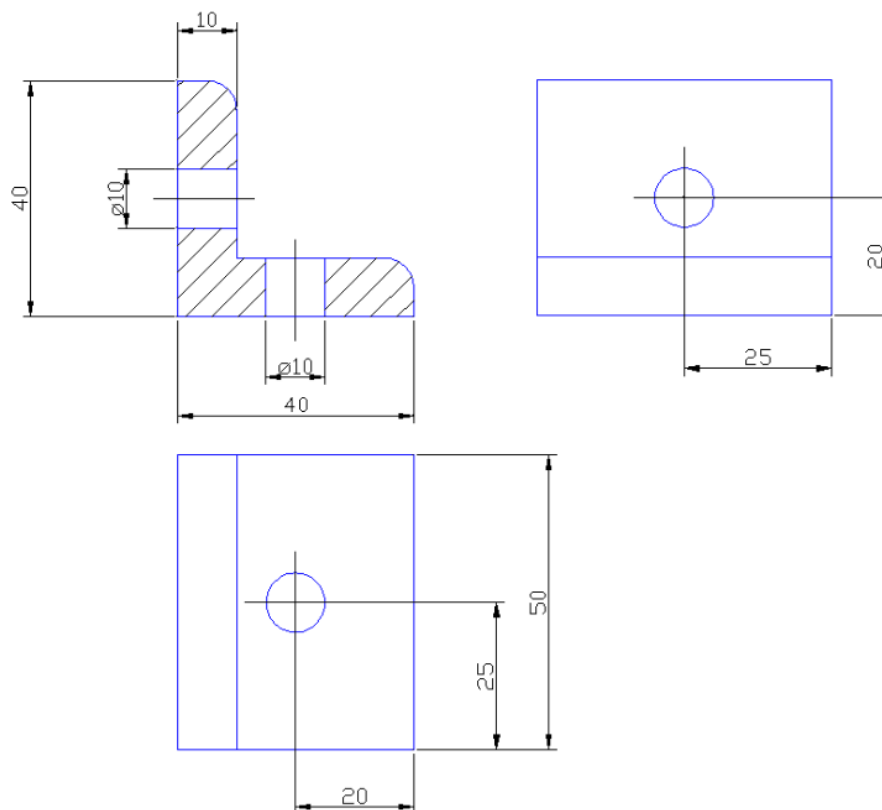
## План работы

1. Выполнить упражнение «Основные элементы графического интерфейса системы OOFELIE».
  - a. Запустить OOFELIE, выполнить настройки Solver Driver Settings и Multiphysics Problem Configuration.
  - b. Открыть файл с готовой моделью.
  - c. Рассмотреть способы управлять моделью (перемещать, вращать, масштабировать) с помощью кнопок панели визуализации и мыши.
  - d. Рассмотреть способы выбора элементов модели (один и несколько одновременно).
  - e. Рассмотреть способы скрывать и отображать скрытые элементы модели.
  - f. Выполнить настройки параметров отображения элементов.
  - g. Рассмотреть способы организации дерева проекта.
2. Построить параметрическую модель детали «Кронштейн» по чертежу с использованием встроенного CAD-модуля системы OOFELIE.
3. Создать расчетную модель. Для моделирования конструкции использовать объемные трехмерные элементы. Задать закрепление конструкции за нижнюю поверхность.

Механические свойства стали:

  - Модуль Юнга – 205 ГПа;
  - Коэффициент Пуассона – 0,3;
  - Плотность – 7800 кг/м<sup>3</sup>;
  - Номинальное предельное допускаемое напряжение – 230 МПа.
4. Исследовать отклик конструкции на статическую нагрузку – давление, приложенное к левой грани конструкции.
5. Сделать выводы о прочностных характеристиках конструкции.





Работа выполняется по электронному пошаговому руководству, размещенному в сети Интернет.

