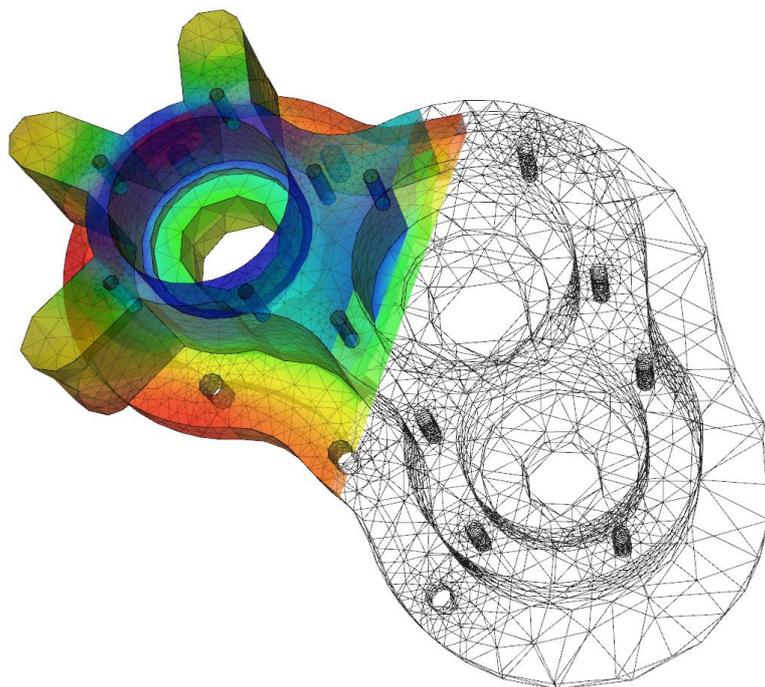


В.А. Пронин, Д.В. Жигновская, В.А. Цветков

**ВВЕДЕНИЕ В РАСЧЕТНУЮ ПЛАТФОРМУ
ANSYS Workbench:
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ. Часть 1**



**Санкт-Петербург
2019**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.А. Пронин, Д.В. Жигновская, В.А. Цветков

**ВВЕДЕНИЕ В РАСЧЕТНУЮ ПЛАТФОРМУ
ANSYS Workbench:
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ. Часть 1**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлению подготовки (специальности)

**16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения в
качестве учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2019

УДК 004.9

В.А. Пронин, Д.В. Жигновская, В.А. Цветков, Введение в расчетную платформу Ansys Workbench: Лабораторные работы. Часть 1 – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 46 с.

Рецензент: Колесниченко Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования и прикладной информатики ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова

В учебном пособии рассматриваются краткие теоретические положения о методе конечных элементов (МКЭ), последовательность работы в платформе ANSYS Workbench. Приводятся необходимые пояснения и последовательность выполнения лабораторных работ.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© В.А. Пронин, Д.В. Жигновская, В.А. Цветков, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	5
2. ОБЗОР ИНСТРУМЕНТАРИЯ ANSYS. РАСЧЕТНАЯ ОБОЛОЧКА WORKBENCH.....	12
3. ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ANSYS WORKBENCH.....	15
4. ИНТЕРФЕЙС МОДУЛЯ SPACE CLAIM.....	17
5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	19
5.1 Задание 1. Построение геометрической модели болта в модуле Space Claim.....	19
5.2 Задание 2. Анализ модели поршневого кольца в модуле Transient Structural.....	31
5.3 Задание 3. Анализ работы конструкции из двух пластин, соединенных болтом, в модуле Static Structural.....	35
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЗАДАНИЙ.....	37
ОФОРМЛЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ.....	41
ГЛОССАРИЙ.....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	44
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	45

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит интенсивное развитие информационных технологий, используемых в проектировании. Программные комплексы, направленные на решение инженерных задач, можно разделить на две группы: САД-системы (Computer-Aided Design), предназначенные для автоматизации процесса проектирования, и САЕ-системы (Computer-Aided Engineering), которые позволяют моделировать разнообразные физические процессы.

Необходимость автоматизации проектирования обусловлена требованием сокращения времени разработки новых конструкций за счет повышения производительности конструкторских работ, так как сложность проектируемых изделий удваивается в течение каждого десятилетия.

В учебном пособии изложен общий порядок работы в платформе ANSYS Workbench на примере выполнения трех лабораторных работ. Пояснения к заданию 1 включают в себя подробный разбор создания графической модели болта в приложении SpaceClaim, задание 2 нацелено на поэтапный разбор моделирования процессов работы поршневого уплотнения компрессора. В процессе выполнения работы студент знакомится с интерфейсом программы, структурой главного меню, основным инструментарием и возможностями команд разделов меню. Также студентам предлагается произвести самостоятельный анализ работы конструкции в задании 3.

В процессе освоения дисциплины «Проектирование элементов машин» студент изучает специфику различных соединений, деталей, основные механические свойства материалов и т.д. Практическая часть курса состоит в ознакомлении с общими правилами и подходами конструкторской деятельности. Выполнение лабораторных работ является обязательным элементом учебного процесса, в ходе которой приобретаются и развиваются навыки 3-D моделирования.

Настоящие методические указания направлены на оказание помощи студентам в освоении программы ANSYS и в работе над лабораторными работами.

ANSYS – это многоцелевой пакет программ для численного моделирования физических процессов и явлений в области прочности, гидрогазодинамики, теплофизики, электромагнетизма, акустики [1].

1. КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой эффективный численный метод решения инженерных и физических задач. Предполагается, что цельная конструкция рассматривается как совокупность отдельных конечных элементов [2, 3].

Основоположником теории МКЭ считается Р. Курант (1943 г.). М. Тернер, Х. Мартин и др. внедрили МКЭ в строительную механику и механику сплошных сред (конец пятидесятых – начало шестидесятых годов двадцатого века). Существенно расширили область применения МКЭ Б. Сабо, О. Зенкевич и др. (конец шестидесятых – начало семидесятых годов), показав, что его можно использовать для решения любых дифференциальных уравнений. Большой вклад в развитие МКЭ внесли отечественные ученые Л. Розин, В. Корнеев, В. Постнов и др. Развитие МКЭ неразрывно связано с совершенствованием вычислительной техники, ускоряющей сложные численные расчеты. Соответственно совершенствовались вычислительные программы, реализующие этот метод [4].

Основные идеи МКЭ заключаются в следующем:

1. Любые непрерывные величины, такие как перемещение, температура, давление, и пр. могут быть аппроксимированы дискретной моделью. Построение модели основано на множестве кусочно-непрерывных функций, определённых на конечном числе подобластей – элементах (конечных элементах);
2. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном фиксируемом числе точек рассматриваемой области. Эти точки называются узлами;
3. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая должна быть определена;
4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе функцией, которая определяется с помощью узловых значений этой величины. Непрерывность величины сохраняется вдоль границ элемента;
5. Объекты исследования могут иметь различную форму и физическую природу, будь то твердые тела, жидкости, газы или электромагнитные среды и др.

Для большей наглядности рассмотрим применение МКЭ на весьма доступном примере. Зададимся некоторым объемом произвольной формы и приложим к нему сосредоточенную нагрузку F (рис.1). В данном случае представляет интерес поведение заданной структуры под действием нагрузки.

Уравнения, которым подчиняется распределение напряжений в принятом объеме, известны.

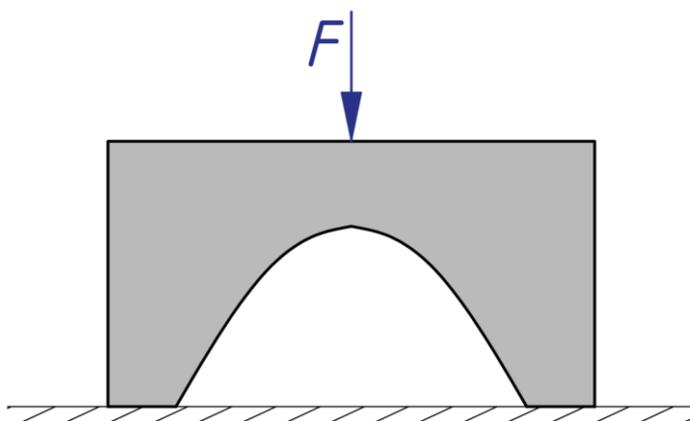


Рис.1.1 Схема объекта исследования

Однако для сложных геометрических форм расчет может быть несколько затруднен, в то же время уравнения можно решить для простых геометрий (примитивов), таких как треугольник или прямоугольник. МКЭ использует данную особенность: сложная геометрия заменяется на близкую ей сеть примитивов. Вся сеть элементов называется конечноэлементной сеткой (рис.2).

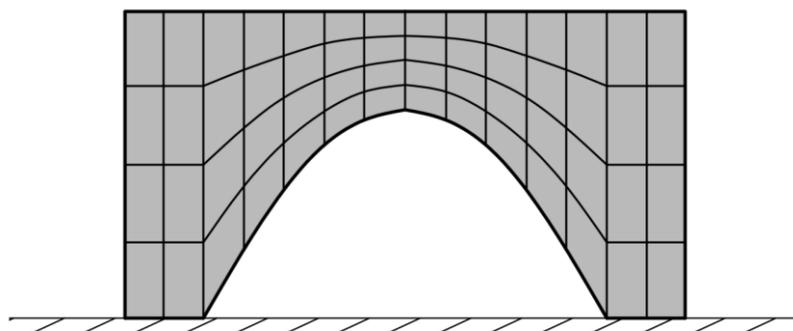
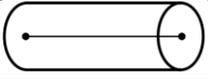
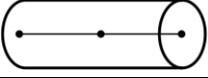


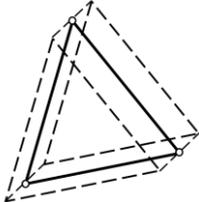
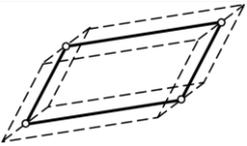
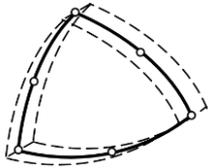
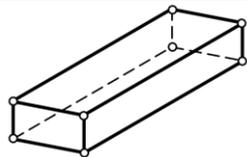
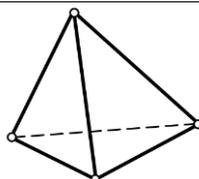
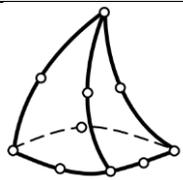
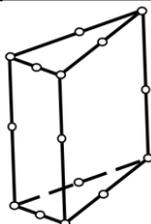
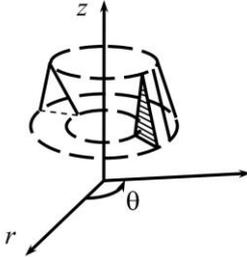
Рис.1.2 Покрытие расчетной геометрии конечноэлементной сеткой

Для решения различных задач можно использовать одну и ту же сетку, а чтобы ее построить, сперва необходимо решить, из каких элементов она будет состоять (табл.1.1):

Таблица 1.1 Элементы разбиения сетки

1. Одномерный элементы (стержневые)		С двумя узлами
		С тремя узлами
		С четырьмя узлами (кубический)

Продолжение табл. 1.1

1. Двумерные элементы		Треугольные
		Четырехугольные
		Многоугольные
2. Трехмерные элементы		В форме параллелепипеда
		В форме тетраэдра
		Сложной формы
3. Специальные элементы		Например, при рассмотрении осесимметричных задач
		

Увеличение числа элементов разбиения увеличивает точность производимого расчета, но при этом возрастает время его вычисления. Поэтому целесообразным является оптимальный подбор числа элементов для требуемой точности в разумных временных пределах.

Выберем в нашем примере восьмиугольный элемент (рис.1.3). Вершины элемента называются узлами, каждый узел может изменять свое положение в координатной системе. Исключение составляют узлы, находящиеся на границе области, их мы считаем неподвижными, и в данном случае это будет являться граничным условием (на рис.1.4 обозначены зеленым цветом). Таким образом, граничные условия позволяют выделить единственное решение.

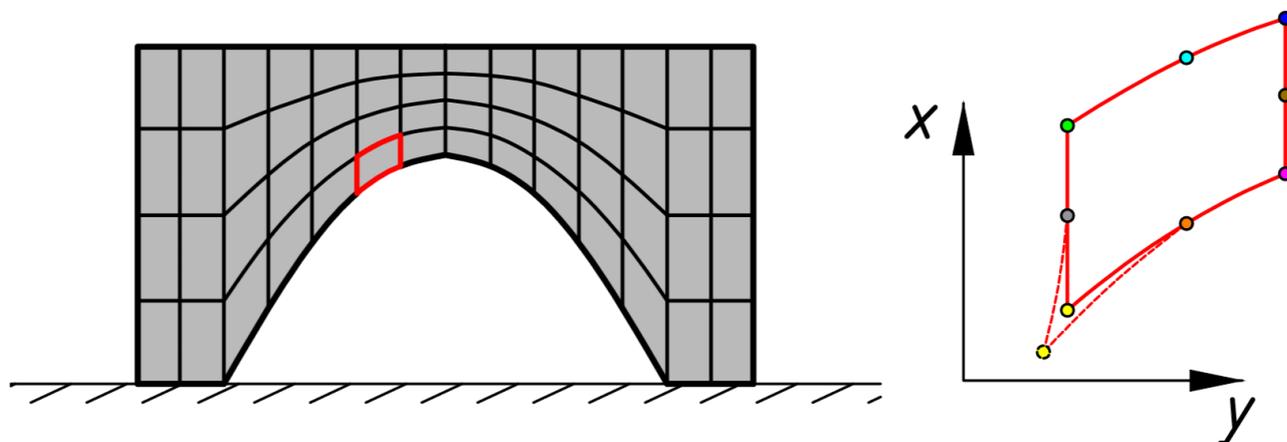


Рис.1.3 Обзор отдельного элемента конечноэлементной сетки

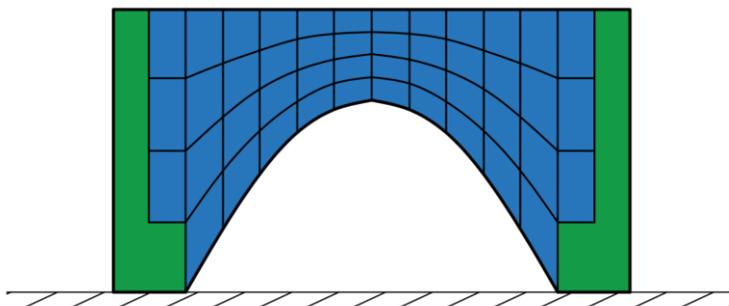


Рис.1.4 Задание граничных условий

Наконец, нужно указать упругие свойства материала и внешнюю нагрузку. На данном этапе расчетная схема принимает свой оригинальный вид (рис.1.5):

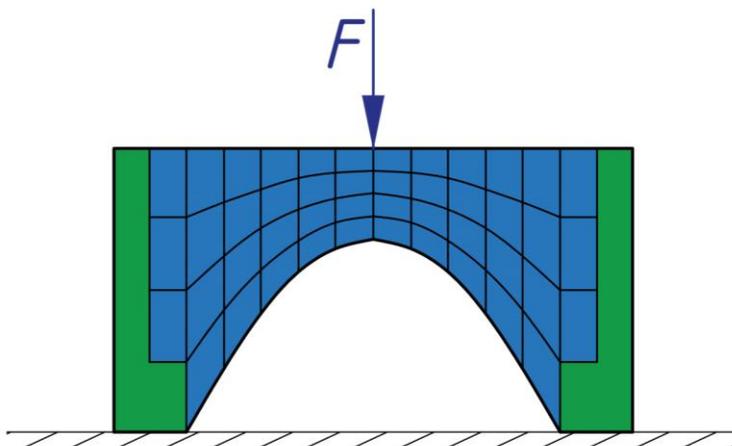


Рис.1.5 Конечная схема к расчету МКЭ

С математической точки зрения нужно получить уравнение, которое будет описывать всю систему.

