

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(Самарский университет)»

**ОСНОВЫ КИНЕМАТИЧЕСКОГО  
И ДИНАМИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ  
В T-FLEX PLM**

Методические указания

Составители В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев

С А М А Р А  
Издательство Самарского университета  
2025

УДК 004.4 (075)

Составители: *В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев*

Рецензент д-р техн. наук, проф. *В. Б. Балыкин*

**Основы кинематического и динамического моделирования в T-FLEX PLM:** метод. указания / сост. *В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев.* – Самара: Изд-во Самарского университета, 2025. – 61 с.: ил.

Методические указания предназначены для Института двигателей и энергетических установок. Рекомендованы для обучения бакалавров (ФГОС-3++) по направлению подготовки 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов» по дисциплине «Кинематика механизмов и машин». А также для обучения специалистов (ФГОС-3++) по направлению подготовки 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» по дисциплине «Кинематика двигателей внутреннего сгорания» по дисциплине «Кинематическое и динамическое моделирование работы механизмов авиационных двигателей и энергетических установок».

Разработано на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1 Лабораторная работа №1	
«Создание упрощенной модели плоскопараллельного механизма» .....	7
1.1 Краткое содержание работы .....	7
1.2 Создание файла модели.....	9
1.3 Создание кривошипа.....	10
1.4 Создание остальных стержней.....	12
1.5 Создание 3D узла вращения направляющей кулисы.....	13
1.6 Создание поршней.....	14
1.7 Создание сферического крепления демпфера.....	15
1.8 Создание треугольного груза.....	15
1.9 Создание сборки параллелограммного механизма.....	16
1.10 Создание сборки кривошипно-шатунного механизма.....	19
1.11 Создание сборки кулисного механизма.....	20
1.12 Создание сборки демпфирующего механизма.....	23
1.13 Построение кинематической схемы механизма.....	25
1.14 Задание движения механизма и создание демпфера.....	26
1.115 Вывод результатов расчетов в виде графиков.....	28
2 Лабораторная работа №2	
«Создание упрощенной модели кривошипно-шатунного механизма» .....	30
2.1 Краткое содержание работы .....	30
2.2 Создание коленчатого вала (КВ).....	32
2.3 Создание поршня и поршневого пальца.....	35
2.4 Создание шатуна.....	37
2.5 Сборка кривошипно-шатунного механизма.....	39
2.6 Задание движения кривошипно-шатунного механизма.....	42
2.7 Вывод результатов расчетов в виде графиков и анимации.	44

3 Лабораторная работа №3	
«Создание упрощенной модели газораспределительного механизма» .....	46
3.1 Краткое содержание работы .....	46
3.2 Создание кулачка и вала ГРМ.....	48
3.3 Создание гильзы цилиндра и клапанов.....	50
3.4 Сборка газораспределительного механизма.....	51
3.5 Создание клапанных пружин.....	55
3.6 Задание в упрощенном виде газовой силы.....	58
3.7 Вывод результатов расчетов в виде графиков и анимации.	59
Список литературы.....	61

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных этапов в проектировании сложных технических систем является кинематический и динамический анализ их механизма, использующий в качестве граничных условий данные, полученные в газодинамическом или тепловом расчете, расчёте процессов горения или газообмена. На этом этапе существенно уточняются и дополняются предварительные аналитические модели двигателя, используемые в 1D моделировании. В некоторых изделиях, например, газотурбинном или ракетном двигателях, где основное внимание уделяется газовому потоку, рассчитываются механизмы регулируемых направляющих аппаратов, реверса сопла, редуктора и т.д. Также, с некоторыми оговорками, выполняется проектный расчёт колебаний роторов. В других изделиях, например, в двигателях внутреннего сгорания, основные усилия создаются именно движением механизма. Поэтому в классических методиках расчета ДВС [1] кинематико-динамический анализ занимает особое место.

Упрощённые аналитические методы, как используемые в 1D-моделировании, так и классические [2], восходящие ещё ко времени до распространения САПР, основываются большей частью на законах механики и эмпирических зависимостях, которые могут дать лишь приблизительные результаты, что приведёт к проблемам с изделием как на стадии доводки, так и при эксплуатации.

Поэтому, расчёты кинематики и динамики сложных механизмов, особенно поверочные, следует проводить в специальных инженерных пакетах, таких как «T-FLEX Динамика» (аналог MSC.ADAMS [3,4], ANSYS Motion) или «T-FLEX Анализ» (аналог ANSYS Mechanical [5], Nastran). Эти пакеты имеют разные, хотя и перекрывающиеся области применения. «T-FLEX Анализ» использует метод конечных элементов и позволяет рассчитать деформацию конструкции и напряжения в ней, в том числе и в движении.

«T-FLEX Динамика» тоже может с некоторыми ограничениями использовать деформируемые тела, однако данный пакет предназначен для «multibody dynamics» – расчёта движения механизмов. Выходными данными расчета являются координаты, скорости, ускорения и усилия для любой точки механизма. Полученные усилия далее используются для расчёта прочности конструкции. Математической основой расчёта является метод Лагранжа-Эйлера, тела считаются абсолютно жёсткими и заменяются системой маркеров (материальных точек с локальными системами координат), а связи между телами могут быть идеализированными и деформируемыми. С помощью «T-FLEX CAD» быстро создается полностью параметризованная модель изделия. Также геометрия может быть импортирована из наиболее популярных CAD-систем, например, SolidWorks, КОМПАС и др. Задав связи компонентов модели, приложив нагрузки, определив параметры кинематического воздействия и запустив расчет, можно получить данные, близкие результатам натурных испытаний системы. Но быстрее и с меньшими трудозатратами.

Программные комплексы заменяют дорогостоящие и длительные натурные эксперименты быстрым и подробным компьютерным моделированием, обеспечивая промышленным предприятиям экономию значительных средств и выход на рынок с всесторонне оптимизированными изделиями.

Данное пособие посвящено изучению программного комплекса «T-FLEX Динамика» и построено в основном на примере упрощенных моделей двигателя внутреннего сгорания и его агрегатов. Предполагается также наличие у студентов общих теоретических знаний по исследуемому предмету.

# **1 Лабораторная работа №1**

## **СОЗДАНИЕ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА**

### **1.1 Краткое содержание работы**

Данная лабораторная работа проходит в системах T-FLEX CAD и T-FLEX Динамика. В рамках задания вам предлагается создать в плоско-сти механизм, показанный на рисунке 1. Для именования большинства элементов и узлов данного механизма была использована терминология, принятая в дисциплинах «Конструкции двигателей внутреннего сгорания» [1] и «Теории механизмов и машин» [2]. Основные задачи:

- ознакомление студентов с интерфейсом пакета;
- рассмотрение порядка построения модели и проведения всех этапов расчета от ввода исходных данных до получения результатов;
- демонстрация базовой направленности пакета.

#### Порядок проведения работы:

- 1 Создание плоскопараллельной модели с одной степенью свободы (по Ассуру), включающий в себя:
  - а) кривошип (AD) и шатун (AE);
  - б) кулисы (F-KLM);
  - в) параллелограммный механизм (ABCD);
  - г) звено более сложной формы, полученное без применения булевых операций (поршни Е и Н).
- 2 Приложение требуемых нагрузок к входному звену (AD).
- 3 Просмотр графиков перемещений, скоростей и ускорений требуемого (выходного) звена механизма (Е и Р).
- 4 Просмотр и запись анимации работы механической системы.

### Исходные данные

Величина	Параметр	Значение	размерность
Радиус главного поршня	$a$	50	мм
Высота главного поршня	$h$	80	мм
Длина шатуна	$l$	200	мм
Длина стороны треугольника (KL=ML=MK)	$b$	100	мм
Ширина и высота стержней	-	10	мм
Длина кривошипа (AD=BC)	$r$	80	мм
Длина стороны AB (AB=CD)	$2r$	160	мм
Длина звена AH	$c$	200	мм
Радиус поршня кулисы	$d$	10	мм
Высота поршня кулисы	$n$	20	мм
Длина направляющей кулисы FK	$m$	400	мм
Длина отрезка ZK	$z$	100	мм
Длина нерастянутой пружины MN	$s$	100	мм
Толщина треугольника KLM	-	10	мм

**Таблица вариантов**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$a$	50	45	40	35	55	60	65	70	50	40	60	70
$h$	80	75	70	65	60	55	55	60	65	70	75	80
$l$	200	125	138	150	163	175	188	213	225	238	250	200
$b$	100	150	145	140	135	130	125	120	115	110	105	95
$r$	80	50	55	60	65	70	75	85	90	95	100	80
$2r$	160	100	110	120	130	140	150	170	180	190	200	160
$c$	200	125	138	150	163	175	188	213	225	238	250	200
$d$	10	7	8	9	10	11	12	13	10	9	8	7
$n$	20	14	16	18	20	22	24	26	20	18	16	14
$m$	400	250	276	300	326	350	376	426	450	476	500	400
$z$	100	63	69	75	82	88	94	107	113	119	125	100
$s$	100	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220

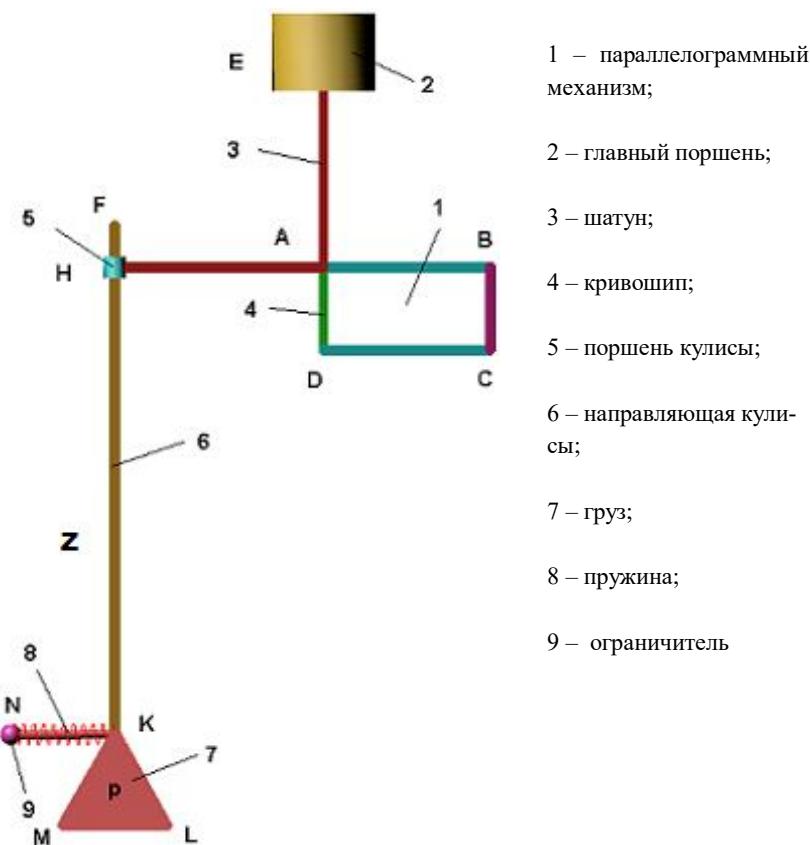


Рис. 1.1 - Схема механизма с обозначением вспомогательных точек

### Алгоритм построения модели

#### 1.2 Создание файла модели

1.2.1 Создайте рабочую папку, где будут храниться все материалы по лабораторной работе. Лучше всего использовать папку D:\Users\№ группы\Фамилия, например, D:\Users\2310\Иванов Максим;

1.2.2 Запустите приложение «T-FLEX CAD».

1.2.3 Выберите в окне приветствия (или в меню Файл - Создать) окно «Создать новый документ», далее выберите вкладку «Детали и сборки» и создайте «3D деталь» . Появится вкладка с названием «3D Деталь ...» с отображением рабочих плоскостей и древа построения.

1.2.4 Выберите в меню Файл – Сохранить как. В окне сохранения выберите созданную ранее рабочую папку и поле «Имя файла» впишите название создаваемой детали, например, «лр1 Кривошип AD»;

1.2.5 Перейдите на вкладку (или в окно<sup>1</sup>) приветствия (или в меню Файл - Создать) и создайте «3D сборку» . Сохраните её в рабочую папку под названием, например, «лр1 Плоский механизм». Не закрывая вкладку сборки, перейдите на вкладку детали 4 «Кривошип» (или звено AD).

При создании модели **воспользуйтесь презентацией**, показывающей состояние модели после выполнения того или иного этапа моделирования.

### 1.3 Создание кривошипа

Данная модель является упрощенной, поэтому сложные элементы будут отображаться стержнями.

1.3.1 Из таблицы вариантов на стр. 7 возьмите параметры геометрии кривошипа (см. позицию 4 на рисунке 1). Все стержни имеют одинаковую ширину и высоту, но различаются длиной.

1.3.2 Выберите плоскость «Вид спереди» и создайте на ней 3D-профиль, используя команду «Чертить» панели «3D Модель». Нарисуйте стержень с заданными размерами в центральной системе координат (ЦСК), как показано на рисунке 1.2. Рекомендуется

---

<sup>1</sup> В зависимости от настроек интерфейса документы в ПО «T-FLEX CAD» могут отображаться как в виде вкладок, так и в виде окон. Далее в работе будет везде говориться о вкладках, подразумевая, что это могут быть и окна.

использовать элемент «паз» на панели «Эскиз». Найти его можно, нажав на стрелочку выпадающего списка рядом с элементом «прямоугольник» .

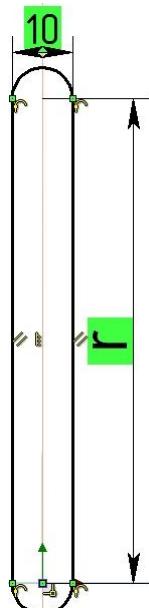


Рис. 1.2 – Эскиз кривошипа

на

1.3.6 Сначала поставьте две взаимно перпендикулярные оси в центре нижнего радиуса стержня, используя инструмент «Перпендикулярные прямые» , как показано на рисунке 4. Найти инструмент можно, нажав на стрелочку открытия выпадающего списка инструмента «Прямая» панели «Построения». Также можно воспользоваться инструментом «Прямые с узлом в 0,0» .