## Лабораторная работа 4 «Исследование гравитационных деформаций узла оптического прибора»

### Теоретические сведения

Гравитационная нагрузка - самый распространенный вид нагрузки. Она обусловлена силой тяжести и определяется весом самих конструкций. Гравитационная деформация  $\sigma_g$  при прочих равных условиях обратно пропорциональна удельной жесткости материала  $\gamma/E$ , где  $E$  - модуль упругости,  $\gamma$  - удельный вес.

Гравитационные поля являются одним из основных источников деформации формы оптической поверхности (размерной нестабильности) зеркал, в том числе крупногабаритных зеркал телескопов наземного базирования.

При решении задач по оценке деформаций конструкций под действием силы тяжести гравитационная нагрузка моделируется путем задания для всей конструкции постоянного ускорения – ускорения свободного падения, величина которого для земных условий принимается равной  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

## **Цель работы**

Исследование гравитационных деформаций параболического отражателя.

## **Постановка задачи**

В рамках работы проводится расчет деформаций параболического отражателя, обусловленных действием силы тяжести; оцениваются напряжения, возникающие в конструкции.

## **План работы**

1. Построить геометрическую модель параболического отражателя с использованием трехмерной модели в формате STP, предварительно созданной в системе трехмерного моделирования CATIA.
2. Построить расчетную модель с учетом действия силы тяжести (ускорение свободного падения направлено вдоль оптической оси – перпендикулярно отражающей поверхности зеркала).

Физические и упругие свойства стекла:

- Модуль Юнга – 60 ГПа;
- Коэффициент Пуассона – 0,22;
- Плотность – 2500 кг/м<sup>3</sup>.

Физические и упругие свойства инвара:

- Модуль Юнга – 150 ГПа;
- Коэффициент Пуассона – 0,26;
- Плотность – 8100 кг/м<sup>3</sup>.

3. Выполнить анализ деформаций конструкции и распределения напряжений в конструкции. Сделать выводы о влиянии гравитационных нагрузок на оптические характеристики системы.

Работа выполняется по электронному пошаговому руководству, размещенному в сети Интернет.

## **Лабораторная работа 5 « Исследование термомеханических деформаций деталей и узлов точных приборов с целью проведения оптимизационного реверс-инжиниринга»**

### **Теоретические сведения**

Метод конечных элементов применяется для расчета температурных деформаций конструкций, то есть для решения связанной задачи термоупругости.

Под связанной задачей понимают задачу, которая определена в нескольких областях, возможно, частично совпадающих. При этом переменные, которыми описывается поведение объекта в этих областях, взаимосвязаны. Часто данный термин используется для описания задач, условие которых относится сразу к двум областям физики.

Условно связанные задачи делятся на сильно- и слабосвязанные. В физическом смысле задача является сильносвязанной, если происходящие в материале под действием различных физических полей явления должны рассчитываться одновременно и совместно. Соответственно, в рамках слабосвязанной задачи можно рассчитывать действие каждого из полей по отдельности.

При численном решении слабосвязанной задачи реализуется каскадный алгоритм. Решение происходит за несколько последовательных шагов.

При численном моделировании сильносвязанная задача предполагает наличие связей на матричном уровне: одновременно решаются уравнения, включающие в себя параметры, относящиеся ко всем рассматриваемым в рамках задачи видам явлениям.

Для получения корректных результатов при анализе температурных деформаций необходимо проводить нелинейный статический анализ.

Фундаментальное отличие линейного и нелинейного анализа состоит в трактовке понятия жесткости. Жесткость характеризует реакцию конструкции на приложенную нагрузку и определяется совокупностью факторов: форма конструкции, материал, наличие опоры.

При деформировании структуры ее жесткость меняется, так как при значительных деформациях изменяется форма изделия, а при достижении предела прочности меняются свойства материала.

С другой стороны, если изменение жесткости незначительно, его можно не принимать в расчет, и считать форму материала и свойства постоянными. Это основное допущение линейного анализа. Это позволяет значительно упростить формулировку и решение задачи.

Соответственно, при нелинейном анализе учитывается изменение жесткости изделия под действием нагрузки.

