

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ЗНАКОМСТВО С ВИРТУАЛЬНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ С T-FLEX PLM

Методические указания

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

С А М А Р А
Издательство Самарского университета
2025

УДК 629.7.036.3

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

Рецензент к-т техн. наук, доц. ***Б. Б. Косенок***

Знакомство с виртуальным моделированием с T-FLEX PLM: метод. указания / сост. ***В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев.*** – Самара: Изд-во Самарского университета, 2025. – 94 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», 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» и специалистов по направлению подготовки 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» во 2 семестре по дисциплине «Ознакомительная практика».

Разработано на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

© Самарский университет,
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ЗАДАНИЕ ПО ОБЪЁМНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ	5
2 ОБЪЁМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ	16
2.1 Создание файла модели	16
2.2 Создание геометрии поршня	17
2.3 Создание геометрии шатуна	27
2.4 Создание геометрии коленчатого вала	36
2.5 Создание геометрии маховика и прочих деталей	43
2.6 Создание сборки кривошипно-шатунного механизма	47
3 ЗАДАНИЕ ПО САЕ-МОДЕЛИРОВАНИЮ	58
4 САЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ	65
4.1 Расчёт кинематики кривошипно-шатунного механизма	65
4.2 Расчёт прочности поршня	76
4.3 Расчёт прочности шатуна	79
4.4 Расчёт прочности коленчатого вала	83
4.5 Расчёт собственных частот коленчатого вала	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	93

ВВЕДЕНИЕ

Теоретическая цель пособия состоит в изучении роли информационных технологий в проектировании сложных технических изделий. Практическая цель пособия — ознакомление с функциональными возможностями современных систем автоматизированного проектирования на примере ПО «T-FLEX CAD» в связке с «T-FLEX Динамика» и «T-FLEX Анализ».

ПО «T-FLEX Анализ» (аналог ANSYS Mechanical, Nastran) использует метод конечных элементов и позволяет рассчитать деформацию конструкции и напряжения в ней, в том числе и в движении. 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.

ПО «T-FLEX Динамика» (аналог MSC.ADAMS, ANSYS Motion), хотя и может с некоторыми ограничениями использовать деформируемые тела, предназначено для «multibody dynamics» — расчёта движения механизмов. Выходными данными расчёта 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.

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.

1 ЗАДАНИЕ ПО ОБЪЁМНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ

Перед началом выполнения задания рекомендуется выполнить базовую часть упражнений по «T-FLEX CAD»: интерфейс и настройка системы, 3D профили и опорная геометрия, создание 3D-модели, создание 3D-сборки.

Цель работы – расчётное определение прочностных, кинематических и динамических характеристик объекта исследования.

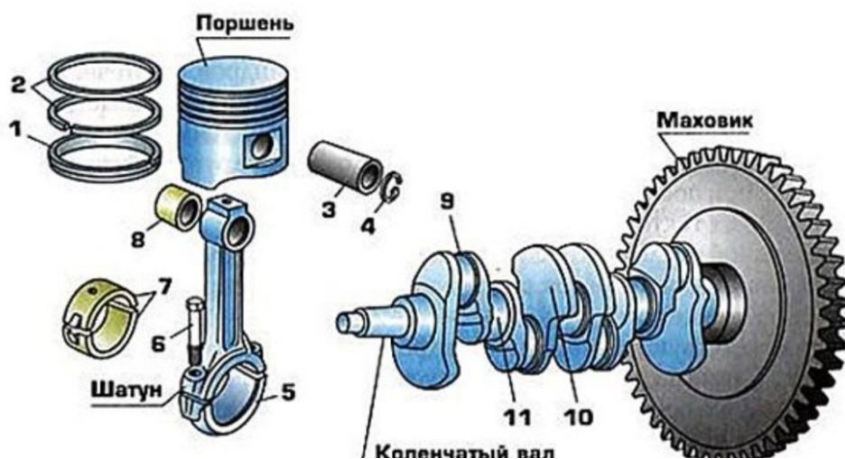
Объектом исследования является выданная преподавателем конструкция. Ниже для примера описываются кривошипный шатунный механизм (КШМ) рядного двигателя и узел пластинчатого гидронасоса.

1.1 Задание по моделированию узла КШМ

Постройте объёмную модель кривошипно-шатунного механизма рядного двигателя, показанную на рисунке 1.1 в пакете «T-FLEX CAD» согласно своему варианту. Основные размеры даны на рисунках 1.2, 1.3, 1.4. Неуказанные размеры принимаются самостоятельно, ориентируясь на рисунок 1.1.

Вариант задания рекомендуется группе из трёх студентов. Рекомендуемая схема распределения. Студент 1 – коленчатый вал; Студент 2 – Поршень и шатун; Студент 3 – Маховик и мелкие детали (вкладыши, поршневой палец и стопорное кольцо, поршневые кольца, болты шатунные). Размеры для каждого варианта в миллиметрах приведены в таблицах 1.1, 1.2, 1.3.

Важно! Схемы деталей ДВС на рис. 1.2, 1.3, 1.4 выполнены с упрощением формы деталей. При создании объёмной модели следует повторять внешний вид, показанный на рисунке 1.1.



1 – маслосъёмное кольцо; 2 – компрессионные кольца; 3 – поршневой палец; 4 – стопорное кольцо; 5 – крышка шатуна; 6 – болт; 7 – вкладыши; 8 – втулка; 9 – шатунная шейка; 10 – противовес; 11 – коренная шейка

Рисунок 1.1 – Внешний вид модели (детали КШМ)

Расстояние В1 на схеме рис. 1.2 дано между центральными плоскостями щёк коленчатого вала. Длина же самой шатунной шейки равна ширине нижней головки шатуна Ш1.

В отчёте опишите построение геометрии модели: создание объёмных моделей деталей и их сборку согласно индивидуальному заданию.

Модель сдаётся преподавателю в виде ассоциированных файлов сборки и деталей «T-FLEX CAD», а также в одном из нейтральных форматов на выбор преподавателя: Parasolid, STEP, IGES.

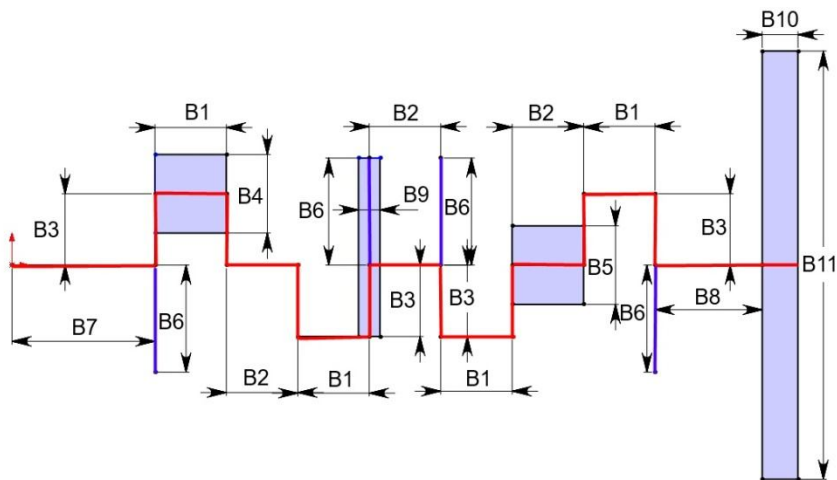


Рисунок 1.2 – Схема коленчатого вала с маховиком

Таблица 1.1 – Параметры вала с маховиком к рис. 1.2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B1	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
B2	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
B3	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41
B4	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43
B5	16	20	22	26	28	32	34	38	40	44
B6	26	28	30	36	42	48	54	60	66	72
B7	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
B8	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
B9	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
B10	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13
B11	86	103	120	123	140	151	160	175	190	205

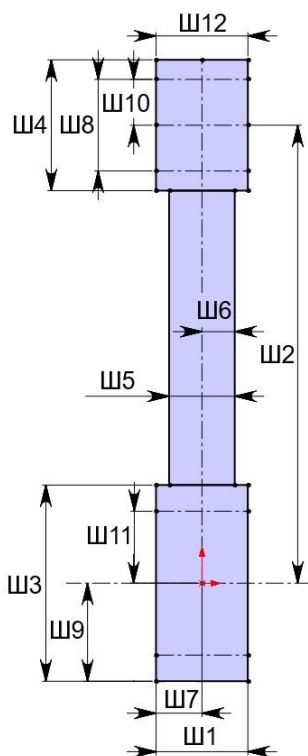


Рисунок 1.3 – Схема шатуна

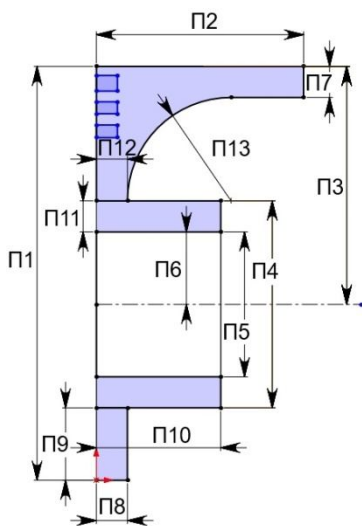


Рисунок 1.4 – Схема поршня

Таблица 1.2 – Параметры шатуна к рис. 1.3

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ш1	6	10	14	18	22	26	30	34	38	42
Ш2	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Ш3	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58
Ш4	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41
Ш5	6	8	10	11	12	13	14	15	16	18
Ш6	3	4	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	9
Ш7	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Ш8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Ш9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
Ш10	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ш11	8	9,5	11	12,5	14	15,5	17	18,5	20	21,5
Ш12	12	14	14	16	16	18	18	20	20	22

Таблица 1.3 – Параметры поршня к рис. 1.4

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
П1	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68
П2	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
П3	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
П4	14	16	20	22	24	26	30	32	34	38
П5	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
П6	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
П7	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
П8	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5
П9	4	6	7	9	11	13	14	16	18	19
П10	11	11	12	12	13	13	14	14	15	15
П11	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5
П12	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5
П13	12	12	10	10	10	10	8	8	8	7

1.2 Задание по моделированию узла пластинчатого гидронасоса

Постройте объёмную модель пластинчатого гидронасоса, показанную на рисунках 1.5 и 1.6. Основные размеры представлены в таблице вариантов 1.4, а также даны на схемах рис. 1.7 - 1.11 в качестве примера. Неуказанные размеры принимаются самостоятельно, исходя из вида конструкции на рисунке 1.5. Стандартные элементы, по возможности, выбираются из библиотеки ПО стандартных изделий.

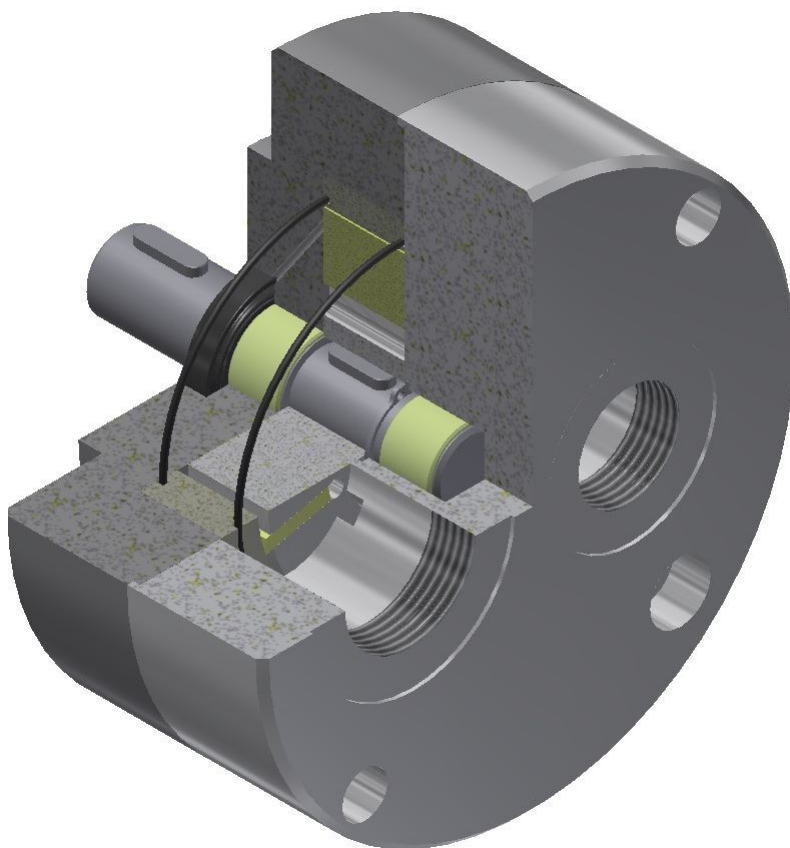
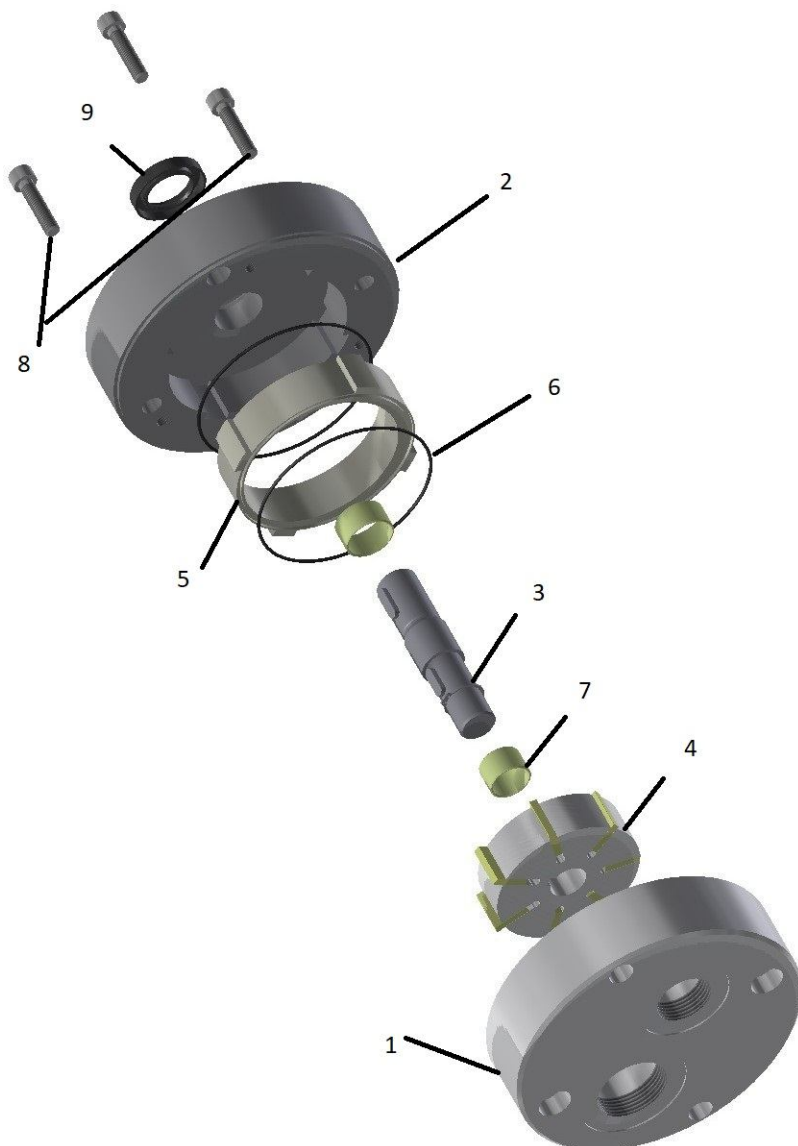


Рисунок 1.5 – Узел пластинчатого гидронасоса в сборе



1 – корпус , 2 - фланец, 3 – вал со шпонками, 4 – крыльчатка, 5 – внутреннее кольцо, 6 – уплотнительное кольцо, 7 - втулка подшипника, 8 – крепёж, 9 – уплотнительный элемент.