Начнем с основного соотношения, выражающего перемещение $u(x, y)$ в каждом узле (x, y) : $u(x, y) = A + Bx + Cy + Dxy + Ex^2 + Fy^2 + Gx^2y + Hxy^2$. В принятом ранее восьмиугольном элементе 8 узлов (см. рис.1.3), в каждом узле запишем уравнение для перемещения. Полученная комбинация образует матрицу U :

$$\begin{matrix}
 \text{У} \\
 \text{З} \\
 \text{Л} \\
 \text{Ы}
 \end{matrix}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \text{●} \\
 \text{●}
 \end{array}
 \right.
 \left(
 \begin{array}{l}
 A + Bx + Cy + Dxy + Ex^2 + Fy^2 + Gx^2y + Hxy^2 \\
 A + Bx + Cy + Dxy + Ex^2 + Fy^2 + Gx^2y + Hxy^2 \\
 A + Bx + Cy + Dxy + Ex^2 + Fy^2 + Gx^2y + Hxy^2 \\
 A + Bx + Cy + Dxy + Ex^2 + Fy^2 + Gx^2y + Hxy^2 \\
 A + Bx + Cy + Dxy + Ex^2 + Fy^2 + Gx^2y + Hxy^2 \\
 A + Bx + Cy + Dxy + Ex^2 + Fy^2 + Gx^2y + Hxy^2 \\
 A + Bx + Cy + Dxy + Ex^2 + Fy^2 + Gx^2y + Hxy^2 \\
 A + Bx + Cy + Dxy + Ex^2 + Fy^2 + Gx^2y + Hxy^2
 \end{array}
 \right) = U$$

В дальнейших расчетах будет использоваться эта матрица вместе с основными законами механики. Имея приложенные нагрузки, программа, реализующая метод конечных элементов, вычисляет перемещения в узлах:

1. Зная перемещения узлов (вид уравнения перемещения обозначен выше), определяются напряжения;
2. Из напряжений получаем деформации;
3. Далее находим потенциальную энергию;
4. Из условий минимума потенциальной энергии получаем два уравнения состояния всего элемента: $F_x = U\{x\}$; $F_y = U\{y\}$;

Получившуюся матрицу называют матрицей жесткости элемента, по аналогии с уравнением для пружины. В пружине перемещение x – одно число, в нашем же случае x – вектор перемещения для всего элемента. Таким образом: $F_x = U\{x\}$; $F_x = kx$.

Данные расчеты прodelьваются для каждого элемента сетки, и у каждого элемента будет своя матрица жесткости. Объединим все эти матрицы в единую матрицу, т.е. в матрицу жесткости всей системы. Любые два соседних элемента

имеют общие узлы, поэтому искомые значения в этих узлах имеются в обеих сопряженных матрицах (рис.1.6).

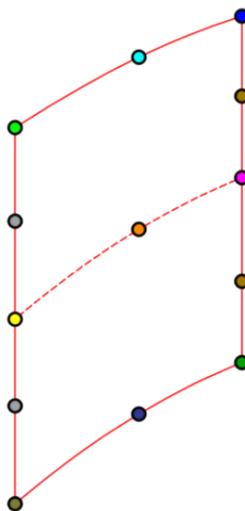


Рис.1.6 Сопряженные матрицы с общими узлами

Матрицы можно объединить простым слиянием. На практике решение всей системы происходит одновременно со слиянием матриц, весь этот процесс называют приведением. В процессе приведения осуществляется процедура исключения части матрицы: решаем уравнения системы, которым соответствуют строки матриц в одном элементе. Сначала решаем одно уравнение и подставляем полученное решение в оставшиеся, затем переходим к следующему элементу. После обработки всех подматриц остается один узел, и найденное значение в этом узле используется в обратном ходе, таким образом находятся все неизвестные. В итоге мы нашли перемещения, далее найдем напряжения. Напряжения показаны на контурной диаграмме (рис.1.7): красным цветом выделяется наибольшее сжатие, синим – наибольшее растяжение.

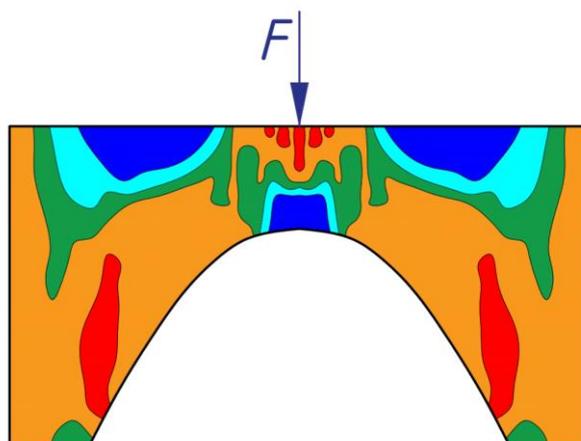


Рис. 1.7 Упрощенная визуализация результатов расчета МКЭ

Разобранный в данном пункте пример показывает, что решение задач МКЭ производится в соответствии со следующими этапами:

1. Построение геометрической модели объекта исследования;
2. Покрытие расчетной области сеткой конечных элементов/конечных объемов;
3. Задание граничных условий;
4. Выбор физико-математической модели, описание расчетной схемы;
5. Процесс решения задачи, контроль за сходимостью решения;
6. Обработка и анализ результатов.

Изложенный алгоритм действий успешно реализуется в программном комплексе ANSYS.

2. ОБЗОР ИНСТРУМЕНТАРИЯ ANSYS. РАСЧЕТНАЯ ОБОЛОЧКА WORKBENCH

Программный комплекс ANSYS базируется на методе конечных элементов и эффективен по своему инструментарию. Программная версия 2019 г. (ANSYS Student 19 R3) [5] объединяет и связывает 30 модулей, в каждом из которых реализованы необходимая для решения той или иной физической задачи подходящая математическая модель и численные методы ее решения.

Инструментами для проведения расчетного анализа являются:

1. Fluid Mechanics – моделирование течений жидкости и газа;
2. Structural Mechanics – моделирование задач динамики и прочности;
3. Electromagnetics – моделирование работы различных компонентов радиоэлектроники, систем автоматики, электрических машин и пр.;

Возможно моделирование интердисциплинарных задач на основании комплексной связки нескольких типов решателей.

Расчетные модули, соответствующие определенным инструментам, сведены в табл. 2.1:

Таблица 2.1 Перечень модулей ANSYS

Fluid Mechanics	Fluent, CFX, Icepak, CFD-Flow, Vista TF, Icem CFD, TurboGrid, TGrid, BladeModeler, CFD-Post
Structural Mechanics	Static Structural, Transient Structural, Rigid Dynamics, Steady-State Thermal, Transient Thermal, Linear Buckling, nCode, Harmonic Response, Random Vibration, Modal, Response Spectrum, Explicit Dynamics/AUTODYN
Electromagnetics	Maxwell, RMXprt, PExprt, Simplorer

Взаимосвязь и передачу необходимой информации между приложениями с разными видами анализа осуществляет платформа Workbench, она также демонстрирует последовательность расчетов, их систематизацию и хранение. Рабочее окно Workbench представлено на рис. 2.1.

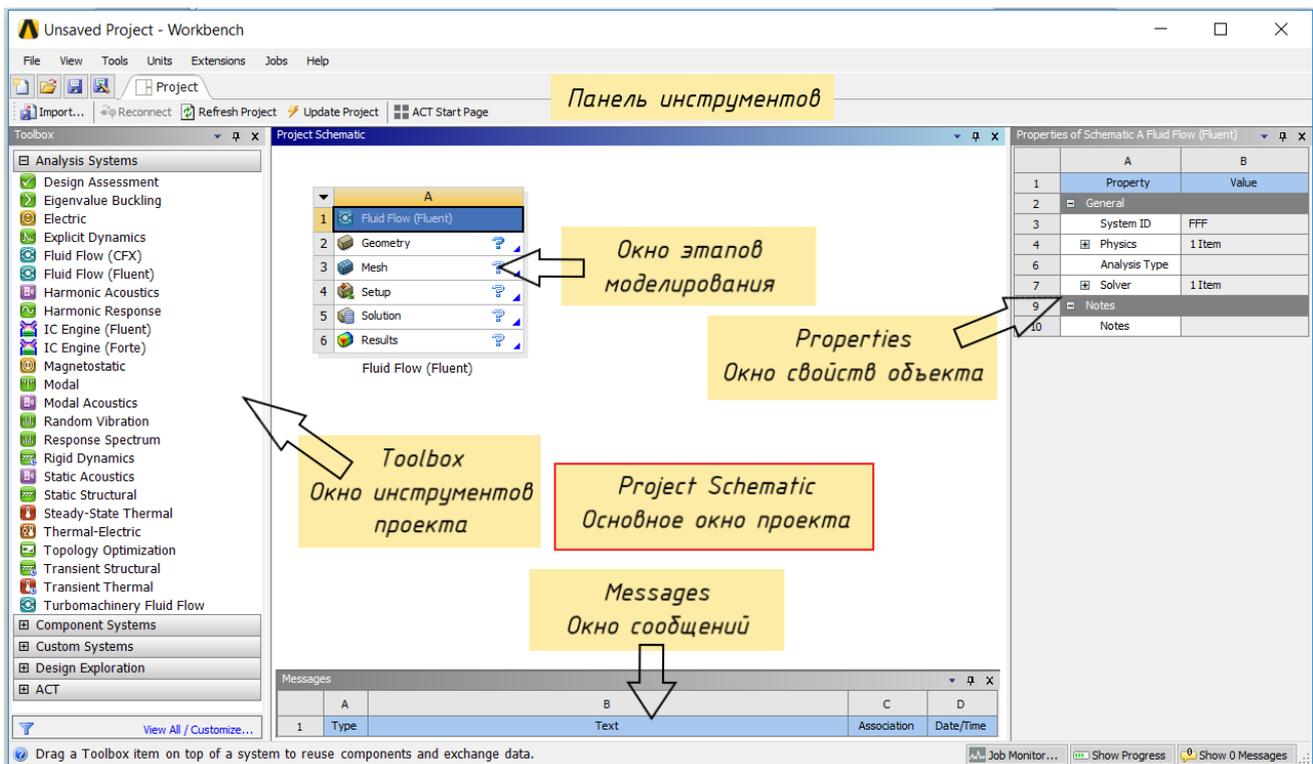


Рис. 2.1 Основное рабочее окно Workbench

В общем случае интерфейс Workbench включает в себя следующие окна:

1. Project Schematic – основное окно проекта. Окно отображает схему проекта (модули и приложения проекта);
2. Панель инструментов. Позволяет управлять настройками и опциями проекта;
3. Properties – окно свойств объекта. Является табличным представлением свойств выбранного объекта. Первый столбец – название свойства, второй – его значение или индикация об его активации (галочка);
4. Toolbox – окно инструментов проекта. Отображает интегрированные модули и приложения программной оболочки. Включает в себя следующие разделы:
 - Analysis Systems. Содержит решатели для всех видов численного (инженерного) анализа.
 - Component Systems. Включает в себя вспомогательные модули численного анализа: геометрическая модель, сетка конечных элементов и пр.
 - Custom Systems. Имеет в себе шаблоны для проведения междисциплинарного анализа (например, Thermal-Stress – термопрочностной).
 - Design Exploration. Решает задачи оптимизации задаваемых параметров модели;

Подробнее отдельные из представленных компонентов окна Toolbox будут рассмотрены в материалах к лабораторным работам.

5. Окно этапов моделирования. Представляет саму структуру численного анализа. Проект может включать в себя несколько таких окон, связанных между собой;
6. Messages – окно сообщений. Отображает все виды служебных сообщений, ошибок.

3. ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ANSYS WORKBENCH

Обратимся к окну этапов моделирования (рис. 3.1):



Рис. 3.1 Окно, содержащее необходимые этапы моделирования

Блок (1), например Static Structural, состоит из модулей:

- Engineering Data (2). Данное приложение является базой данных физических и механических свойств материалов и входных параметров математических моделей;
- Geometry (3). Представленный пункт включает в себя модуль Design Modeler и позволяет создавать геометрические 2-D и 3-D модели. Через модуль возможен импорт моделей из прочих CAD-систем для ее дальнейшего использования или редактирования;
- Mesh (4). Модуль предназначен для генерации расчетной сетки. Включает в себя широкий набор инструментов;
- Setup (5). Переводит покрытую сеткой конечных элементов геометрическую модель в отдельный модуль для задания граничных условий;
- Solution (6). Процесс решения задачи, контроль за сходимостью решения;
- Results (7). Обработка и анализ результатов.

Процесс моделирования (решения задачи) подразумевает последовательное прохождение этапов (2) – (7). Результатом будет являться решение задачи

Перечисленные этапы (2) – (7) визуально продемонстрированы на рис.3.2 на примере исследования поршневого кольца при помощи модулей Transient Structural (B) и Transient Thermal (Г).

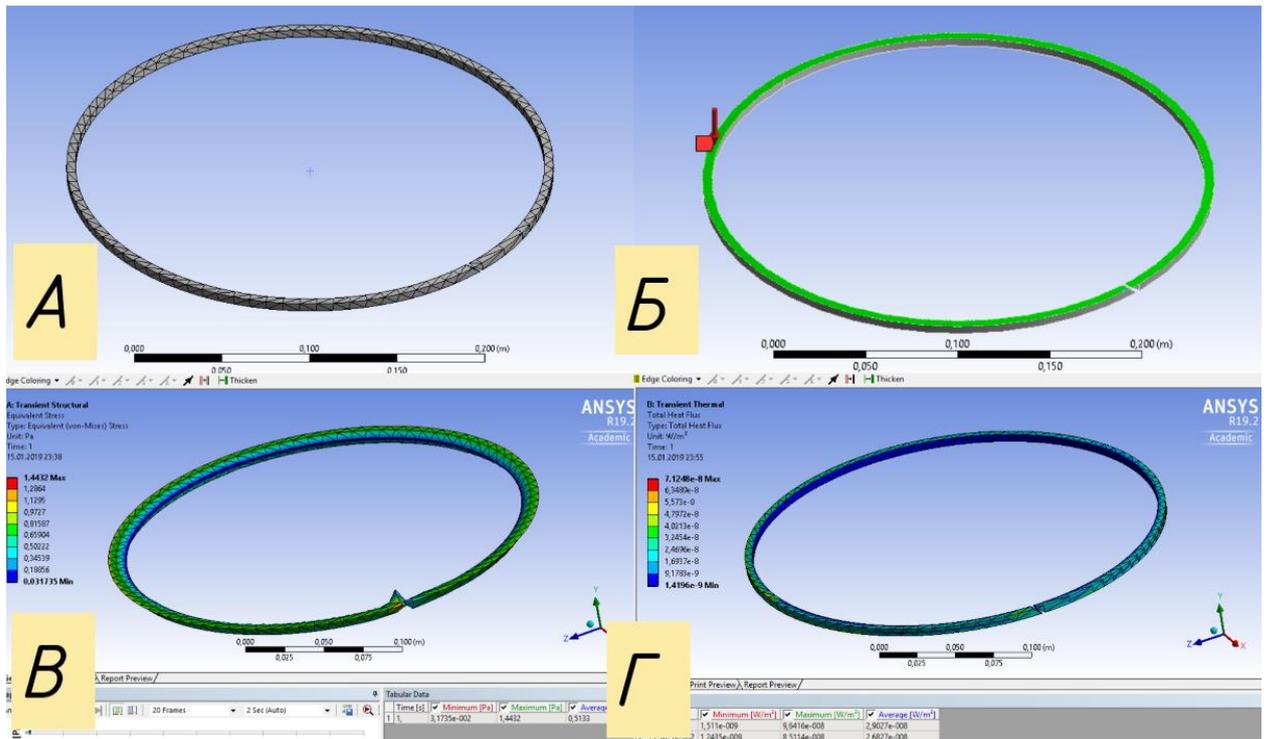


Рис.3.2 Анализ модели поршневого кольца в ANSYS [6]:

А – этапы 2 – 4; Б – 5; В – 6, 7 (Transient Structural); Г – 6, 7 (Transient Thermal)

4. ИНТЕРФЕЙС МОДУЛЯ SPACE CLAIM

SpaceClaim – это многофункциональное приложение для 3D-моделирования, обеспечивающее эффективное решение общих задач моделирования. Программа нацелена на создание, редактирование или восстановление геометрии. Наглядные и интуитивно понятные инструменты позволяют создавать объекты, детали и узлов с целью их многократного использования в последующем.

Для начала работы в окне этапов моделирования правой кнопкой мыши выберем Geometry → New SpaceClaim Geometry... (рис. 4.1).