При нагреве конструкции происходит изменение ее геометрических размеров. Относительное изменение объёма или линейных размеров тела с увеличением температуры на 1 К при постоянном давлении характеризуется коэффициентом теплового расширения материала. Различают коэффициенты объёмного и линейного расширения. Коэффициент линейного теплового расширения показывает относительное изменение длины тела при нагревании на температуру  $\Delta T$ . Теоретические основы процесса теплового расширения материалов описаны в дополнительной литературе.

Если конструкция состоит из нескольких деталей или слоев,

выполненных из материалов с разными коэффициентами теплового расширения, наблюдаются деформации конструкции, которые могут отрицательно сказываться на работе прибора.

### **Цель работы**

Исследование термомеханических деформаций многослойных конструкций. Решение задачи в линейной и нелинейной постановке.

### **Постановка задачи**

В данной работе рассматривается проведение связанного анализа термомеханической системы. Работа состоит из четырех частей.

Часть 1. Линейный статический анализ двухслойной конструкции. Слои имеют различные коэффициенты теплового расширения. Вследствие этого при нагреве слои расширяются неравномерно, и конструкция деформируется.

Часть 2. Нелинейный статический анализ. В конструкции наблюдаются значительные деформации, которые оказывают влияние на жесткостные свойства конструкции, следовательно, необходимо проведение нелинейного статического анализа.

Часть 3. Статический анализ конструкции, для которой задан градиент температуры. Вследствие различия теплопроводностей материалов слоев распределение температуры неравномерно.

Часть 4. Динамический (транзиентный) анализ конструкции.

Для выполнения данной работы требуются базовые навыки работы с OOFELIE.

### **План работы**

#### *Часть 1: Линейный статический анализ двухслойной конструкции*

В первой части работы рассматривается конструкция из двух тонких слоев из материалов с различными коэффициентами теплового расширения. задается постоянная температура объекта. Расширение слоев при нагреве будет неодинаковым, поэтому конструкция деформируется.

1. Построить геометрическую модель двухслойной конструкции с помощью встроенного CAD-редактора OOFELIE.
2. Подготовить расчетную модель, задав термомеханические свойства материалов, закрепления и нагрузки.

Физические и упругие свойства алюминия:

- Модуль Юнга – 70 ГПа;
- Коэффициент Пуассона – 0,35;
- Плотность – 2700 кг/м<sup>3</sup>;
- Коэффициент температурного расширения – 23,1e-6 1/К;
- Теплопроводность – 237 Вт/м·К.

Физические и упругие свойства кремния:

- Модуль Юнга – 170 ГПа;
  - Коэффициент Пуассона – 0,27;
  - Плотность – 2330 кг/м<sup>3</sup>;
  - Коэффициент температурного расширения – 2,6e-6 1/К;
  - Теплопроводность – 156 Вт/м·К.
3. Проанализировать деформации конструкции и сделать вывод о целесообразности проведения нелинейного анализа.

*Часть 2: Нелинейный статический анализ двухслойной конструкции*

Из результатов предыдущего расчета ясно, что в системе присутствуют значительные деформации. Следовательно, допущения линейного анализа не применимы (жесткость конструкции изменяется под действием нагрузки), и результат расчета некорректен. Результаты могут быть улучшены, если будет проведен нелинейный анализ.

1. Изменить настройки решателя и перейти к выполнению нелинейного анализа.
2. Сравнить результаты расчета с ранее полученными. Сделать выводы о реалистичности результатов расчета.

*Часть 3: Линейный статический анализ конструкции (градиент температуры)*

В предыдущих двух частях работы рассматривались деформации двухслойной структуры при нагреве, обусловленные различием коэффициентов теплового расширения материалов слоев. В данной части будет рассмотрено влияние теплопроводности материалов на деформации конструкции при наличии градиента температуры.

4. Построить геометрическую модель двухслойной конструкции с помощью встроенного CAD-редактора OOFELIE.
5. Подготовить расчетную модель, задав термомеханические свойства материалов, закрепления и нагрузки.
6. Проанализировать деформации конструкции и распределение температур в конструкции.