Рисунок 1.6 – Состав узла пластинчатого гидронасоса

Задание рекомендуется рабочей группе из двух студентов. Рекомендуемая схема распределения: студент 1 – роторная часть; студент 2 – статорная часть и подбор стандартных элементов. Сборка осуществляется совместно рабочей группой. Дальнейшая работа планируется в составе той же рабочей группы.

Модель сдаётся преподавателю в виде ассоциированных файлов сборки и деталей T-FLEX CAD, а также в одном из нейтральных форматов на выбор преподавателя Parasolid, STEP, IGES.

Таблица 1.4 – Параметры пластинчатого гидронасоса

№	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L
1	16	12	20	16	23	94	24,5	28	20	24	16
2	14	10	18	14	23	94	24,5	26	18	22	14
3	16	12	18	14	26	94	30	28	20	24	16
4	16	12	22	18	23	104	30	28	20	24	16
5	14	10	16	14	21	92	22,5	24	16	20	12
6	18	14	22	20	26	94	30	28	20	24	16

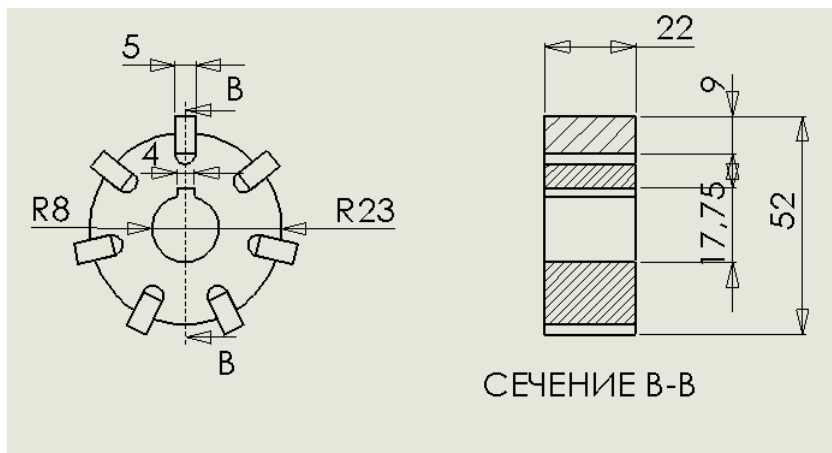


Рисунок 1.7 – Эскиз крыльчатки

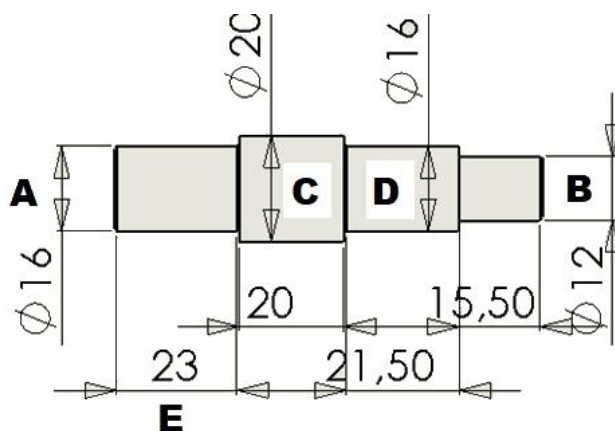


Рисунок 1.8 – Эскиз вала

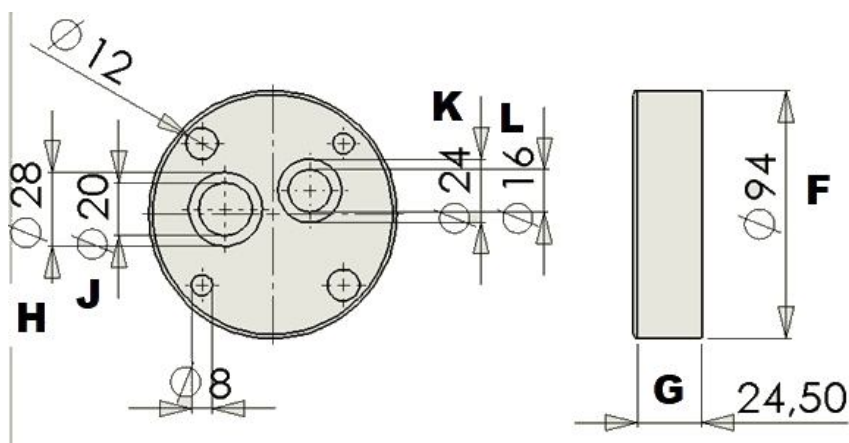


Рисунок 1.9 – Эскиз корпуса

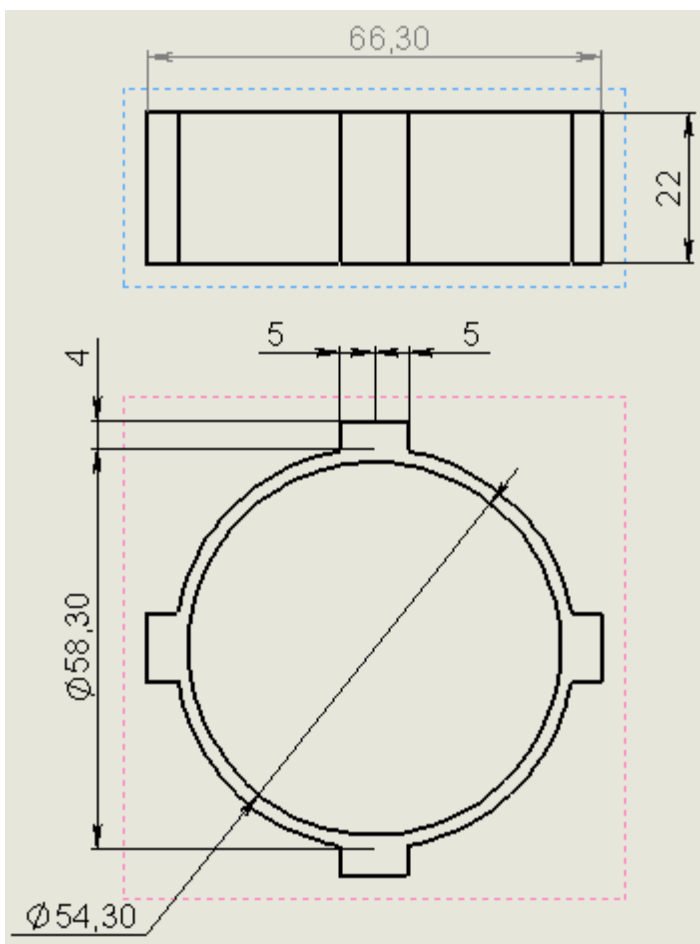


Рисунок 1.10 – Эскиз внутреннего кольца

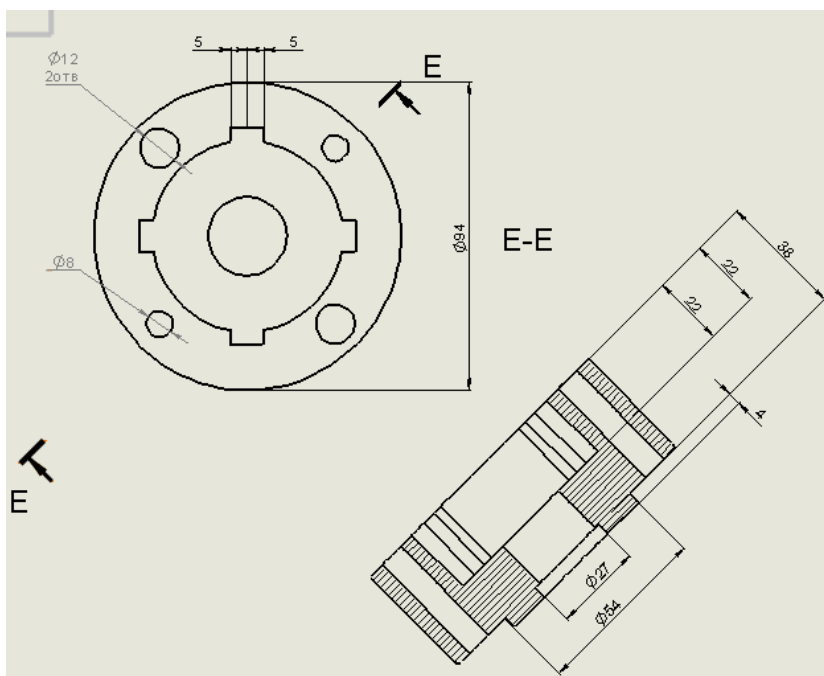


Рисунок 1.11 – Эскиз фланца


2 ОБЪЁМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Ниже приведён пример построения сборки КШМ в «T-FLEX CAD». Геометрия в примере упрощена, поэтому допускается её усложнение за счёт добавления конструктивных особенностей. На данном примере рассматриваются необходимые инструменты и алгоритм построения деталей. Пластинчатый гидронасос моделируется сходным образом.


2.1 Создание файла модели

Создайте рабочую папку, где будут храниться все материалы. Лучше всего использовать папку D:\Users\№ группы\Фамилия, например, D:\Users\2210\Иванов Максим;

Запустите приложение «T-FLEX CAD».



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.

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


Перейдите на вкладку (или в окно¹) приветствия (или в меню Файл - Создать) и создайте «3D сборку» . Сохраните её в рабочую папку под названием, например, «КШМ». Не закрывая вкладку сборки, перейдите на вкладку детали «Поршень».



¹ В зависимости от настроек интерфейса документы в «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.



2.2 Создание геометрии поршня




Сначала воспользуйтесь инструментом «Переменные»  панели «Параметры». В открывшемся окне «Редактор переменных» выберите инструмент «Новая переменная» . Введите имя переменной «П1». Укажите тип «Вещественная». В поле «Выражение» введите значение переменной «П1» из табл. 1.3. Нажмите на кнопку с многоточием справа от поля «Единица измерения». Выберите в открывшемся списке «Длина» - «мм». Поставьте галочку в поле «Внешняя». В поле «Комментарий» можно указать какую-то вспомогательную информацию. Завершите создание переменной, нажав «ОК».

Создайте аналогично оставшиеся двенадцать переменных из табл. 1.3.

Выберите плоскость «Вид спереди» и создайте на ней 3D-профиль, используя команду «Чертить»  панели «3D Модель».





Сначала создайте две взаимно перпендикулярные оси в центре координат, используя инструмент «Прямые с узлом в 0,0» , который открывается через подменю инструмента «Прямая» .

Используя отрезки , начертите 3D-профиль (эскиз) базовой геометрии поршня, как показано на рис. 2.1. Используя элемент «Размеры»  панели «Оформление», задайте длины отрезков. Вместо параметров с рис. 1.4 задавайте созданные ранее переменные. Для этого просто напишите их названия в окне задания размера.




Проверить расстояние можно, используя инструмент «Измерить»  панели «Измерить» вкладки «Измерение». В свойствах инструмента  выберите «Измерить отношение между двумя элементами» .

Некоторые линии на рис. 2.1 не имеют размеров. Это прямая 1 и дуга 2, образующие внутреннюю поверхность днища поршня, и

набор линий 3, образующих поверхности трёх канавок для установки поршневых колец².

Линию 1 изначально создайте небольшой длины, не более чем $0,2 \cdot P2$. Дугу 2, соединяющую линии 1 и 4, создайте инструментом «Касательная дуга» , доступным в подменю инструмента «Дуга»  панели «Эскиз» вкладки «Чертёж». Сначала выберите линию 4, а затем крайнюю левую точку линии 1. После этого на панели «Ограничения»  вкладки «Чертёж» выберите ограничение «Касание»  и укажите дугу 2 и линию 1, которые также становятся касательными³.






Размеры линий набора 3, описывающих форму канавок под поршневые кольца, выберите самостоятельно, исходя из следующих ограничений: общая высота канавок (от днища поршня до нижней точки нижней канавки) не более $0,25 \cdot P1$, глубина канавки не более $0,75 \cdot P8$.

Для построения объёмной геометрии одноцветный контур 3D-профиля должен быть замкнутым и непересекающимся⁴. Для проверки контура на разрывы или пересечения можно воспользоваться инструментом «Проверка контуров»  вкладки «Измерение». Выберите инструмент , нажмите на . Места ошибок (при наличии) обозначатся на контуре.

² Верхние две одинаковые канавки предназначены для установки компрессионных колец, нижняя канавка, чуть большей высоты предназначена для установки маслосъёмного кольца.

³ При этом длина линии 1 и радиус дуги 2 становятся определёнными, хотя их значения и не указаны явно. Такие размеры, определяемые набором ограничений модели, называют «свободными». Не путайте их с «произвольными» размерами, значение которых пользователь выбирает по желанию.

⁴ Поскольку для линий разного цвета, нарисованных на одной плоскости, создаются разные 3D-профиля (по которым в дальнейшем строится различная объёмная геометрия), требования замкнутости и отсутствия пересечений относятся только к линиям одного цвета. Разные контуры, нарисованные линиями различных цветов, могут пересекаться.

Для задания точек соединения некоторых деталей в сборке требуется создать 3D узлы . Перейдите на вкладку «3D Модель» и найдите в панели «Построения» инструмент «3D узел» . Создайте 3D узел  в центре координат (на пересечении осей поршня и поршневого пальца). Используйте тип «В координатах»  или «По двум проекциям» .

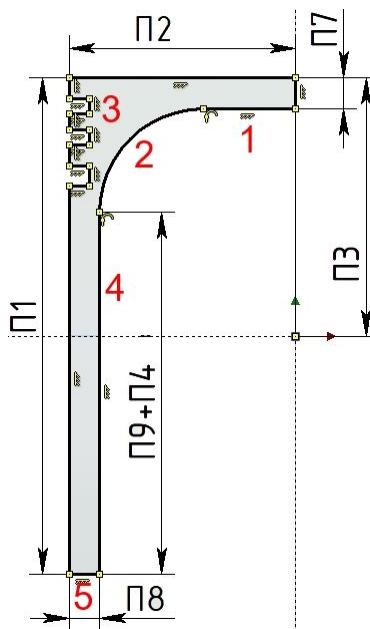













Рисунок 2.1 – 3D-профиль базовой геометрии поршня


Нажмите правой кнопкой мыши на рабочем поле модели и в выпадающем меню выберите пункт «Завершить»  (или нажмите «Завершить»  на панели «Управление»). В древе построения должна появиться папка «3D Узлы» и в ней созданный 3D узел. Сохраните документ .


Выбрав построенный 3D-профиль, создайте тело операций «Вращение»  панели «Операции» вкладки «3D-модель». Угол



поворота составляет 360 градусов. В качестве оси вращения используйте отрезок П7. Оставьте галочку «Упростить геометрию».