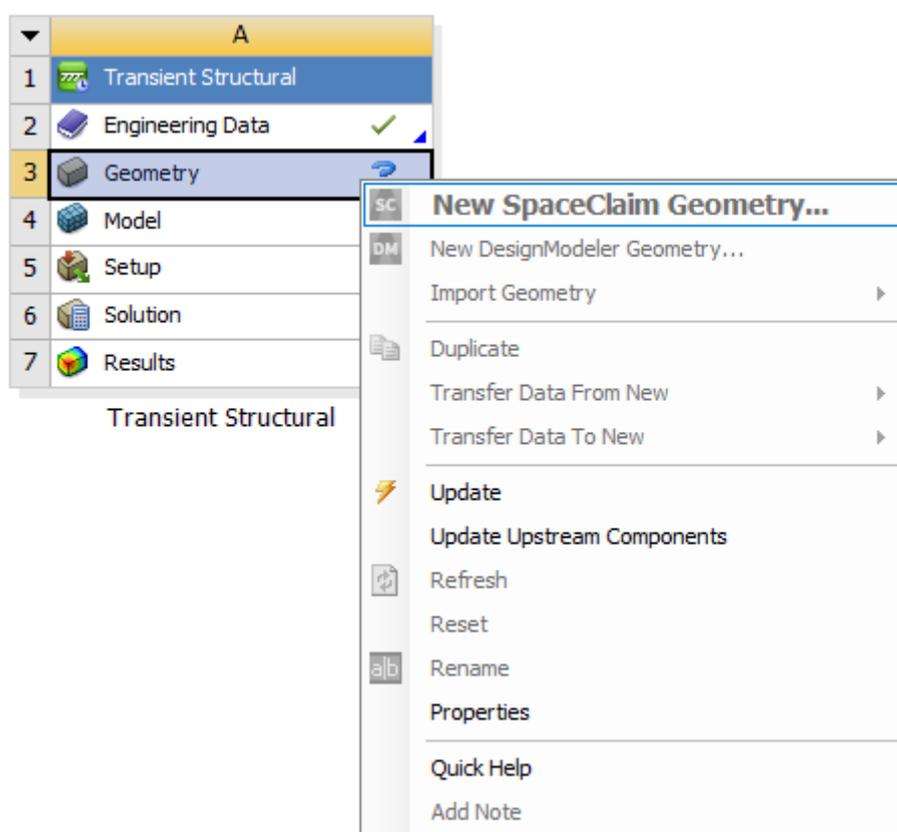


Рис. 4.1 Начало работы в SpaceClaim

Интерфейс SpaceClaim представлен следующими элементами (рис. 4.2):

1. Закладки меню быстрого доступа;
2. Окно структуры документа;
3. Вспомогательные инструменты;
4. Рабочее поле.

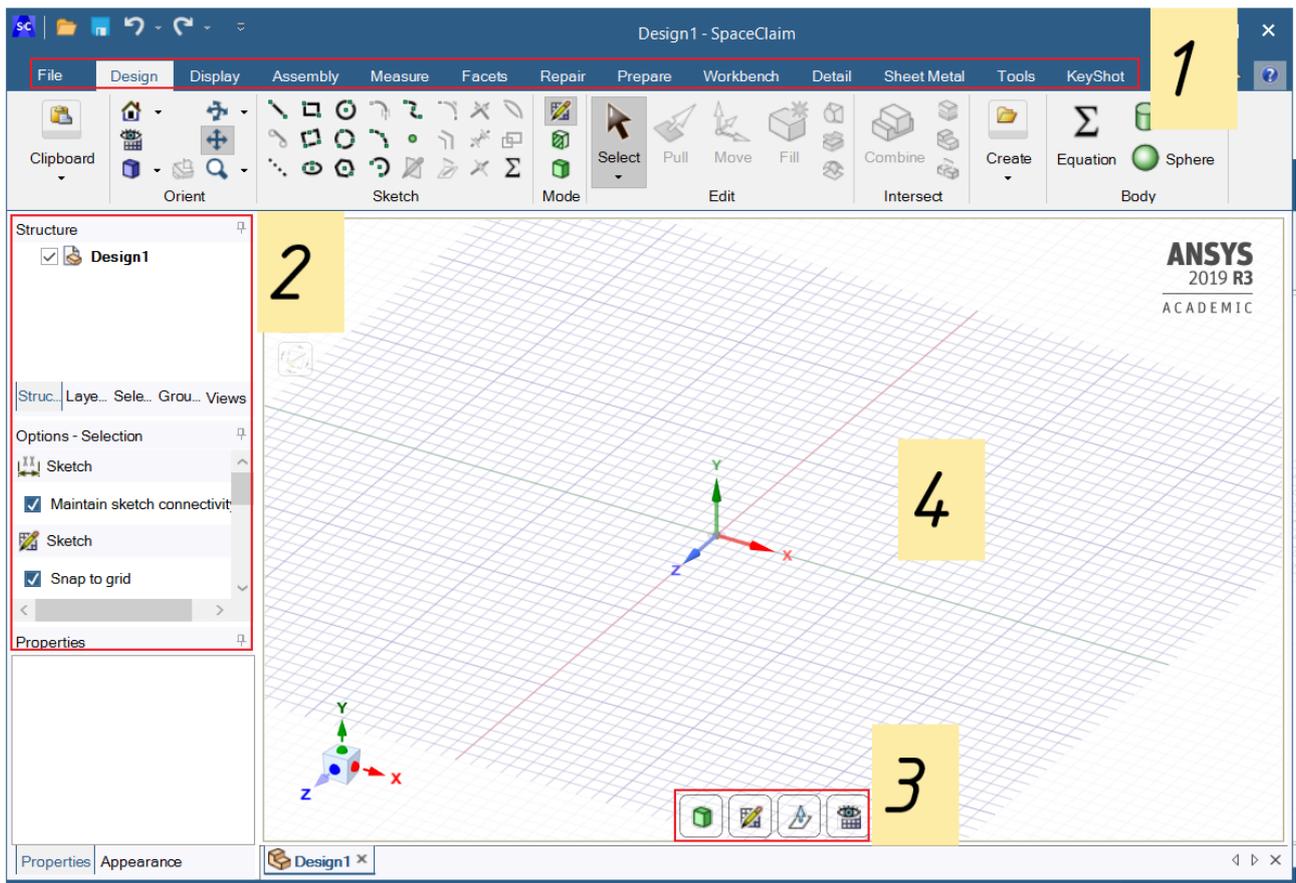


Рис. 4.1 Интерфейс модуля SpaceClaim

5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данном разделе представлен порядок выполнения лабораторных работ. Приводится материал, необходимый для получения навыков работы в следующих приложениях:

- Модуль подготовки геометрических моделей Space Claim;
- Модуль Transient Structural. Позволяет решать задачи динамики конструкций и основывается на неявных схемах интегрирования уравнений движения;
- Модуль Static Structural. Решает задачи механики деформируемого тела в статической постановке.

5.1 Задание 1. Построение геометрической модели болта в модуле Space Claim

Пример интересен тем, что в процессе построения геометрической модели обучающийся получает навыки работы с основными инструментами программы.

Решение

1. Начало построения геометрической модели болта (рис. 5.1):

1. Выбираем инструмент Cylinder;
2. В произвольной точке области построения кликаем мышкой в первой точке и вытягиваем отрезок до второй точки на плоскости, задавая ось будущей модели. Вводим необходимое значение длины цилиндра в подсвеченном окне;
3. Вручную перемещая курсор от второй точки в перпендикулярном направлении, задаем значение диаметра цилиндра.

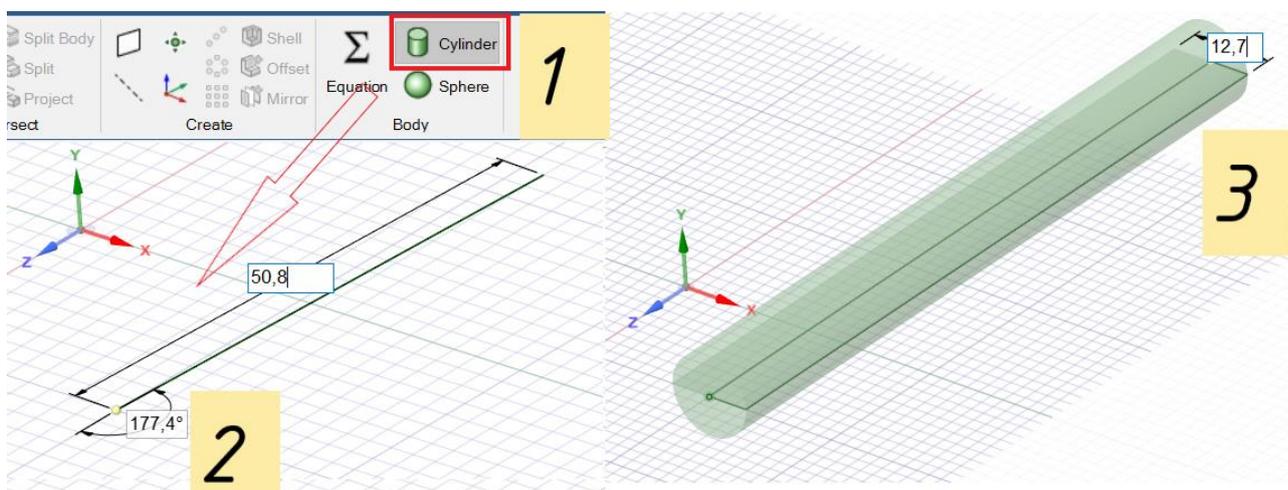


Рис. 5.1 Начало построения геометрической модели болта

2. Построение головки болта (рис. 5.2):

1. Выбираем на панели инструментов окружность;
2. Выбираем плоскость построения на поверхности тела болта. Нажимаем на кнопку Select New Sketch Plane и указываем на видимую торцевую поверхность цилиндра (становится желтым цветом).
3. Строим головку болта соосно телу болта (построенному цилиндру), вводим значение диаметра;
4. Выбираем на панели инструментов Pull. Вытягиваем плоскость, образованную окружностью тела болта, и плоскость, образованную окружностью головки цилиндра, на необходимую высоту (с зажатой клавишей Ctrl, становятся оранжевого цвета).

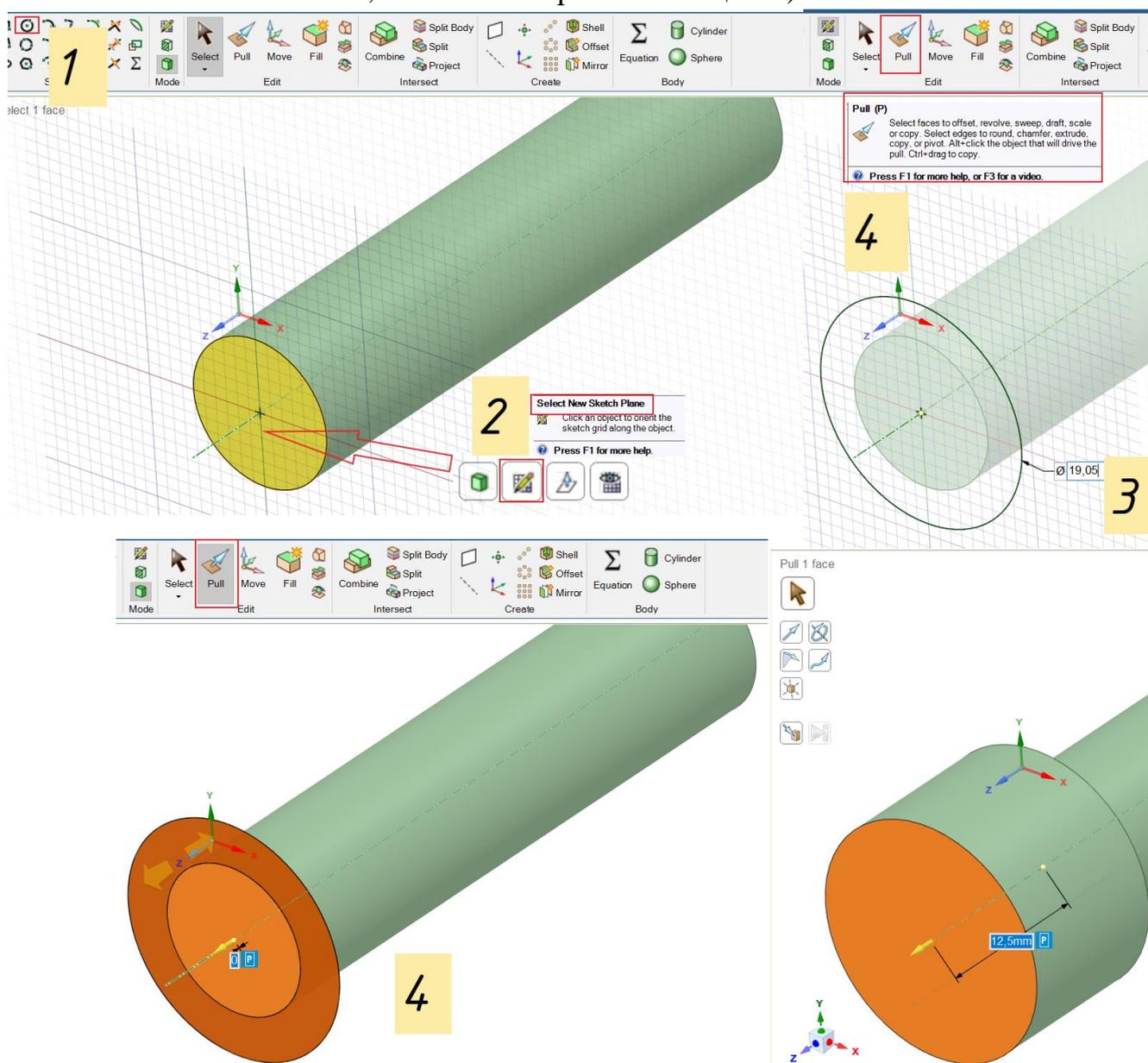


Рис. 5.2 Построение головки болта

3. Построение шестигранного отверстия (рис. 5.3):

1. Выбираем инструмент Polygon;
2. Указываем поверхность построения, приравниваем центр будущего отверстия к оси, вытягиваем и вводим необходимый размер;
3. Строим углубление внутрь головки болта плоскостью, ограниченной шестигранником. Pull → выбор плоскости → вытягивание на необходимую глубину;

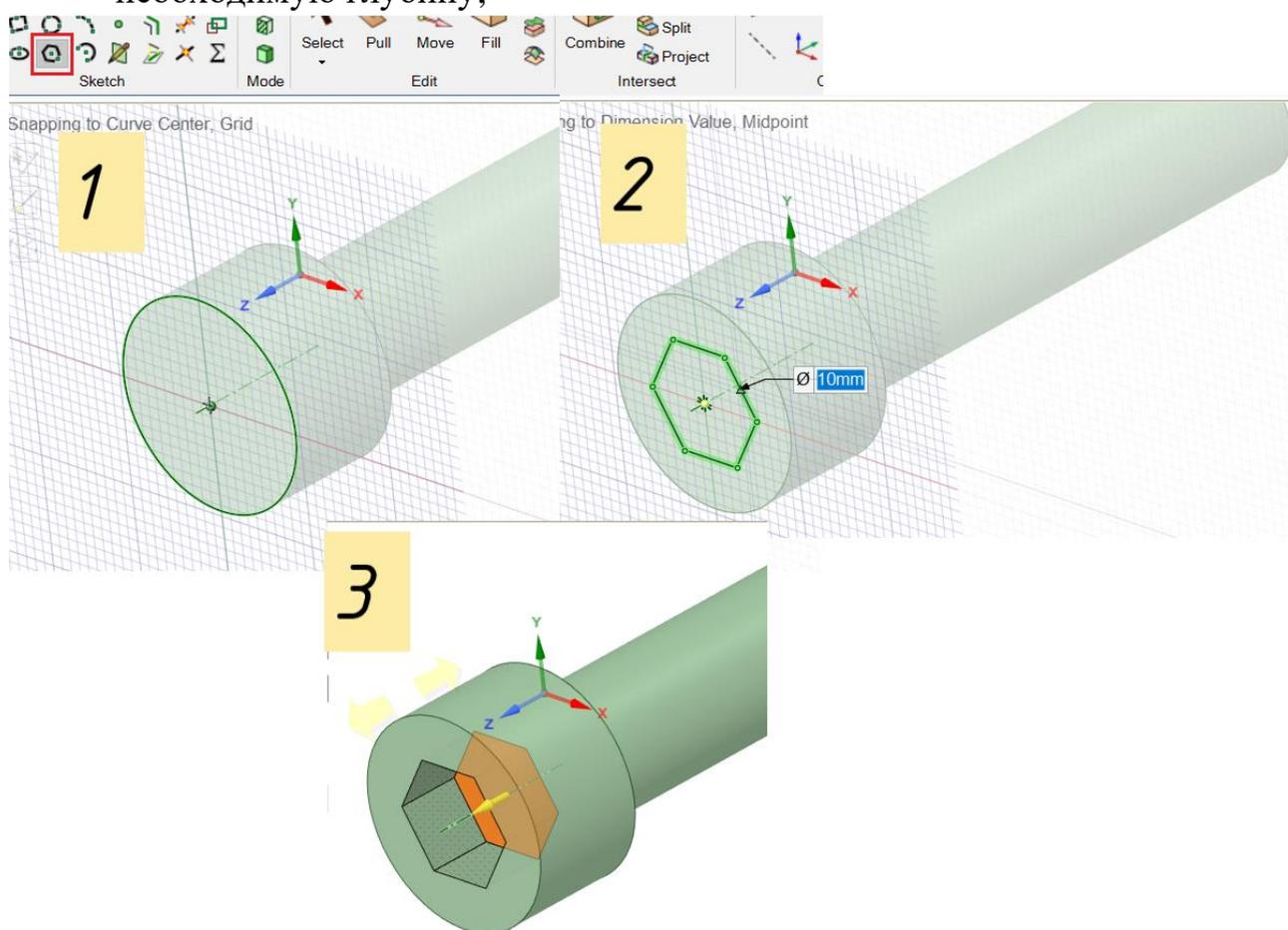


Рис. 5.3 Построение шестигранного отверстия

4. Построение фасок (рис.5.4). Необходимо построить 3 прямых фаски и 1 скругленную.