*Часть 4: Транзиентный анализ конструкции*

В этой части работы рассматриваются деформации конструкции с течением времени при нагреве.

1. Изменить расчетную модель, дополнив термомеханические свойства материалов и откорректировав действующие нагрузки.
  - Теплоемкость алюминия – 2,46e6 Дж/м<sup>3</sup>·К;
  - Теплоемкость кремния – 1,66e6 Дж/м<sup>3</sup>·К.
2. Выполнить анализ переходных процессов в конструкции.
3. Проанализировать деформации конструкции и распределение температур в конструкции. Сделать выводы о влиянии теплоемкости

материалов на распределение температур в конструкции с течением времени.

Работа выполняется по электронному пошаговому руководству, размещенному в сети Интернет.

## **Лабораторная работа 6 «Исследование температурных деформаций узла оптического прибора с целью проведения оптимизационного реверс-инжиниринга»**

### **Теоретические сведения**

При проектировании приборов линзовой оптики необходимо учитывать особые требования, связанные со специфическими условиями эксплуатации разрабатываемого прибора. Так, для приборов, работающих в нестабильном тепловом режиме, необходимо проводить оценку температурных деформаций конструкции прибора. Температурные деформации могут вызывать пережатие оптических деталей, которое, в свою очередь, ведет к возникновению напряжений в материале линзы, деформации оптических поверхностей и, как следствие, ухудшению качества изображения.

Оценка температурных деформаций, возникающих при работе прибора в нестабильном тепловом режиме, на этапе проектирования может проводиться с помощью программных комплексов, основанных на методе конечных элементов и позволяющих решать связанные задачи теплопередачи и теплообмена в приборах и системах различного назначения. Тепловой анализ на уровне изделия включает в себя исследование нагрева компонентов изделия, вызванного самонагревом активных компонентов, теплообменом излучением с соседними компонентами и конвективным теплообменом с окружающей средой.

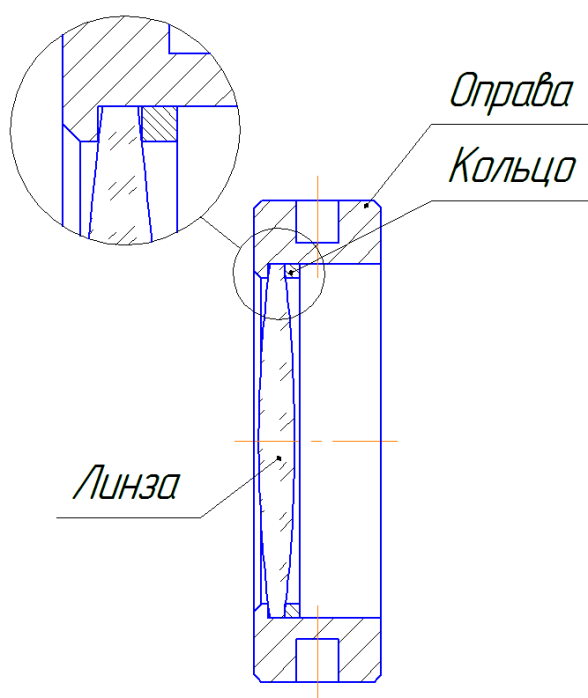
Для моделирования контакта между оптическими элементами и их конструктивным окружением используется технология «склеивания» объектов. Использование технологии «склеивания» обеспечивает удовлетворение условия непрерывности физического поля в зоне контакта объектов с различными механическими и тепловыми свойствами, даже если в области контакта не обеспечивается совпадение узлов конечно-элементных сеток. Может моделироваться «идеальное склеивание» и «неидеальное склеивание». При «идеальном склеивании» в зоне контакта перемещения (температуры) точек первого из склеиваемых объектов равны перемещениям (температурам) точек второго объекта. В случае «неидеального склеивания» между двумя взаимодействующими телами вводится слой клея толщиной  $h$  с заданным модулем Юнга  $E$  и модулем сдвига  $G$  (либо теплопроводностью  $\sigma$ ).