Воспользуйтесь инструментом «Плоскость»  панели «Построения» вкладки «3D-модель». Выберите в открывшемся окне опцию «Смещённая плоскость» . В качестве «Исходной плоскости» укажите рабочую плоскость «Вид слева». В поле смещения укажите величину (П2-П10). В окне «Система координат рабочей плоскости» выберите «Глобальная система координат» . В поле «Имя» введите, например, «Бобышки поршня». Завершите создание рабочей плоскости . Она появится в древе построения модели в разделе «Рабочие плоскости».






Начните чертить  на рабочей плоскости «Бобышки поршня». 3D-профиль бобышки и рёбер жёсткости удобно чертить, переключившись на стиль отображения  «Рёберное изображение»  на вкладке «Вид».

Сначала создайте две взаимно перпендикулярные оси в центре координат, используя инструмент «Прямые с узлом в 0,0» .

В центре координат начертите окружность диаметром П4 с помощью инструмента «Окружность»  вкладки «Эскиз» панели «Чертёж» для построения бобышки поршня.

Затем проведите две вспомогательные прямые  под наклоном 30 градусов к вертикали, как показано на рис. 2.2. Для этого выберите инструмент «Прямая» . Нажмите на точку в центре координат. Затем укажите вертикальную прямую, от которой будет отсчитываться угол. Далее в соответствующем поле на боковой вкладке⁵ «Параметры» укажите нужное значение угла. Задайте угловой размер между вновь созданной наклонной и вертикальной

⁵ Боковые вкладки, такие как «3D-модель», «Меню документов», «Параметры» являются «плавающими», т.е. их можно разместить в любом месте окна T-FLEX CAD. Также их можно скрывать и отображать через пункт «Окна» меню «Настройка...» . Однако, по умолчанию, они привязаны к левой части окна.

прямой инструментом «Размеры» . Постройте отрезками  геометрию рёбер жёсткости⁶. Для отрезка с одной стороны прямой задайте ограничение параллельности  относительно прямой. Для отрезка с другой стороны прямой задайте ограничение симметричности . Для этого задайте первый отрезок, затем второй отрезок, и прямую, являющуюся осью симметрии. Затем задайте расстояние от одного из отрезков до вспомогательной прямой (половину толщины ребра, рекомендуемое значение $P8/2$). И проекцию высоты ребра ($P3-1$) на ось Z. Аналогично постройте второе ребро. Обрежьте  лишние части окружности под рёбрами.

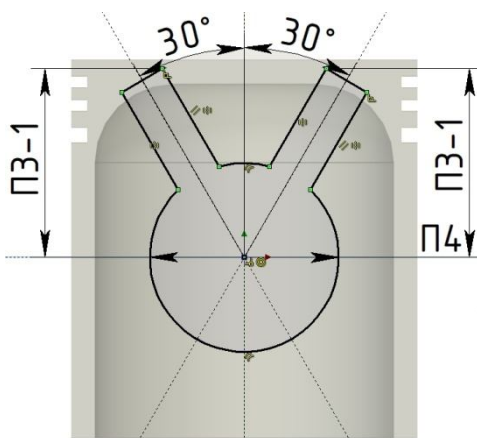













Рисунок 2.2 – 3D-профиль бобышки поршня и рёбер жёсткости


Чтобы было лучше видно внутреннее строение поршня, можно использовать инструмент «Активна»  или «В плоскости экрана»  панели «Плоскость обрезки» вкладки «Вид». При этом бу-



⁶ Если внутренний (ближайший к оси поршня) край рёбер жёсткости совпадает с внутренним краем бобышки, то можно строить их на одном профиле, как это показано на рис. 2.2. В противном случае, т.е. если глубина рёбер жёсткости меньше глубины бобышки, для ребер жёсткости нужно создать ещё одну смещённую рабочую плоскость , как описано выше.

дет создан визуальный разрез детали, который (в отличие от инструмента «Применить сечение» ) не вносит изменений в модель и служит только для удобства просмотра.



На панели «Операции» выберите операцию «Выталкивание» . Укажите созданный 3D-профиль. В основных параметрах в поле «Прямое направление» выберите «До поверхности» . В поле «Отступ» введите «0» мм. Кликните на внутреннюю цилиндрическую грань поршня с той стороны, куда должна вытягиваться бобышка.



Для того, чтобы создаваемое тело сразу соединялось с базовой частью поршня (без необходимости отдельно применять булеву операцию  «Сложение»  из панели «Операции» вкладки «3D Модель») примените булеву операцию внутри текущей операции. Для этого измените интеллектуальный режим⁷  создания булевой операции на «сложение» , выберите в свойствах операции пиктограмму «Выбрать исходное тело для булевой операции»  и кликните на тело поршня⁸.

Завершите операцию .

Далее необходимо добавить на наружной поверхности поршня площадку в месте установки поршневого пальца. Начните чертить  на рабочей плоскости «Вид спереди». Поскольку на рабочей плоскости «Вид спереди» уже существует 3D профиль базовой геометрии поршня, нужно разделить элементы построения (линии), относящиеся к разным телам. Для этого контуры разных 3D профилей нужно окрасить в разные цвета, используя инструмент «Цвет»  панели «Стиль» вкладки «Рабочая плоскость». Выбери-

⁷ В интеллектуальном режиме T-FLEX CAD пытается сам определить, нужно применить для этой операции булеву операцию сложения, вычитания или пересечения.

⁸ Уже созданные отдельные тела можно объединять, используя булеву операцию  «Сложение»  из панели «Операции» вкладки «3D Модель».

те инструмент «Прямоугольник»  панели «Эскиз» вкладки «Чертёж». По умолчанию выбран чёрный цвет .

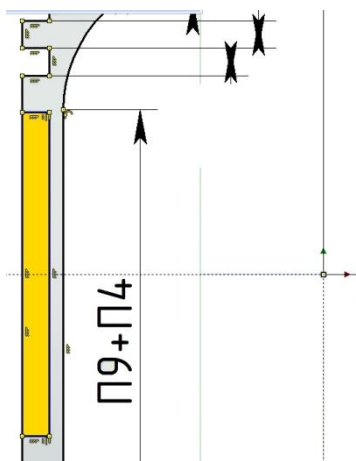















Рисунок 2.3 – 3D-профиль площадки для поршневого пальца

Измените цвет на любой другой, например, синий .



Постройте 3D профиль площадки в виде прямоугольника , как показано на рис. 2.3. Используйте ограничение  симметричности  для верхнего и нижнего отрезков и вспомогательной линии на оси бобышки. После завершения черчения  появится диалоговое окно с вопросом «Создать для каждого цвета линий изображения отдельный профиль?». Выберите ответ «Да».

Выберите созданный 3D-профиль площадки. На панели «Операции» выберите операцию «Выталкивание» . В основных параметрах в поле «Прямое направление» выберите «Через всё». Используйте булеву операцию «Вычитание» . Завершите операцию .

Воспользуйтесь операцией «Симметрия»  панели «Операции» относительно рабочей плоскости «Вид слева», чтобы создать зеркальную копию геометрии бобышки. Сначала выберите 3D операцию выталкивания, которой создана бобышка, для копирования  (внутри тела поршня), а затем плоскость симметрии .

Объедините симметричную копию бобышки (Симметрия_1) с телом поршня, используя булеву операцию  «Сложение»  из панели «Операции» вкладки «3D Модель». Первым операндом укажите основное тело (к которому присоединяется или из которого вычитается другой объект), а вторым операндом укажите при-

соединяемое (или вычитаемое) тело (или операцию внутри тела). В данном случае первый операнд – тело поршня, второй операнд – копия бобышки.

Воспользуйтесь операцией «Симметрия»  снова, чтобы отразить относительно рабочей плоскости «Вид слева» площадку под поршневой палец. Завершите операцию .

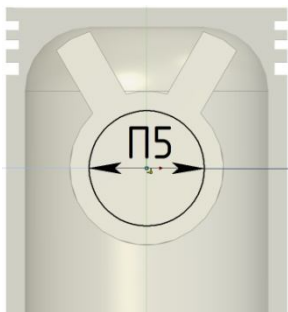









Рисунок 2.4 – 3D-профиль отверстия под поршневой палец

Вычтите симметричную копию площадки из тела поршня, используя булеву операцию  «Вычитание»  из панели «Операции» вкладки «3D Модель».



Начертите  на рабочей плоскости «Вид слева» 3D-профиль отверстия под поршневой палец, как показано на рис. 2.4. На панели «Операции» выберите операцию «Выталкивание» . В основных параметрах в поле «Прямое направление» выберите «Через всё».

Используйте булеву операцию «Вычитание» . Завершите операцию . Проверьте соответствие созданной геометрии рис. 1.1 и 1.4. При необходимости отредактируйте 3D-профиля операций «Редактировать профиль»  из меню правой кнопки мыши для нужного 3D-профиля в разделе «3D построения» дерева построения модели. Особенно обращайте внимание на элементы, размеры которых заданы произвольно.

Например, если отверстие под поршневой палец пересекает канавки под поршневые кольца, необходимо сместить поршневые кольца⁹ вверх на произвольное расстояние, уменьшив высоту канавок и расстояние между ними.

⁹ Сместить нужно именно канавки под поршневые кольца, а не отверстие под поршневой палец, поскольку размеры колец не указаны в таблице

Если площадка под поршневой палец на наружной поверхности поршня оказалась меньше отверстия под поршневой палец, её размер следует увеличить. И т.д.

После завершения редактирования начертите  на рабочей плоскости «Вид слева» 3D-профиль отверстия под противовес, как показано на рис. 2.5. На панели «Операции» выберите операцию «Выталкивание» . В основных параметрах в поле «Прямое направление» выберите «Через всё».

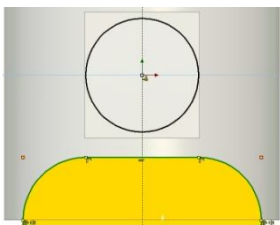




Рисунок 2.5 – 3D-профиль выреза под противовес


Добавьте скругления между элементами геометрии операцией «Сглаживание» . На рис. 2.6 выделены обязательные рёбра для скругления. Скруглять рёбра лучше последовательно. Радиусы скруглений подберите самостоятельно. Можно добавить и другие скругления, ориентируясь¹⁰ на рис. 1.1.

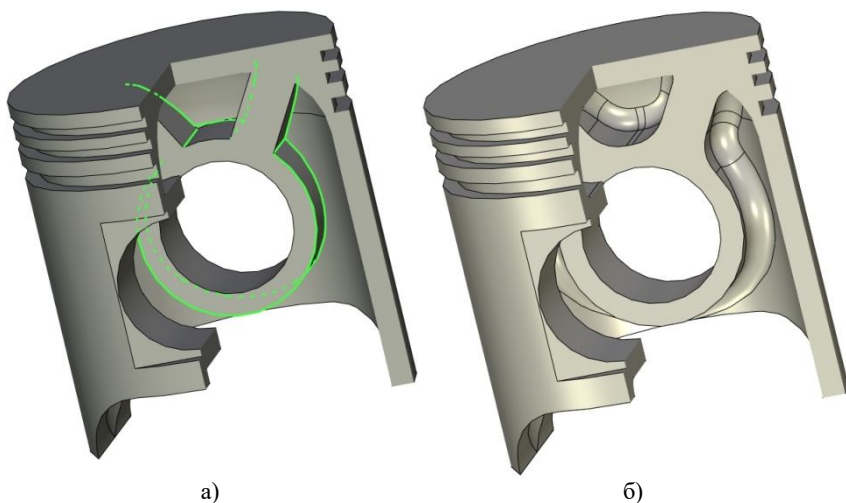
Воспользуйтесь инструментом «Материалы»  (доступен на вкладке «3D модель» или «Инструменты» на панели «Оформление»). Откроется окно «Материалы» для управления материалами детали. На вкладке «Документ» окна «Материалы» в поле «Имя» должен находиться материал «Сталь», из которого сделаны все тела (и операции) детали по умолчанию.

Перейдите на вкладку «Библиотеки» и найдите в папке «Металлы – ГОСТ – Алюминий, сплав алюминия – Алюминиевый литейный сплав» материал «АК8М» (или другой по выбору преподавателя). Зажав левую кнопку мыши, перетащите картинку выбранного материала на тело поршня в рабочем окне. Выберите в от-

исходных данных и выбираются «из конструктивных соображений», т.е. ориентируясь на внешний вид (конструкцию) примера (прототипа).

¹⁰ Если известен реальный двигатель-прототип, ориентируйтесь на его внешний вид (стенды, фотографии, техописания) и чертежи.




крывшемся окне галочку «Изменить материал тела». Цвет тела поршня изменится. Сохраните документ .





а) Рёбра для операции «Сглаживание»,
б) Результат применения двух последовательных операций сглаживания
Рисунок 2.6 – Сглаживание тела поршня



В данном примере рассмотрено создание только основной геометрии поршня. Для приближения модели к реальности можно смоделировать также: рёбра жёсткости и охлаждения на внутренней поверхности днища поршня, проточки под стопорные кольца, каналы подвода-отвода масла, проточки под клапана и фаски на днище поршня, выпуклость/вогнутость самого днища, овальность и конусность боковой поверхности поршня и т.д.




2.3 Создание геометрии шатуна



Создайте «3D деталь»  «Шатун». Воспользуйтесь инструментом «Переменные»  панели «Параметры». Создайте переменную  «Ш1». В поле «Выражение» введите значение переменной «Ш1» из табл. 1.2. В поле «Единица измерения» укажите «мм». Поставьте галочку в поле «Внешняя». Завершите создание переменной, нажав «ОК».

Создайте аналогично оставшиеся одиннадцать переменных из табл. 1.2.

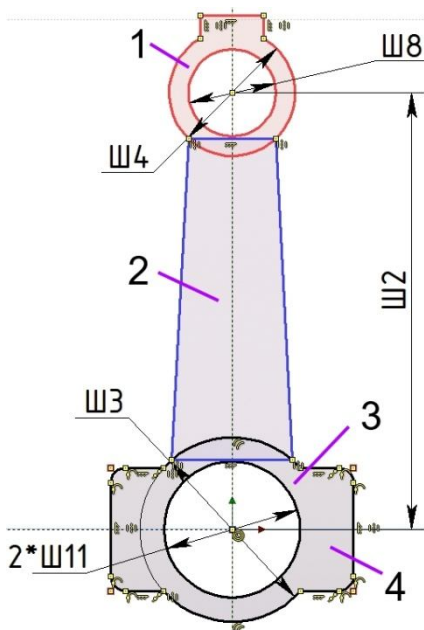
Начните чертить  на рабочей плоскости «Вид слева». Создайте две взаимно перпендикулярные оси в центре координат, используя инструмент «Прямые с узлом в 0,0» .

Разными цветами  отрезков  начертите три отдельных 3D-профиля верхней и нижней головок и стержня шатуна, как показано на рис. 2.7. Полная высота шатуна на рис. 2.7 $(Ш2+(Ш3+Ш4)/2+\Delta1)$, где $\Delta1$ – высота площадки, в данном примере равная $(Ш4/6)$. Полная ширина шатуна на рис. 2.7 $(Ш3+2*\Delta2)$, где $\Delta2$ – ширина прилива под крепление, в данном примере равная $(6*Ш3/19)$. $\Delta1$ и $\Delta2$ задаются, ориентируясь на пропорции шатуна¹¹ на рис. 1.1.

Создайте 3D узлы  в центре координат (центре нижней головки) и в центре верхней головки. Используйте тип «В координатах»  или «По двум проекциям» .