1. При включенном инструменте Pull выбираем необходимые ребра (отмечаются желтым цветом). На панели General выбираем тип фаски и вводим необходимые значения.
2. Повторяем операцию для скругленной фаски;

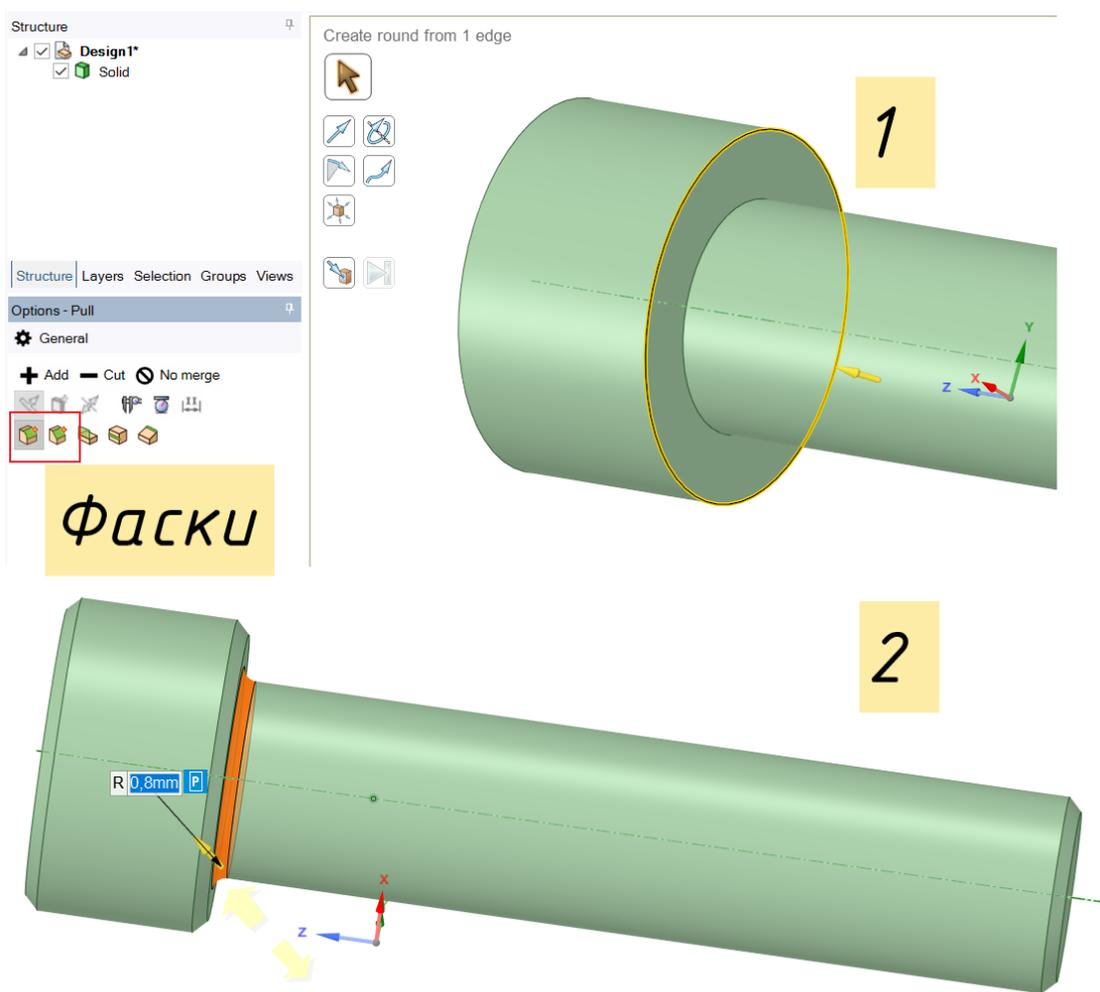


Рис.5.4 Построение фасок

5. Построение углубления в шестигранном отверстии (рис.5.5).

1. Выбираем Select → Кликаем на ось болта → Выбираем инструмент Plane;
2. Выбираем инструмент Plan View (таким образом модель отображается в 2-D) и затем выбираем инструмент Sketch Mode (переходим в режим “скетча” – создания геометрии);
3. Выбираем инструмент Line → от верхней грани углубления тянем линию до оси под требуемым углом → создаем прямоугольный треугольник (замкнутую поверхность), как на рис.5.5 (3);
4. Нажимаем на клавиатуре клавишу “D” (переходим в 3-D режим) → в Structure выбираем Design → на вкладке Display задаем прозрачный режим (Transparent);
5. Полученный на этапе (3) замкнутый прямоугольный треугольник необходимо “закрутить” по оси болта, тем самым “вычисть” из поверхности болта объем в форме конуса. Для этого выбираем: Pull → выбираем плоскость “вычитаемой” поверхности →

выбираем инструмент Revolve → в параметрах Pull Options выбираем “ – ” Cut (вычитание из поверхности) → выбираем ось вращения → выбираем кнопку Full Pull (вычитаемая поверхность совершит оборот вокруг выбранной оси на 360°).

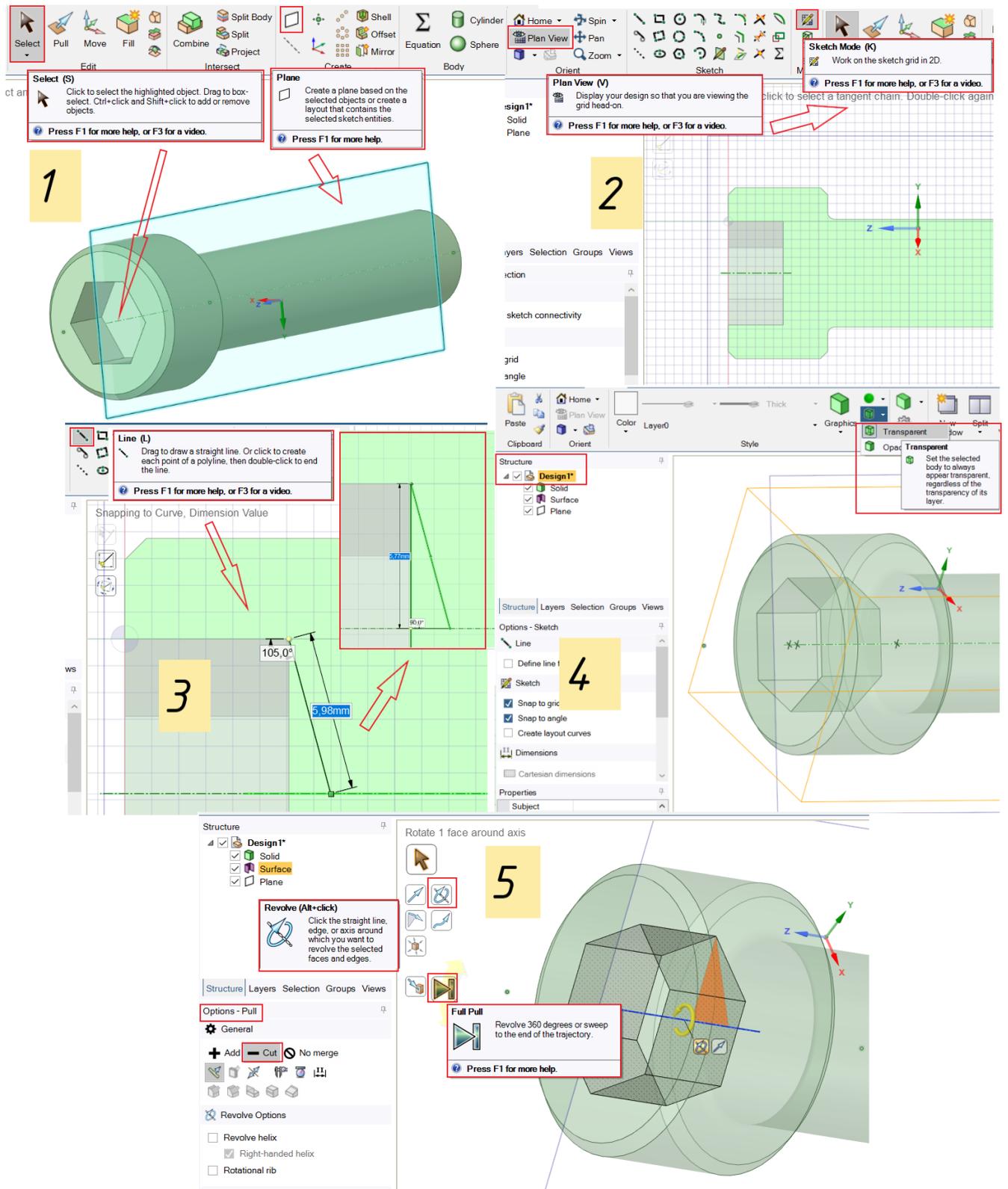


Рис. 5.5 Порядок построения углубления в шестигранном отверстии

Для просмотра результата данного этапа (рис. 5.6) выбираем Select → в структуре документа Design1* → переходим на вкладку Display и вместо режима прозрачности Transparent выбираем сплошной цвет Opaque (рис. 5.6, а). Для большей наглядности поменяем визуализацию на режим отображения материала на режим Metallic (рис.5.6, б).

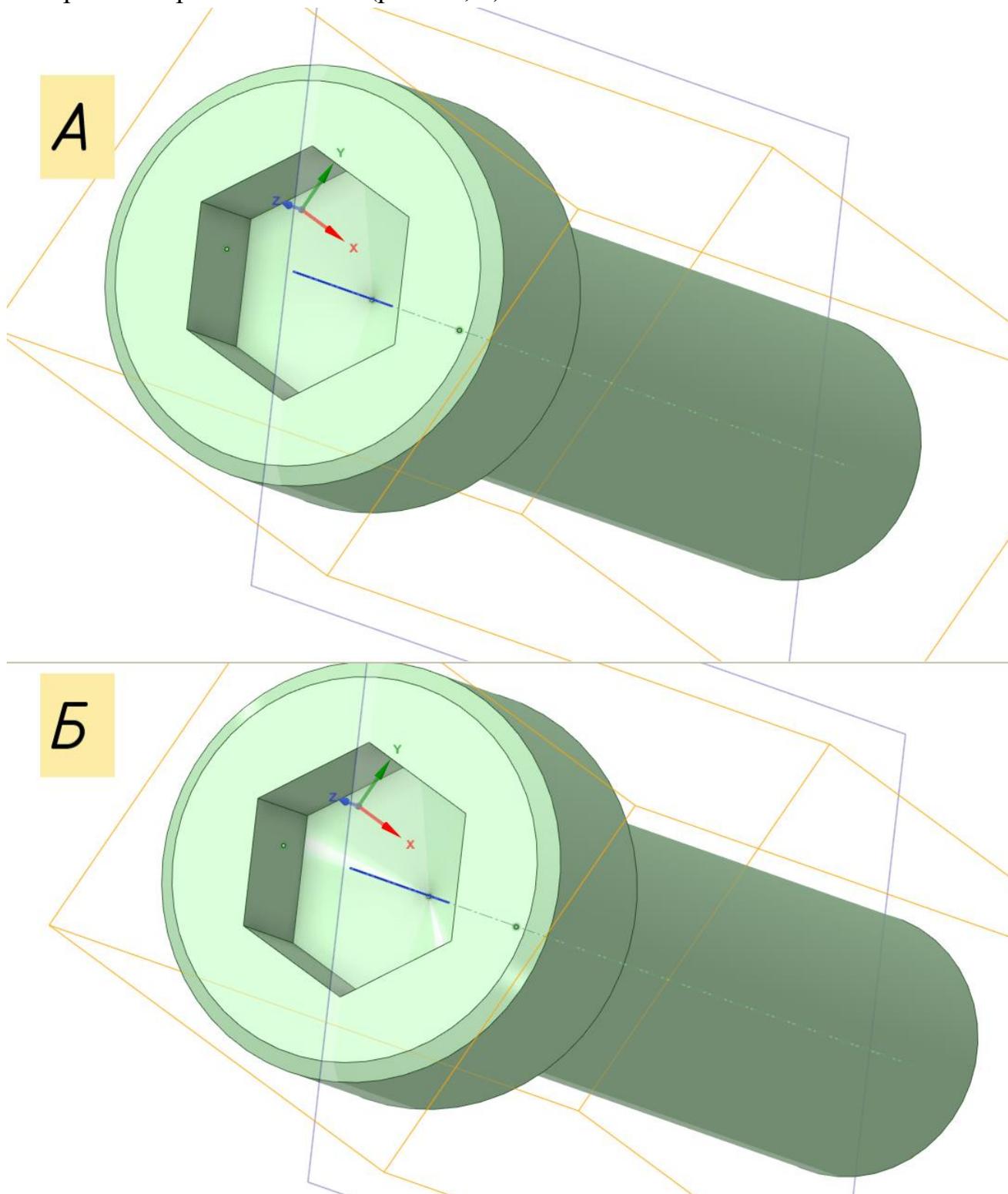


Рис. 5.6 Поверхность модели, полученная в результате выполнения этапов построения (1) – (5). А – в режиме сплошного цвета Opaque; Б – в режиме отображения материала Metallic

Для просмотра в режиме разреза выбираем: Select → плоскость, на которой выполнялось построение “вычитаемого” конуса → Plan View → режим Section Mode. Рассмотренная операция представлена на рис. 5.7:

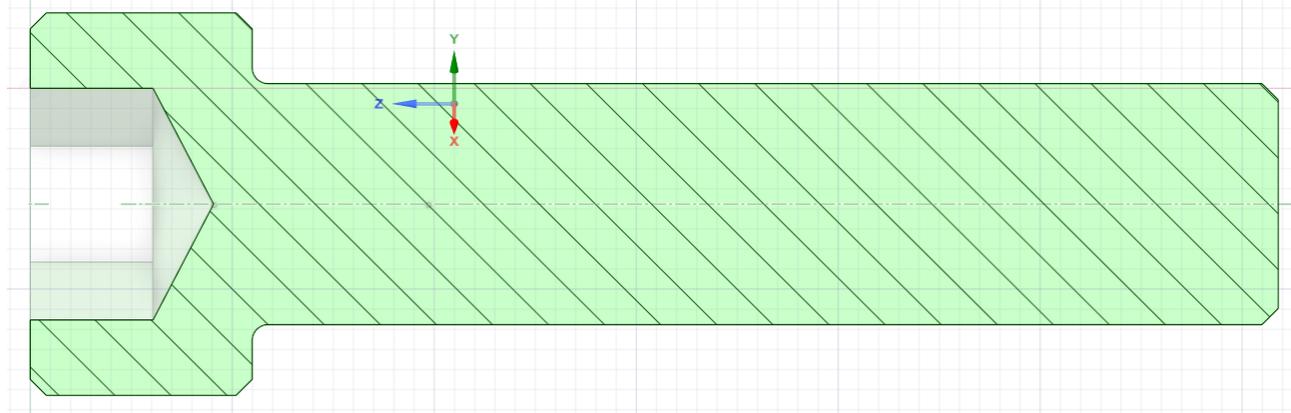


Рис. 5.7 Изображение модели в продольном разрезе

6. Задание разделяющей плоскости – начала построения резьбы (рис. 5.8).