## Цель работы

Исследование поведения оптической системы при термомеханическом нагружении.

## Постановка задачи

В рамках работы проводится связанный анализ температурных деформаций линзы в оправе. Выполняется моделирование напряжений в конструкции, возникающих под действием тепловых нагрузок.



## План работы

1. Построить геометрическую модель линзы в оправе с использованием трехмерных моделей линзы, оправы и кольца в формате STP, предварительно построенных в системе трехмерного моделирования САПР.
2. Построить расчетную модель с учетом контактных взаимодействий между элементами конструкции.

Физические и упругие свойства алюминия:

- Модуль Юнга – 70 ГПа;
- Коэффициент Пуассона – 0,35;
- Плотность – 2700 кг/м<sup>3</sup>;
- Коэффициент температурного расширения – 23,1e-6 1/К;
- Теплопроводность – 237 Вт/м•°К.

Физические и упругие свойства стекла BK7:

- Модуль Юнга – 81 ГПа;
- Коэффициент Пуассона – 0,206;
- Плотность – 2460 кг/м<sup>3</sup>;
- Коэффициент температурного расширения – 7,1e-6 1/К;

– Теплопроводность – 1,114 Вт/м•К.

3. Выполнить анализ термомеханических деформаций конструкции, распределения температуры в конструкции. Сделать выводы о влиянии температурных нагрузок на оптические характеристики системы.

Работа выполняется по электронному пошаговому руководству, размещенному в сети Интернет.

## **Лабораторная работа 7 «Исследование термоаббераций оптических систем, возникающих в процессе механической обработки заготовок»**

(для выполнения работы требуется наличие программы Zemax и программы OOFELIE версии от 4.3)

### **Теоретические сведения**

На начальном этапе проектирования оптических систем с помощью САПР оптических приборов создается модель оптической системы. При этом модель оптической системы представляет собой набор поверхностей, пространство между которыми заполнено оптическими средами с заданными оптическими свойствами. САПР оптических устройств моделирует прохождение лучей через оптическую систему и, соответственно, позволяет оценить aberrации, присутствующие в оптической системе. Aberrация оптической системы – это ошибка или погрешность изображения в оптической системе, вызываемая отклонением луча от того направления, по которому он должен был бы идти в идеальной оптической системе. Информация о типах aberrаций оптических систем представлена в дополнительной литературе.

Результатов, полученных при моделировании оптической системы с помощью САПР оптических приборов, как правило, недостаточно для точного предсказания поведения оптического прибора в процессе эксплуатации. При проектировании оптической системы в САПР оптических приборов оптические элементы «висят в воздухе», не принимается в расчет их конструктивное окружение (корпус прибора, оправы, уплотнительные кольца), не учитываются условия эксплуатации.

Как результат, оптические характеристики идеальной системы значительно отличаются от реальных оптических характеристик готового прибора, так как при оценке реальных оптических характеристик нельзя пренебрегать действующими на прибор тепловыми и механическими нагрузками, а также взаимодействием оптических элементов и их конструктивного окружения.



Реалистично оценить характеристики готового прибора можно с использованием систем инженерного анализа, основанных на использовании метода конечных элементов. С помощью системы инженерного анализа производится расчет термомеханических деформаций поверхностей оптических элементов. Затем рассчитанные деформации поверхностей представляются в формате, пригодном для экспорта в САПР оптических устройств – в виде коэффициентов разложения по базису полиномов Цернике или сетки прогибов. На основе исходной модели оптической системы в САПР оптических приборов автоматически создается новая модель, учитывающая деформации оптических элементов под действием термомеханических нагрузок.

Изменение температуры стекла влияет на показатель преломления. Изменение показателя преломления стекла при изменении его температуры характеризуется коэффициентом  $dn/dt$  по кривой зависимости между температурой стекла и показателем преломления. Температурный коэффициент показателя преломления (для света определенной длины волны) изменяется с изменением длины волны и температуры.