При создании площадки на верхней головке шатуна и выступов под болты, используйте ограничение  симметричности .



¹¹ Или на конструкцию выданного прототипа.





- 1 – верхняя головка; 2 – стержень;
3 – нижняя головка;
4 – прилив под крепление


Рисунок 2.7 – 3D-профиля шатуна

Вытолкните  каждый 3D-профиль на заданное расстояние. В поле «Прямое направление» выберите «Симметрично по общей длине». Для того, чтобы создаваемое тело сразу соединялось с базовой частью шатуна, выберите в свойствах операции пиктограмму «Выбрать исходное тело для булевой операции»  и кликните на тело шатуна. Измените интеллектуальный режим  создания булевой операции на «сложение» .

Либо объедините созданное тело с базовой частью шатуна, используя булеву операцию  «Сложение»  из панели «Операции» вкладки «3D Модель».

Если шатун планируется сделать разборным, то для верхней и нижней части его нижней головки (поз. 3 на рис. 2.7) нужно сде-

Помните, что каждый 3D-профиль должен быть замкнутым и непересекающимся. Для проверки контура на разрывы или пересечения можно воспользоваться инструментом «Проверка контуров»  вкладки «Измерение». Для удаления ненужных участков отрезков, например, дуг окружностей, используйте инструмент «Обрезка» .

После завершения черчения  появится диалоговое окно с вопросом «Создать для каждого цвета линий изображения отдельный профиль?». Выберите ответ «Да».

лать отдельные 3D-профиля и вытолкнуть их на одинаковое расстояние.

Если планируется сделать приливы под крепления (поз. 4 на рис. 2.7) так, как показано на рис. 1.1, чтобы их передняя и задняя плоскости не совпадали с соответствующими плоскостями шатуна, для одного из приливов нужно также сделать отдельный 3D-профиль, как для стержня шатуна (поз. 2 на рис. 2.7). Вытолкнуть его на меньшее расстояние, чем Ш1.

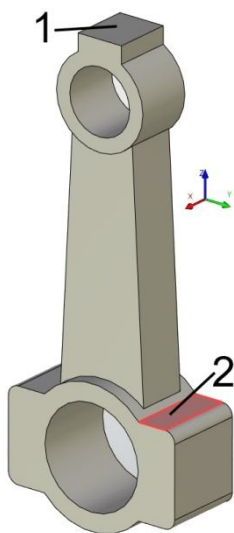










Рисунок 2.8 – Грани для дополнительных 3D-профилей


А затем создать копию, используя операцию «Симметрия»  панели «Операции» относительно рабочей плоскости «Вид спереди». Сначала нужно выбрать 3D операции для копирования , а затем плоскость симметрии . Чтобы создать отверстие для подвода масла, используйте инструмент «Отверстие»  панели «Расширенное». Укажите верхнюю грань верхней головки шатуна (поз. 1 на рис. 2.8). Используйте тип «Под крепёжные детали» , стандарт «Метрические». В основных параметрах выберите простое цилиндрическое отверстие  и укажите диаметр. В разделе «Положение» укажите координаты U (Ш12/2000) и V (половина ширины площадки 1 на рис. 2.8) в метрах, чтобы отверстие было в середине грани.

Затем на панели дополнительных опций выберите инструмент «На заданную длину»¹² . Укажите такую длину, чтобы отвер-

¹² Если отверстие не проходит через стержень шатуна, а только через верхнюю (поршневую) головку, можно выбрать инструмент «До следующей грани» .



стие проходило через стержень¹³ шатуна, но не затрагивало нижнюю часть нижней головки (Ш2+0,5*Ш4).

Далее создаётся геометрия узла крепления верхней и нижней части нижней головки шатуна.

В реальной конструкции для этого на грани (поз. 2 на рис. 2.8) создаётся отверстие¹⁴  . Затем строятся, либо берутся из библиотеки стандартных элементов, модели шатунного болта¹⁵, гайки и стопорной (самоконтрящейся или контровочной) шайбы и добавляются в сборку шатуна. А сама сборка шатуна, как подсборка, добавляется в сборку¹⁶ КШМ.

Перед применением булевой операции посмотрите на деталь с разных сторон, чтобы убедиться в правильном позиционировании созданной геометрии.



В данной упрощённой модели шатун делается как одно тело.

Начните чертить  на верхней грани (поз. 2 на рис. 2.8) прилива под крепление. Используя инструмент «Многоугольник» 

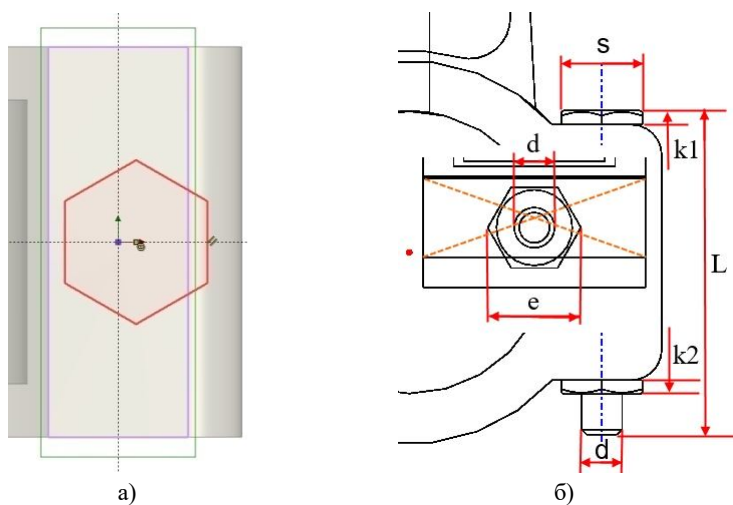
¹³ По умолчанию отверстие создаётся по нормали (т.е. перпендикулярно) выбранной поверхности. Если требуется изменить угол наклона отверстия, поставьте галочку в боксе «Ориентация» и укажите элемент, через который должна проходить ось отверстия. Например, 3D-узел верхней головки шатуна.

¹⁴ При задании в свойствах отверстия параметров резьбы весь подходящий элемент крепежа можно добавлять из библиотек стандартных (или пользовательских) элементов. В данном пособии работа со стандартными элементами не рассматривается. Для получения информации по работе со стандартными элементами обратитесь к упражнениям встроенного (или онлайн) учебного пособия T-FLEX CAD по данной тематике.

¹⁵ Например, болт ГОСТ Р 50791-95, стопорная гайка ГОСТ ISO 7044-2016. Шайба в этом случае не нужна.


¹⁶ Альтернативный вариант – добавление внутри самой детали «Шатун» одного комплекта крепежа, его зеркальное отражение операцией «Симметрия»  и объединение с телом шатуна булевой операцией «Сложение» .




панели «Эскиз», создайте 3D-профиль головки болта¹⁷, как показано на рис. 2.9, ориентируясь на пропорции шатуна на рис. 1.1 или параметры прототипа. В данном примере используется упрощённая геометрия болта и гайки с размерами $d = 0,25 \cdot \text{Ш12}$, $L = 8 \cdot d$, $S = L/4$, $e \approx 1,155 \cdot S$, $k_1 = k_2 = 0,35 \cdot d$.



а) 3D-профиль головки болта; б) Размеры болта и гайки

Рисунок 2.9 – Параметры шатунного крепежа

Для удобства центрирования можно провести прямые  через рёбра и вершины грани (поз. 2 на рис. 2.8) и использовать их как базу для измерения. Вытяните готовый 3D-профиль на нужное расстояние.

Чтобы сделать фаску головки болта, создайте вспомогательную рабочую плоскость . На вкладке «Основные параметры» выберите «Через плоское ребро или точки»   и укажите ребро призмы и противоположащую точку (или ребро), как показано на рис. 2.10.

¹⁷ Размеры болтов и гаек можно найти в стандартах, например, ГОСТ 7805-70 или ГОСТ 7798-70.

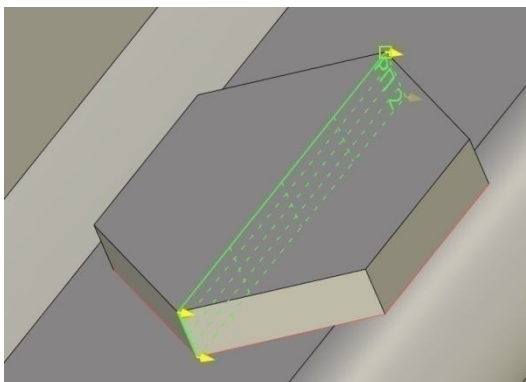










Рисунок 2.10 – Рабочая плоскость для фаски болта

Начните чертить  на созданной вспомогательной рабочей плоскости. Используя отрезки , постройте 3D-профиль в виде прямоугольного треугольника, как показано на рис. 2.11. Проведите осевую линию .

Создайте тело операцией «Вращение»  панели «Операции». Угол поворота составляет 360 градусов. Начальный угол «0». В качестве оси вращения используйте созданную осевую линию. Используйте булеву операцию «Вычитание» .

Аналогично добавьте с нижней стороны шатуна геометрию гайки и выступающей части болта.

Сначала создайте копию только присоединяемых геометрий, используя операцию «Симметрия»  панели «Операции» относительно рабочей плоскости «Вид спереди». Сначала нужно выбрать 3D операции для копирования , а затем плоскость симметрии .

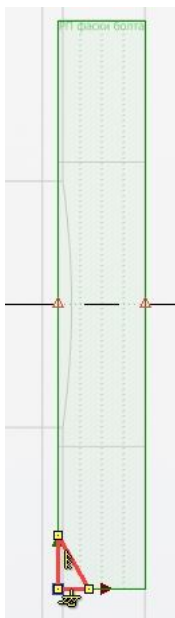








Рисунок 2.11 –
3D-профиль
фаски болта






Затем создайте копию вычитаемых геометрий, также используя операцию «Симметрия» . Элементы «Сглаживание» , во избежание ошибок, лучше не добавлять в копируемые операции, а применить их в конце к готовой детали.


Создастся два новых тела: «Симметрия_1» и «Симметрия_2». Соедините тело «Симметрия_1» с телом шатуна, используя булеву операцию «Сложение»  из панели «Операции» вкладки «3D Модель». Вычитите тело «Симметрия_2» из тела шатуна, используя булеву операцию «Вычитание» .




Начните чертить  на передней (или задней) грани стержня шатуна (поз. 2 на рис. 2.7).



Используя отрезки , постройте 3D-профиль облегчения стержня, как показано на рис. 2.12.


Форма облегчения может быть различной и произвольной.



В данном примере 3D-профиль строится следующим образом. Линии 1 и 5 являются параллельными . Линия 6 симметрична линии 5, поскольку создана инструментом «Симметрия линий» . Дуги 7 и 8 созданы инструментом «Дуга по двум точкам» . Их центра смещены относительно центров головок шатуна. Скругления  между линиями 5 и 7, 6 и 7 одинаковы. Также одинаковы скругления  между линиями 5 и 8, 6 и 8.


Чтобы изменить 3D-профиль, найдите его в дереве построения, нажмите на него правой кнопкой мыши и выберите «Редактировать профиль» .


Вытолкните  3D-профиль на нужное расстояние, вычтя  его из тела шатуна. Затем создайте копию облегчения с другой стороны стержня шатуна, используя операцию «Симметрия» .


панели «Операции» относительно рабочей плоскости «Вид слева». Сначала нужно выбрать 3D операции для копирования , а затем плоскость симметрии .

Вычитите полученное тело «Симметрия_3» из тела шатуна, используя булеву операцию «Вычитание» .

Неверно созданную булеву операцию можно удалить через меню¹⁸. Выберите «Правка – Операции – Булева операция » и укажите нужную операцию в древе модели. В панели свойств выберите нужное действие. Для удаления нажмите пиктограмму «Удалить элемент» . В открывшемся окне выберите «Исключить выбранные элементы из модели». Если данная геометрия не имеет дочерних геометрий (или их можно переопределить) булева операция будет удалена.

Добавьте в модель сглаживание , например, как показано на рис. 2.13.

Используя инструмент «материалы» , задайте шатуну материал «Библиотеки – Металлы – ГОСТ – Сталь – Сталь высоколегированная – 12X18H10T» (или другой по выбору преподавателя).

Сохраните модель .

¹⁸ В том случае, если после неё в древе есть другие операции. Если это последняя операция, её можно удалить кнопкой отмены последних действий. Также через это меню можно удалять и редактировать другие операции.

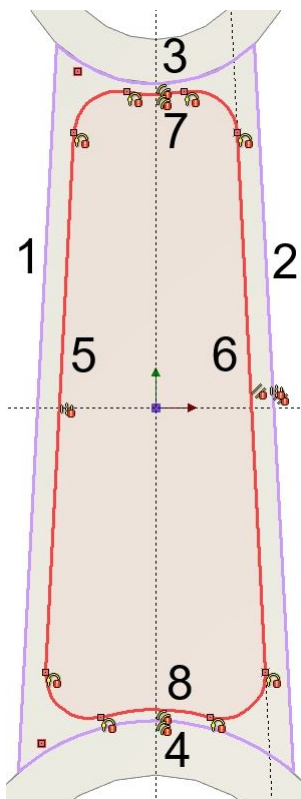


Рисунок 2.12 – 3D-профиль
облегчения в стержне шатуна

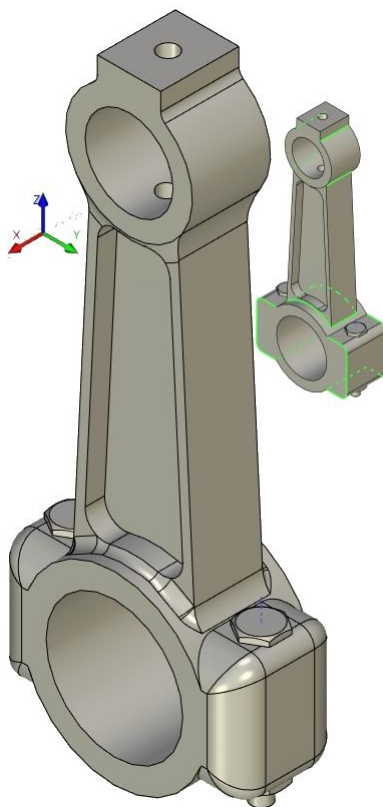






Рисунок 2.13 –
Сглаживание геометрии шатуна




Модель шатуна также можно усложнить, приближая её форму к реальной детали.

2.4 Создание геометрии коленчатого вала

Создайте «3D деталь»  «КВ». Воспользуйтесь инструментом «Переменные»  панели «Параметры». Создайте переменную  «B1». В поле «Выражение» введите значение переменной «B1» из табл. 1.1. В поле «Единица измерения» укажите «мм». Поставьте галочку в поле «Внешняя». Завершите создание переменной, нажав «ОК».

Создайте аналогично переменные «B2»...«B9» из табл. 1.1. «B10» и «B11» создавать не нужно.

Создайте две взаимно перпендикулярные оси в центре координат, используя инструмент «Прямые с узлом в 0,0» .

Используя отрезки , начертите  на рабочей плоскости «Вид слева» 3D-профиль носка коленчатого вала, как показано на рис. 2.14. Проведите осевую линию .

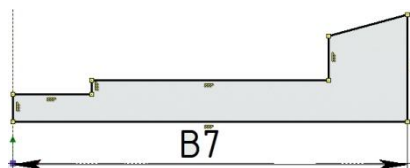






Рисунок 2.14 – 3D-профиль переднего носка вала

Чтобы привязываться к вспомогательным прямым (а не только к точке их пересечения), на панели выбора должна быть активна пиктограмма «Точка на линии построения» .