1.3.7 Затем перейдите на вкладку «3D Модель» и найдите в панели «Построения» инструмент 3D узел . Создайте два 3D узла : первый в центре нижнего радиуса, а второй в центре верхнего радиуса. Используйте тип «В координатах» или «По двум проекциям» . Чтобы появилась точка в центре радиуса для установки

3D узла, наведите на конечные точки радиуса. При этом должна быть активна функция автопривязки.

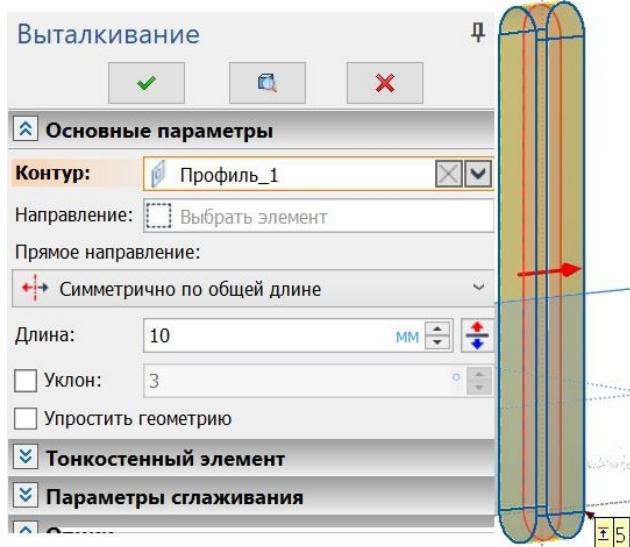


Рис. 1.3 – Операция выталкивания

1.3.8 Нажмите правой кнопкой мыши на рабочем поле модели и в выпадающем меню выберите пункт «Завершить» . В древе построения должна появиться папка «3D Узлы» и в ней созданные 3D узлы.

1.3.9 Сохраните документ .

## 1.4 Создание остальных стержней

1.4.1 Откройте в проводнике рабочую папку. Скопируйте файл с моделью кривошипа (лр1 Кривошип AD.grs;) и переименуйте копию в «лр1 Шатун AE.grs». Откройте этот файл в T-FLEX CAD либо двойным щелчком на нём, либо через меню Файл – Открыть в T-FLEX CAD.

1.4.2 На вкладке «лр1 Шатун AE.grs» в T-FLEX CAD найдите в древе построения «Профиль\_1», нажмите на него правой кнопкой

мыши и в выпадающем меню выберите «Редактировать профиль» . В открывшемся профиле измените длину стержня  $r$  на длину шатуна  $l$  из таблицы на стр. 7.

1.4.3 Завершите редактирование и сохраните модель

1.4.4 Аналогичным образом создайте другие стержни механизма: «лр1 АВ», «лр1 АН», «лр1 Направляющая кулисы FK» (см. позицию 6 на рис. 1.1). Причём для стержней ВС и СД отдельных деталей создавать не нужно, поскольку они идентичны стержням АД и АВ соответственно.

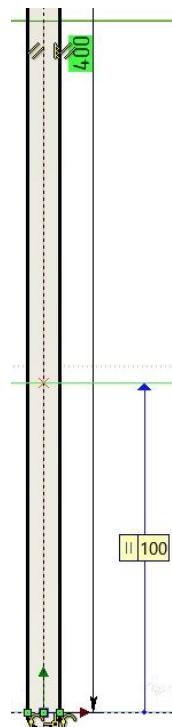


Рис. 1.4 –  
Создание 3D  
узла

## 1.5 Создание 3D узла вращения направляющей кулисы

Направляющая кулиса FK поворачивается относительно корпуса в точке Z (см. рис. 1). Расстояние ZK ( $z$ ) можно узнать из таблицы вариантов на стр. 7. Для создания точки Z будет использован 3D узел .

1.5.1 Откройте модель «лр1 Направляющая кулисы FK» (если она закрыта) и перейдите на её вкладку в окне T-FLEX CAD.

1.5.2 Выберите «Редактировать профиль» для данной детали. Кликните левой кнопкой мыши на горизонтальную прямую, проходящую через ноль. Появится ассоциированная с ней горизонтальная прямая. В поле «Расстояние» укажите расстояние  $z$  из таблицы исходных данных. Можно использовать инструмент «Горизонтальная прямая» .

1.5.3 Разместите 3D узел на пересечении созданной прямой с вертикальной осью (осью симметрии стержня), как показано на рис.1.4.

1.5.4 Нажмите правой кнопкой мыши на рабочем поле модели и в выпадающем меню выберите пункт «Завершить» . В древе по-

строения должна появиться папка «3D Узлы» и в ней созданный 3D узел .

#### 1.5.5 Сохраните документ .

### 1.6 Создание поршней

1.6.1 Создайте новую «3D деталь» , как описано в пункте 1. Сохраните её, например, с названием «лр1 Главный поршень». На вкладке этой модели начните чертить  на плоскости «Вид сверху».

1.6.2 Нарисуйте окружность радиуса  $a$ , например, инструментом «Окружность»  с панели «Эскиз». Диаметр окружности, равный  $2a$ , задайте с помощью размеров  (см. рис. 1.5)

1.6.3 В центре окружности создайте 3D узел .

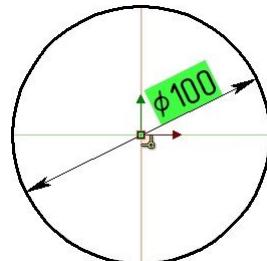


Рис. 1.5 – Создание 3D профиля поршня

1.6.4 Завершите  создание 3D профиля. На панели «Операции» выберите операцию «Выталкивание»  . В основных параметрах в поле «Прямое направление» (см. рисунок 1.3) выберите «Симметрично по общей длине». В поле «Длина» введите  $h$  мм. Сохраните документ .

1.6.6 Откройте в проводнике рабочую папку. Скопируйте файл с моделью главного поршня (лр1 Главный поршень.grs) и переименуйте копию в «лр1 Поршень кулисы.grs».

Откройте этот файл в T-FLEX CAD либо двойным щелчком на нём, либо через меню Файл – Открыть в T-FLEX CAD.

1.6.7 На вкладке «лр1 Поршень кулисы.grs» в T-FLEX CAD найдите в древе построения «Профиль\_1», нажмите на него правой кнопкой мыши и в выпадающем меню выберите «Редактировать профиль»  . В открывшемся профиле измените диаметр поршня на  $2d$  из таблицы на стр. 7.

1.6.8 Зайдите в папку «Операции» в древе построения модели и найдите там операцию «Выталкивание\_1». Нажмите на неё правой кнопкой мыши и в выпадающем меню выберите «Изменить» . Введите новое значение высоты поршня, равное  $n$  в поле «Длина».

1.6.9 Сохраните документ

## 1.7 Создание сферического крепления демпфера

1.7.1 Создайте новую «3D деталь» , как описано в пункте 1. Сохраните её, например, с названием «лр1 Сфера».

1.7.2 Чтобы создать сферическое крепление демпфера (см. позицию 9 (N) на рис. 1.1), выберите инструмент «Шар» , нажав стрелочку выпадающего меню инструмента «Примитив» (по умолчанию ) на панели «Специальные». Задайте диаметр шара 20 мм. Завершите создание и сохраните документ

## 1.8 Создание треугольного груза

1.8.1 Создайте новую «3D деталь» , как описано в пункте 1. Сохраните её, например, с названием «лр1 Груз».

1.8.2 Чтобы создать треугольный груз KLM (см. позицию 7 (P) на рис. 1.1), на вкладке этой модели начните чертить на плоскости «Вид спереди». Поставьте две взаимно перпендикулярные оси, воспользовавшись инструментом «Прямые с узлом в 0,0 »

1.8.3 Верхняя точка треугольника K находится в координатах 0,0. Зная длину стороны  $b$  равностороннего треугольника KLM, вычислите по теореме Пифагора координаты  $x$  и  $y$  ( $x$  – горизонтальная ось,  $y$  – вертикальная) его нижних точек L и M. Затем проведите вспомогательные прямые через эти координаты, как показано на рис. 1.6. Для этого кликните на горизонтальную прямую левой кнопкой мыши. Появится связанная с ней копия. Укажите расстояние между прямыми  $-y$ . Аналогично сделайте связанные копии вертикальной прямой на настоящий  $x$  и  $-x$ .

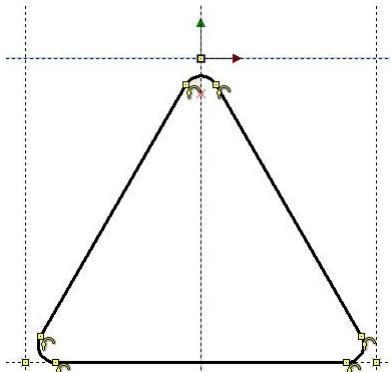


Рис. 1.6 – Создание 3D профиля груза

1.8.4 Соедините точки K, L, M отрезками с помощью инструмента «Отрезок» панели «Эскиз». Затем, используя инструмент «Скругление» панели «Эскиз», скруглите вершины треугольника KLM с радиусом 5 мм.

1.8.5 Затем перейдите на вкладку «3D Модель» и найдите в панели «Построения» инструмент 3D узел .

Создайте 3D узел в центре верхнего радиуса. Чтобы появилась точка в центре радиуса для установки 3D узла, наведите на конечные точки радиуса. При этом должна быть активна функция автопривязки.

1.8.6 Завершите создание 3D профиля. На панели «Операции» выберите операцию «Выталкивание» . В основных параметрах в поле «Прямое направление» (см. рисунок 3) выберите «Симметрично по общей длине». В поле «Длина» введите 10 мм.

1.8.7 Сохраните документ .

## 1.9 Создание сборки параллелограммного механизма

1.9.1 Перейдите на вкладку «лр1 Плоский механизм» (откройте её, если она закрыта). В ленте автоматически откроется панель «Сборка». Найдите на ней инструмент «3D Фрагмент» . Он позволяет добавлять детали (звенья механизма) в сборку. Нажмите и выберите в его подменю инструмент «Выбрать файл» . Сначала выберите «лр1 Кривошип AD». По умолчанию кривошип установится центром нижнего радиуса в центр координат сборки (точка 0, 0, 0). Подтвердите это положение .

1.9.2 Снова используйте инструмент «3D Фрагмент»  . Выберите файл  «лр1 АВ». Стержень (в данном случае это звено CD) также разместится вертикально в начале координат. Поверните звено CD на 270 градусов (или 90 градусов в зависимости от нужного направления) вокруг оси Y (в горизонтальное положение), используя разноцветную систему координат вставляемого в сборку тела. Наведите указатель мыши на зелёную дугу, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая левую кнопку мыши, потяните звено CD, пока оно не займёт своё положение в механизме.

1.9.3 Чтобы механизм двигался как единое целое, нужны кинематические граничные условия. Они задают взаимосвязи между деталями, отнимающие взаимные степени свободы деталей. Зафиксируйте стержень CD как корпусную деталь. Для этого в древе построения модели нажмите нужный фрагмент правой кнопкой мыши и в открывшемся меню выберите пункт «Сопряжения –  Задфиксировать положение».

Если в меню нет такого пункта, то нажмите на иконку «Создать»  в панели «Сопряжения». Откроется окно «Параметры сопряжения». Установите фильтр операций  . Поставьте флаг на опцию совпадение и кликните левой кнопкой мыши на нужный 3D фрагмент (стержень CD в данном случае). В поле «Первый элемент» появится надпись «3D фрагмент\_...: 3D фрагмент\_... [Операция]». Нажмите на иконку фиксации  справа от надписи и закройте сопряжение.

На значке 3D фрагмента  в древе построения появится якорь. У данного фрагмента зафиксированы все шесть степеней свободы, т.е. он неподвижен.

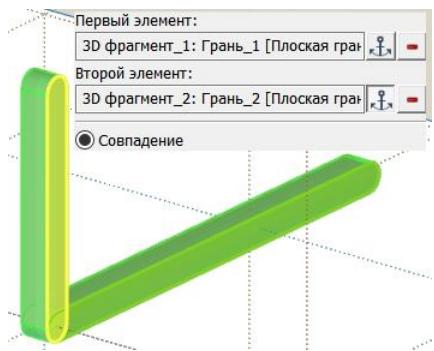


Рис. 1.7 – Создание сопряжения «совпадение» для стержней

1.9.4 Снова выберите инструмент «Создать» в панели «Сопряжения». Поставьте флаг на опцию «Совпадение» в «Параметрах сопряжения». Установите фильтр граней . Выберите в качестве первого и второго элемента передние грани стержней AD и DC, как показано на рис. 1.7. Завершите создание сопряжения .

1.9.5 Затем переключите флаг на опцию «соосность». Выберите полукруглые грани стержней AD и DC, как показано на рис. 1.8. Завершите создание сопряжения . Обратите внимание, что когда флаг стоит на опции «соосность», выбираются только концентрические грани.

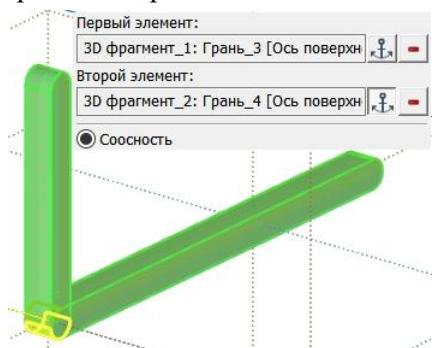


Рис. 1.8 – Создание сопряжения «соосность» для стержней

1.9.6 Проверьте работу сопряжений. Для этого выберите инструмент «Переместить» на панели «Сопряжения» и потяните за кривошип. Он должен поворачиваться вокруг нижней точки. Отмените перемещение, чтобы кривошип остался в вертикальном положении.

1.9.7 Снова используйте инструмент «3D Фрагмент» . Выберите файл «лр1 АВ». Стержень AB разместится вертикально в начале координат. Поверните его горизонтально, как стержень CD, и немного поднимите по оси Z (вверх). Сделайте сопряжение «совпадение» передних граней стержней AD и AB, а затем сопря-

жение «соосность» для верхней полукруглой грани стержня AD и левой полукруглой грани стержня AB по описанному выше примеру. Далее задайте сопряжение «параллельность» для верхних граней стержней AB и CD. Проверьте работу собранной части механизма.

1.9.8 Используя инструменты «3D Фрагмент» , «Создать» и ориентируясь на рис. 1.1, последовательно добавляйте звенья в механизм как описано далее. Сначала добавьте «лр1 Кривошип AD». Сдвиньте его немного вправо вдоль оси X. Задайте совпадение его передней грани с передней гранью стержня CD и соосность со стержнем AB на верхнем конце и CD на нижнем конце. Проверьте работу параллелограммного механизма и сохраните документ .