### **Цель работы**

Исследование термоаббераций оптической системы.

### **Постановка задачи**

В рамках работы проводится связанный опто-термомеханический линейный статический анализ линзы в оправе (рис. 2). Рассматривается создание связи между моделью оптической системы в Zemax и геометрической моделью конструкции в OOFELIE. Выполняется моделирование деформаций линзы под действием тепловых нагрузок. По итогам расчета автоматически создается обновленная модель в Zemax®, в которой учитываются деформации оптических поверхностей при нагреве. Помимо этого, выполняется расчет изменения показателя преломления материала линзы при нагреве. Таким образом, проводится анализ аббераций волнового фронта, наблюдаемых в оптической системе при термомеханическом нагружении.

### **План работы**

1. Рассмотреть оптическую модель системы в Zemax.
2. Построить геометрическую модель линзы в оправе с использованием трехмерной модели линзы, экспортированной из Zemax, и трехмерных моделей оправы и кольца в формате STEP, предварительно построенных в системе трехмерного моделирования CATIA.
3. Построить расчетную модель с учетом контактных взаимодействий между элементами конструкции.

Физические и упругие свойства алюминия:

- Модуль Юнга – 70 ГПа;
- Коэффициент Пуассона – 0,35;

- Плотность – 2700 кг/м<sup>3</sup>;
- Коэффициент температурного расширения – 23,1e-6 1/°К;
- Теплопроводность – 237 Вт/м•°К.

Физические и упругие свойства стекла BK7:

- Модуль Юнга – 81 ГПа;
- Коэффициент Пуассона – 0,206;
- Плотность – 2460 кг/м<sup>3</sup>;
- Коэффициент температурного расширения – 7,1e-6 1/°К;
- Теплопроводность – 1,114 Вт/м•°К.

4. Выполнить анализ термомеханических деформаций конструкции, распределения температуры в конструкции, локальных изменений показателя преломления стекла при нагреве. Экспортировать результаты расчета в Zemax®. Сделать выводы о влиянии температурных нагрузок на оптические характеристики системы.

Работа выполняется по электронному пошаговому руководству, размещенному в сети Интернет.

## **Лабораторная работа 8 «Исследование эффекта тепловой линзы в лазерной среде для контроля и управления параметрами оптической системы»**

(для выполнения работы требуется наличие программы Zemax и программы OOFELIE версии от 4.3)

### **Теоретические сведения**

Лазер – квантовый генератор, источник когерентного монохроматического электромагнитного излучения оптического диапазона. Обычно состоит из трёх основных элементов:

- источник энергии (механизм «накачки»);
- рабочее тело;
- система зеркал («оптический резонатор»).

В рамках работы будет исследоваться эффект тепловой линзы в Nd:YAG лазере. В лазерах этого типа в качестве устройства накачки выступает сфокусированный свет ксеноновой импульсной лампы. В качестве активной среды (рабочего тела) используется алюмо-иттриевый гранат («YAG», Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) легированный ионами неодима (Nd).

Эффект тепловой линзы проявляется вследствие поперечного градиента температуры по сечению лазерной среды, приводящего к изменению показателя преломления. Полное изменение показателя преломления складывается из температурной зависимости  $dn/dT$  и изменения, обусловленного возникновением в неравномерно прогретой среде

термоупругих напряжений  $dl/dT$ , что приводит к неравномерному (в поперечном направлении) тепловому расширению стержня (диска), и, как следствие, искривлению его торцевых поверхностей. Порядок величин  $dn/dT$  и  $dl/dT$  одинаков. Если  $0 < dn/dT$ , то наведённая линза положительная. В рамках лабораторной работы будет рассматриваться только температурная зависимость показателя преломления среды.

В процессе работы лазеры данного типа имеют потребность во внешнем водяном охлаждении. Конвективный теплообмен активной среды с охлаждающей водной средой будет моделироваться в ходе расчета.