Не забывайте, что при удержании указателя мыши на точке, открывается список всех присоединённых к ней элементов.

Создайте тело операцией «Вращение»  панели «Операции». Угол поворота составляет 360 градусов. В качестве оси вращения используйте созданную осевую линию. Завершите создание геометрии .

Начертите  на правой (по рис. 2.14) грани тела 3D-профиль щеки коленчатого вала, как показано на рис. 2.15. 3D-профиля

можно создавать любым известным методом. Ниже приведен пример одного из алгоритмов.

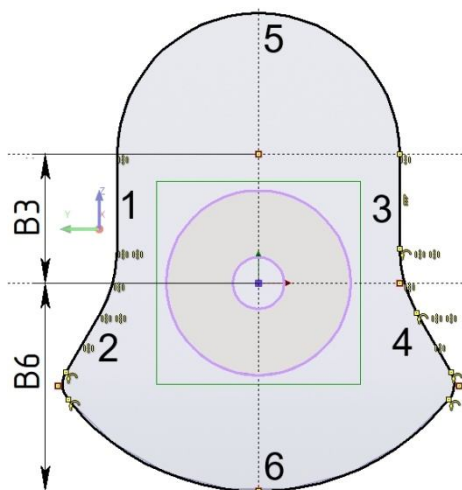






Рисунок 2.15 – 3D-профиль щеки с противовесом




Сначала создайте две взаимно перпендикулярные оси в центре координат, используя инструмент «Прямые с узлом в 0,0» . Затем поставьте две точки : сверху на расстоянии B3 (центр шатунной шейки) и B6 (нижний конец противовеса). Используйте элемент «размеры» панели «оформление». Проведите через эти точки вспомогательные прямые .

Нарисуйте отрезки 1 и 2 (см. рис. 2.14). Создайте отрезки 3 и 4, отразив отрезки 1 и 2 инструментом «Симметрия линий» относительно вертикальной оси. Постройте дугу 5 инструментом «Касательная дуга» , а дугу 6 инструментом «Дуга» .

Добавьте скругления между отрезками 1 и 2, 3 и 4, а также между отрезком 2 и дугой 6, и между отрезком 4 и дугой 6.

Также можно добавить сквозное отверстие сквозь щеку и центр шатунной шейки.

Вытолкните  3D-профиль на расстояние B9 симметрично по общей длине , добавив его к телу коленчатого вала операций «Сложение» . При этом создаваемая геометрия частично перекроет созданную ранее геометрию носка вала. Это нормально, поскольку расстояние B1 на схеме рис. 1.2 дано между центральными плоскостями щёк коленчатого вала. Длина же самой шатунной шейки равна ширине нижней головки шатуна Ш1. Сохраните модель .

Начертите  на рабочей плоскости «Вид спереди» разными цветами  отрезков  два отдельных 3D-профиля для фаски щеки и шатунной шейки вала, как показано на рис. 2.16.

В 3D-профиле можно добавить центральное отверстие, как в носке вала, если ответное отверстие было ранее сделано в щеке.

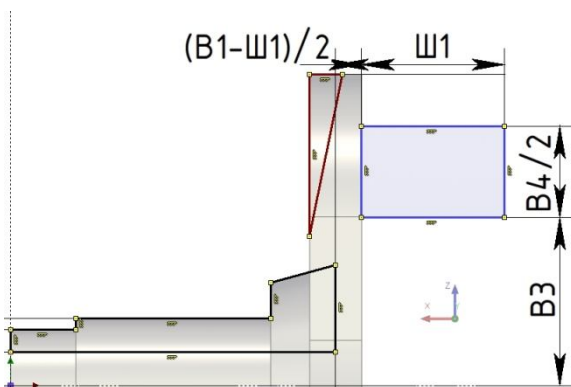








Рисунок 2.16 – 3D-профиля фаски щеки и шатунной шейки

Создайте тело из 3D-профиля фаски щеки операций «Вращение»  панели «Операции». Угол поворота составляет 180 градусов, начальный угол минус 90 градусов. В качестве оси вращения можно использовать созданную осевую линию (см. рис. 2.14), либо создать дополнительную ось  выше или ниже, чтобы добиться нужной формы фаски.

Вычтите создаваемое тело из тела коленчатого вала, используя булеву операцию «Вычитание» .

Создайте тело из 3D-профиля шатунной шейки операциями «Вращение» , добавив его к телу коленчатого вала операциями «Сложение» . Угол поворота составляет 360 градусов. В качестве оси вращения используйте нижний отрезок 3D-профиля.

Начертите  на правой (по рис. 2.16) грани шатунной шейки 3D-профиль щеки коленчатого вала без противовеса, как показано на рис. 2.17.

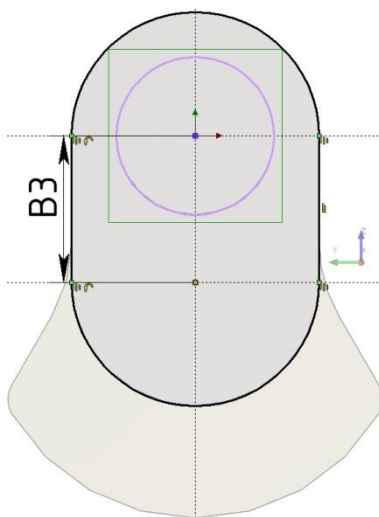





Рисунок 2.17 – 3D-профиль щеки без противовеса

Вытолкните  3D-профиль на расстояние B9 вправо  (автоматически) относительно рисунка 2.16, добавив его к телу коленчатого вала операцией «Сложение» .

Аналогично показанному на рис. 2.16, сделайте 3D-профили фасок щеки без противовеса и коренной шейки, как показано на рис. 2.18.

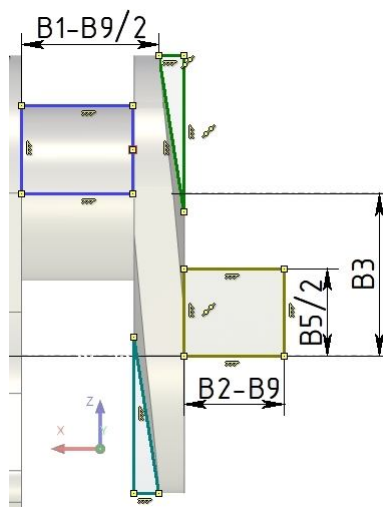













Рисунок 2.18 – 3D-профиля фаски щеки без противовеса и коренной шейки


Создайте из 3D-профилей тела операций «Вращение» , при этом геометрию фасок нужно вычесть  из тела коленчатого вала, а геометрию шейки сложить  с ним.

Начертите  на правой грани (по рис. 2.18) коренной шейки 3D-профиль щеки, такой же по размерам, как на рис. 2.17, но повернутый на 180 градусов вокруг оси вала (см. рис. 1.1).



Вытолкните  3D-профиль на расстояние B9, добавив его к телу коленчатого вала операцией «Сложение» .



Начертите  на рабочей плоскости «Вид спереди» (разными цветами ) 3D-профиля фасок щеки и второй шатунной шейки по аналогии с рис. 2.18.




Создайте из 3D-профилей тела операций «Вращение» , при этом геометрию фасок нужно вычесть  из тела коленчатого вала, а геометрию шейки сложить  с ним.




Начертите  на правой грани (по рис. 2.18) коренной шейки 3D-профиль щеки с противовесом, такой же по размерам, как на рис. 2.15, но повернутый на 180 градусов вокруг оси вала (см. рис.






1.1). Или можно скопировать исходный 3D-профиль в буфер и вставить его со смещением и поворотом в модель. В данной модели поворот вокруг оси X составляет 180 градусов, смещение вдоль оси X ($B1+B1+B2-B9$). Также присутствует некоторое смещение вдоль оси Z для совмещения центра коренной шейки сечения с осью вала.

Вытолкните  3D-профиль на расстояние B9, добавив его к телу коленчатого вала операцией «Сложение» .

Начертите  на рабочей плоскости «Вид спереди» (разными цветами ) 3D-профиль фаски щеки и коренной шейки.

Создайте из 3D-профилей тела операцией «Вращение» , при этом геометрию фаски нужно вычесть  из тела коленчатого вала, а геометрию шейки сложить  с ним.

Далее требуется создать отражение геометрии коленчатого вала относительно центра средней (только что созданной) коренной шейки. Для этого создайте вспомогательную рабочую плоскость  между гранями шейки и щеки, как показано на рис. 2.19. На вкладке «Основные параметры» выберите опцию «Между двумя плоскостями» . Ниже выберите «Глобальная система координат» .

Воспользуйтесь операцией «Симметрия»  панели «Операции» относительно созданной рабочей плоскости, чтобы создать зеркальную копию геометрии коленчатого вала. Копируемые геометрии выделены прямоугольником на рис. 2.19. Сначала выберите 3D операции для копирования , а затем плоскость симметрии . Причём выбор нужно осуществлять в два этапа. На первом этапе выбираются операции, создаваемая геометрия которых будет объединяться  с телом коленчатого вала (щёки и шейки), а на втором этапе выбираются те операции, геометрия которых вычитается  из тела коленчатого вала (фаски).

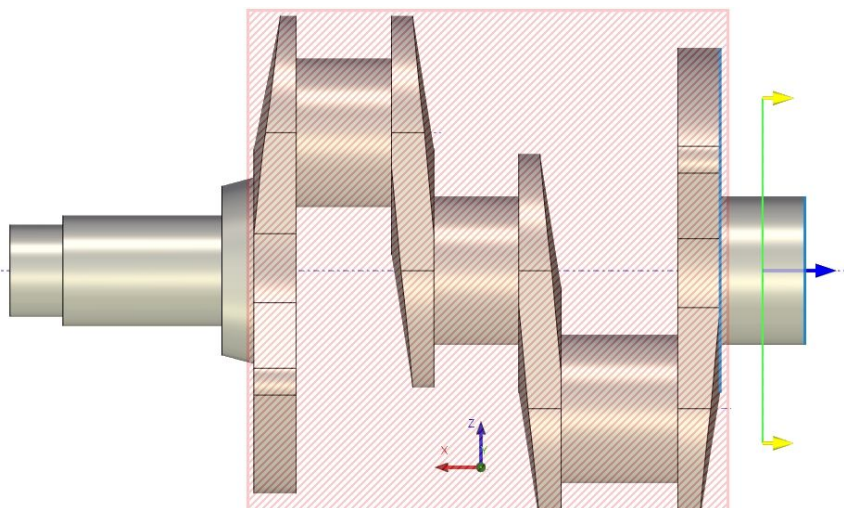


Рисунок 2.19 – Выбор геометрий для копирования

Создастся два новых тела: «Симметрия_1» и «Симметрия_2». Соедините тело «Симметрия_1» с телом коленчатого вала, используя булеву операцию «Сложение» из панели «Операции» вкладки «3D Модель». Вычтите тело «Симметрия_2» из тела коленчатого вала, используя булеву операцию «Вычитание».

Начертите на рабочей плоскости «Вид спереди» (другим цветом) 3D-профиль правого носка коленчатого вала в виде прямоугольника, как коренную шейку, но длиной B_8+B_{10} . В верхнем правом углу прямоугольника добавьте 3D узел для связи с маховиком.

Создайте тело из 3D-профиля правого носка коленчатого вала операцией «Вращение», добавив его к телу коленчатого вала операцией «Сложение».

Добавьте в модель сглаживание, например, как показано на рис. 2.20.

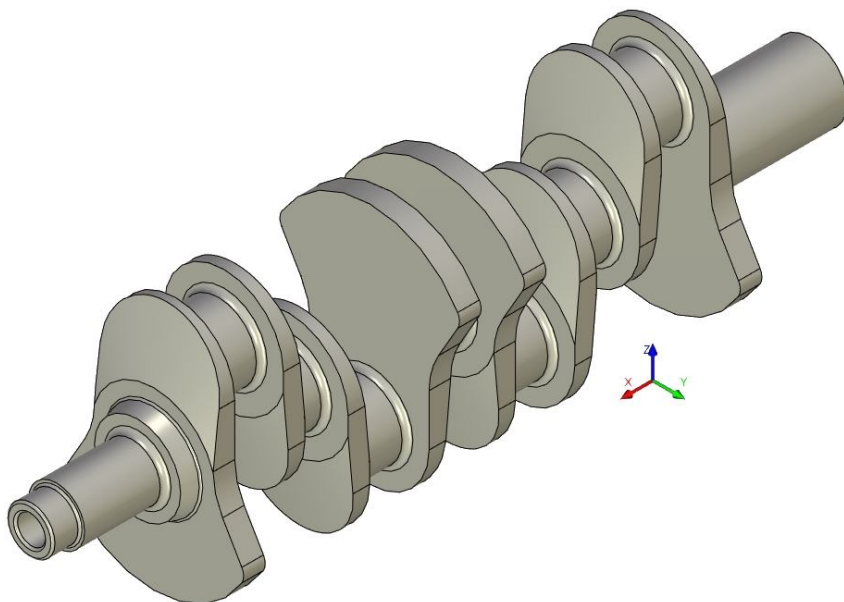










Рисунок 2.20 – Сглаживание геометрии коленчатого вала

Используя инструмент «материалы» , задайте коленчатому валу материал «Библиотеки – Металлы – ГОСТ – Чугун – Чугун серый – СЧ35» (или другой по выбору преподавателя).

2.5 Создание геометрии маховика и прочих деталей

Создайте «3D деталь»  «Маховик». Воспользуйтесь инструментом «Переменные» . Создайте внешние переменные  «B10» и «B11». А также переменную «B5» без флажка «Внешняя».

Создайте две взаимно перпендикулярные оси в центре координат, используя инструмент «Прямые с узлом в 0,0» .

Используя отрезки , начертите  на рабочей плоскости «Вид спереди» 3D-профиль носка коленчатого вала, как показано на рис. 2.21. Проведите осевую линию .

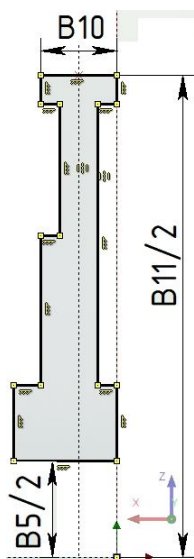








Рисунок 2.21 –
3D-профиль маховика


В правом нижнем углу 3D-профиля поставьте 3D узел .

Создайте тело операцией «Вращение»  панели «Операции». Угол поворота составляет 360 градусов. В качестве оси вращения используйте созданную осевую линию.

Зубья на ободе маховика делаются по стандартам, например, ГОСТ 2185-66 и 6033-80. По согласованию с преподавателем зубья могут выполняться упрощенно, в виде треугольников.

Начертите  на рабочей плоскости «Вид спереди» 3D-профиль зуба маховика, как показано на рис. 2.22.

Пример алгоритма построения зуба следующий. Сначала проведите окружность  диаметром B11. Затем верхний отрезок , в центре которого поставьте точку .

Задайте для этой точки условие совпадения  с вертикальной вспомогательной прямой.