## 1.10 Создание сборки кривошипно-шатунного механизма

1.10.1 Добавьте «лр1 Шатун AE» . Подвиньте его немного вверх. Задайте для стержня AE совпадение (здесь и далее по передним граням) и соосность со стержнем AD (здесь и далее по полукруглым граням на концах стержней, у AD – верхний конец, у AE – нижний конец).

1.10.2 Добавьте «лр1 Главный поршень». Подвиньте его немного вверх. Для соединения поршня будут использованы 3D узлы . 3D узлы, созданные внутри детали, по умолчанию не видны в сборке. Чтобы к ним можно было привязываться в сборке, найдите в древе построения модели «лр1 Шатун AE» созданные ранее 3D узлы (3D фрагмент\_ – Модель – 3D Построения – 3D Узлы). Поочерёдно кликните на каждом из них правой кнопкой мыши, и в выпадающем меню выберите пункт «Поднять в сборку». В древе 3D фрагмента\_ появится новая папка «Поднятые элементы», в ко-

торой будут подняты на уровень сборки 3D узлы<sup>2</sup>. Также 3D узлы будут выбираться на модели в рабочем окне.

1.10.3 Аналогично поднимите в сборку 3D узел на главном поршне. На панели выбора кликните два раза мышкой на элемент , чтобы выбирать только узлы. Выберите инструмент «Создать» в панели «Сопряжения». Поставьте флаг на опцию «Совпадение» в «Параметрах сопряжения». Выберите в качестве первого и второго элемента 3D узлы на главном поршне и на верхнем конце шатуна. Затем соедините любой из этих 3D узлов с рабочей плоскостью «Вид слева» (фильтр для рабочих плоскостей , чтобы выбирать всё ). На панели выбора кликните два раза на элемент , чтобы выбирать только грани. Добавьте сопряжение «параллельность» для верхней грани<sup>3</sup> главного поршня и верхней грани стержня CD. Проверьте работу кривошипно-шатунного механизма. Сохраните документ . На данном этапе модель должна выглядеть, как показано на рисунке 1.9.

## 1.11 Создание сборки кулисного механизма

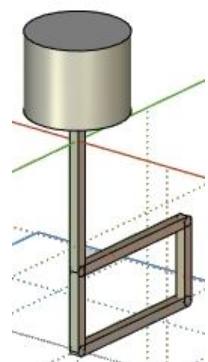


Рис. 1.9 – КШМ  
и параллелограмм

1.11.1 Добавьте звено АН («лр1 АН»). Поверните его на 90 градусов влево (или 270 градусов в зависимости от нужного направления) вокруг оси Y (в горизонтальное положение по рис. 1.1), используя разноцветную систему координат вставляемого в сборку тела. И подвиньте его немного вверх.

1.11.2 Задайте для стержня АН совпадение и соосность со стержнем АД.

<sup>2</sup> При этом исходные узлы остаются в детали. На уровне сборки создаются связанные копии.

<sup>3</sup> Она называется «днищем поршня».

1.11.3 Задайте перпендикулярность между верхней гранью стержня АН и боковой левой гранью стержня АЕ.

1.11.4 Добавьте направляющую кулисы («лр1 Направляющая кулисы FK»). Подвиньте её немного влево. Поднимите на уровень сборки 3D узлы направляющей кулисы FK и стержня АН.

1.11.5 Для дальнейшего позиционирования направляющей кулисы FK можно воспользоваться вспомогательными плоскостями, полученными копированием основных рабочих плоскостей со сдвигом. Нажмите на иконку «Плоскость» панели «Построения». В основных параметрах выберите «Смещённая плоскость» . Систему координат рабочей плоскости установите на «Глобальная система координат» . Кликните на поле «Исходная плоскость» и, затем, на рабочую плоскость «Вид слева». В поле «Смещение» задайте расстояние, на которое нужно сместить плоскость: длина  $c$  звена АН (см. таблицу исходных данных на стр. 7). Если плоскость смещается не в ту сторону, введите значение с минусом или нажмите пиктограмму «Сменить направление» . Появится новая рабочая плоскость РП 1, параллельная рабочей плоскости «Вид слева» и проходящая на заданном расстоянии.

1.11.6 Аналогично создайте рабочую плоскость, смещённую относительно рабочей плоскости «Вид сверху» на расстояние  $(r + z - m + \Delta_m)$ .  $\Delta_m$  – расстояние, на которое верхний конец направляющей кулисы должен выступать над звеном АН.  $\Delta_m$  составляет примерно 25...35 мм.

1.11.7 Задайте для стержня FK совпадение со стержнем АН (по передним граням ). Затем задайте совпадение 3D узла в точке Z на направляющей кулисы FK поочерёдно с созданными рабочими плоскостями РП 1 и РП 2. Проверьте, что звено FK поворачивается вокруг точки Z . Отображение плоскостей на экране можно скрыть, нажав на пиктограмму в древе построения.

1.11.8 Добавьте поршень кулисы («лр1 Поршень кулисы»). Подвиньте его немного влево. Поднимите на уровень сборки 3D узел поршня кулисы. Задайте совпадение этого узла с узлом на левом конце звена АН (см. рис. 1.1).

1.11.9 Затем задайте совпадение 3D узла на верхнем конце направляющей кулисы FK с осью<sup>4</sup> поршня кулисы, как показано на рисунке 1.10.

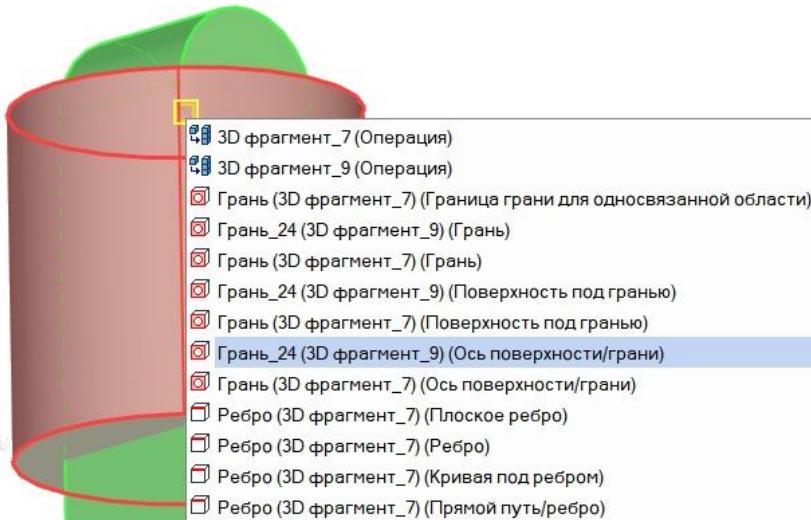


Рис. 1.10 – Соединение оси поршня кулисы с 3D узлом на оси направляющей кулисы FK

Поскольку отдельного фильтра для выбора осей не предусмотрено, наведите указатель мыши на нужную область и подождите несколько секунд. Откроется список всех элементов в окрестностях данной области. Выберите среди них нужную ось.

1.11.10 Задайте перпендикулярность круглой грани поршня кулисы (неважно, верхней или нижней) и одного из длинных рёбер

<sup>4</sup> У любой цилиндрической поверхности T-FLEX CAD создаёт ось, даже если она получена не вращением, а вытягиванием, как в этот раз.

направляющей кулисы FK<sup>5</sup>. Проверьте работу кулисного механизма и сохраните документ .

1.11.11 Добавьте груз («лр1 Груз»). Подвиньте его немного влево. Поднимите на уровень сборки 3D узел груза. Задайте совпадение этого узла с 3D узлом на нижнем конце звена FK (см. рис. 1.1). Задайте для треугольника KLM совпадение со стержнем FK (по передним граням ). Задайте перпендикулярность нижней грани треугольника KLM и одного из длинных рёбер направляющей кулисы FK. Проверьте работу кулисного механизма и сохраните документ .

## 1.12 Создание сборки демпфирующего механизма

1.12.1 Добавьте в модель сферическое крепление демпфера («лр1 Сфера») и сместите его сначала влево (по оси X) на расстояние ( $c + s$ ), а затем вниз (по оси Z) на расстояние ( $r + \Delta_m - m$ ). Зафиксируйте сферическое крепление демпфера.

1.12.2 Переименуйте все 3D фрагменты по названиям точек на рис. 1. Например, кривошип назовите AD. Для переименования 3D фрагмента кликните на него двойным щелчком мыши в древе построения. Откроется окно «Параметры 3D фрагмента». В поле «Имя операции» на вкладке «Общее» введите новое имя 3D фрагмента (стерев предварительно старое). Древо построения модели с названиями 3D фрагментов показано на рис. 1.11.

1.12.3 Покрасьте 3D фрагменты в разные цвета. Использование разных цветов помогает чётче различать движения разных звеньев при анимации. Также цвета могут кодировать информацию о модели.

---

<sup>5</sup> Альтернативный способ. Задайте параллельность оси поршня кулисы и одного из длинных рёбер направляющей кулисы FK.

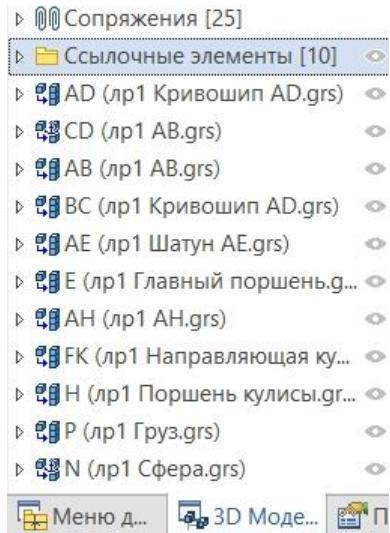


Рис. 1.11 – Фрагмент  
древа построения модели

Например, корпусные детали можно сделать зелёными, поршни красными, груз синим и т.д. Цвета выберите сами, не обязательно ориентироваться на рис. 1.1. Для покраски 3D фрагментов сначала переключите «Стиль отображения» на панели «Вид» на «Тоновая закраска» .

1.12.4 Чтобы изменить цвет 3D фрагмента, кликните на него двойным щелчком мыши в древе построения. Откроется окно «Параметры 3D фрагмента». Поставьте галочку в поле «Цвет» на вкладке «Общее» и выберите нужный цвет в поле справа.

1.12.5 Важнейшим элементом демпфера является упругодемпфирующий элемент, сочетающий в себе упругость (способность изменять свою длину пропорционально действующей на него силе) и демпфирование (способность рассеивать, например, превращать в тепло, часть подведённой к нему энергии, в данном случае, энергии сжатия и растяжения). Данный элемент не является твёрдым телом<sup>6</sup>, поэтому не может быть создан средствами T-FLEX CAD. Необходимо запустить модуль T-FLEX Динамика. Для этого перейдите на вкладку «Анализ». Выберите пиктограмму «Создать

---

<sup>6</sup> Используя T-FLEX CAD, можно нарисовать пружину, материал MP, блок рессор и любую другую форму упругодемпфирующего элемента, например, для изучения их конструкций, создания чертежей, производства. Однако данное тело будет абсолютно твёрдым (не упругим и не демпфирующим).

задачу»  на панели «Задача». И в выпадающем списке выберите «Анализ движения» .

1.12.6 На вкладке «Задача» в поле «Тип» также выберите «Анализ движения». Проверьте, что присутствуют все элементы расчётной модели. На вкладке «Анализ контактов» оставьте флаг «Отключен». Завершите создание задачи . Теперь на панели будет находиться вкладка «Задачи», а в ней конкретная задача «Анализ движения 1». Также папка «Задачи» появится в древе построения модели. В одной модели может быть несколько разных задач, но только одна из них является активной.

1.12.7 В выпадающем списке инструмента «Сила»  на панели «Условия» вкладки «Анализ» выберите «Пружина» . В качестве точки 1 задайте середину ребра<sup>7</sup> в верхней части груза, а в качестве второй точки задайте центр сферы N (сферического ограничителя демпфера). Ориентируйтесь на рис. 1.1. В разделе «Тип зависимости» выберите «Линейная пружина». В поле «Жёсткость» введите 50 Н/мм, в поле «Демпфирование» введите 1 Н/мм·с. Размерность коэффициентов определяется текущей системой единиц.

## 1.13 Построение кинематической схемы механизма

Кинематическая схема механизма – это графическое отображение звеньев<sup>8</sup> механизма и связей между ними. Она может иметь

---

<sup>7</sup> Не используйте 3D узел для привязки пружины, поскольку он не двигается в процессе расчёта.

<sup>8</sup> Также может называться «кинематической группой» - это совокупность тел (геометрий или деталей), движущихся совместно и состоящих из одного материала. Также звеном могут называться несколько деталей, связанных фиксирующими шарнирами JF. Допускается объединять в одно звено тела из разных материалов, если их плотности различаются менее чем на заданную величину  $\chi$ , зависящую от требуемой точности расчёта. Обычно  $\chi$  принимают в диапазоне 1,5...5%. Также можно присоединять маленькие тела к большим, даже если они из разных материалов. Разница объёмов тел должна быть значительна, более чем в 20...50 раз в зависи-

разное оформление. На рисунке 1.12 представлена кинематическая схема в виде блок схемы в MS.Excel. Здесь AD (кривошип), AB, BC, AE (шатун) и AH, FK (направляющая кулисы) и P (груз), E (главный поршень), H (поршень кулисы или кулисный камень) – подвижные звенья, CD и N – неподвижные звенья (Ground или корпус). Большинство звеньев состоят из одного тела. Некоторые звенья составные: AE, AH и FK, P. Отдельные детали внутри таких звеньев жёстко соединены между собой, т.е. являются кинематической группой.

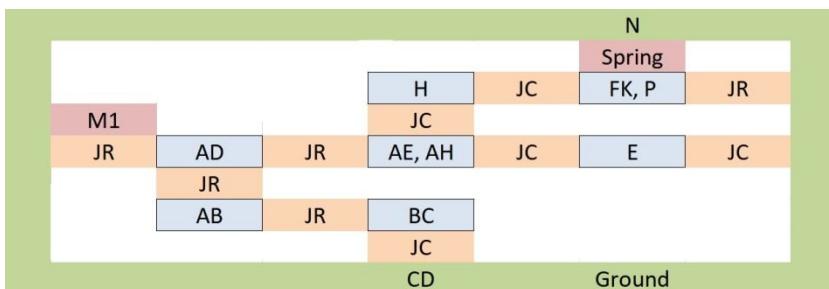


Рис. 1.12 – Кинематическая схема механизма

Звенья связаны между собой шарнирами: JR – вращательный (вращение вокруг одной оси), JC – цилиндрический (вращение вокруг одной оси и движение вдоль неё). Также на схеме отмечена пружина (Spring) и генератор вращения или двигатель (M1).