### **Цель работы**

Обобщение знаний о моделировании оптических приборов с помощью системы инженерного анализа OOFELIE::Multiphysics. Исследование эффекта тепловой линзы в лазерной среде.

### **Постановка задачи**

Выполнить моделирование температурных деформаций стержня активного вещества Nd:YAG лазера с учетом конвективного теплообмена лазерной среды с водой в системе охлаждения. Исследовать возникающий в лазерной среде эффект тепловой линзы. Экспортировать результаты моделирования в Zemax® и оценить влияние эффекта тепловой линзы на оптические характеристики системы.

### **План работы**

1. Построить параметрическую модель стержня активного вещества Nd:YAG лазера.
2. Создать расчетную модель с учетом нагрева лазерной среды за счет поглощения части излучения импульсной лампы. Выполнить моделирование охлаждения лазерной среды за счет конвективного теплообмена с окружающей водной средой, находящейся при заданной температуре.
3. Выполнить анализ температурных деформаций лазерного стержня, распределения температуры в конструкции, локальных изменений показателя преломления лазерной среды при нагреве. Экспортировать результаты расчета в Zemax®. Сделать выводы о влиянии температурных нагрузок на оптические характеристики системы.

Работа выполняется по электронному пошаговому руководству, размещенному в сети Интернет.

## **Критерии оценивания лабораторных работ**

Выполнение всех лабораторных работ и составление отчетов в соответствии с требованиями шаблона, а также обоснованность, четкость полнота изложения выводов во всех отчетах – 20 баллов.

В случае если оформление отчета соответствует указанным требованиям, и студент активно принимал участие в обсуждении, то студент получает максимальное количество баллов.

Основаниями для снижения количества баллов являются:

- небрежное выполнение;
- низкое качество графического материала.

Отчет не может быть принят и подлежит доработке в случае:

- отсутствия необходимых разделов;
- отсутствия необходимого графического материала;
- некорректной обработки результатов измерений.

## Рекомендованная литература

а) основная литература:

1. Иванов С.Е. Интеллектуальные программные комплексы для технической и технологической подготовки производства. Часть 5. Системы инженерного расчета и анализа деталей и сборочных единиц. Под ред. Куликова Д.Д. Учебно-методическое пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 48 с.
2. Яблочников Е.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А. Компьютерные технологии в жизненном цикле изделия / Учебное пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 188 с.
3. Яблочников Е.И., Куликов Д.Д., Молочник В.И. Моделирование приборов, систем и производственных процессов / Учебное пособие – СПб: СПбГУИТМО, 2008. – 156 с.
4. Детлаф А., Яворский Б. Курс физики. – М.: Академия, 2014. – 720 с.
5. Егоров А.С., Савикин А.П. Твердотельные лазеры с диодной накачкой на керамике, допированной ионами Nd<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup>: методическое пособие. – Нижний Новгород, 2011 – 44 стр.

б) дополнительная литература

6. Валетов В.А., Помпеев К.П. Технология приборостроения. Учебное пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013 г. – 234 с.
7. Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. Пер. с франц. – М.: Мир, 1989. – 190с.
8. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер. У. Колебания в инженерном деле. — М.: Машиностроение, 1985. — 472 с.
9. Сопротивление материалов : учеб. пособие для вузов по напр. 150000-"Техника и технология" / П. А. Павлов [и др.] ; под ред. Б. Е. Мельникова. - Изд. 2-е, испр. и доп. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2007. - 545 с.
10. Толстоба Н. Д., Цуканов А. А. Проектирование узлов оптических приборов. Учебное пособие. – СПб, 2002. – 128 с.
11. A. Mazzoli, P. Saint-Georges, A. Orban, J.S. Ruess, J. Loicq, S. Marcotte, C. Barbier, Y. Stockman, M. Georges, C. Thizy, P. Nachtergaele, S. Paquay and P. De Vincenzo, Experimental Characterization Providing Enhanced Opto-Thermo-Elastic Modelling, Proc. 12th European Conference on Spacecraft Materials, Structures and Environmental Testing, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands (March 2012).