1. Выберем поверхность, находящуюся между двумя фасками (нижняя фаска головки болта и скругленная фаска), и проведем через нее плоскость инструментом Plane;
2. Передвигаем плоскость на заданное расстояние, выбрав инструмент перемещения Move. Передвижение производим в соответствии с направлением синей стрелки, нажав на нее (вдоль оси болта).

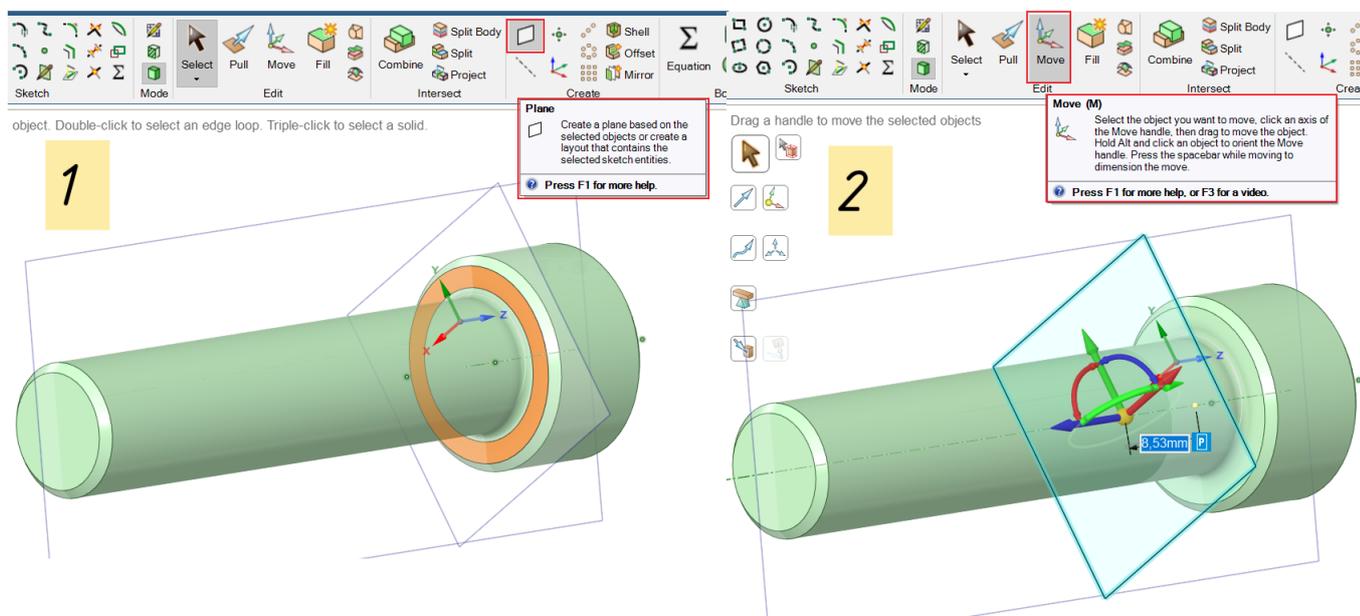


Рис. 5.8 Задание разделяющей плоскости – начала построения резьбы

7. Построение резьбы на модели болта (рис. 5.9 – 5.12)

1. Выбираем плоскость построения (соосная оси болта) → переходим в режим Plan View → производим переход в режим черчения Sketch. Далее необходимо задать 2 вспомогательные линии (инструмент Construction Line). Первую линию помещаем на грань тела болта → выбираем инструмент Move и с зажатой клавишей Ctrl перемещаем вспомогательную линию на заданное расстояние (в направлении зеленой стрелки), задавая высоту резьбы → Инструментом Line отрисовываем форму витка будущей резьбы. Вспомогательная линия отображается пунктиром. Вторую линию устанавливаем на грань тела болта. Данный этап представлен на рис. 5.9:

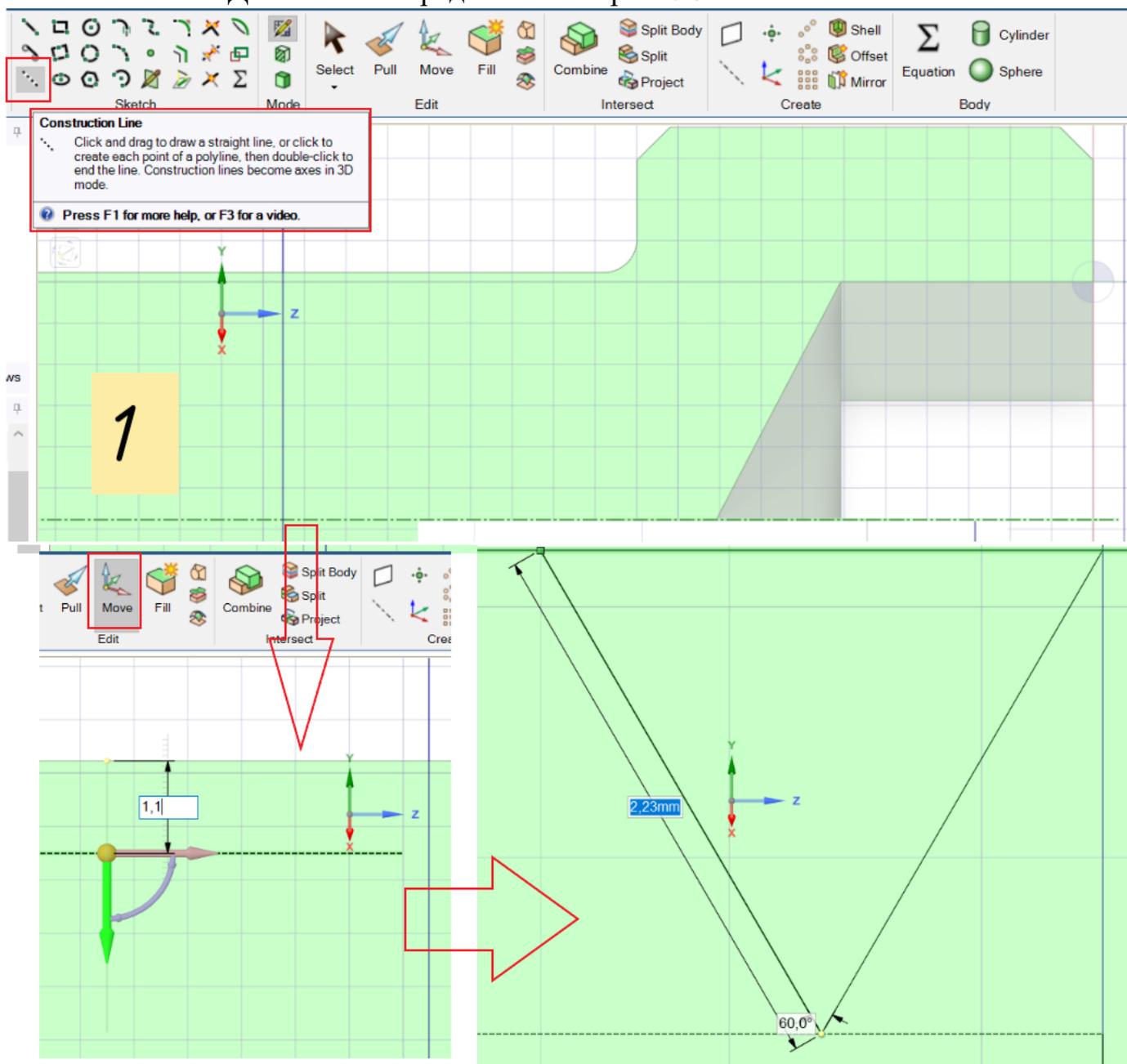


Рис. 5.9 Построение формы витка резьбы

2. Зададим скругление резьбы инструментом Tangent Arc, дуги по касательной. Выбираем 2 линии, между которыми необходимо выполнить скругление, задаем требуемые значения угла и диаметра. (рис.5.10). Аналогичную операцию проводим между линиями граней зуба резьбы и гранью тела болта.

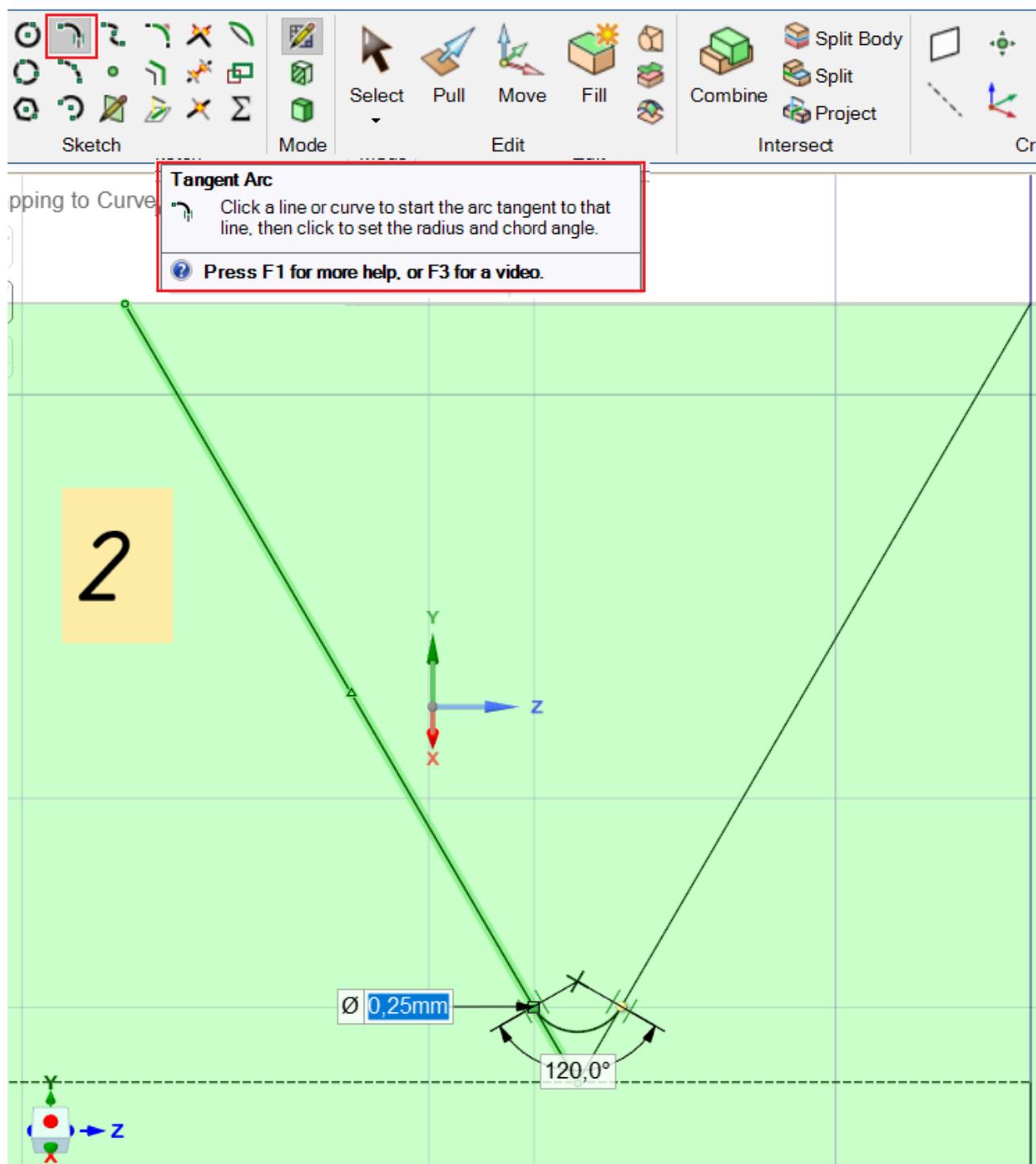


Рис. 5.10 Скругление углов витка резьбы

После выполнения скругления уберем лишнюю геометрию. Вспомогательные линии выберем правой кнопкой мыши → Delete. Элементы, вместо которых выполнены скругления, удаляются инструментом Trim Away. Соединим вершины зубьев инструментом Line, чтобы построить замкнутую плоскость (рис. 5.11).

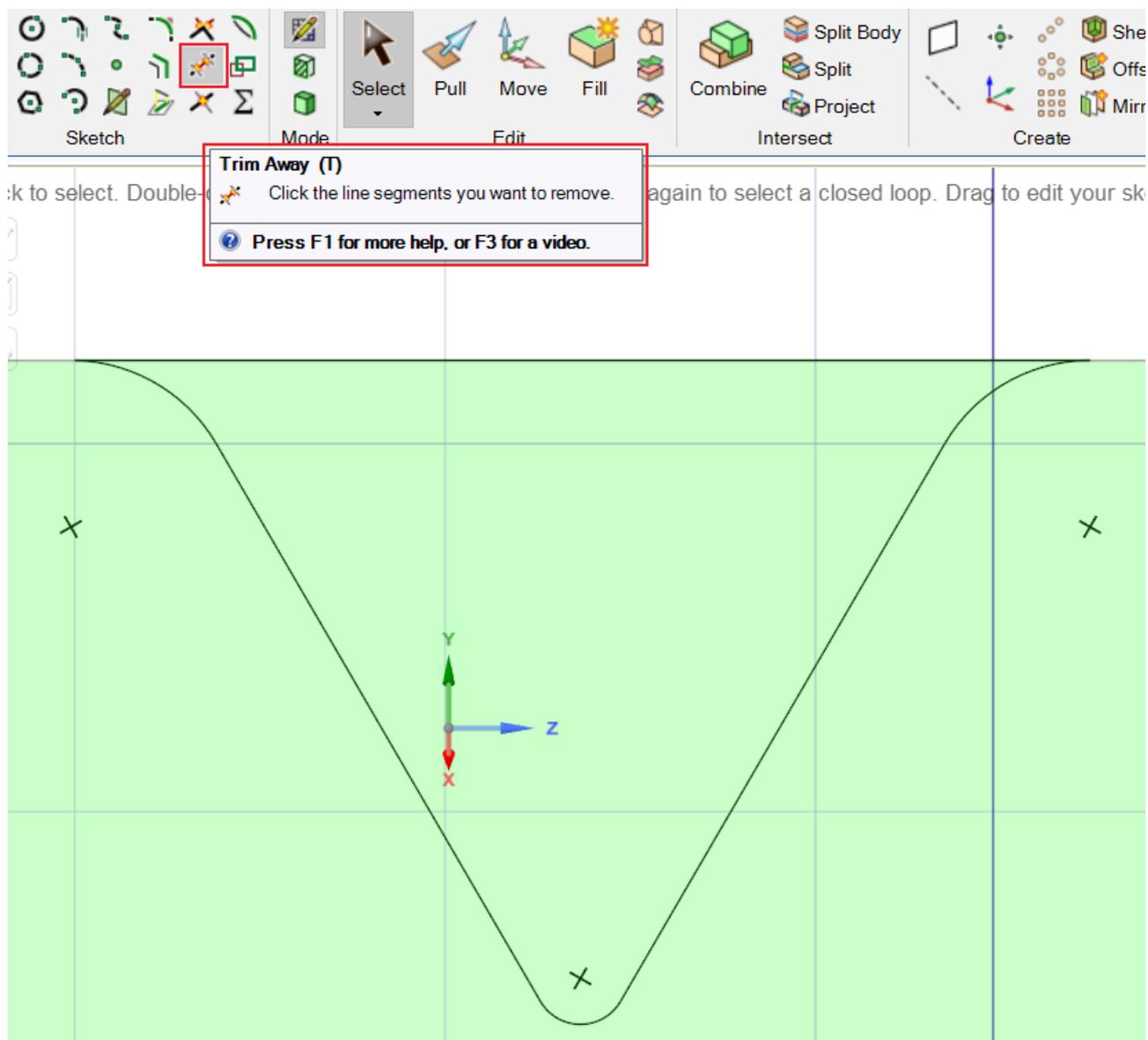


Рис. 5.11 Придание окончательной геометрии впадины зуба

3. Построение резьбы. Переходим в 3-D режим (нажатие клавиши D) → Выбор Design1* и снятие отображения плоскостей (Plane) на панели Structure → В панели Design выбираем прозрачный режим отображения модели Transparent → Выбираем построенную плоскость будущего зуба инструментом Pull → Выбираем инструмент Revolve → в параметрах Pull Options выбираем “-” Cut (вычитание из поверхности) → выбираем