## 1.14 Задание движения механизма и создание демпфера

1.14.1 Воспользуйтесь инструментом «Сила» на панели «Условия» вкладки «Анализ», чтобы задать «Вращение» кривошипа AD вокруг его нижней точки.

---

ности от требуемой точности расчёта. Для повышения точности можно назначать звену среднюю плотность материала.

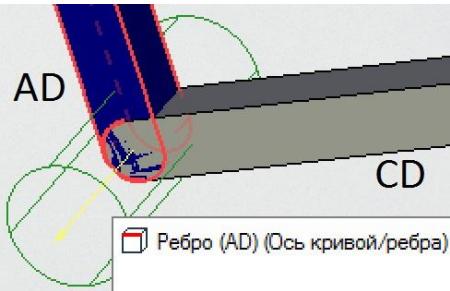


Рис. 1.13 – Выбор оси вращения кривошипа

Для этого сначала кликните на кривошип, затем на ось вращения, как показано на рис. 1.13.

1.14.2 В разделе «Угловая скорость» в поле «Значение» введите 0,525 рад/с, что соответствует 5 об/мин.

Вращение считается равномерным. Завершите ввод

1.14.3 Все заданные ограничения преобразуются в шарниры. Нажмите правой кнопкой мыши на задачу «Анализ движения 1» и в выпадающем меню найдите опцию «Параметры...» . На вкладке «Основные» в поле «Продолжительность» укажите время работы механизма в диапазоне от 25 до 50 с. А в поле «Кадров в секунду» введите значение в диапазоне от 40 до 120. Чем больше кадров, тем выше точность расчёта и гладже графики, но медленнее скорость воспроизведения. Если в тот момент, когда параллелограммный механизм ABCD складывается в линию ("мёртвая точка"), возникает ошибка и расчёт прерывается, то это значит, что программа "не знает", куда пойдёт механизм дальше. Измените число кадров так, чтобы оно не было кратно продолжительности работы механизма, например, 93 или 107. Тогда один шаг будет до "мёртвой точки", а другой после неё.

1.14.4 На вкладке «По умолчанию» выключите силы трения в модели, убрав галочку «Учитывать трение», поскольку рассчитывается идеализированный механизм. На вкладке «Моделирование» проверьте правильность направленности гравитации и передвиньте ползунок «Точность реализации связей» в крайнее правое положение для максимальной точности. Также выберите метод расчёта «Точный».

## 1.15 Вывод результатов расчетов в виде графиков

1.15.1 Воспользуйтесь инструментом «Расчёт» на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». Нажмите на кнопку «Запись» раздела «Параметры моделирования». Посмотрите анимацию, сравните её с анимацией из презентации. Кривошип должен делать минимум 2, максимум 3 оборота. Если это не так, подкорректируйте продолжительность расчёта в параметрах .

1.15.2 Запишите видеоролик инструментом Для ускорения видео можно задать значения параметра «Шаг». Чем больше значение, тем быстрее видео. Рекомендуемое значение «10». Задайте имя и расположение файла, а также его формат. Запись возможна в формате «wmv» или «avi». Для обоих форматов можно выбрать различное качество записи.

1.15.3 Воспользуйтесь инструментом «Создать датчик» на панели «Условия» вкладки «Анализ». Необходимо создать два датчика: для главного поршня Е и груза Р. Они создаются аналогично. Выберите тип датчика «Тело», кликните на главный поршень. Затем в разделе «Отображаемые параметры» выберите: траектория, линейная скорость и линейное ускорение. Завершите создание датчика Повторите процесс для датчика груза.

1.15.4 Воспользуйтесь инструментом «Создать результат» на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». Выберите для «Датчик\_1» (датчик главного поршня) параметры вдоль оси его движения Z: координата Z, линейная скорость Z, линейное ускорение Z. Выберите для «Датчик\_2» (датчик груза): координата X, линейная скорость X, линейное ускорение X. Соответствующие результаты появятся в папке «Результаты» текущей задачи. Открыв любой результат, можно посмотреть график изменения интересующей величины. Пример графика показан на рис. 1.13.

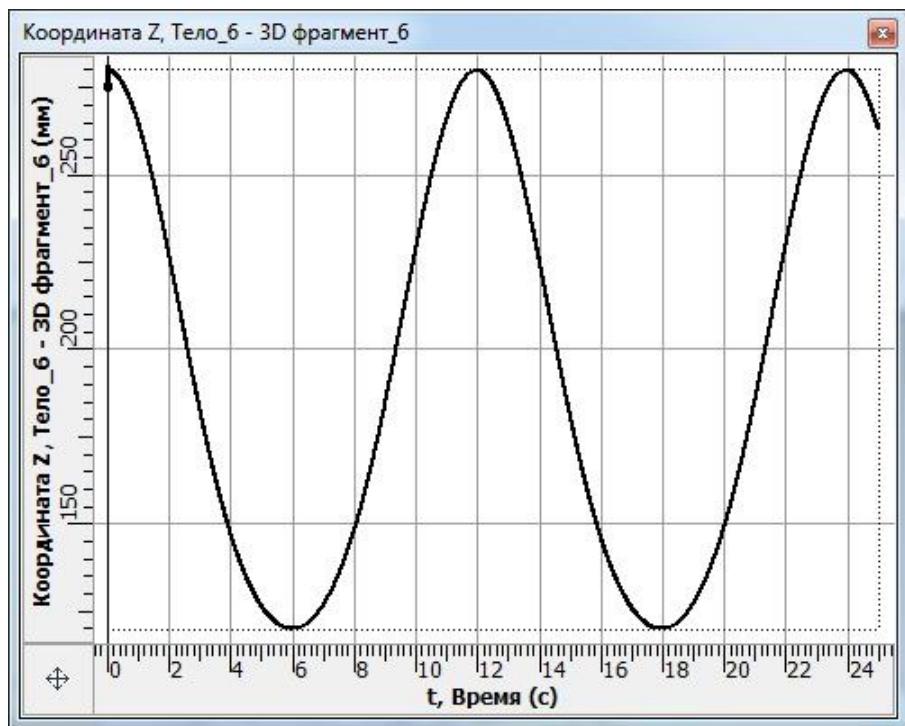


Рис. 1.13 – Пример графика зависимости перемещения главного поршня от времени

1.15.5 Вернитесь к инструменту «Расчёт» на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». На рабочем поле появятся все шесть графиков кинематических параметров (три для главного поршня и три для груза), а также таблица минимальных и максимальных значений измеряемых величин. Нажмите на кнопку «Запись» раздела «Параметры моделирования». В процессе расчёта графики будут строиться, а таблица заполняться значениями. Дождитесь конца расчёта. Если графики плохо видны, можно подвинуть их. Для этого наведите указатель мыши на шкалу графика, зажмите левую кнопку мыши, и двигайте мышь в нужную сторону. Также масштаб графика можно менять независимо по каждой оси.

## **2 Лабораторная работа №2**

### **СОЗДАНИЕ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА И ЗАДАНИЕ ЕГО ДВИЖЕНИЯ**

#### **2.1 Краткое содержание работы**

Лабораторная работа также проводится в системах T-FLEX CAD и T-FLEX Динамика. Используя знания, полученные в лабораторной работе №1, вам потребуется создать упрощенную модель кривошипно-шатунного механизма двигателя внутреннего сгорания (см. рисунок 2.1); оснастить ее указанными нагрузками и граничными условиями. После этого необходимо будет провести один из этапов кинематического и динамического анализа, выполнив итого-вое практическое задание.

#### **Основные задачи:**

- показать применимость пакета T-FLEX PLM для расчета кинематики ДВС и других механизмов в 3D-постановке;
- ознакомить студентов с особенностями булевых операций в среде T-FLEX CAD.

#### **Порядок проведения работы:**

- 1 Создание в упрощенном виде кривошипно-шатунного механизма (КШМ), поршня и опорного участка коленчатого вала (КВ) двигателя внутреннего сгорания.
- 2 Задание граничных условий для конструкции в виде связей.
- 3 Приложение крутящего момента к КВ и замер требуемых параметров.
- 4 Проведение кинематико-динамического расчета конструкции.
- 5 Просмотр и запись анимации.

### Исходные данные

Величина	Параметр	Значение	Размерность
Длина шатунной шейки	$L$	80	мм
Радиус шатунной шейки	$R$	20	мм
Ширина щеки КВ (Width)	$W$	40	мм
Длина щеки КВ (Length)	$Q$	80	мм
Высота щеки КВ (Depth)	$E$	20	мм
Диаметр поршня	$D$	100	мм
Высота поршня	$H$	80	мм
Толщина стенки поршня	$\delta$	10	мм
Диаметр поршневого пальца	$D_p$	20	мм
Высота поршневого пальца	$H_p$	98	мм
Толщина стержня шатуна	$B_s$	30	мм
Радиус скруглений стержня шатуна	$R_s$	1	мм
Длина шатуна	$L_s$	300	мм
Толщина элемента облегчения	$P$	10	мм
Радиус скругления облегчения	$O$	5	мм
Крутящий момент	$M$	-5	Н·м

**Таблица вариантов**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L$	80	70	75	80	85	90	72	77	82	87	81	78
$R$	20	16	17	18	19	20	21	22	23	24	19	21
$W$	40	32	34	36	38	40	42	44	46	48	38	42
$E$	20	16	17	18	19	20	21	22	23	24	19	21
$D$	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111
$H$	80	70	75	85	90	70	75	80	85	90	82	78
$\delta$	10	7	7.5	8	8.5	9	9.5	12	10.5	11	11.5	12.5
$D_p$	20	17	17.5	18	18.5	19	19.5	22	20.5	21	21.5	22.5
$H_p$	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109
$B_s$	30	21	24	30	33	36	21	24	30	33	36	30
$P$	10	7	8	10	11	12	7	8	10	11	12	10

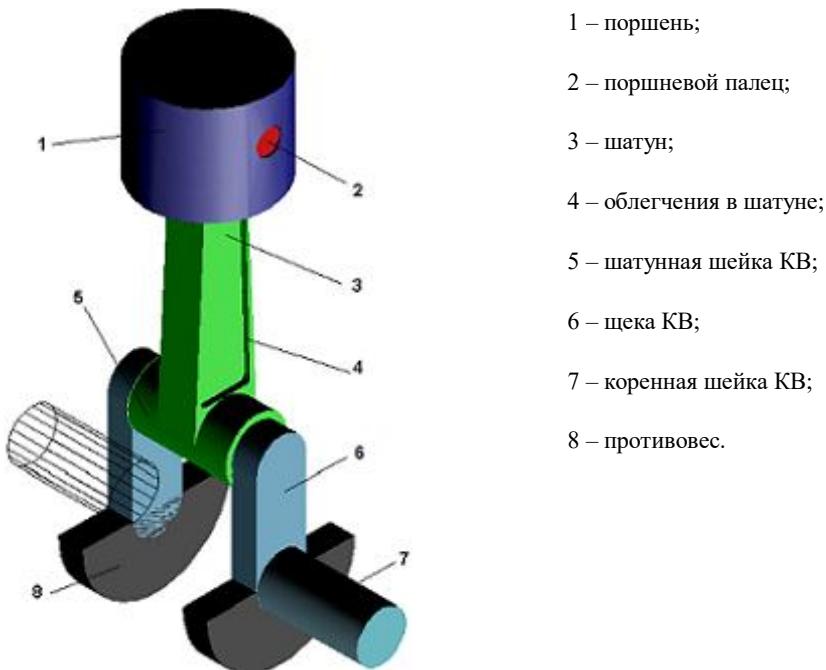


Рис. 2.1 – Схема КШМ

### **Алгоритм построения модели**

#### **2.2 Создание коленчатого вала (КВ)**

2.2.1 Создайте «3D деталь» и сохраните её в рабочую папку, например, как «лр2 КВ». Выберите плоскость «Вид слева» и создайте на ней 3D-профиль окружности диаметром  $2R$ , используя команду «Чертить» панели 3D Модель. В центре окружности разместите 3D узел . Нажмите правой кнопкой мыши на рабочем поле модели и в выпадающем меню выберите пункт «Завершить» .

2.2.2 На панели «Операции» выберите операцию «Выталкивание» . В основных параметрах в поле «Прямое направление» выбери-

те «Симметрично по общей длине». В поле «Длина» введите  $L$  мм. Полученный цилиндр называется шатунной шейкой КВ.

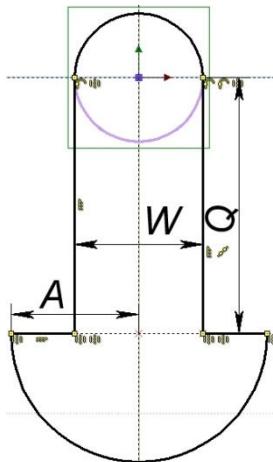


Рис. 2.2 –3D профиль щеки КВ с противовесом

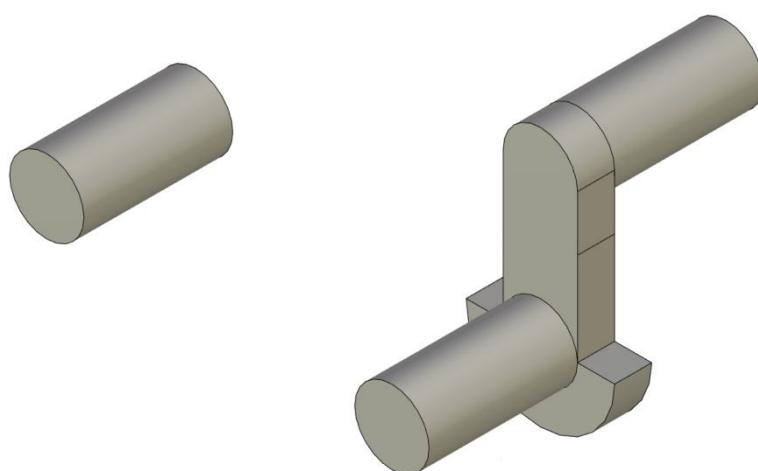
2.2.3 Выберите левую круглую грань цилиндра и используйте команду «Чертить на грани» . Создайте 3D профиль нужной формы, объединяющий в себе щёку КВ и противовес, как показано на рисунке 2.2. Радиус А выберите в диапазоне 25...50 мм. Завершите черчение и вытолкните 3D профиль на расстояние  $E$  наружу от шатунной шейки (см. таблицу вариантов).