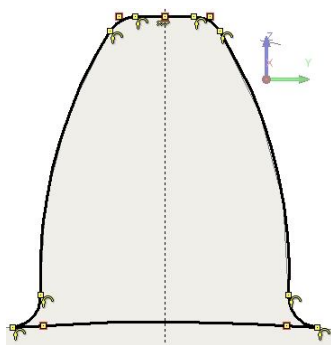














Рисунок 2.22 – 3D-профиль
зуба маховика

Затем проведите боковые дуги  (или сплайны) до касания с окружностью диаметром B11 и задайте им условие симметричности  относительно вертикальной вспомогательной прямой. Проставьте размеры . Затем сделайте верхние и нижние скругления . После чего удалите ненужную часть окружности инструментом «Обрезка» .

Вытолкните  3D-профиль на расстояние B11, добавив его к телу маховика операцией «Сложение» .

Создайте круговой массив  с равным шагом из заданного числа зубьев, как показано на рис. 2.23. Соедините массив с телом маховика, используя булеву операцию  «Сложение» . Завершите редактирование . Сохраните модель .

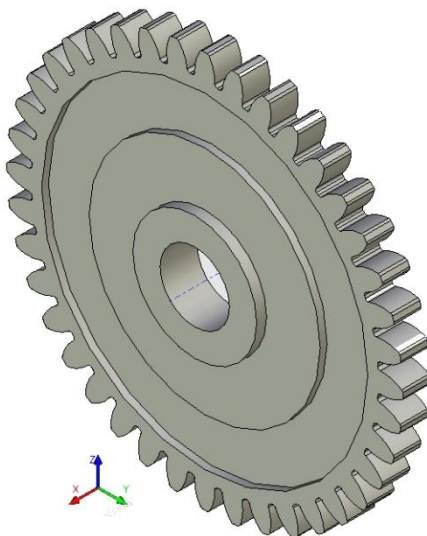





Рисунок 2.23 – 3D-модель маховика


По согласованию с преподавателем геометрию маховика также можно приблизить к конструкции реальной детали. Например, добавив шпоночное, шлицевое или болтовое соединение для посадки маховика на вал.


Поршневой палец выполните в виде полого цилиндра операцией «Вращение»  из 3D-профиля в виде прямоугольника (по аналогии с носком вала на рис. 2.14). Проведите осевую линию . В центре 3D-профиля на оси поставьте 3D-узел  для центрирования в поршне. Рекомендуемая длина пальца (2*П2-2) или мень-

ше, чтобы края пальца не выступали за наружную поверхность поршня.

Таким же образом выполните внутреннее кольцо коренного подшипника (в виде полого цилиндра) с внутренним диаметром B5 и длиной (B2-B9).



Прочие детали выполняются по согласованию с преподавателем исходя из требований к детализации геометрии (т.е. близости её к форме реальной детали).

Поршневые кольца выполните операцией «Вращение» . Поскольку поршневое кольцо рисуется в установленном состоянии, зазором в замке кольца можно пренебречь (он будет очень мал), и проверить 3D-профиль на 360 градусов.

Стопорное кольцо поршневого пальца выполните операцией «Вращение»  аналогично поршневому кольцу.

Чтобы установить стопорные кольца в поршень, вырежьте на поршне в отверстии под поршневой палец небольшую канавку (похожую на канавку под поршневое кольцо, но меньшего размера) с каждой стороны поршня.





Поршневые и стопорные кольца выполняются из легированных сталей.


Вкладыши для шатуна также выполните операцией «Вращение» . Если необходимо добавить отверстие, используйте инструмент «Отверстие»  панели «Расширенное» (по аналогии отверстием в шатуне на рис. 2.8.). Вкладыши изготавливаются из бронзы.


На этом создание деталей кривошипно-шатунного механизма завершено и можно переходить к процессу его сборки.



2.6 Создание сборки кривошипно-шатунного механизма


Сборка механизма состоит в позиционировании его деталей согласно рис. 1.1 и создании связей.


Вернитесь к 3D сборке  «КШМ» (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 «Коренной подшипник».




По умолчанию он установится в центр координат сборки (точка 0, 0, 0). Если коренной подшипник смещён относительно центра координат, переместите его в нужное положение, используя разноцветную систему координат вставляемого в сборку тела. Наведите указатель мыши на нужную ось, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая левую кнопку мыши, потяните деталь, пока она не займёт своё положение в механизме. Подтвердите это положение .




Чтобы механизм двигался как единое целое, нужны кинематические граничные условия. Они задают взаимосвязи между деталями, отнимающие взаимные степени свободы деталей. Зафиксируйте коренной 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 (коренной подшипник 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.

Снова используйте инструмент «3D Фрагмент» . Выберите файл  «КВ» (коленчатый вал). Коленчатый вал также разместится в начале координат. Подтвердите это положение .

Снова выберите инструмент «Создать»  в панели «Сопряжения». Поставьте флаг на опцию «Соосность». Установите фильтр граней . Выберите внутреннюю цилиндрическую грань коренного подшипника и наружную цилиндрическую грань первой коренной шейки. Завершите создание сопряжения . Обратите внимание, что когда флаг стоит на опции «Соосность», выбираются только concentрические грани.




Затем переключите флаг на опцию «Совпадение» в «Параметрах сопряжения». Выберите левую грань коренной шейки и правую грань второй щеки (без противовеса). Завершите создание сопряжения . Коленчатый вал переместится в новое положение (поскольку коренной подшипник зафиксирован).




Снова используйте инструмент «3D Фрагмент» . Выберите файл  «Шатун» (если моделировались вкладыши, то сначала вставляются они). Шатун также разместится в начале координат. Сдвиньте его влево, используя разноцветную систему координат вставляемого в сборку тела так, чтобы было удобно накладывать сопряжения. Подтвердите это положение .



Используйте сопряжение  «Соосность», чтобы связать внутреннюю цилиндрическую поверхность  нижней головки шатуна и наружную цилиндрическую поверхность  первой шатунной шейки. А затем используйте сопряжение  «Совпадение», чтобы

связать одну из боковых поверхностей нижней головки шатуна  с расположенной рядом щекой .

Для соединения шатуна 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 «Шатун» 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 которой будут поднятые на уровень сборки узлы¹⁹. Также узлы будут выбираться на модели в рабочем окне.

Добавьте «3D Фрагмент» ,  «Поршневой палец». Сдвиньте его вверх, используя разноцветную систему координат вставляемого в сборку тела так, чтобы было удобно накладывать сопряжения. Подтвердите это положение .

Используйте сопряжение  «Соосность», чтобы связать внутреннюю цилиндрическую поверхность  верхней головки шатуна и наружную цилиндрическую поверхность  поршневого пальца.

Аналогично поднимите в сборку 3D узел на поршневом пальце. 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». И выберите в качестве первого и второго элемента 3D узлы на поршневом пальце и на верхнем конце шатуна (в центре его верхней головки).

На данном этапе модель должна выглядеть, как показано на рисунке 2.24.

¹⁹ При этом исходные узлы остаются в детали. На уровне сборки создаются связанные копии.

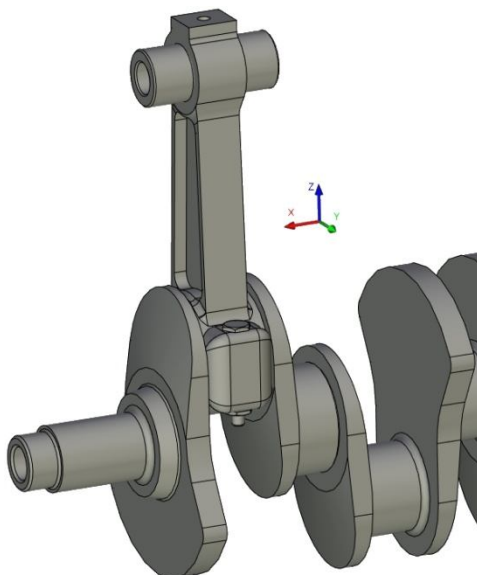










Рисунок 2.24 – Этап добавления в сборку поршневого пальца

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


Добавьте «3D Фрагмент» ,  «Поршень» (если моделировались стопорные кольца, то сначала вставляются они). Поднимите в сборку 3D узел на поршне.



Используйте сопряжение  «Соосность», чтобы связать внутреннюю цилиндрическую поверхность  бобышки поршня и наружную цилиндрическую поверхность  поршневого пальца.




Используйте сопряжение  «Совпадение», чтобы связать 3D узлы на поршневом пальце и в центре поршня, а затем одного из этих узлов с рабочей плоскостью «Вид спереди».

Используйте сопряжение  «Параллельность», чтобы связать верхнюю поверхность  поршня (днище поршня) и рабочую



плоскость «Вид сверху». Если поршень переворачивается, поставьте галочку «Обратное направление».

Проверьте работу сопряжений, используя инструмент «Переместить» .

Добавьте «3D Фрагмент» ,  «Поршневое кольцо» (если поршневые кольца моделировались, иначе пропустите этот пункт). Все три поршневых кольца закрепляются одинаково.

Используйте сопряжение  «Соосность», чтобы связать внутреннюю цилиндрическую поверхность  поршневого кольца и цилиндрическую поверхность  канавки под кольцо в поршне.

Используйте сопряжение  «Совпадение», чтобы связать верхние поверхности  поршневого кольца и канавки.

Покрасьте 3D фрагменты в разные цвета. Использование разных цветов помогает чётче различать движения разных звеньев при анимации. Также цвета могут кодировать информацию о модели. Например, корпусные детали можно сделать зелёными, поршни синими, коленчатый вал тёмно-серым и т.д. Цвета выберите сами, не обязательно ориентироваться на рис. 2.25. Для покраски 3D фрагментов сначала переключите «Стиль отображения»  на панели «Вид» на «Тоновая закраска» .

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.

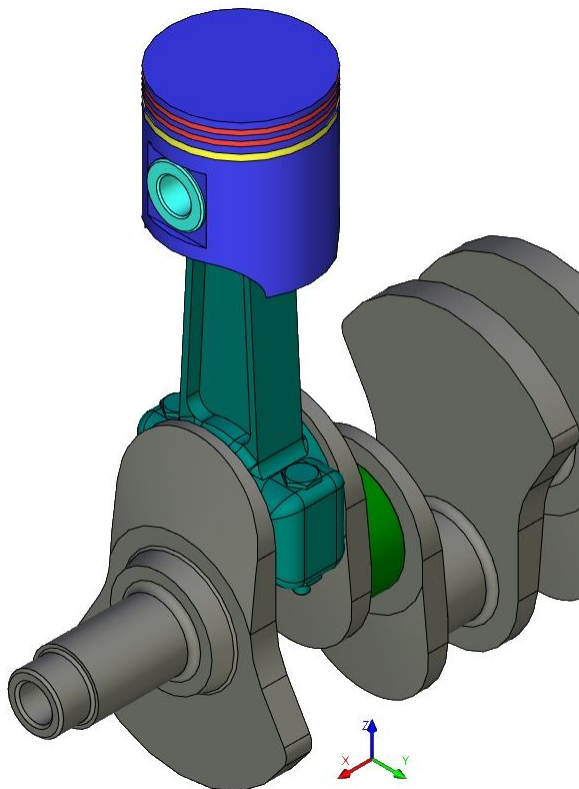












Рисунок 2.25 – Сборка одного фрагмента КШМ

Аналогично, добавляя в сборку 3D фрагменты , , и соединяя их сопряжениями , создайте сборки ещё трёх идентичных фрагментов КШМ, как показано на рис. 2.26. При вставке детали достаточно щёлкнуть на неё мышкой, чтобы тут же создать её копию.

Затем добавьте «3D Фрагмент» , , «Маховик».

Используйте сопряжение  «Соосность», чтобы связать внутреннюю цилиндрическую поверхность  ступицы маховика и наружную цилиндрическую поверхность  крайней правой шейки коленчатого вала.

Поднимите в сборку 3D узлы на коленчатом валу и маховике. Используйте сопряжение  «Совпадение», чтобы связать эти 3D узлы. Сохраните модель .

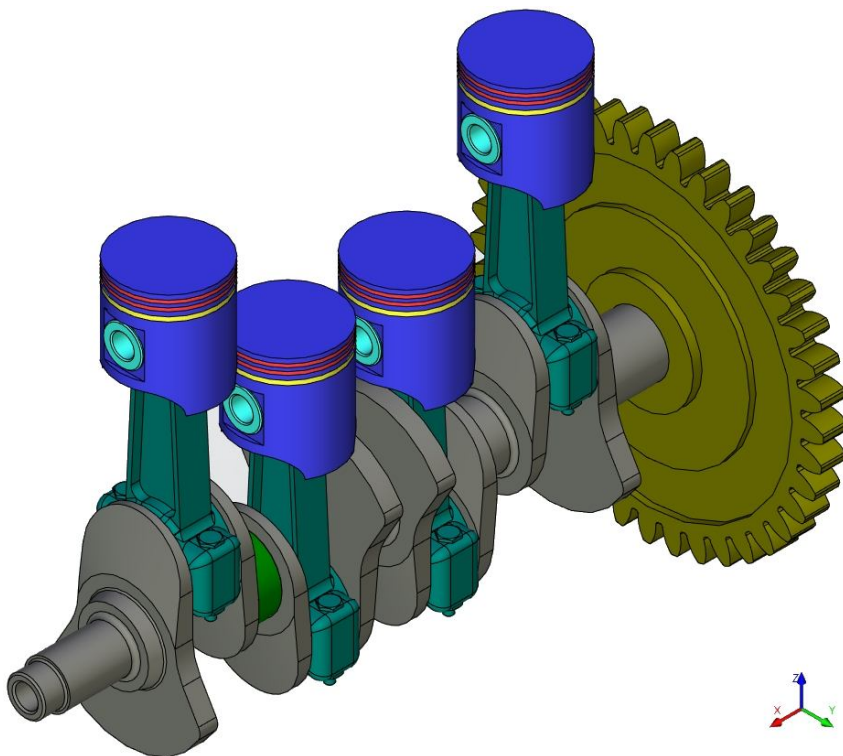


Рисунок 2.26 – Сборка КШМ








Таким образом, в учебной сборке присутствуют минимум 15 деталей (27 с поршневыми кольцами).

Для сложных сборок можно легко запутаться в типе и порядке соединения деталей (3D Фрагментов). Наглядно изобразить все соединения в механизме можно, используя кинематическую схему. Она в сжатом виде содержит информацию о связях в модели, по-

звolyет оптимизировать сопряжения и быстро строить модели аналогичных конструкций.

Кинематическая схема механизма – это графическое отображение звеньев²⁰ механизма и связей между ними. Она может иметь разное оформление. На рисунке 2.27 представлена кинематическая схема в виде блок-схемы в MS.Excel.