ось вращения → в опциях Revolve Options отмечаем Revolve helix (вращение по спирали) – Right-handed helix (спираль правая) → Вводим значения Height (высота резьбы) и Pitch (шаг резьбы). Данный этап представлен на рис.5.12:

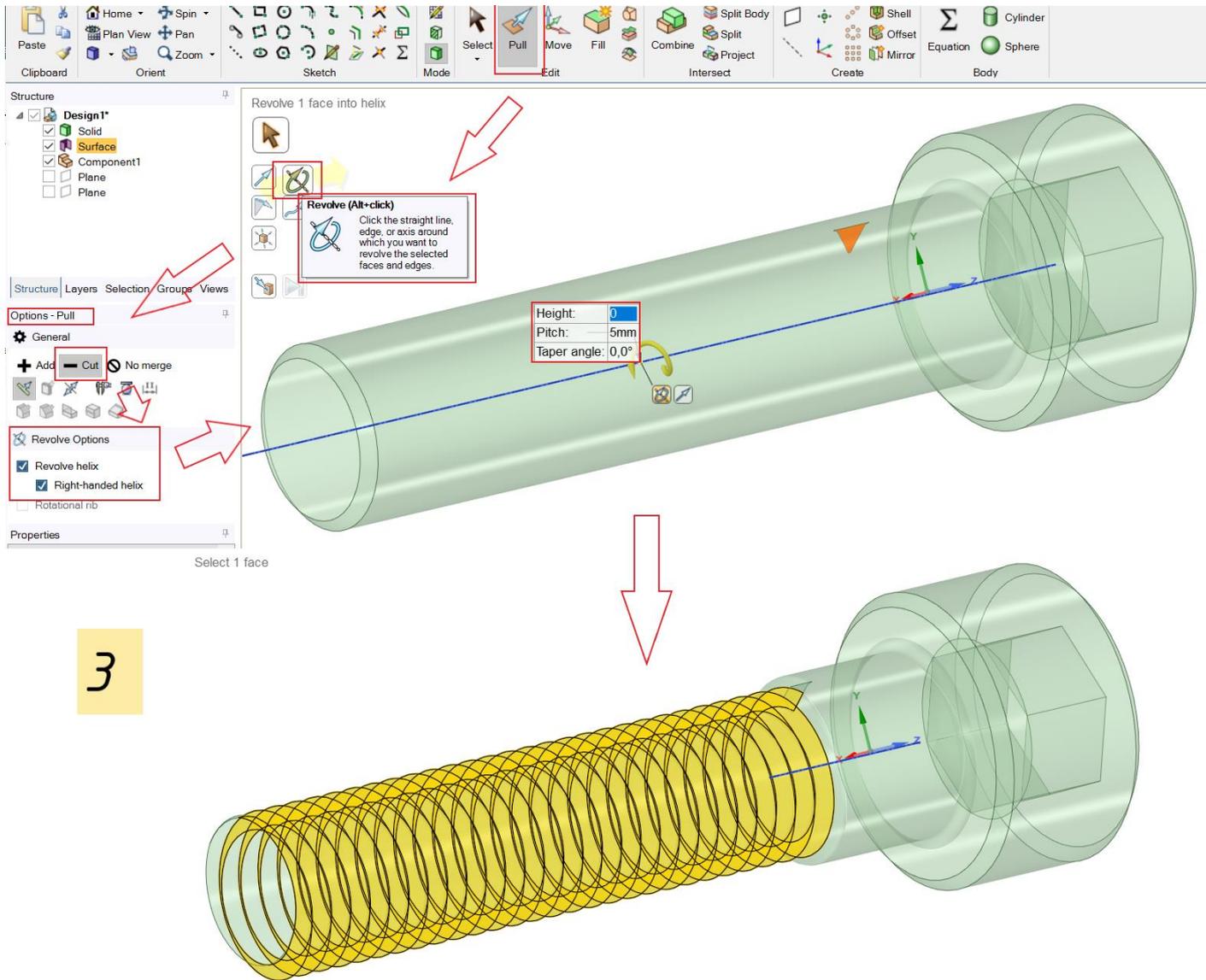


Рис. 5.12 Построение резьбы

Задача решена. Полученная модель представлена на рис. 5.13.

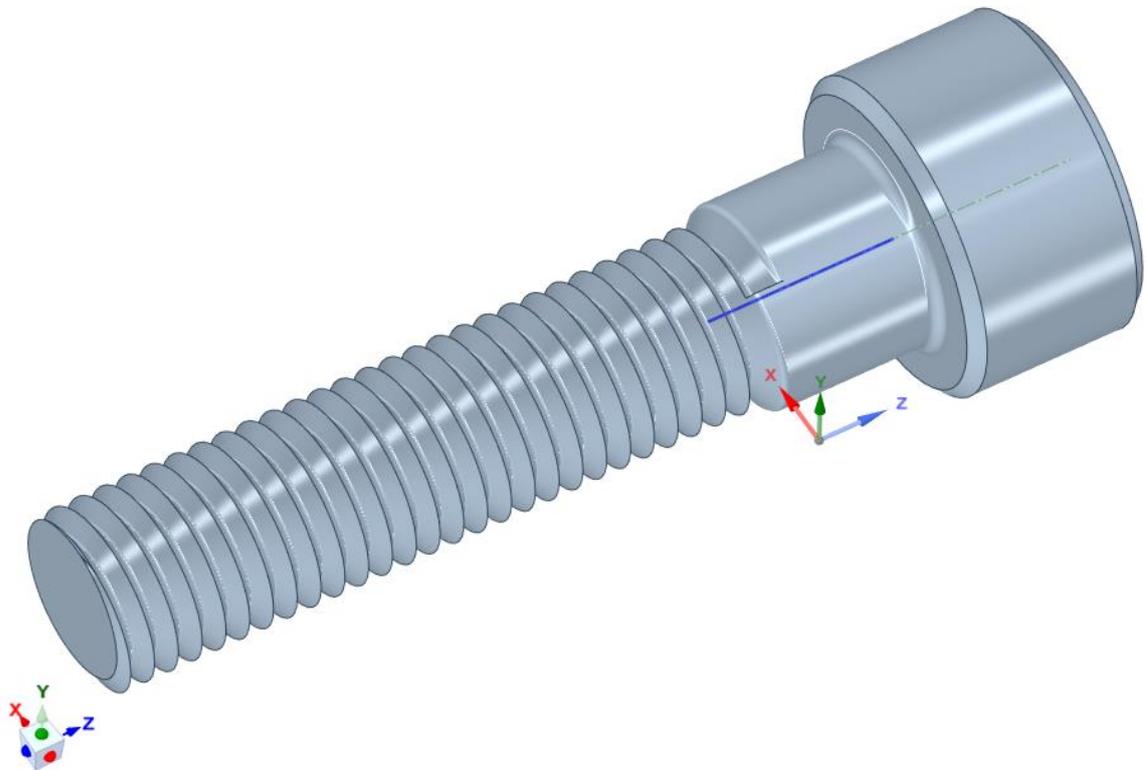
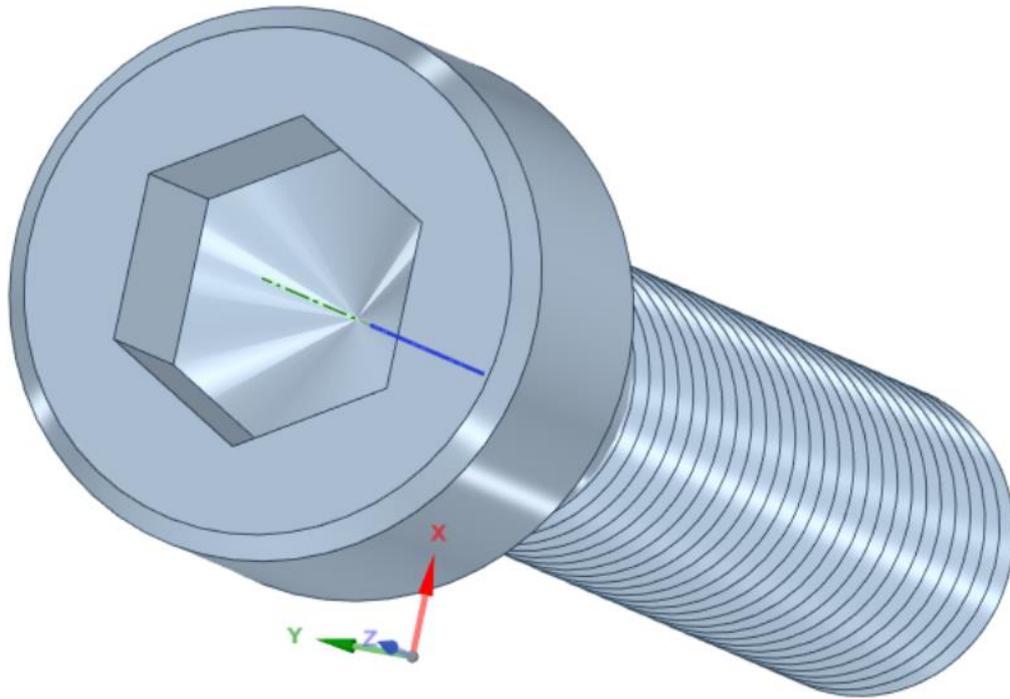


Рис. 5.13 Модель болта, построенная в модуле SpaceClaim

5.2 Задание 2. Анализ модели поршневого кольца в модуле Transient Structural

Задание подразумевает анализ деформации поршневого кольца компрессора в результате воздействия газовых сил. При этом газ действует на его грани, нижняя грань имеет жесткую заделку (плотно прилегает к торцевой канавке поршня).

Решение

1. Engineering Data. Приложение осуществляет выбор материала модели, управление его физическими и механическими свойствами и входных параметров математических моделей.

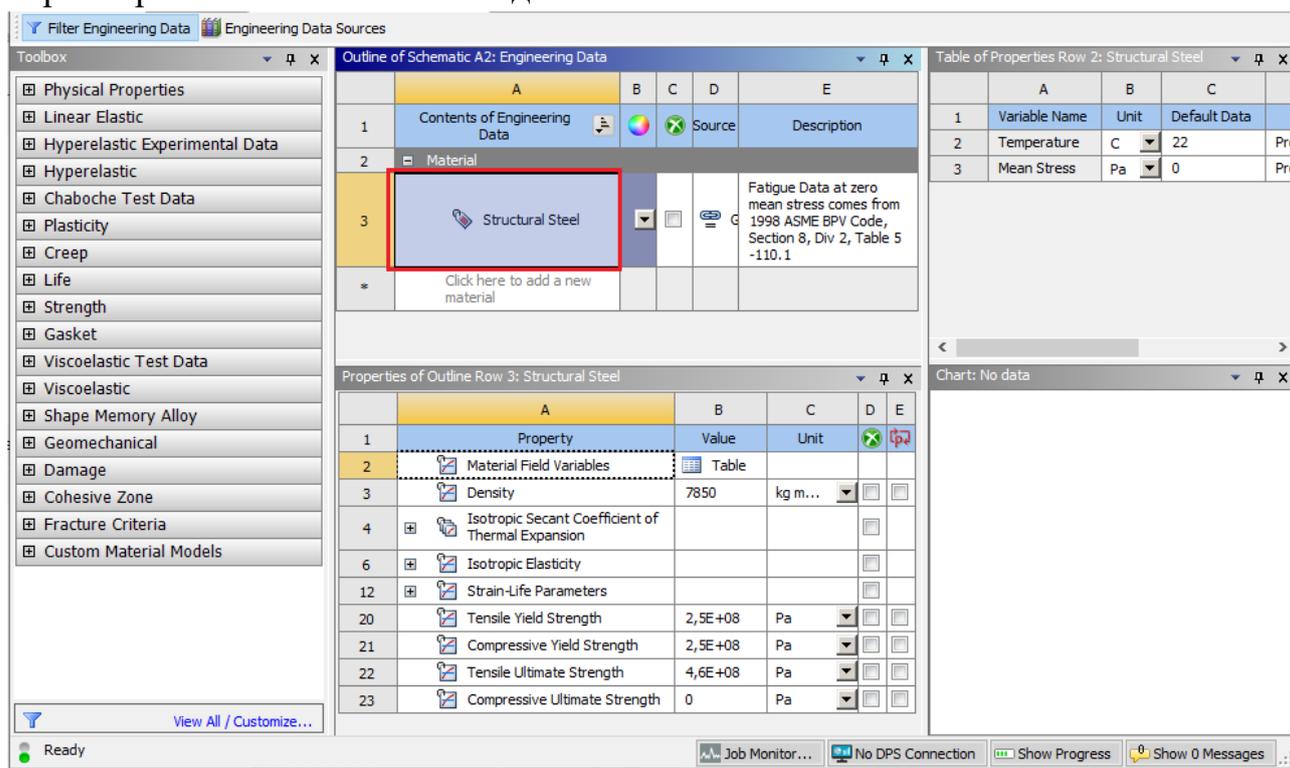


Рис. 5.13 Меню Engineering Data

2. Geometry. Порядок создания простейших геометрий подробно рассмотрен в п.5.1 (задание 1). Конструкция поршневого уплотнения в общем случае представляет собой кольцо квадратного сечения $b \times b$ и имеет разрез (замок). Замок может быть прямой или наклонный к плоскости кольца (под углом 45° или 60°).
3. Mesh. Покрытие модели кольца сеткой конечных элементов производится в следующей последовательности (рис.5.14):
 1. В дереве решений выбираем Mesh;
 2. Во вкладке Details of "Mesh" настраиваем параметры Settings → Relevance Center, таким образом настраивая качество сетки;
 3. Выбираем Mesh → Generate Mesh

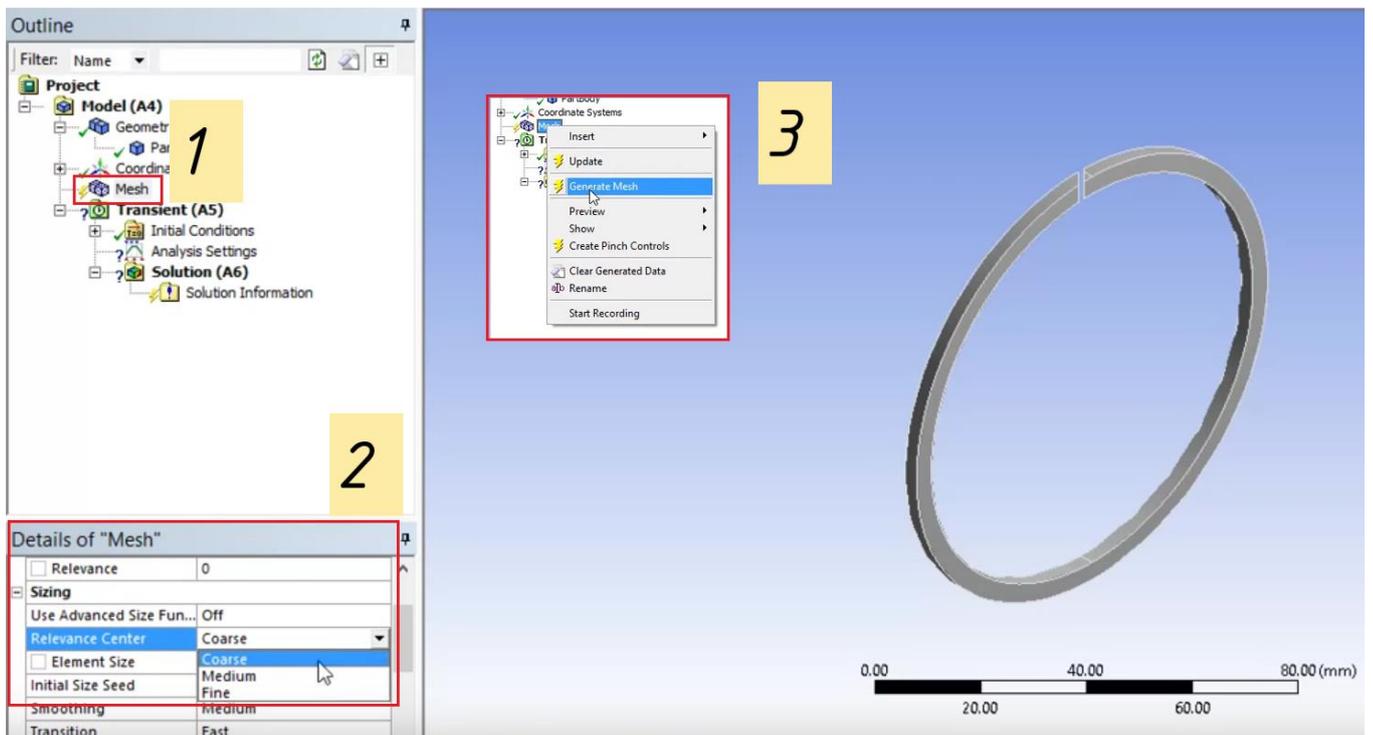


Рис. 5.14 Покрытие модели кольца сеткой конечных элементов

Расчетная сетка сгенерирована рис. 5.15:

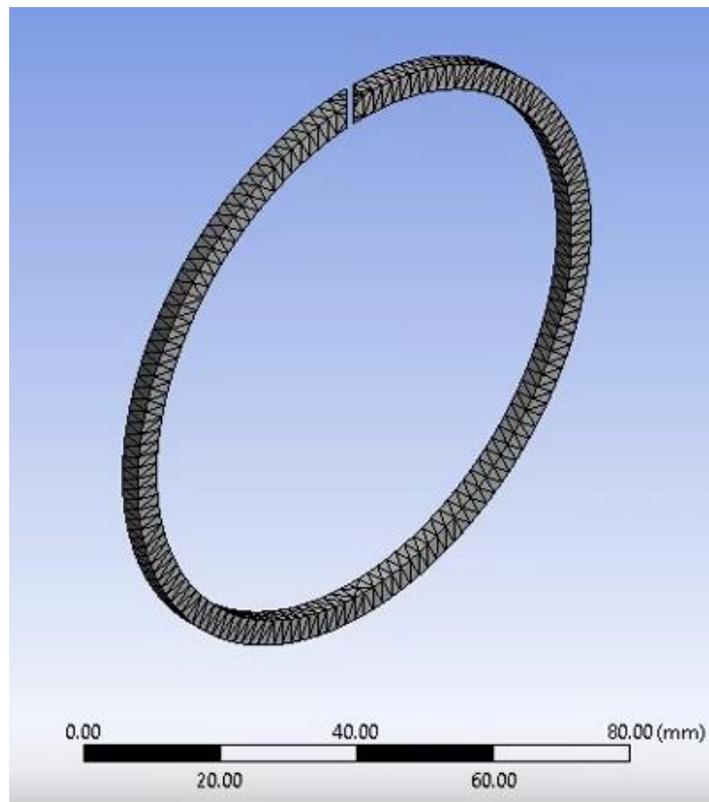


Рис. 5.15 Итог этапа Mesh

4. Setup. В дерево решений добавим (рис.5.16):

1. Loads → Pressure. Далее выбираем поверхности кольца, на которые будет действовать давление (верхняя, наружная, внутренняя и образованные замком). На модели выделяются зеленым цветом;
2. Во вкладке Details of “Pressure” в строке Magnitude указываем значение давления, действующего на грани кольца в МПа. На модели выделяется красным цветом;
3. В дереве решений выбираем Analysis Settings и задаем: Initial Time Step = 1 s, Minimum Time Step = 1 s, Maximum Time Step = 1 s;

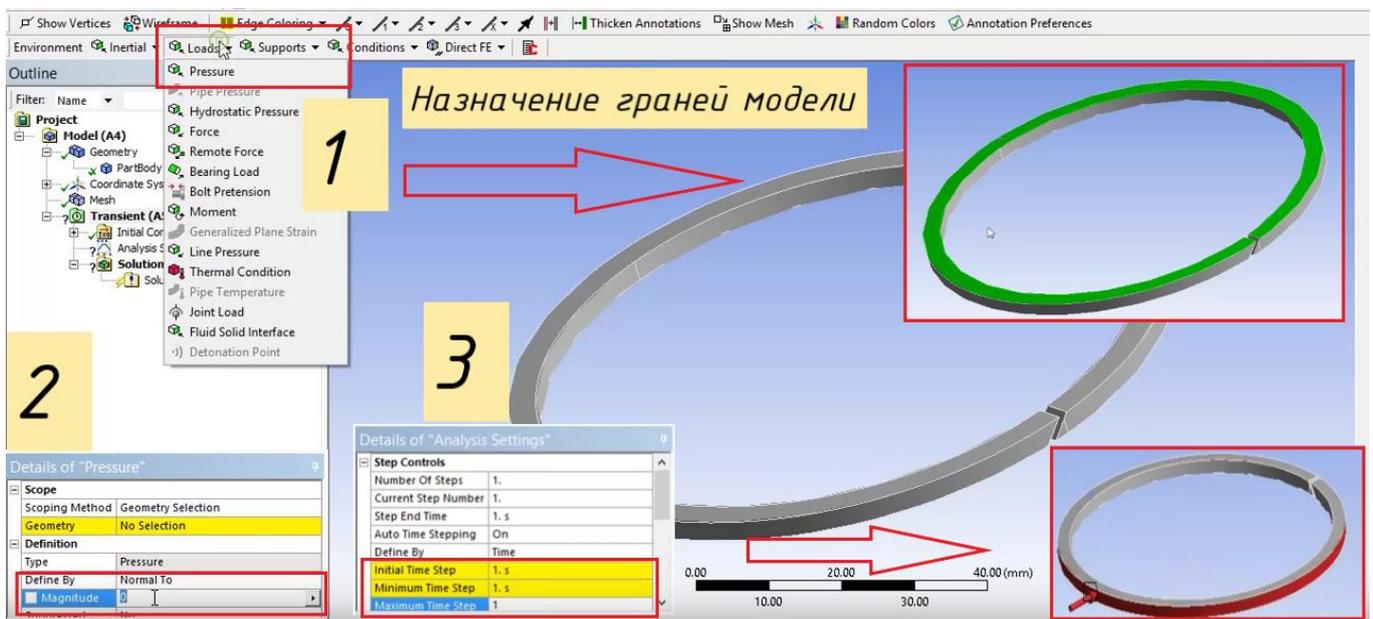


Рис. 5.16 Назначение поверхностей действия газовых сил и параметров действующего давления

4. Нижнюю поверхность кольца определяем как грань, в сечении которой имеет место жесткая заделка. На модели выделяется сиреневым цветом; (рис. 5.17):
Supports → Fixed Support → Выбор грани.

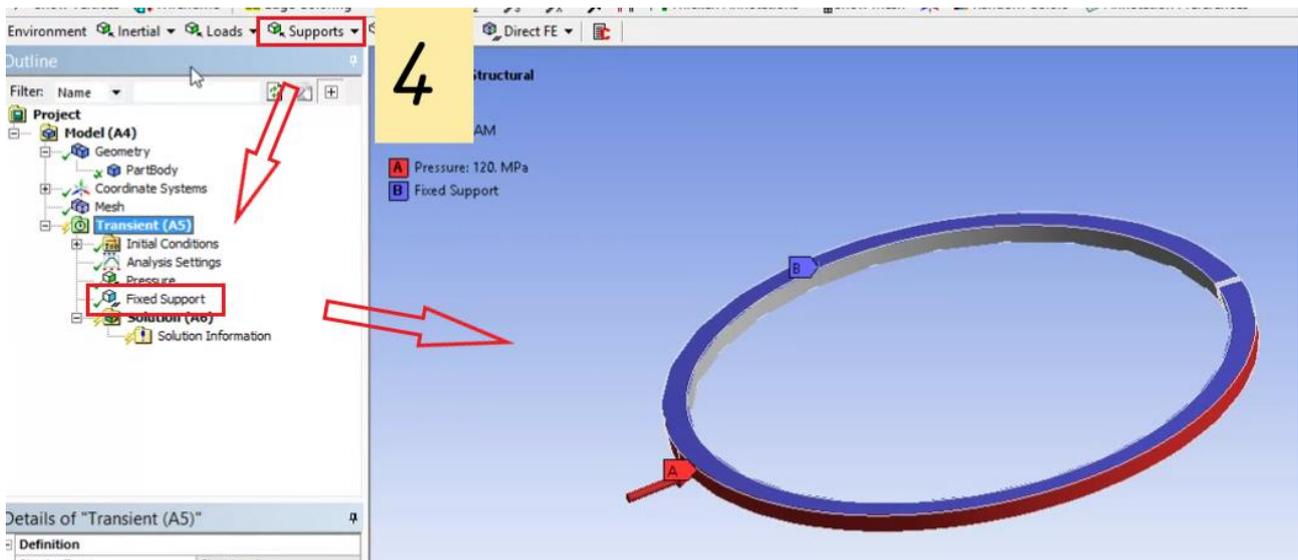


Рис. 5.17 Назначение поверхности кольца с жесткой заделкой
Задание граничных условий окончено.

5. *Solution*. Анализ деформаций под действием условий, заданных на этапе Setup. В рабочем поле устанавливаем (рис. 5.18):

- Deformation → Total, Directional;
- Strain → Equivalent;
- Stress Equivalent.

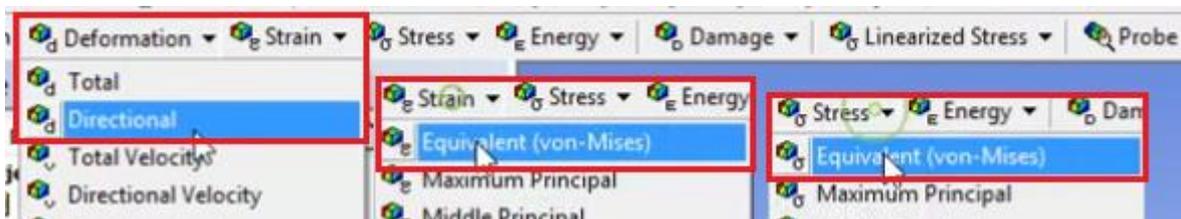


Рис. 5.18 Установка характера деформаций

6. *Results*. В дереве решений выбираем Solution → Solve. В результате получаем поля деформации поршневого уплотнения (рис.5.19):

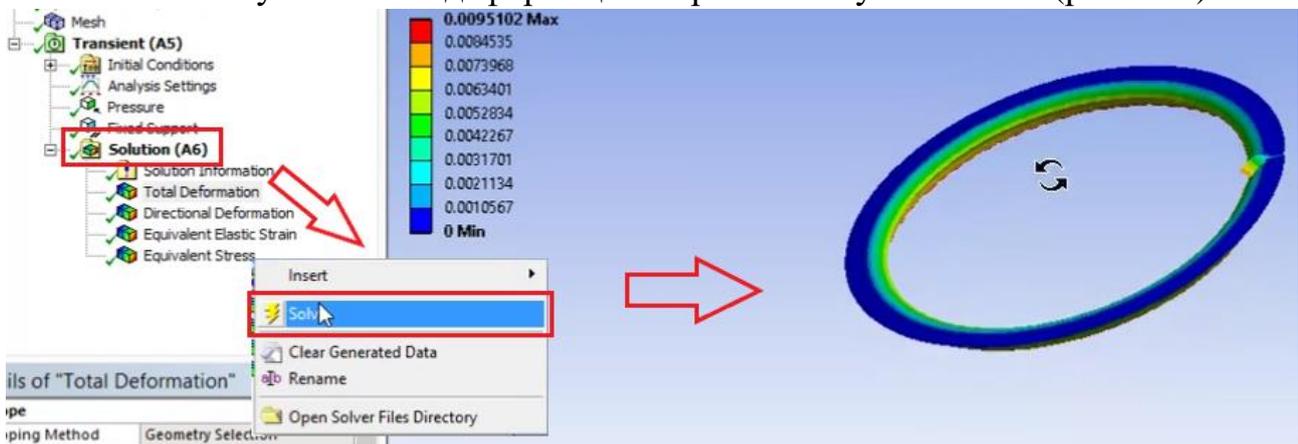


Рис.5.19 Результаты решения задачи

5.3 Задание 3. Анализ работы конструкции из двух пластин, соединенных болтом, в модуле Static Structural

Геометрическая модель представляет собой две расположенные друг на друге пластины, каждая из которых имеет длину A , ширину B , высоту S и отверстие диаметром $D_{\text{П}}$. Пластины соединены болтом, высота тела болта $H_{\text{ТБ}}=2S$, высота головки болта $H_{\text{ГБ}}=0,5S$, диаметр тела болта $D_{\text{ТБ}}=D$, диаметр головки болта $D_{\text{ГБ}}=2D$.

В данной лабораторной работе необходимо применить навыки, полученные при решении задач пунктов 5.2 и 5.3. Последовательность решений соответствует алгоритму решения задач в ANSYS:

1. Расчетная геометрия (рис. 5.20):

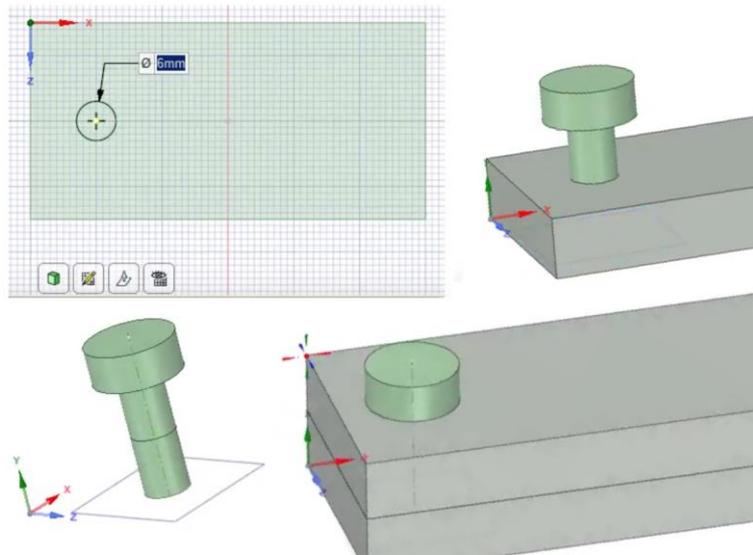


Рис. 5.20

2. Построение сетки конечных элементов (рис. 5.21):

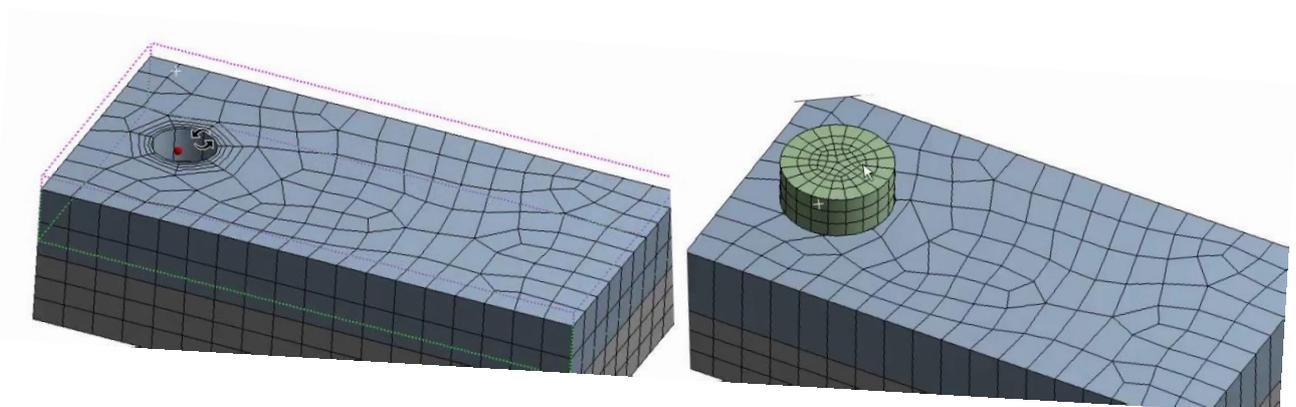


Рис. 5.21

3. Задание граничных условий (рис. 5.22):