2.2.4 Аналогично, используя черчение на грани и выталкивание , добавьте коренную шейку КВ с размерами шатунной шейки КВ ( $R, L$ ).

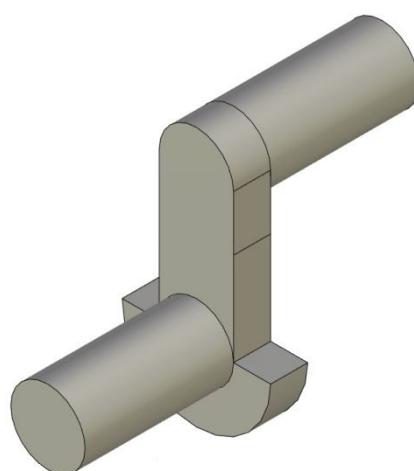
В центре окружности разместите 3D узел . Форму и расположение геометрий смотрите на рисунке 2.1.

2.2.5 Воспользуйтесь операцией «Симметрия» панели «Операции» относительно рабочей плоскости «Вид слева», чтобы создать зеркальную копию геометрий, созданных в п. 1.3 и 1.4 (щёки КВ с противовесом и коренной шейки). Сначала выберите 3D операции для копирования , а затем плоскость симметрии . Порядок построения модели КВ показан на рис. 2.3.

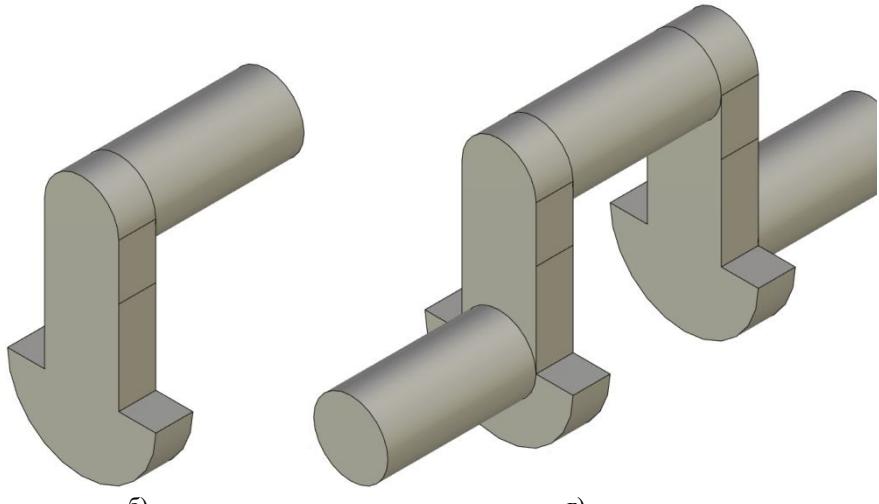
2.2.6 Объедините все тела в детали, используя булеву операцию «Сложение» из панели «Операции» вкладки «3D Модель». Окно булевой операции показано на рис. 2.4.



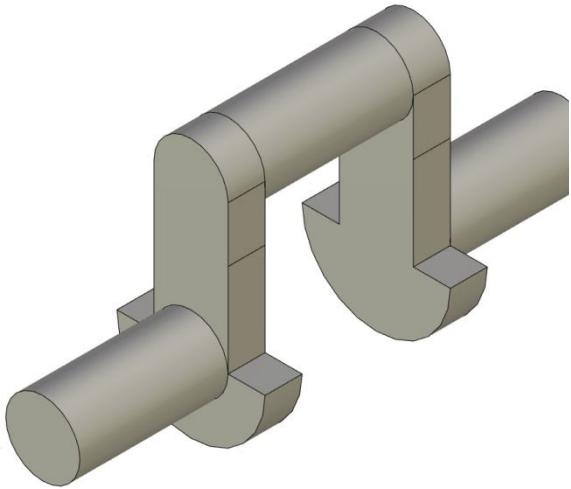
а)



в)



б)



г)

а) шатунная шейка КВ; б) добавление левой щеки КВ и противовеса;

в) добавление левой коренной шейки КВ;

г) добавление правой щеки, противовеса и коренной шейки КВ

Рис. 2.3 – Объединение тел булевой операцией сложения

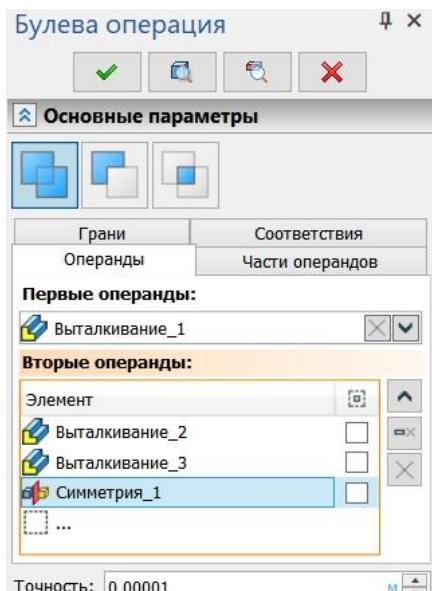


Рис. 2.4 – Объединение тел булевой операцией сложения

2.3.2 Создайте тело операцией «Вращение» панели «Операции». Угол поворота составляет 360 градусов. В качестве оси вращения укажите отрезок днища на оси поршня.

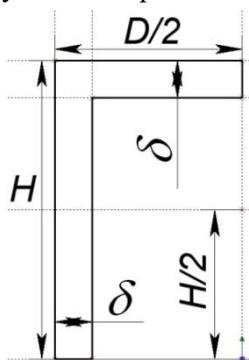


Рис. 2.5 – 3D профиль тела поршня

## 2.3 Создание поршня и поршневого пальца

2.3.1 Создайте «3D деталь» и сохраните её в рабочую папку, например, как «лр2 Поршень». Выберите плоскость «Вид слева» и создайте на ней 3D-профиль, показанный на рис. 2.5, используя команду «Чертить» панели 3D Модель. На оси поршня разместите 3D узел . Нажмите правой кнопкой мыши на рабочем поле модели и в выпадающем меню выберите пункт «Завершить» .

2.3.3 Для создания в поршне отверстия под поршневой палец (позиция 2 на рис. 2.1) начните чертить на рабочей плоскости «Вид слева». Поскольку на рабочей плоскости «Вид слева» уже существует 3D профиль тела поршня, нужно разделить элементы построения (линии), относящиеся к телу поршня (создаваемому операцией «Вращение» ) и отверстию (создаваемому операцией «Выталкивание» ).

Для этого контуры разных 3D профилей нужно окрасить в разные цвета, используя инструмент «Цвет» ■ панели «Стиль» вкладки «Рабочая плоскость». По умолчанию выбран чёрный цвет ■. Измените цвет на любой другой. Постройте 3D профиль окружности диаметром  $D_p$  с центром в созданном ранее 3D узле. После завершения черчения ✓ появится диалоговое окно с вопросом «Создать для каждого цвета линий изображения отдельный профиль?». Выберите ответ «Да».

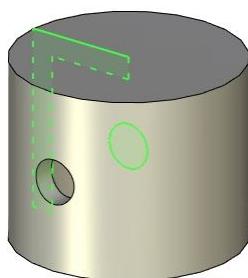


Рис. 2.6 – внешний вид поршня

2.3.4 Вырежьте в поршне отверстие под поршневой палец (см. рис. 2.6), создав операцией «Выталкивание» цилиндр. В основных параметрах в поле «Прямое направление» выберите «Через всё» . Для того, чтобы создаваемый цилиндр сразу вырезал отверстие (без необходимости отдельно применять булеву операцию «Вычитание» из панели «Операции» вкладки «3D Модель») выберите в свойствах операции пиктограмму «Выбрать исходное тело для булевой операции» и кликните на тело поршня.

Лучше сразу изменить интеллектуальный режим<sup>9</sup> создания булевой операции на «вычитание» .

2.3.5 Создайте «3D деталь» и сохраните её в рабочую папку, например, как «лр2 Поршневой палец». Смоделируйте цилиндр диаметром  $D_p$  и высотой  $H_p$  операцией «Выталкивание»<sup>10</sup> на основе кругового 3D профиля на рабочей плоскости «Вид слева».

<sup>9</sup> В интеллектуальном режиме T-FLEX CAD пытается сам определить, нужно применить для этой операции булеву операцию вычитания или пересечения.

<sup>10</sup> Цилиндр также можно создать, используя примитив «Цилиндр» панели «Специальные».

В центре поршневого пальца разместите 3D узел . В основных параметрах в поле «Прямое направление» выберите «Симметрично по общей длине».

## 2.4 Создание шатуна

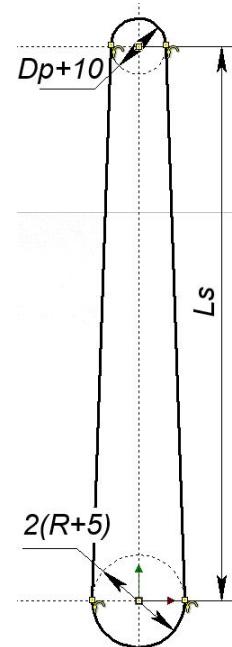


Рис. 2.7 – 3D профиль тела шатуна

2.4.1 Создайте «3D деталь» и сохраните её в рабочую папку, например, как «лр2 Шатун». Выберите плоскость «Вид слева» и создайте на ней 3D-профиль, показанный на рис. 2.7, используя команду «Чертить» панели 3D Модель. Например, создайте оси и вспомогательную горизонтальную прямую на высоте  $Ls$ . Постройте в нижней и верхней части окружности нужного диаметра. Проведите соединяющие их наклонные отрезки . Они должны быть касательными к окружностям. Затем отрежьте части окружностей внутри контура инструментом «Обрезка» панели «Эскиз».

2.4.2 В центрах верхней и нижней окружностей создайте 3D узлы . Нажмите правой кнопкой мыши на рабочем поле модели и в выпадающем меню выберите пункт «Завершить» .

2.4.3 На панели «Операции» выберите операцию «Выталкивание» . В основных параметрах в поле «Прямое направление» выберите «Симметрично по общей длине». В поле «Длина» введите  $Bs$  мм.

2.4.4 Постройте ещё один 3D профиль на плоскости «Вид слева», содержащий окружность с центром в нижней точке тела шатуна диаметром  $(2R + 10)$  мм. Поскольку на рабочей плоскости «Вид слева» уже есть 3D профиль, используйте для этих окружностей

другой цвет ■, как описано в пункте 2.3. Вытолкните ⚡ эту окружность на длину  $L$  мм. В поле «Прямое направление» выберите «Симметрично по общей длине». Сразу объедините создаваемую геометрию с телом шатуна ☐ операцией «Сложение» ☕ (☒).

2.4.5 Аналогично постройте верхнюю (поршневую) головку шатуна, взяв окружность диаметром ( $D_p + 10$ ) мм и в поле «Длина» введите ( $D - 2\delta - 10$ ) мм.

2.4.6 Создайте отверстия в верхней (диаметр  $D_p$ ) и нижней (диаметр  $2R$ ) головке шатуна инструментом «Отверстие» ⚡ панели «Расширенное». Используйте тип «Под крепёжные детали» 📈, стандарт «Метрические». В основных параметрах выберите простое цилиндрическое отверстие 📈 и укажите диаметр. В качестве базовой грани выбирайте круглую грань соответствующей головки. В разделе «Положение» укажите координаты U и V в метрах, чтобы отверстие было в середине грани. Для нижней головки (0; 0), для верхней (0;  $L_s$ ).

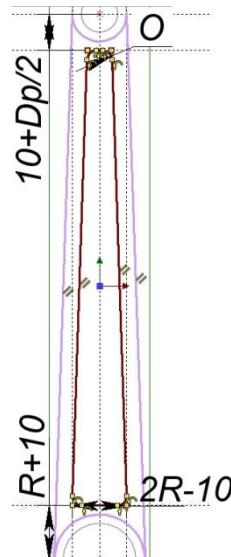


Рис. 2.8 – 3D профиль облегчения в шатуне

2.4.7 Создайте на боковой грани стержня шатуна облегчение с целью снижения массы при достаточной прочности конструкции, как показано на рис. 2.8. Чтобы привязываться к вспомогательным прямым (а не только к точке их пересечения), на панели выбора должна быть активна пиктограмма «Точка на линии построения» ↗. Чтобы задать параллельность боковым линиям облегчения и стержня шатуна, используйте ограничение «Параллельность» ⚡ инструмента «Ограничение» ⚡ панели «Ограничения». Скругления радиусом  $O$  (5 мм) задаются инструментом ⚡. Длина верхней стороны облегчения получается автоматически.

2.4.8 Вытолкните 3D профиль облегчения внутрь стержня шатуна на длину  $P$ . Отразите облегчение на другую сторону шатуна операцией «Симметрия» панели «Операции» относительно рабочей плоскости «Вид слева». В меню «Дополнительно» поставьте галочку «Копия с объединением». Сделайте вычитание тела облегчений из тела шатуна.

2.4.9 Скруглите указанные на рис. 2.8д) рёбра с радиусом  $Rs$  операцией «Сглаживание» панели «Операции».