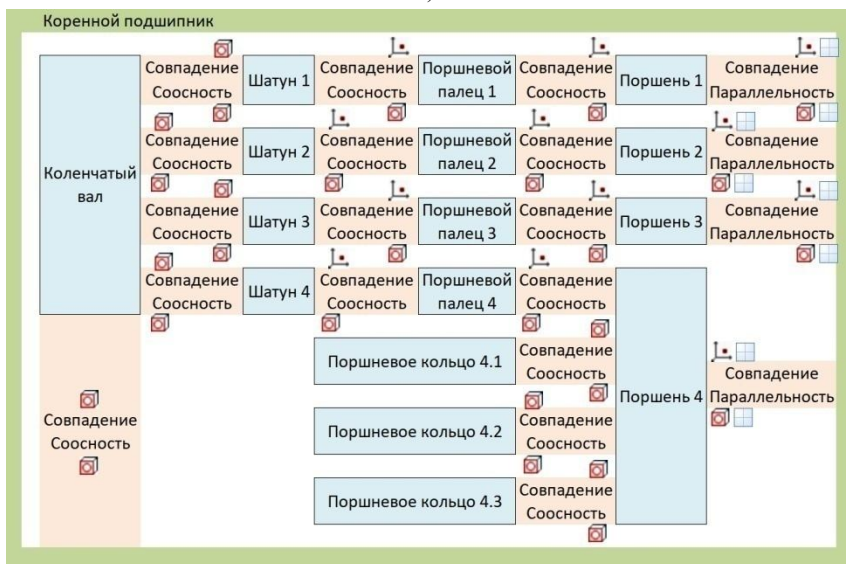
Отдельные детали внутри звеньев жёстко соединены между собой. Звенья связаны между собой шарнирами (см. рис. 2.27а): JR – вращательный (вращение вокруг одной оси), JC – цилиндрический (вращение вокруг одной оси и движение вдоль неё), JF – фиксирующий шарнир (закрепление по всем осям от перемещения и вращения).

При желании на схеме можно обозначить объекты (или фильтры), по которым происходит сопряжение . Так, на рис. 2.27б обозначены: соединения по 3D-узлам  и соединения по граням . Если на соединяемых телах выбираются разные элементы, например, 3D-узел и рабочая плоскость   или грань и рабочая плоскость  , то они указываются рядом.

²⁰ 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 χ , зависящую от требуемой точности расчёта. Обычно χ 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 зависимости от требуемой точности расчёта. Для повышения точности можно назначать звену среднюю плотность материала.



а)




б)

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

Рис. 2.27 – Кинематическая схема механизма

Иногда на схему наносятся изображения соответствующих деталей (подборок) над блоками кинематических групп, а также обозначаются миниатюры со скриншотом, где выделены соединяемые места деталей.

Если геометрия импортирована из стороннего пакета, т.е. не имеет 3D-узлов, можно расставить их на деталях вручную перед сборкой. Либо можно использовать другие типы сопряжений, например «Расстояние», чтобы задать расстояние между боковыми гранями шатуна и поршневого пальца, а также бобышки поршня и поршневого пальца. Для обеспечения вертикального движения поршней в этом случае понадобится создать, разместить и зафиксировать для каждого из них дополнительное кольцо, имитирующее гильзу цилиндра, в которой движется поршень. А затем использовать между этими деталями сопряжение  «Соосность» (как для коренного подшипника²¹). В этом случае задание параллельности днища поршней рабочей плоскости «Вид сверху» не требуется.

На этом создание 3D-сборки кривошипно-шатунного механизма завершено.

²¹ В данной модели использовано упрощённое соединение по одному коренному подшипнику абсолютно жёстким вращательным шарниром JR (комбинация соосности и совпадения в T-FLEX CAD). Если соединить так все четыре коренные шейки, то суммарное количество ограничений (по 5 от каждого шарнира, т.е. 20 в сумме) превысит 6 степеней свободы коленчатого вала. Такая ситуация называется «статической неопределимостью» и решается за счёт привлечения деформируемых элементов. Для вала обычно вместо JR используются JB шарниры, позволяющие задать жёсткость реального подшипника. Однако для данного пособия этот подход избыточно сложен и будет рассмотрен в последующем обучении.

В данном разделе предусмотрены дополнительные задания:

1. Создайте оформленный по ГОСТ сборочный чертёж кривошипно-шатунного механизма (в виде продольного разреза) и спецификацию к нему. Приложите их к отчёту.

2. Подготовьте демонстрацию работы КШМ в VR-среде. Разнесите детали КШМ, покажите изменение геометрии за счёт параметров в VR-среде.

3 ЗАДАНИЕ ПО САЕ-МОДЕЛИРОВАНИЮ

К заданию можно приступать после выполнения обучающих упражнений по программе.

Основное задание:

1. Оснастить собранную модель кинематическими и динамическими граничными условиями, выполнить спектр расчётов для определения параметров механизма.

2. Получить анимацию работы механизма и требуемые графики.

3. Провести упрощённый прочностной расчёт указанных деталей.

4. Оформить пояснительную записку по работе.

Промежуточные задачи:

1. Изучить работу механизма, сформулировать закон движения механизма;

2. Оснастить модель механизма кинематическими и динамическими граничными условиями;

3. Оснастить модель механизма датчиками;

4. Провести кинематический расчёт механизма с целью определения перемещений, скоростей и ускорений тел, крутящего момента механизма, а также реакций в шарнирах;

5. Записать анимацию работы механизма;

6. Построить основные графики работы механизма, а также другие графики по согласованию с преподавателем;

7. Провести анализ собственных частот колебаний одного элемента.

8. Провести выборочный анализ статической прочности элементов;

Работа завершается подготовкой пояснительной записки, оформленной по стандарту университета, и презентацией, с последующей защитой работы преподавателю.

Примерное содержание работы
*Работа оформляется согласно СТО Самарского Универси-
тета*

Титульный лист

Реферат

Задание

Содержание

Введение

1 Создание объёмной модели

Выполняется на кафедре инженерной графики

Здесь приводится описание модели и её внешний вид с указанием названий деталей.

Примечания: объёмная модель должна представлять собой сборку в программном комплексе T-FLEX CAD.

Если используется другое ПО, то необходимо экспортировать всю сборку целиком и отдельные детали в нейтральные форматы, чтобы иметь возможность импортировать её в среду T-FLEX CAD, где будет проводиться дальнейшее моделирование. Лучшие подготовить файлы в нескольких нейтральных форматах, например, IGES, STEP и PARASOLID. Импортированные детали необходимо собрать, используя инструмент «Сопряжения». Все детали должны быть связаны друг с другом, корпусные зафиксированы. При этом модель механизма должна двигаться так, как механизм работает в реальности.

Примечания для КШМ: для импортированной модели жёстко закреплены два кольца, имитирующие подшипник на оси коленвала и гильзу поршня. Соединения строятся по кинематической схеме, показанной на рис. 3.1.

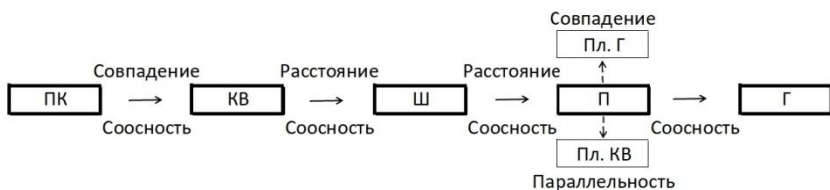


Рис. 3.1 – Кинематическая схема импортированного механизма

Здесь ПК – это подшипник коленвала. Представляет собой жёстко зафиксированное кольцо, расположенное на оси коленвала, относительно которого вращается коленвал (Соосность) и идёт осевая фиксация коленвала (Совпадение).

КВ – коленвал или коленчатый вал. Вращается внутри подшипника коленвала. Имеет коренные шейки, которые находятся на одной оси и шатунные шейки, на которые крепятся шатуны.

Ш – шатун. Вращается вокруг шатунной шейки коленвала (Соосность). Выровнен посередине шатунной шейки за счёт задания расстояния (Расстояние) от щеки коленвала до торца нижней головки шатуна.

П – поршень. Вращается относительно верхней головки шатуна (Соосность) за счёт поршневого пальца и втулки (не показаны на схеме). Выровнен посередине верхней головки шатуна за счёт задания расстояния (Расстояние) от бобышки поршня до торца верхней (поршневой) головки шатуна.

Г – гильза. Представляет собой жёстко зафиксированное кольцо, внутри которого движется поршень (Соосность). ПК и Г представляют собой корпусные детали.

Альтернативный способ крепления поршня – через плоскость гильзы (Пл. Г) и плоскость коленвала (Пл. КВ). Плоскость гильзы проходит через оси всех четырёх поршней. По сути – это плоскость симметрии модели. Плоскость коленвала проходит через ось коленвала перпендикулярно плоскости гильзы.

2 Моделирование работы механизма

Краткая аннотация. Выполняется в T-FLEX Динамика.

2.1 Приложение граничных условий

Здесь должен быть рисунок модели с шарнирами (на рисунке модели указываются места приложения шарниров), где указываются их названия (название включает тип и соединяемые группы). А также особенности приложения (как выбирался центр приложения, направления осей, тип). Также приводятся законы движения управляющих (ведущих) звеньев. Указываются материалы деталей, таблица с координатами точек газовой силы (см. табл. 3.1). Основные характеристики (ход поршня, углы поворота, частота вращения вала).

Примечания для КШМ: задаётся вращение коленвала с постоянной скоростью в рад/с. На днища поршней прикладываются газовые силы в виде графика по индикаторным диаграммам (зависимость силы на поршень от угла поворота коленвала, распредела или текущего времени). Индикаторные диаграммы предварительно вычисляются, например, в MS.Excel.

2.2 Кинематический расчёт модели

Здесь приводятся параметры расчёта (тип расчёта, время, число шагов, используемый решатель), а также результаты расчёта в виде начального и промежуточного положения моделей и графиков. Графики должны отражать перемещение, скорости и ускорения ведомого звена (лучше всего все одинаковые величины, например перемещения, дать на одном поле), а также усилия в приводах (силы и моменты). К графикам должны быть выводы, объясняющие их вид.

Примечания для КШМ: на модели должны быть три оси: ось 1 коленвала (параллельна оси, проходящей через оси коренных шеек), ось 2 (параллельна оси поршней), ось 3 (перпендикулярна осям 1 и 2). Должны быть получены следующие графики: перемещение, скорость и ускорение поршня относительно оси 2. Силы реакций в

шарнире А, соединяющем поршень и шатун, по осям 2 и 3. Силы реакций в шарнире Б, соединяющем шатун и коленвал, по осям 2 и 3. Крутящий момент механизма в инструменте «Вращение».

3 Расчёт прочности механизма

Краткая аннотация. Выполняется в T-FLEX Анализ.

3.1 Расчёт детали на собственные частоты

Здесь приводятся внешний вид выбранной детали с закреплениями, вид сетки конечных элементов. Далее даются параметры расчёта (тип расчёта, количество форм колебаний), а также результаты расчёта в виде таблицы частот и рисунки форм колебаний. К рисункам должны быть выводы, объясняющие их вид.

Примечания для КШМ: рассчитывается одна из деталей на вариант (по согласованию с преподавателем): поршень, шатун или коленвал. Если иное не указано, то рассчитывается коленвал. Поршень закрепляется по внутренним поверхностям отверстий в бобышках – жёстко с одной стороны и с другой стороны по осям 2 и 3. Шатун закрепляется жёстко по внутренней поверхности нижней головки. Коленвал закрепляется по коренным шейкам по осям 2 и 3. По оси 1 он закрепляется с одного из торцов. Вращения относительно любых осей запрещены.

3.2 Расчёт прочности критических деталей

Здесь приводятся параметры расчёта (тип расчёта), а также результаты расчёта в виде рисунков перемещений, напряжений и коэффициентов запаса, распределённых по объёму выбранных деталей. На основе допустимой величины коэффициентов запаса (1,3...2,5) делается вывод о прочности. Даются рекомендации об изменении конструкции детали или её материала.

Примечания для КШМ: рассчитывается три детали: поршень, шатун и коленвал. Закрепления описаны в предыдущем пункте. Поршень нагружается на днище газовой силой с максимальным значением. Шатун нагружается по внутренней поверх-

ности* верхней головки силами реакции в шарнире А (максимальные значения по осям 2 и 3 с учётом знака). Коленвал нагружается по наружным поверхностям* шатунных шеек силами реакции в шарнире Б (максимальные значения по осям 2 и 3 с учётом знака).

*Для повышения реалистичности расчета можно выделять сектор размером в 120 или 180 градусов в направлении действия силы.

Заключение

Здесь приводятся выводы по работе, а также основная статистика: число деталей, число шарниров, количество заданных законов движения, перемещения основного входного и выходного звена, усилия в приводах.

Примечания для КШМ: приводятся максимальные значения полученных графиков, минимальные коэф. запаса для деталей.

Список литературы

Не менее трёх источников, можно указывать учебные и методические пособия, конспект лекций, электронные источники.



Таблица 3.1 – Значения давления газов и частоты вращения


Вариант	1	2	3	4, 9	5, 10	6	7	8
n , об/мин	780	3310	5300	5400	5600	2400	2800	2900
φ°	Давление газов на поршень, P_r , кПа							
0	105	18	115	113	125	25	0	112
30	-14	-11	52	86	90	-9	59	102
60	-14	-11	55	86	90	-9	59	92
90	-14	-11	60	86	90	-9	59	84
120	-14	-11	63	86	90	-9	59	79
150	-14	-11	66	86	90	-9	59	80
180	-14	-11	82	86	90	-9	59	84
210	-9,1	-11	129	94	98	-9	80	92
240	-7	0	222	113	127	68	130	114
270	140	50	333	167	200	489	240	175
300	420	230	582	314	395	1170	690	364
330	840	800	1216	814	939	1870	2310	1250
360	3605	2200	2280	1952	1920	2439	8569	5028
370	7980	6330	3294	3658	5310	2501	11207	7124
390	4200	3750	4307	5364	3890	1260	6060	3205
420	1960	1500	2196	3364	3728	765	2030	1065
450	1120	700	1312	1461	1610	413	930	552
480	560	500	942	824	832	289	560	392
510	245	325	555	579	535	253	390	306
540	140	175	221	490	397	101	220	188
570	70	50	168	181	240	25	140	158
600	35	18	154	113	141	25	62	138
630	35	18	143	113	125	25	62	126
660	35	18	130	113	125	25	62	121
690	35	18	119	113	125	25	62	118
720	35	18	115	113	125	25	62	112



4. САЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

В данном разделе дан пример выполнения кинематических, динамических и прочностных расчётов на примере кривошипно-шатунного механизма. Все расчёты идут в среде проектирования T-FLEX CAD и непосредственно продолжают работу со сборкой «КШМ», созданной ранее. Расчёт кинематики механизма проводится с использованием модуля T-FLEX Динамика, а расчёт прочности и собственных частот проводится с использованием модуля T-FLEX Анализ.




4.1 Расчёт кинематики кривошипно-шатунного механизма

Запустите 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. 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.

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 ($120/n$) с, чтобы механизм сделал ровно два оборота. А в поле «Кадров в секунду» введите значение в диапазоне от n до $6n$. Чем больше кадров, тем выше точность расчёта и глаже графики, но медленнее скорость воспроизведения.

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».

Воспользуйтесь инструментом «Сила»  на панели «Условия» вкладки «Анализ», чтобы задать «Вращение»  коленчатого вала в коренном подшипнике. Для этого сначала кликните на коленчатый вал, затем на ось вращения, как показано на рис. 4.1. Линиями выделен контур коленчатого вала, линией со стрелкой отображена ось наружной цилиндрической поверхности  коренного подшипника.