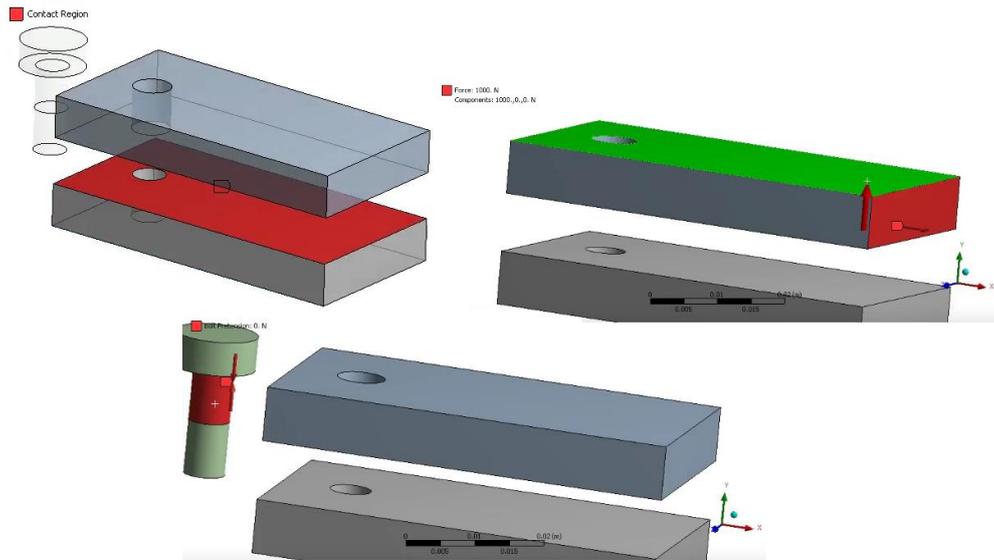


Рис. 5.22

4. Решение (рис. 5.23):

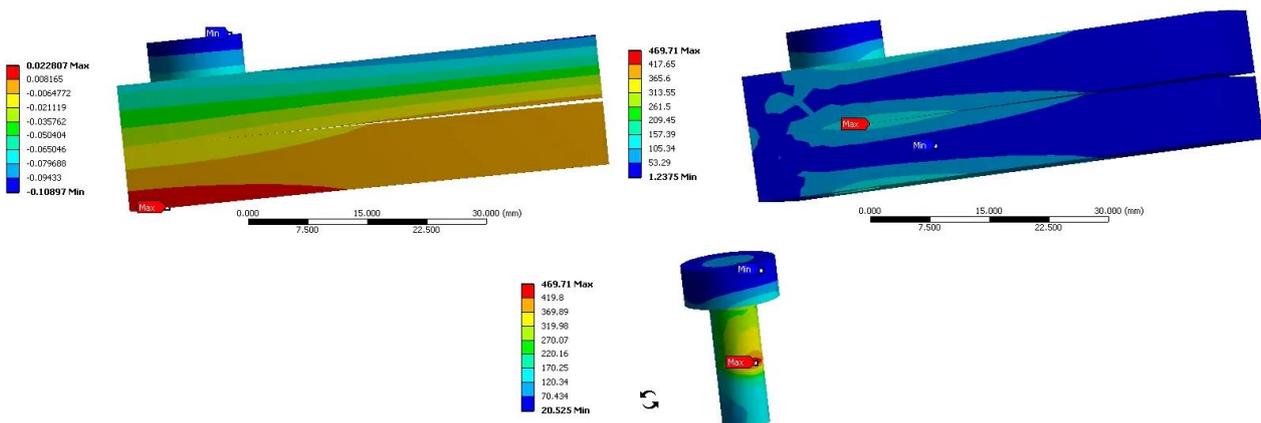


Рис. 5.23

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЗАДАНИЙ

Задание 1

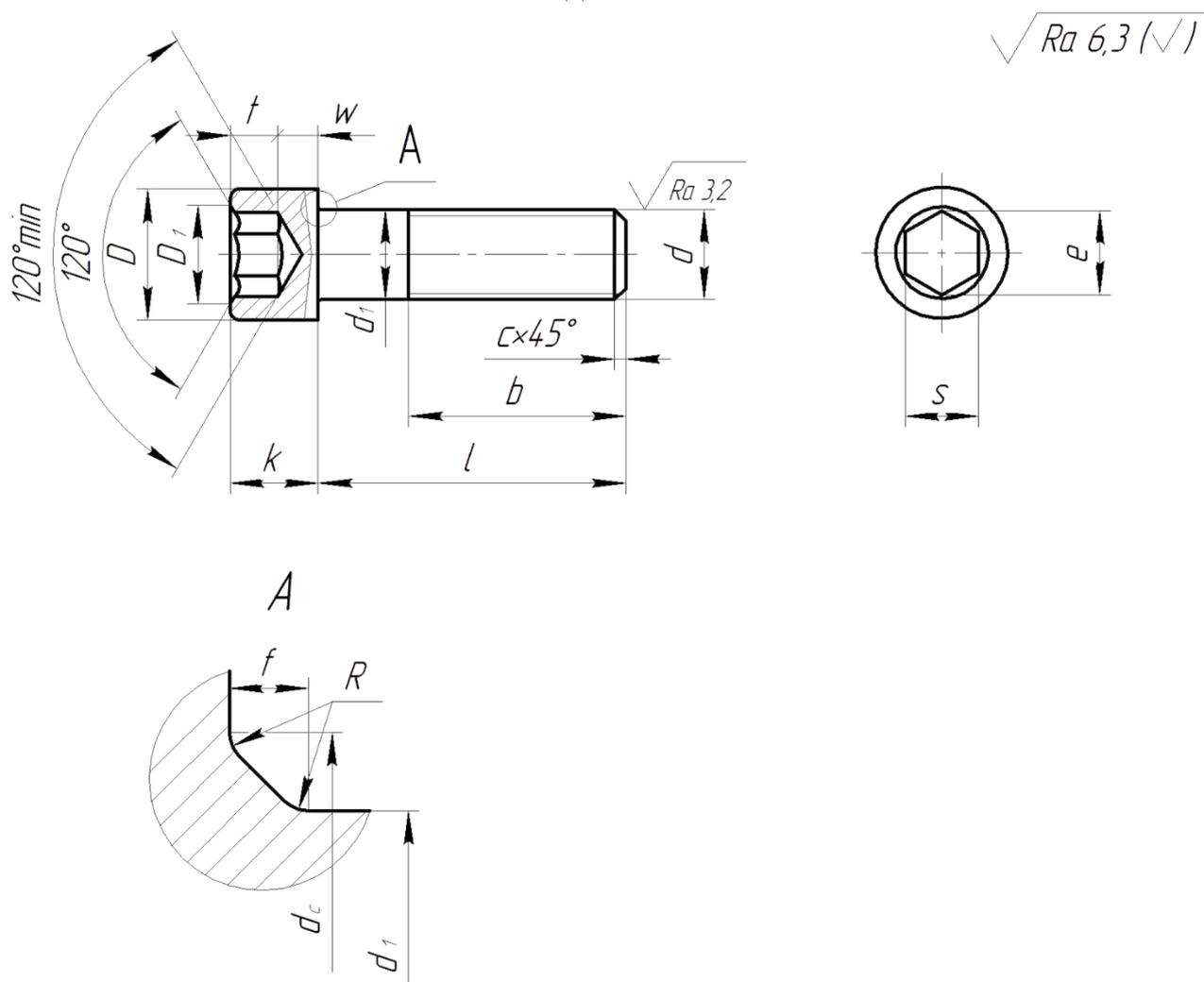


Рис.1 Схема к построению геометрической модели болта в модуле Space Claim

Таблица 1 Исходные данные для создания модели болта

Параметры винта	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
D	96	84	72	63	54	45	36	30
D ₁	50	45	40	35	29	24	20	18
t	30	25	20	20	18	15	12	10
d	50	45	40	35	29	24	20	18
c	4	4	4	4	3	3	3	3
b	140	124	108	96	84	72	60	52

Параметры винта	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
l	120	120	80	70	50	35	30	20
k	63.26	55.26	47.38	41.38	35.38	29.48	23.48	19.48
e	52.53	46.83	41.13	36.57	30.85	25.15	21.73	19.44
s	46	41	36	32	27	22	19	17
f	4	4	4	4	3	3	3	3
R	3	3	3	3	2	2	2	2
Параметры винта	Номер варианта							
	9	10	11	12	13	14	15	16
D	24	21	18	16	13	10	8.5	7
D ₁	14	12	10	8	6	5	4	3
t	7	6	6	5	4	3	2	2
d	24	21	18	16	13	10	8.5	7
c	3	2	2	2	1	1	1	1
b	44	40	36	32	28	24	22	20
l	16	14	12	10	8	6	5	5
k	15.57	13.6	11.57	9.64	7.64	5.7	4.82	3.82
e	16	13.72	11.43	9.15	6.86	5.72	4.58	3.44
s	14	12	10	8	6	5	4	3
f	3	2	2	2	1	1	1	1
R	2	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5

Размеры даны в миллиметрах

Задание 2

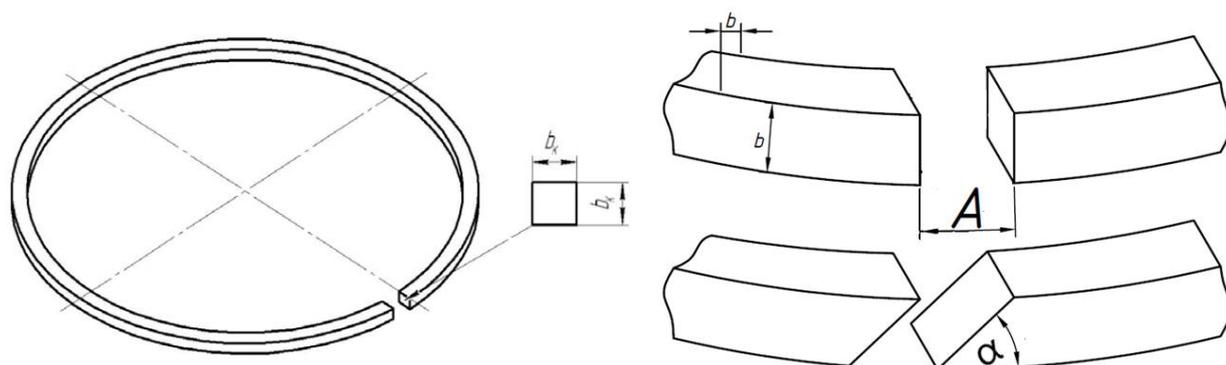


Рис. 2 Схема к построению геометрической модели поршневого уплотнения

Таблица 2 Исходные данные для создания модели

№ вар., п/п	R, мм	b, мм	A, мм	α	№ вар., п/п	R, мм	b, мм	A, мм	α
1	20	3	0.5	45	9	36	4	1	60
2	22	3	0.5	45	10	38	4	1	60
3	24	3	0.5	45	11	40	4	1	60
4	26	3	0.5	45	12	42	4	1	60
5	28	3.5	1	45	13	44	4.5	2	90
6	30	3.5	1	45	14	46	4.5	2	90
7	32	3.5	1	60	15	48	4.5	2	90
8	34	3.5	1	60	16	50	4.5	2	90

Задание 3

Пластина имеет длину A , ширину B , высоту S и отверстие диаметром D . Пластины соединены болтом, высота тела болта $H_{ТБ}=2S$, высота головки болта $H_{ГБ}=0,5S$, диаметр тела болта $D_{ТБ}=D$, диаметр головки болта $D_{ГБ}=2D$. Положение отверстия в пластине назначается произвольно.

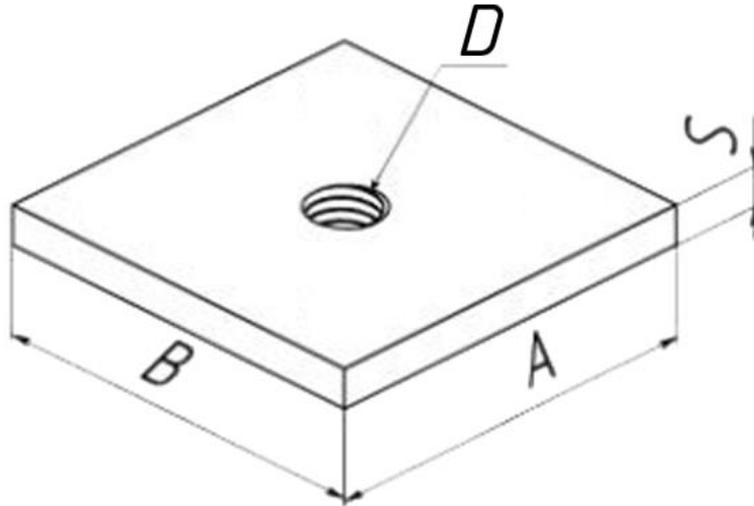


Рис. 3 Схема к построению геометрической модели пластины

Таблица 3 Исходные данные для создания модели пластины

№ вар., п/п	D, мм	S, мм	A, мм	B, мм	№ вар., п/п	D, мм	S, мм	A, мм	B, мм
1	5	3	25	45	9	6	4	20	60
2	7	3	35	45	10	8	4	30	60
3	9	3	45	45	11	10	4	40	60
4	11	3	55	45	12	12	4	50	60
5	13	3.5	65	45	13	14	4.5	60	90
6	15	3.5	75	45	14	16	4.5	70	90
7	16	3.5	85	60	15	18	4.5	80	90
8	4	3.5	95	60	16	20	4.5	90	90

ОФОРМЛЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Практическая работа оформляется в виде пояснительной записки и графических материалов в соответствии с требованиями ЕСКД. Пояснительная записка должна содержать следующие элементы:

1. Титульный лист.
2. Текст пояснительной записки:
 - цель работы,
 - исходные данные для проектирования,
 - описание последовательности работы в программных модулях в соответствии основными положениями, представленными в настоящем учебном пособии.
3. Графические материалы.

Примечание: при оформлении графического материала в пояснительной записке рисунки пронумеровываются с присвоением соответствующих подрисуночных названий.

4. Заключение. По результатам практической работы резюмируются полученные в процессе выполнения заданий навыки.

ГЛОССАРИЙ

Ниже приведены термины, встречающиеся в ходе работы с настоящим учебным пособием:

Analysis Systems – Системы текущего анализа
Component Systems – Компоненты
Custom Systems – Пользовательские системы
Cut – Удалить
Cylinder – Цилиндр
Deformation – Деформация
Design – Проектирование, проект
Design Exploration – Исследование конструкции
Directional – Указанный, направленный
Display – Вывод на экран
Engineering Data
Equivalent – Одинаковый
Fixed Support – Жесткая заделка
Full Pull – Полное вытягивание
Generate Mesh – Создавать сетку конечных элементов
Geometry – Геометрия, графическое окно
Height – Высокий
Initial Time Step – Начальный размер шага времени
Line – Простой отрезок
Loads – Конструкционные нагрузки, действующие на модель
Magnitude – Величина
Maximum Time Step – Максимальный размер шага по времени
Mesh – Сетка
Messages – Сообщения
Minimum Time Step – Минимальный размер шага по времени
Move – Изменять, перемещать
Opaque – Непрозрачный, матовый
Plan View – Вид в плане, горизонтальная проекция
Plane – Уровень
Polygon – Многоугольник
Pressure – Давление
Project – Проект
Properties – Свойство, характеристики
Pull – Тянуть, вытягивать
Pull Options – Опции инструмента “Вытягивание”
Relevance – Соответствие, относимость

Results – Результаты выполнения операции, расчета
Revolve – Вращаться, вращать
Revolve helix – Вращение по спирали
Right-handed helix – Правосторонняя спираль
Select New Sketch Plane – Выбор новой плоскости эскиза
Settings – Настройки, установки
Setup – Установка, настройка
Solution – Решение
Solve – Управление решателем
Static Structural – Статический прочностной анализ
Strain – Натяжение, нагрузка
Stress – Напряжение, нагрузка
Structure - Структура
Support – Закрепление
Tangent – Отрезок, касательный по объекту
Toolbox – Инструментарий
Total – Суммарный, совокупный
Transparent – Прозрачный

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные тенденции развития инженерии все чаще направлены на создание и развитие систем автоматизированного проектирования (САПР). В процессе обучения студент должен получить навыки и умения работы в прикладных программах расчета.

Используя данное учебное пособие, студент знакомится с расчетной платформой ANSYS Workbench.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.: ил.
2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов — М.: Мир, 1979. — 392 С.
3. Оголихин Д. А. Метод конечных элементов – ЛитРес: Самиздат, 2018. – 100 с.: ил.
4. Кондратьева Л.Е. Основы метода конечных элементов: Введение. Расчет стержневых систем: конспект лекций / Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 36 с.
5. ANSYS Student | Free Student Software (ANSYS – Продукты. Бесплатное программное обеспечение для студентов). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/academic/free-student-products>
6. Цветков В.А. Современные тенденции создания поршневых уплотнений // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО -2019. - Т. 5. - С. 222 - 226

Пронин Владимир Александрович
Жигновская Диана Валерьевна
Цветков Вадим Александрович

**ВВЕДЕНИЕ В РАСЧЕТНУЮ ПЛАТФОРМУ
ANSYS Workbench:
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ. Часть 1**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО**

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49