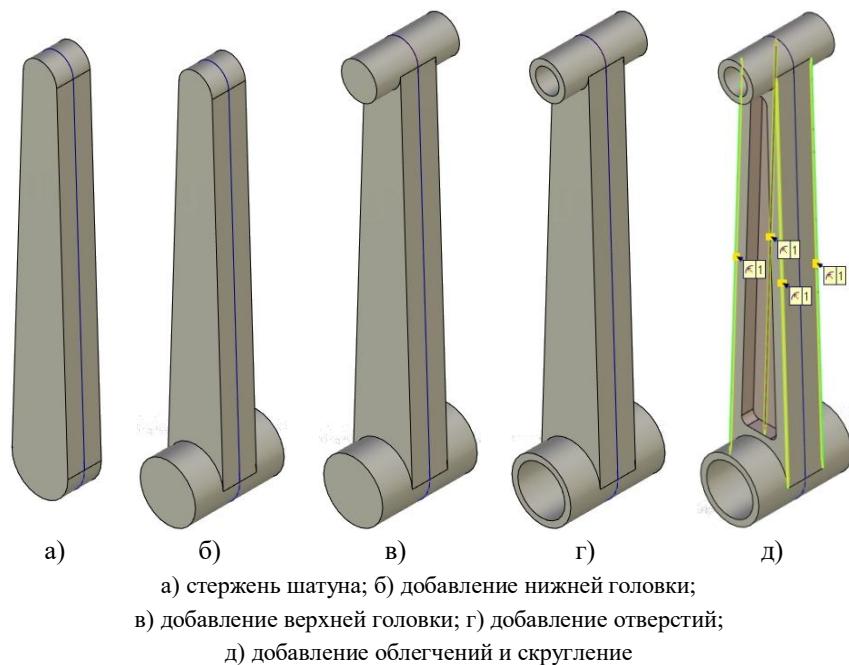


Рис. 2.9 – Последовательность операций построения 3D модели шатуна

## 2.5 Сборка кривошипно-шатунного механизма

2.5.1 Создайте «3D деталь» и сохраните её в рабочую папку, например, как «лр2 Подшипник». Выберите плоскость «Вид слева» и создайте на ней 3D-профиль из двух окружностей с внутренним диаметром  $2R$ , а наружную  $(2R+10)$ . В центре

окружностей создайте 3D узел . Вытолкните 3D профиль на длину  $P$ . В поле «Прямое направление» выберите «Симметрично по общей длине».

2.5.2 Создайте «3D сборку» . Сохраните её в рабочую папку под названием, например, «лр2 КШМ». Используйте инструмент «3D Фрагмент» и выберите в его подменю инструмент «Выбрать файл» . Сначала выберите «лр2 Подшипник». По умолчанию подшипник установится в центр координат сборки (точка 0, 0, 0). Подвиньте его вдоль оси X на расстояние  $(1,5L + E - 0,5P)$ , используя разноцветную систему координат вставляемого в сборку тела.

2.5.3 Зафиксируйте подшипник как корпусную деталь. Для этого в древе построения модели нажмите нужный фрагмент правой кнопкой мыши и в открывшемся меню выберите пункт «Сопряжения – Зафиксировать положение».

Если в меню нет такого пункта, то нажмите на иконку «Создать» в панели «Сопряжения». Откроется окно «Параметры сопряжения». Установите фильтр операций . Поставьте флаг на опцию совпадение и кликните левой кнопкой мыши на нужный 3D фрагмент. В поле «Первый элемент» появится надпись «3D фрагмент\_...: 3D фрагмент\_... [Операция]». Нажмите на иконку фиксации справа от надписи и закройте сопряжение. На значке 3D фрагмента в древе построения появится якорь.

2.5.4 Добавьте «3D Фрагмент» «лр2 КВ». Задайте для КВ сопряжение «совпадение» с подшипником по левым крайним граням , а затем сопряжение «соосность» для цилиндрической части коренной шейки КВ и внутренней цилиндрической поверхности подшипника. КВ должен остаться симметричным относительно рабочей плоскости «Вид слева», как показано на рис. 2.10.

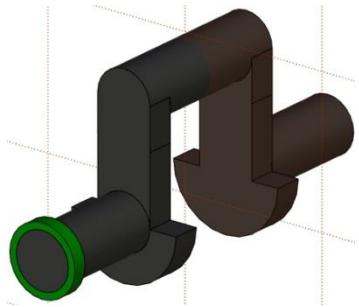


Рис. 2.10 – Соединение КВ с подшипником

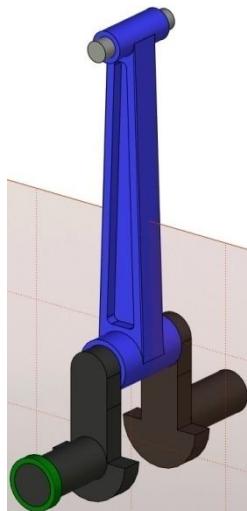


Рис. 2.11 – Соединение шатуна с поршневым пальцем

2.5.5 Добавьте «3D Фрагмент» «лр2 Шатун». Ориентируясь на рис. 2.1, задайте для шатуна сопряжение «совпадение» с КВ по внутренней поверхности щёк, а затем сопряжение «соосность» по цилиндрической грани шатунной шейки КВ и внутренней цилиндрической поверхности нижней головки шатуна.

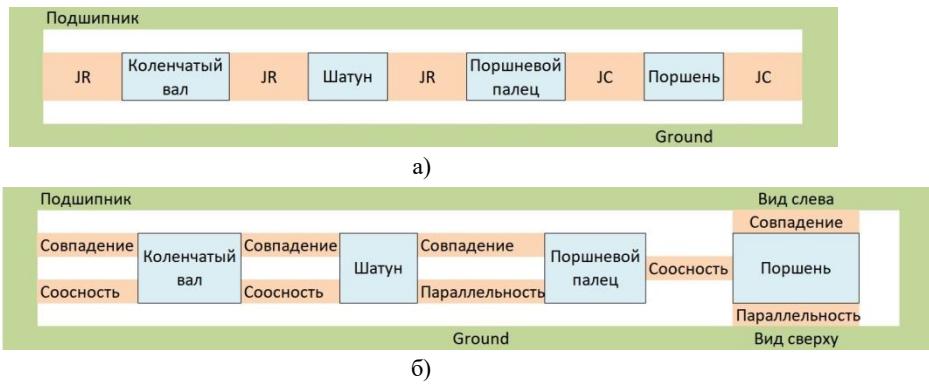
2.5.6 Добавьте «3D Фрагмент» «лр2 Поршневой палец». Поднимите на уровень сборки 3D узлы шатуна и поршневого пальца. Задайте сопряжение «совпадение» для 3D узла поршневого пальца и верхней головки шатуна, а затем сопряжение «параллельность» для их боковых граней . Модель должна выглядеть, как показано на рис. 2.11. Проверьте работу собранной части механизма.

2.5.7 Добавьте «3D Фрагмент» «лр2 Поршень». Поднимите на уровень сборки его 3D узел . Задайте последовательно совпадение 3D узла поршня с рабочей плоскостью «Вид слева», а затем с рабочей плоскостью «Вид спереди».

2.5.8 Задайте параллельность верхней грани поршня рабочей плоскости «Вид сверху». Если поршень переворачивается, поставьте галочку «Обратное направление».

2.5.9 Далее задайте сопряжение «соосность» для цилиндрической грани поршневого пальца и внутренней цилиндрической грани бобышек (одного из боковых отверстий) поршня. Проверьте

работу механизма. Кинематическая схема модели показана на рис. 2.12. Она в сжатом виде содержит информацию о связях в модели, позволяет оптимизировать сопряжения и быстро строить модели аналогичных конструкций.



а) с шарнирами T-FLEX Динамика; б) со связями T-FLEX CAD

Рис. 2.12 – Кинематическая схема механизма

## 2.6 Задание движения кривошипно-шатунного механизма

2.6.1 Далее необходимо запустить модуль T-FLEX Динамика. Для этого перейдите на вкладку «Анализ». Выберите пиктограмму «Создать задачу» на панели «Задача». И в выпадающем списке выберите «Анализ движения» . На вкладке «Задача» в поле «Тип» также выберите «Анализ движения». Проверьте, что присутствуют все элементы расчётной модели (все детали КШМ). На вкладке «Анализ контактов» оставьте флаг «Отключен». Завершите создание задачи .

2.6.2 Нажмите правой кнопкой мыши на задачу «Анализ движения 1» и в выпадающем меню найдите опцию «Параметры...» . На вкладке «Основные» в поле «Продолжительность» укажите время работы механизма в диапазоне от 2 до 5 с. А в поле «Кадров в секунду» введите значение в диапазоне от 100 до 400. На вкладке «По умолчанию» выключите силы трения в модели, убрав галочку

«Учитывать трение». На вкладке «Моделирование» проверьте правильность направленности гравитации и передвиньте ползунок «Точность реализации связей» в крайнее правое положение для максимальной точности. Также выберите метод расчёта «Точный».

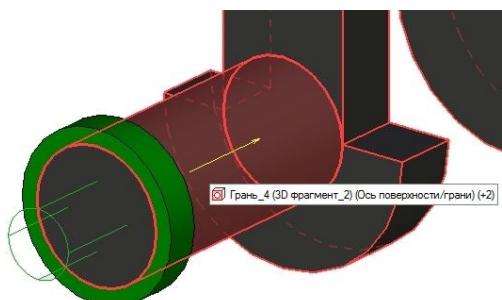


Рис. 2.13 – Задание оси крутящего момента

2.6.3 В выпадающем списке инструмента «Сила» на панели «Условия» вкладки «Анализ» выберите «Крутящий момент» . Кликните по КВ. В качестве оси вращения укажите ось коренной шейки. Укажите значение момента  $M$ .

2.6.4 Далее требуется приложить момент сопротивления. Поскольку его величина зависит от скорости вращения, перед его созданием потребуется выполнить некоторые подготовительные операции. Создайте датчик для КВ (панель «Условия» вкладки «Анализ»). Выберите тип датчика «Тело» и кликните на КВ. Затем в разделе «Отображаемые параметры» выберите угловую скорость (AV). Завершите создание датчика .

2.6.5 Далее необходимо создать функцию момента сопротивления. Функции для приложения в качестве законов изменения сил и моментов в T-FLEX CAD задаются в виде графиков. Используйте инструмент «Графики» панели «Инструменты» вкладки «Параметры». В открывшемся окне выберите «Создать график», далее «Функция». Назовите новый график «Момент сопротивления». Выберите «Редактировать» для данного графика. И в открывшемся окне нажмите «Параметры графика» . В поле «Аргумент» укажите диапазон от нуля до десяти, а в поле «Выражение» введите

функцию « $-0.05*\#1$ », где « $\#1$ » - это аргумент. Завершите создание графика .

2.6.6 Создайте ещё один крутящий момент  на коренной шейке с другой стороны КВ. В диалоге создания момента в разделе «Момент» переключитесь на график и нажмите «Выбрать график и датчик». Выберите «Использовать существующий график» и найдите в списке созданный ранее график «Момент сопротивления». В поле «Зависимость от датчика» выберите датчик, созданный в п. 5.4. Укажите параметр «AVX» (угловая скорость вращения вокруг оси X), который подставится в функцию вместо аргумента « $\#1$ ». Завершите выбор и, затем, создание момента . Теперь момент сопротивления будет направлен противоположно вращению КВ и будет возрастать с увеличением скорости вращения.

2.6.7 Переименуйте крутящий момент как «МК», момент сопротивления как «МС». Для этого нужно кликнуть два раза левой кнопкой мыши на момент  в древе построения модели и в открывшемся окне в поле «Имя» задать новое название момента.

## 2.7 Вывод результатов расчетов в виде графиков и анимации

2.7.1 Воспользуйтесь инструментом «Расчёт»  на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». Нажмите на кнопку «Запись»  раздела «Параметры моделирования». Посмотрите анимацию, сравните её с анимацией из презентации. Если двигатель останавливается, УВЕЛИЧЬТЕ величину крутящего момента. Если двигатель бесконечно раскручивается, измените знак крутящего момента.

2.7.2 Запишите видеоролик инструментом .

2.7.3 Воспользуйтесь инструментом «Создать датчик»  на панели «Условия» вкладки «Анализ». Необходимо создать три датчика : для поршневого пальца, крутящего момента и момента сопротивления. Выберите тип датчика «Тело», кликните на поршневой палец. Затем в разделе «Отображаемые параметры» выбери-

те: траектория, линейная скорость и линейное ускорение. Завершите создание датчика .

2.7.4 Выберите тип датчика  «Силовой элемент», кликните на крутящий момент. Выберите в отображаемых параметрах «Активный момент АТ». Завершите создание датчика  . Повторите процесс для момента сопротивления. Для удобства рекомендуется переименовать созданные датчики в соответствии с объектами измерения. Для этого нужно кликнуть два раза левой кнопкой мыши на датчик в древе построения модели и в открывшемся окне в поле «Имя» задать новое название датчика.

2.7.5 Воспользуйтесь инструментом «Создать результат»  на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». Выберите для датчика поршневого пальца параметры вдоль оси его движения Z: координата Z, линейная скорость Z, линейное ускорение Z. Если график вырождается в вертикальную линию, можно задать соотношение масштаба по осям для графиков, задав значение в поле «Визуальное соотношение единиц функции и аргумента» в параметрах графика  . Может потребоваться значение «0,01» или даже «0,0001» в зависимости от варианта.

2.7.6 Создайте результат  для датчика крутящего момента, выбрав активный момент (X), ATX. Создайте аналогичный результат  для датчика момента сопротивления. Запустите расчёт заново .

2.7.7 На основании анимации сделайте вывод о корректности работы механизма. По графику МС определите момент выхода двигателя на установившийся режим (когда МК = МС по среднему значению за оборот). Как ведут себя при этом кинематические параметры поршня (перемещение, скорость, ускорение)?

### **3 Лабораторная работа №3**

## **СОЗДАНИЕ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА**

### **3.1 Краткое содержание работы**

Лабораторная работа проходит в системах T-FLEX CAD и T-FLEX Динамика, является продолжением лабораторной работы №2 и выполняется на базе созданного в ней КШМ. В данном задании необходимо модифицировать существующий КШМ посредством оснащения его простейшим газораспределительным механизмом (ГРМ). Работа посвящена созданию ГРМ и обеспечению его взаимодействия с готовым изделием (КШМ).

#### **Основные задачи:**

- показать возможность расчета кинематики и динамики отдельных звеньев системы управления газораспределением двигателя внутреннего сгорания;
- познакомить студентов с упругими элементами и контактными силами T-FLEX Динамика.

#### **Порядок проведения работы:**

- 1 Создание в упрощенном виде основных элементов системы ГРМ: кулачка, толкателя, клапана и, схематично, гильзы цилиндра с отверстиями под клапаны (рисунок 3.1).
- 2 Оснащение ГРМ необходимыми соединениями.
- 3 Задание газовых сил в виде функции, зависящей от времени.
- 4 Проведение расчета.
- 5 Просмотр графиков и запись анимации работы системы.

### Исходные данные

Величина	Параметр	Значение	Размерность
Длина вала ГРМ	$L$	100	мм
Высота камеры сгорания	$S_c$	20	мм
Толщина стенок гильзы цилиндра	$\delta$	15	мм
Диаметр большего основания тарелки клапана	$Db$	30...36	мм
Диаметр меньшего основания тарелки клапана	$Dm$	20...28	мм
Высота тарелки клапана	$H$	5	мм
Диаметр стержня клапана	$A$	6	мм
Высота стержня клапана	$B$	80	мм
Диаметр толкателя	$C$	36	мм
Высота толкателя	$F$	8	мм

**Таблица вариантов**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L$	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118	120	122
$S_c$	20	21	22	23	20	21	22	23	20	21	22	23
$\delta$	15	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$Db$	30	31	32	33	34	35	36	30	31	32	33	34
$Dm$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	20	21	22
$H$	5	6	7	5	6	7	5	6	7	5	6	7
$A$	6	7	8	6	7	8	6	7	8	6	7	8
$B$	80	74	80	80	78	84	84	90	88	88	94	100
$C$	28	29	30	31	32	33	34	35	36	29	30	31
$F$	8	7	9	10	7	8	9	10	7	8	9	10

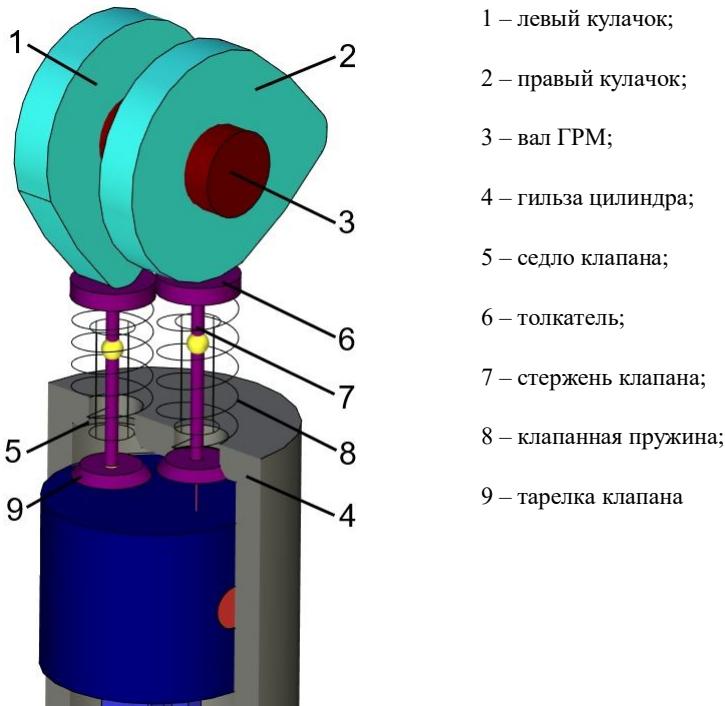


Рис. 3.1 – Схема ГРМ

### Алгоритм построения модели

#### 3.2 Создание кулачка и вала ГРМ

3.2.1 Создайте «3D деталь» и сохраните её в рабочую папку, например, как «лр3 Кулакок». Выберите плоскость «Вид слева» и создайте на ней 3D-профиль как показано на рисунке 3.2. Данний упрощённый профиль кулачка<sup>11</sup> состоит из двух окружностей

---

<sup>11</sup> Для построения профиля кулачка реального двигателя изменяйте размеры дуг и окружностей. При необходимости добавляйте ещё дуги. Для точного построения профиля кулачка также можно использовать сплайны.

диаметрами 107 и 142 мм, двух дуг радиусом 200 мм и двух скруглений радиусом 10 мм.

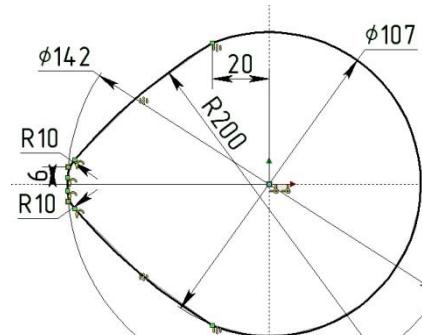


Рис. 3.2 – Ориентировочный  
3D профиль кулачка

3.2.2 Создайте 3D узел в на оси вращения кулачка. В данном случае это центр образующих окружностей<sup>12</sup>. Завершите создание 3D профиля и сохраните документ . На панели «Операции» выберите операцию «Выталкивание» . В поле «Длина» введите 20 мм.

В основных параметрах в поле «Прямое направление» выберите «Симметрично по общей длине».

3.2.3 Создайте «3D деталь» и сохраните её в рабочую папку, например, как «лр3 Вал ГРМ». Создайте цилиндр длины  $L$  и диаметром, равным диаметру шатунной шейки  $2R$  (см. Лабораторную

<sup>12</sup> Иногда стоит задача, чтобы при вращении кулачок не создавал дисбаланс на валу ГРМ. Дисбаланс порождается неуравновешенными инерционными силами. Чем быстрее вращение, тем больше дисбаланс. Дисбаланс вызывает вибрации, шум, повышенный износ механизма. Он может нарушать сцепление звеньев, вызывать их соударения и даже разрушить механизм. Для устранения дисбаланса необходимо, чтобы ось вращения кулачка проходила через центр масс. Чтобы узнать положение центра масс кулачка, воспользуйтесь инструментом «Характеристики» панели «Измерить» вкладки «Измерение». Кликните левой кнопкой мыши на кулачок. И в поле измерения появятся значения параметров для выбранного тела. Найдите значение Y центра масс. X и Z центра масс будут равны нулю, поскольку по этим осям кулачок симметричен. Вернитесь к 3D профилю кулачка через команду «Редактировать профиль» в выпадающем меню. Проведите вертикальную вспомогательную прямую на расстоянии до центра масс вправо для формы кулачка, показанной на рис. 3.2. Для других форм центр масс сдвинут в ту сторону, где сосредоточена большая часть массы кулачка.

работу №2) любым из способов: через 3D профиль или через примитив «Цилиндр» . Создайте 3D узел в центре вала ГРМ.

### 3.3 Создание гильзы цилиндра и клапанов

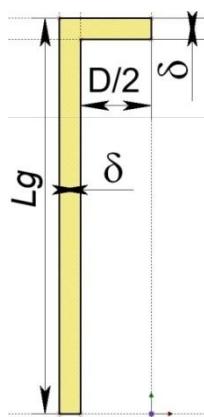


Рис. 3.3 – 3D профиль тела гильзы

3.3.1 Создайте «3D деталь» и сохраните её в рабочую папку, например, как «лр3 Гильза». Начертите 3D профиль тела гильзы цилиндра на рабочей плоскости «Вид слева», как показано на рис. 3.3. Высота гильзы  $Lg$  подбирается так, чтобы когда поршень при движении окажется в самой нижней точке (НМТ), он не выходил за пределы гильзы, но КВ при вращении задевать гильзу не должен. Все соединения осуществляются без зазоров (по номиналам). Используйте операцию «Вращение» относительно отрезка на вертикальной оси.

3.3.2 Начертите 3D профиль отверстия под клапан в гильзе на плоскости «Вид спереди», как показано на рис. 3.4. Создайте 3D узел в верхней правой точке.

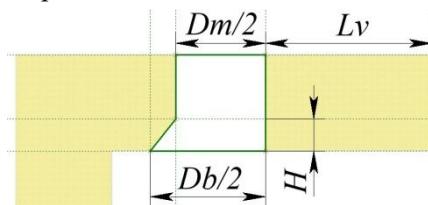


Рис. 3.4 – 3D профиль прорези под клапан

Расстояние  $Lv$  от оси клапана до оси гильзы выберите сами, опираясь на рис. 3.1. Учтите, что между тарелками клапанов должно быть расстояние не менее радиуса тарелки клапана, от стенок гильзы также необходим небольшой отступ, оси клапанов

должны лежать в рабочей плоскости «Вид спереди» и быть направлены вертикально.

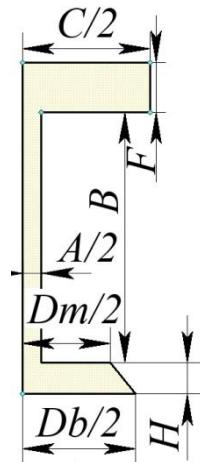


Рис. 3.5 – 3D профиль клапана

3.3.3 Создайте тело операцией «Вращение» панели «Операции». Угол поворота составляет 360 градусов. Отразите отверстие на другую сторону гильзы операцией «Симметрия» панели «Операции» относительно рабочей плоскости «Вид слева». В меню «Дополнительно» поставьте галочку «Копия с объединением». Сделайте вычитание тел отверстий из тела гильзы.

3.3.4 Создайте «3D деталь» и сохраните её в рабочую папку, например, как «лр3 Клапан». Начертите на рабочей плоскости «Вид слева» 3D профиль тела клапана, как показано на рис. 3.5.

3.3.5 Создайте 3D узлы в верхней и нижней левой точке. Создайте тело операцией «Вращение» относительно левой вертикальной линии. Сохраните документ .

### 3.4 Сборка газораспределительного механизма

3.4.1 Скопируйте в рабочей папке файл «лр2 КШМ» и переименуйте копию, например, как «лр3 ГРМ». Откройте файл «лр3 ГРМ». Добавьте «3D Фрагмент» «лр3 Гильза». Поднимите гильзу так, чтобы между её верхней внутренней поверхностью и верхней поверхностью поршня (днищем поршня) осталось расстояние  $S_c$  для камеры сгорания. Можно вычислить высоту подъёма гильзы сразу, или сначала поднять её до соприкосновения указанных поверхностей, а затем поднять ещё на расстояние  $S_c$ . Удобнее всего выполнять операции совмещения, переключившись на стиль отображения «Рёберное изображение» на вкладке «Вид». Проверить расстояние можно, используя инструмент «Из-

мерить» панели «Измерить» вкладки «Измерение». В свойствах инструмента выберите «Измерить отношение между двумя элементами» Задайте сопряжение гильзу.

3.4.2 Добавьте «3D Фрагмент» «лр3 Клапан». Подвиньте его вверх так, чтобы нижняя поверхность его тарелки совпадала с внутренней поверхностью верхней части гильзы (закрытие клапана), как показано на рис. 3.6. Задайте сопряжение «соосность» для цилиндрической грани стержня клапана и цилиндрической части правого отверстия под клапан в гильзе.

3.4.3 Добавьте ещё один «3D Фрагмент» «лр3 Клапан». Подвиньте его вверх так, чтобы нижняя поверхность его тарелки была на 15 мм ниже внутренней поверхности верхней части гильзы (открытие клапана). Задайте сопряжение «соосность» для цилиндрической грани стержня клапана и цилиндрической части левого отверстия под клапан в гильзе.

3.4.4 Добавьте «3D Фрагмент» «лр3 Вал ГРМ». Поднимите его вверх, так чтобы он находился над клапанами. Поднимите на уровень сборки 3D узел и рабочую плоскость «Вид спереди» вала ГРМ. Задайте сопряжение «Расстояние» между этим 3D узлом и верхней поверхностью гильзы. Расстояние выберите произвольно, поскольку оно будет редактироваться. Далее последовательно задайте сопряжения «Совпадение» между 3D узлом вала ГРМ и рабочими плоскостями «Вид слева» и «Вид спереди». Затем задайте сопряжение «Параллельность» между боковой круглой гранью вала ГРМ и рабочей плоскостью «Вид слева». Сохраните документ .

3.4.5 Добавьте «3D Фрагмент» «лр3 Кулачок». Поднимите его вверх так, чтобы он находился над клапанами. Этот кулачок будет управлять правым клапаном, который сейчас закрыт. Назовите его «Выпускной». Кликните на кулачок в сборке. В начале координат появится его копия. Поверните второй кулачок на 90 градусов во-

круг оси X так, чтобы его длинный конец смотрел вниз<sup>13</sup>. Также поднимите его вверх так, чтобы он находился над клапанами. Назовите его «Впускной».

3.4.6 Поднимите на уровень сборки 3D узлы и рабочие плоскости «Вид сверху» обоих кулачков, управляющих впускным и выпускным клапанами. Задайте следующие сопряжения :

- совпадение 3D узла кулачка впускного клапана с осью вала ГРМ,
- совпадение 3D узла кулачка выпускного клапана с осью вала ГРМ,
- расстояние между левым краем вала ГРМ и левой гранью кулачка впускного клапана,
- расстояние между правым краем вала ГРМ и правой гранью кулачка выпускного клапана,
- совпадение рабочей плоскости вала ГРМ «Вид спереди» и рабочей плоскости «Вид сверху» кулачка впускного клапана,
- перпендикулярность рабочей плоскости «Вид спереди» кулачка впускного клапана и рабочей плоскости «Вид спереди» кулачка выпускного клапана,

Расстояния задаются так, чтобы кулачки находились точно над своими клапанами. Также отредактируйте расстояние от 3D узла вала ГРМ и верхней поверхностью гильзы, созданное в п. 3.4 так, чтобы оба кулачка касались своих клапанов с точностью до десятой доли миллиметра. Если один клапан касается кулачка, а другой нет, необходимо отредактировать размеры модели. Для этого есть два пути. Во-первых, можно опустить ниже выпускной клапан, но так, чтобы он не касался поршня! Для этого нужно уда-

---

<sup>13</sup> Это делается для того, чтобы обеспечить заданные фазы газораспределения. Всего фаз четыре: впуск, сжатие, рабочий ход и выпуск; один из кулачков управляет впускным клапаном, другой – выпускным.

лить сопряжение «Соосность» между впускным клапаном и гильзой, затем опустить клапан инструментом «Преобразования» панели «Дополнительно» вкладки «Сборка», и снова создать удалённое сопряжение. Во-вторых, если сдвига клапана недостаточно, можно отредактировать профиль кулачка. Например, сделайте его толще или длиннее.<sup>14</sup> В итоге детали должны быть расположены, как показано на рис. 3.6. Сечение гильзы можно сделать инструментом «Применить сечение» на панели справа. Проверьте работу механизма.

И, наконец, для связи между КВ и валом ГРМ воспользуйтесь сопряжением «Колёса (угловые скорости)». Выберите сначала цилиндрическую поверхность коренной шейки КВ, поскольку КВ является ведущим в этой паре, а затем цилиндрическую поверхность вала ГРМ, являющимся ведомым. Укажите передаточное отношение «1:2», поскольку КВ должен вращаться в два раза быстрее, чем вал ГРМ. Проверьте работу механизма. Сохраните документ .

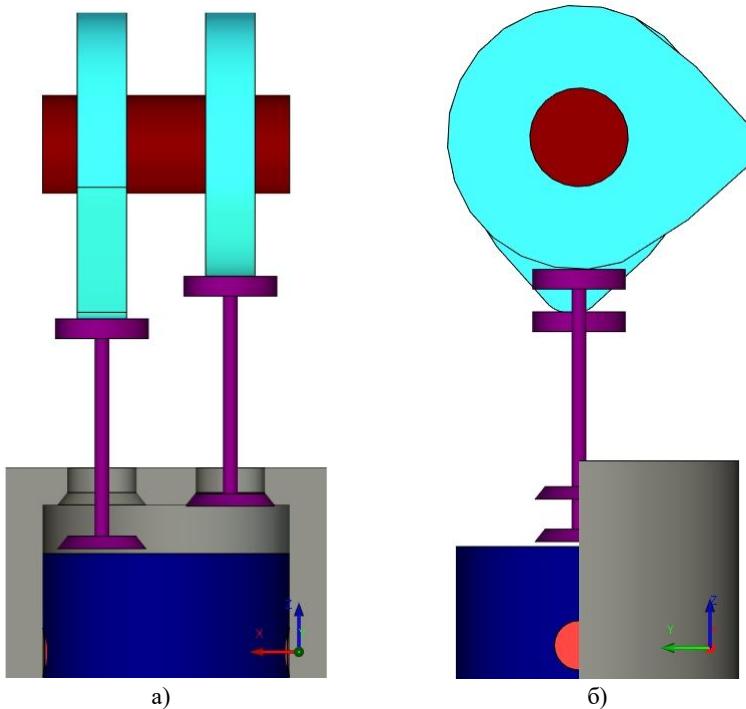
Зайдите в параметры импортированных тел (например, двойным щелчком на них в древе окна "3D Модель") и в поле "Имя тела" каждого тела впишите его название (например, "Впускной клапана" и т.д.).

Кинематическая схема ГРМ показана на рис. 3.7. Схема с шарнирами показывает реальные соединения в механизме. Так шарнир JF – это сварка, пайка, склейка и т.д. Шарнир JR – это радиально-упорный подшипник (шариковый или скольжения). Шарнир JC – это радиальный подшипник, например, роликовый или игольчатый. Такая схема полезна для понимания конструкции ме-

---

<sup>14</sup> Если ось кулачка должна проходить через его центр масс, то при удлинении кулачка не забудьте изменить координату 3D узла его центра масс . Проверить расстояние можно, используя инструмент «Измерить» . При симметричном изменении ширины или толщины кулачка, координата его центра масс не меняется.

ханизма и направлений его дальнейшей оптимизации. А схема со связями T-FLEX CAD нужна, чтобы легче строить аналогичные механизмы в T-FLEX PLM, прикладывая минимально необходимый набор непротиворечивых соединений.



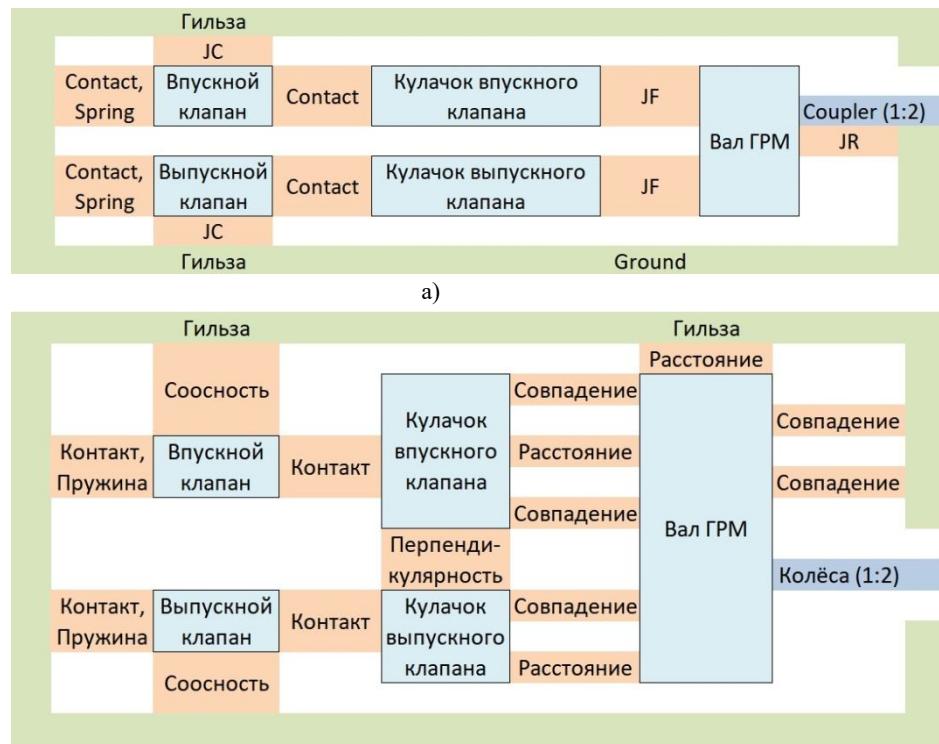
а) вид спереди; б) вид справа

Рис. 3.6 – 3D модель упрощённого газораспределительного механизма (ГРМ)

### 3.5 Создание клапанных пружин

3.5.1 Дальнейшие построения проводятся с помощью модуля Т-FLEX Динамика . Нажмите правой кнопкой мыши на задачу «Анализ движения 1», созданную в лабораторной работе №2, и в выпадающем меню найдите опцию «Изменить» . В разделе «Анализ контактов» выберите параметр «Вручную», затем выберите впускной клапан и ниже «Контактирует с». Выберите в поле

ниже контактирующие с клапаном тела<sup>15</sup>: гильзу и кулачок впускного клапана.



а) с шарнирами T-FLEX Динамика; б) со связями T-FLEX CAD

Рис. 3.7 – Кинематическая схема ГРМ

Затем выберите в списке выше выпускной клапан и в поле «Контактирует с» укажите гильзу и кулачок выпускного клапана.

<sup>15</sup> Кулачки при вращении вала ГРМ давят на толкатели клапанов, опуская клапана вниз и открывая канал. При движении вверх клапана тарелками упираются в области на гильзе, которые называются «сёдлами клапанов», перекрывая канал. Говорят, что клапана «садятся на сёдла». Смоделировать данные процессы, не используя контакты, достаточно сложно.

Параметры контакта<sup>16</sup> пока оставьте без изменений. Завершите редактирование задачи ✓.

Нажмите правой кнопкой мыши на задачу «Анализ движения 1» и в выпадающем меню найдите опцию «Параметры...» . На вкладке «Основные» в поле «Кадров в секунду» увеличьте значение в 10 раз<sup>17</sup> (оно должно быть в диапазоне от 1000 до 4000).

3.5.2 В выпадающем списке инструмента «Сила» на панели «Условия» вкладки «Анализ» выберите «Пружина» . В качестве точки 1 задайте центр окружности нижней поверхности толкателя впускного клапана, а в качестве второй точки задайте центр верхней окружности отверстия под впускной клапан на гильзе. Ориентируйтесь на рис. 3.8. В поле «Начальная длина» введите длину нерастянутой пружины (пружины выпускного клапана). Она равна расстоянию ( $B + H - \delta$ ) от толкателя до гильзы для закрытого клапана. В разделе «Тип зависимости» выберите «Линейная пружина». В поле «Жёсткость» введите 25 Н/мм, в поле «Демпфирование» введите 0,05 Н/мм·с. Размерность коэффициентов определяется текущей системой единиц. В разделе «Визуализация»

---

<sup>16</sup> По умолчанию трение в контакте отключено, а также используется упрощённый метод, учитывающий долю поглощённой при ударе кинетической энергии тел. Если коэффициент восстановления равен 1, то вся энергия возвращается телу, т.е. его скорость по амплитуде не меняется. Это абсолютно упругий удар. Если коэффициент восстановления равен 0, то тело теряет всю кинетическую энергию. Тела при ударе «слипаются». Это абсолютно неупругий удар. При коэффициенте восстановления равном 0,5, как установлено по умолчанию, тело после удара получает половину кинетической энергии четверть начальной скорости. Это соответствует четверти начальной скорости, что примерно соответствует удару сталь по стали. Данный метод хорошо работает, если одно из тел неподвижно, например, контакт клапана и гильзы, если скорости в контакте невелики, а сам контакт носит эпизодический характер. Для более точного моделирования контакта используется метод Лагранжа с прямоугольным пятном контакта или метод Герца с эллиптическим пятном контакта.

<sup>17</sup> Поскольку в модель добавлены контакты. Контактное взаимодействие (удар) происходит очень быстро и требует высокой точности расчёта.

увеличьте «Диаметр» пружины до диаметра толкателя С. Количество витков должно быть не более 5.

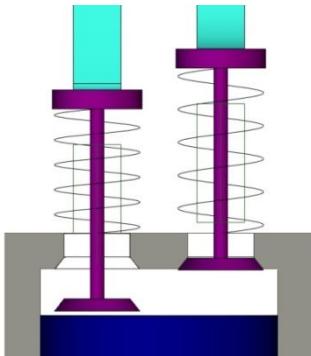


Рис. 3.8 – Задание пружин клапанов

3.5.3 Создайте вторую пружину с такими же параметрами, но соединяющую центр окружности нижней поверхности толкателя выпускного клапана и центр верхней окружности отверстия под выпускной клапан на гильзе. В закрытом состоянии оба клапана должны быть на одинаковой высоте.

### 3.6 Задание в упрощенном виде газовой силы

Нагрузка на клапана от газов в камере сгорания задаётся упрощённо функцией<sup>18</sup>

$$F_g = a(z - z_0)^2,$$

здесь  $z$  – перемещение поршневого пальца вдоль оси Z (оси цилиндра).  $z_0$  – высота поршневого пальца в нижней мертвой точке (НМТ) поршня в центральной системе координат (ЦСК).  $z_0$  равно длине шатуна за вычетом длины щеки, т.е. ( $L_s - Q$ ). Коэффициент  $a = 0.005$ .

3.6.1 Используйте инструмент «Графики» панели «Инструменты» вкладки «Параметры». В открывшемся окне выберите «Создать график», далее «Функция». Назовите новый график «Газовая сила». Выберите «Редактировать» для данного графика. И в открывшемся окне нажмите «Параметры графика» . В поле «Аргумент» укажите числовой диапазон от ( $L_s - Q$ ) до ( $L_s + Q$ ), а в поле «Выражение» введите функцию « $0.005*(#1-z_0)**2$ », где «#1»

<sup>18</sup> Задание действительной газовой силы – сложный процесс. Подробнее смотрите [1,6].

- это аргумент, а  $z_0$  задаётся числом. Завершите создание графика .

3.6.2 В выпадающем списке инструмента «Сила»  на панели «Условия» вкладки «Анализ» выберите «Сила» . Кликните по впускному клапану. Выберите точку в центре нижней окружности  тарелки впускного клапана. Выберите направление по нормали (вверх) к верхней поверхности  тарелки клапана. В диалоге создания силы в разделе «Сила» переключитесь на график и нажмите «Выбрать график и датчик». Выберите «Использовать существующий график» и найдите в списке созданный ранее график «Газовая сила». В поле «Зависимость от датчика» выберите датчик перемещения поршневого пальца, созданный в п.6 лабораторной работы №2. Укажите параметр «Z» (координата вдоль оси Z), который подставится в функцию вместо аргумента «#1». Завершите выбор и, затем, создание силы .

3.6.3 Создайте аналогичную силу, действующую на тарелку второго клапана.

### 3.7 Вывод результатов расчетов в виде графиков и анимации

3.7.1 Запустите «Расчёт» , нажав на кнопку «Запись»  раздела «Параметры моделирования». Посмотрите анимацию, сравните её с анимацией из презентации. В случае неправильной работы пружин допускается изменять их жёсткость, демпфирование и начальную длину. Механизм ГРМ требует дополнительной мощности для своей работы. Если текущего крутящего момента недостаточно (кулачку не хватает усилия открыть клапан), увеличьте крутящий момент МК.

3.7.2 Запишите видеоролик инструментом . Рекомендуются значения «Шаг» 5 и «Масштаб времени» 10.

3.7.3 Воспользуйтесь инструментом «Создать датчик»  на панели «Условия» вкладки «Анализ». Необходимо создать три датчика : для впускного, выпускного клапана и одной из клапан-

ных пружин. Выберите тип датчика «Тело», кликните на впускной клапан. Затем в разделе «Отображаемые параметры» выберите: траектория, линейная скорость и линейное ускорение. Завершите создание датчика . Повторите процесс для выпускного клапана.

3.7.4 Выберите тип датчика «Силовой элемент», кликните на одну из пружин. Выберите в отображаемых параметрах «Активная сила AF». Завершите создание датчика . Для удобства рекомендуется переименовать созданные датчики в соответствии с объектами измерения.

3.7.5 Воспользуйтесь инструментом «Создать результат» на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». Выберите для датчика впускного клапана параметры вдоль оси его движения Z: координата Z, линейная скорость Z, линейное ускорение Z. Создайте аналогичный результат для датчика выпускного клапана, но выберите только координату Z.

3.7.6 Создайте результат для датчика пружины, выбрав активную силу (Z), AFZ. Запустите расчёт заново . Воспроизведите анимацию .

## **Список литературы**

1. Двигатели внутреннего сгорания: устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей : учеб. пособие ; под ред. А. С. Орлина. – М. : Машиностроение, 1980. – 288 с.
2. Кореняко А. С. Теория механизмов и машин : учеб. пособие / А. С. Кореняко – Киев : Вища школа, 1976. – 444 с.
3. Основы кинематического и динамического моделирования в MSC.ADAMS [Электронный ресурс] : [метод. указания] / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т) ; сост.: В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев. - Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2018. - on-line
4. Гвоздев, А. С. Изучение конструкции авиационных двигателей и энергетических установок с использованием 3D-моделей их элементов [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А. С. Гвоздев, В. С. Мелентьев, Д. С. Лежин ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Самара, 2013. - on-line
5. Гвоздев, А. С. Изучение конструкции авиационных двигателей и энергетических установок с совместным использованием пакетов ANSYS, ADAMS и SolidWorks [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / А. С. Гвоздев, В. С. Мелентьев ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Самара, 2013. - on-line
6. Мелентьев, В. С. Проектирование конструкции "виртуального двигателя" [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев, Ф. В. Паровой ; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. акад. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Самара, 2011. - on-line