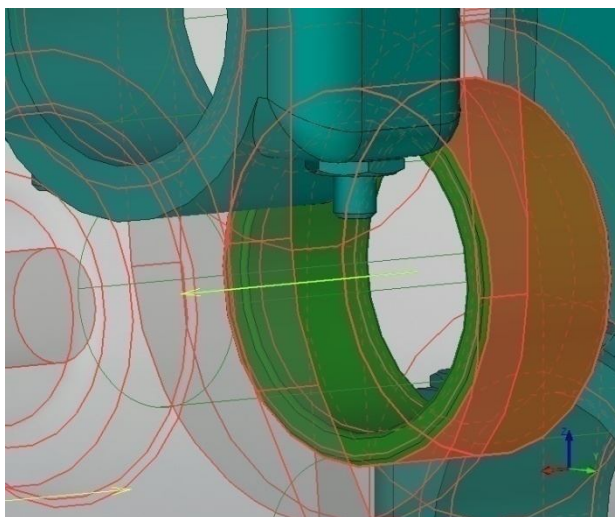






Рис. 4.1 – Выбор оси вращения коленчатого вала


Вычислите скорость вращения двигателя в рад/с по формуле $(\pi \cdot n / 30)$, взяв значение частоты вращения n из таблицы 3.1 для

своего варианта. Введите его в разделе «Угловая скорость» в поле «Значение». В учебной модели Вращение считается равномерным. Завершите ввод .


Воспользуйтесь инструментом «Расчёт»  на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». Нажмите на кнопку «Запись»  раздела «Параметры моделирования».


Если расчёт зависает или прерывается в какой-то момент, возможно в механизме присутствует "мёртвая точка". Возможно, шаг расчёта приходится ровно на этот момент, и программа "не знает", куда пойдёт механизм дальше. Измените число кадров так, чтобы оно не было кратно продолжительности работы механизма, например, добавив 3...17 кадров. Тогда один шаг будет до "мёртвой точки", а другой после неё. Расчёт пройдёт нормально.


Посмотрите анимацию. Коленчатый вал должен делать ровно два оборота. Если это не так, подкорректируйте продолжительность расчёта в параметрах .




Запишите видеоролик инструментом . Для ускорения видео можно задать значения параметра «Шаг». Чем больше значение, 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. Если на данном компьютере видео не воспроизводится или воспроизводится с ошибками, попробуйте нажать кнопку «Сжатие» и выбрать другую программу сжатия (другой кодек).

В T-FLEX Динамика предусмотрено не только создание анимации работы механической системы, но и числовой вывод результатов (в виде графиков и таблиц).

Воспользуйтесь инструментом «Создать датчик»  на панели «Условия» вкладки «Анализ». Необходимо создать датчик для одного из поршней. Выберите тип датчика «Тело», кликните на

выбранный поршень. Затем в разделе «Отображаемые параметры» выберите: траектория, линейная скорость и линейное ускорение. Завершите создание датчика .

Воспользуйтесь инструментом «Создать результат»  на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». Выберите для «Датчик_1» (датчик поршня) параметры вдоль оси его движения Z: координата Z, линейная скорость Z, линейное ускорение Z. Соответствующие результаты появятся в папке «Результаты» текущей задачи. Открыв любой результат, можно посмотреть график изменения интересующей величины. Пример графика показан на рис. 4.2.

Вернитесь к инструменту «Расчёт»  на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». На рабочем поле появятся все три графика кинематических параметров, 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. Нажмите кнопку «Пуск» . Графики должны вписаться в размер поля.

Если графики плохо видны, можно подвинуть их. Для этого наведите указатель мыши на шкалу графика, нажмите левую кнопку мыши, и двигайте мышь в нужную сторону. Также масштаб графика можно менять независимо по каждой оси в параметрах графика, доступных для графика в меню правой кнопки мыши.

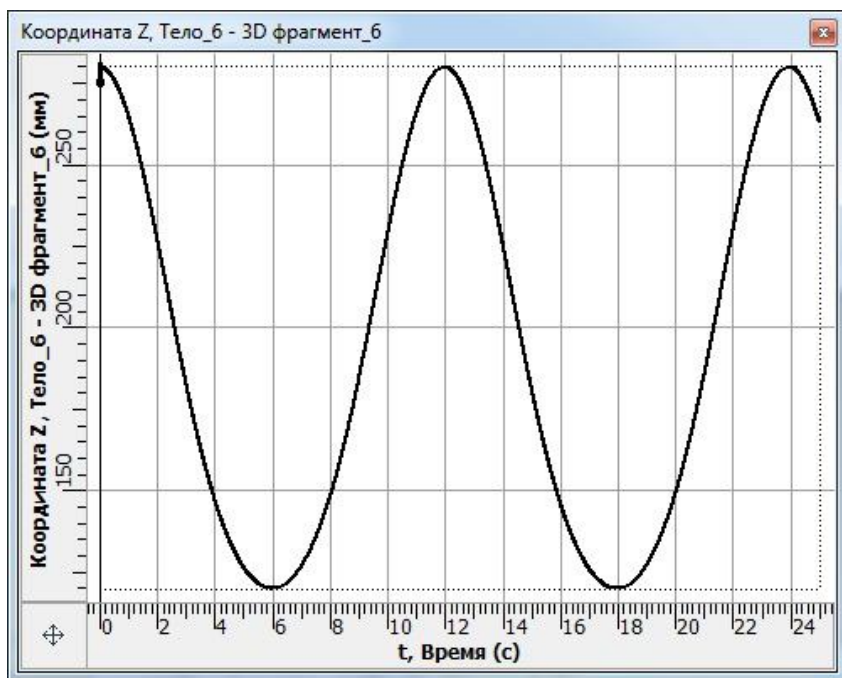





Рис. 4.2 – Пример графика зависимости перемещения поршня от времени

Например, 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 «0,0001» или даже «0,000001» в зависимости от варианта.

Далее требуется приложить газовую силу на каждый поршень. Поскольку её величина зависит от угла поворота коленчатого вала, перед заданием газовой силы 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 «Траектория». Завершите создание датчика ✅.

Переименуйте датчики по названиям тел, например, «Датчик КВ». 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.

Воспользуйтесь инструментом «Создать результат»  на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». Выберите для датчика коленчатого вала показатель «Угол поворота вокруг оси X» (RX).

Нажмите на кнопку «Запись»  раздела «Параметры моделирования». Дождитесь конца расчёта. Нажмите кнопку «Пуск» . Убедитесь, что график угла поворота КВ линейно зависит от времени.

Далее необходимо создать газовую силу. Чтобы это сделать, желательно иметь некоторое представление о работе кривошипно-шатунного механизма. Его работа является циклической, причём каждые 720 градусов поворота коленчатого вала цикл повторяется²². Цикл делится на четыре примерно равных (т.е. каждый занимает примерно 180 градусов поворота КВ) процесса, которые называют «Впуск», «Сжатие», «Рабочий ход», «Выпуск». Именно в таком порядке процессы даны в табл. 3.1.

Поршни движутся внутри цилиндров (корпусные детали). Однако, чтобы не сломать механизм, процессы не идут во всех цилиндрах одновременно, а последовательно смещаются на один процесс (т.е. на 180 градусов поворота КВ) по цилиндрам. Например, когда в одном цилиндре рабочий ход, и на поршень действует максимальная сила, в другом происходит впуск и сила на поршень минимальна.

Значения давления на первый поршень от угла поворота коленчатого вала возьмите в таблице 3.1 для своего варианта.

²² Такой двигатель называется четырёхтактным. Существуют также двухтактные двигатели, в которых все процессы (цикл) повторяются каждые 360 градусов поворота коленчатого вала, т.е. каждый оборот.

Для простоты предположим, что для каждого последующего цилиндра сдвиг происходит ровно на один процесс²³, т.е. на 180 градусов поворота КВ.

Заполните таблицу распределения давлений от угла поворота КВ для поршней по своему варианту по аналогии с табл. 4.1. Здесь каждый процесс обозначен своим цветом:

Впуск	Сжатие	Рабочий ход	Выпуск
-------	--------	-------------	--------

Получив значения давлений на поршень при каждом положении коленчатого вала, пересчитайте давление газа в силу, умножив каждое значение давления в табл. 4.1 на площадь поперечного сечения поршня, которую можно найти по формуле площади окружности ($\pi \cdot P_2 \cdot P_2$). Следите за соблюдением размерностей (т.е. при умножении кПа на м² должны получиться кН).

Поскольку КВ вращается равномерно, значения газовой силы можно задавать не от времени, а от угла поворота²⁴ КВ φ . Угол φ можно пересчитать во время по формуле (φ/bn).

Для данной модели все расчётные значения сведены в таблицу 4.2.

²³ В реальности существуют разные законы распределения данного сдвига по цилиндрам, который называется «порядком распределения зажигания». Наиболее популярным для рядных четырёхцилиндровых двигателей является 1 – 3 – 4 – 2.



²⁴ В реальных расчётах моделируется также вал системы газораспределения, и значения газовой силы задаются именно от угла поворота этого вала, а не КВ (хотя для двухтактных двигателей это может быть один и тот же вал). В таком случае можно моделировать неравномерное вращение КВ, например, разгон, торможение и приёмистость двигателя.

Таблица 4.1 – Значения давления газов на поршни


φ°	$P_{г1}, \text{кПа}$	$P_{г2}, \text{кПа}$	$P_{г3}, \text{кПа}$	$P_{г4}, \text{кПа}$
0	25	25	2501	-9
30	-9	25	1260	68
60	-9	25	765	489
90	-9	25	413	1170
120	-9	25	289	1870
150	-9	25	253	2439
180	-9	25	101	2501
210	-9	-9	25	1260
240	68	-9	25	765
270	489	-9	25	413
300	1170	-9	25	289
330	1870	-9	25	253
360	2439	-9	25	101
370	2501	-9	-9	25
390	1260	68	-9	25
420	765	489	-9	25
450	413	1170	-9	25
480	289	1870	-9	25
510	253	2439	-9	25
540	101	2501	-9	-9
570	25	1260	-9	-9
600	25	765	68	-9
630	25	413	489	-9
660	25	289	1170	-9
690	25	253	1870	-9
720	25	101	2439	-9


Таблица 4.2 – Значения газовой силы на поршни

φ°	Время, с	F_{r1} , Н	F_{r2} , Н	F_{r3} , Н	F_{r4} , Н
0	0	38	38	3803	-14
30	0,0021	-14	38	1916	103
60	0,0042	-14	38	1163	744
90	0,0063	-14	38	628	1779
120	0,0083	-14	38	439	2843
150	0,0104	-14	38	385	3709
180	0,0125	-14	38	154	3803
210	0,0146	-14	-14	38	1916
240	0,0167	103	-14	38	1163
270	0,0188	744	-14	38	628
300	0,0208	1779	-14	38	439
330	0,0229	2843	-14	38	385
360	0,0250	3709	-14	38	154
370	0,0257	3803	-14	-14	38
390	0,0271	1916	103	-14	38
420	0,0292	1163	744	-14	38
450	0,0313	628	1779	-14	38
480	0,0333	439	2843	-14	38
510	0,0354	385	3709	-14	38
540	0,0375	154	3803	-14	-14
570	0,0396	38	1916	-14	-14
600	0,0417	38	1163	103	-14
630	0,0438	38	628	744	-14
660	0,0458	38	439	1779	-14
690	0,0479	38	385	2843	-14
720	0,0500	38	154	3709	-14

Функции для приложения в качестве законов изменения сил и моментов в T-FLEX Динамика задаются в виде графиков. Используйте инструмент «Графики»  панели «Инструменты» вкладки «Параметры». В открывшемся окне выберите «Создать график», далее «Гладкая кривая». Назовите новый график «Газовая сила 1». Выберите «Редактировать» для данного графика. И в открывшемся окне нажмите «Параметры графика» . В поле «Минимальный шаг узлов по значению аргумента» укажите, с какой точностью определяется время, т.е. «0,0001» или меньше.





Затем выделите одновременно столбец времени и газовой силы на первый поршень из таблицы в Excel или текстового файла и вставьте его в график из буфера (сочетанием клавиш «Ctrl + V» или через меню правой кнопки мыши). Здесь X – это время, а F – значение газовой силы.


Если возникают проблемы, добавить точки можно вручную, используя инструмент «Добавить новый узел по координатам» .


Далее нажмите «Параметры графика» . В поле «Визуальное соотношение единиц функции и аргумента» укажите масштабный коэффициент по вертикальной оси так, чтобы график был хорошо виден. В данной модели это «0,00001». Вращая колёсико мыши, можно приближать и удалять график.

Завершите создание графика .



Аналогично добавьте графики газовой силы для второго, третьего и четвёртого поршня, но со своими значениями.



В выпадающем списке инструмента «Сила»  на панели «Условия» вкладки «Анализ» выберите «Сила» . Кликните по первому поршню. Выберите точку в центре верхней окружности  (днища) поршня. Выберите направление по нормали (вниз) к верхней поверхности  (днищу) поршня. 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 1». Завершите выбор и, затем, создание силы .

Переименуйте силу как «Газовая сила 1». Для этого нужно кликнуть два раза левой кнопкой мыши на пиктограмму силы  в древе построения модели и в открывшемся окне в поле «Имя» задать новое название силы.

Аналогично приложите газовые силы к остальным трём поршням и переименуйте их.



Выберите тип датчика  «Силовой элемент», кликните на газовую силу. Выберите в отображаемых параметрах «Активная сила AF». Завершите создание датчика .

Выберите тип датчика  «Шарнир», кликните на шарнир, соединяющий поршневой палец с шатуном. Выберите в отображаемых параметрах «Сила реакции RF». Завершите создание датчика . Переименуйте датчик как «Сила на шатун».

Аналогично создайте ещё один датчик «Сила на KB»  для шарнира, соединяющего шатун с коленчатым валом.

Создайте результаты :

- для датчика газовой силы, выбрав активную силу (Z), AFZ;
- для датчика «Сила на шатун», реакция (Z), RFZ;
- для датчика «Сила на KB», реакция (Z), RFZ;

Нажмите на кнопку «Запись»  раздела «Параметры моделирования». Дождитесь конца расчёта. Нажмите кнопку «Пуск» . Убедитесь, что график газовой силы соответствует заданным значениям.



Если есть сомнения в правильности приложения газовой силы к остальным поршням, рекомендуется создать датчики и для них тоже.





Запишите максимальное и минимальное значения с графиков датчиков «Сила на шатун» и «Сила на KB». Они понадобятся позже для расчёта прочности шатуна и коленчатого вала.

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.

4.2 Расчёт прочности поршня

Для удобства расчёт на прочность детали можно вести напрямую в сборке, как это описано для расчёта собственных частот коленчатого вала в п. 4.5. Но поскольку поршень имеет две плоскости симметрии: по оси поршневого пальца и перпендикулярно к ней, для расчёта можно использовать четверть поршня, задав вместо отсечённых частей условие симметрии. Это позволит вчетверо уменьшить количество конечных элементов, что позволит снизить требования к памяти компьютера и ускорить расчёт.

Создайте копию детали «Поршень» и назовите её «Поршень прочность». Не удаляйте исходный файл! Откройте деталь «Поршень прочность» в T-FLEX CAD. Используйте инструмент «Отсечение»  панели «Расширенные» вкладки «3D модель» чтобы сначала отсечь от поршня половину рабочей плоскостью «Вид слева», а затем отсечь  ещё четверть рабочей плоскостью «Вид спереди», как показано на рис. 4.3.

Для проведения прочностного расчёта поршня перейдите на вкладку «Анализ». Выберите пиктограмму «Создать задачу»  на панели «Задача». И в выпадающем списке выберите «Конечно-элементный анализ» . На вкладке «Задача» в поле «Тип» выберите «Статическая прочность» . Добавьте в окно «Элемент» тело поршня (если оно не добавилось автоматически). Завершите создание задачи . Автоматически откроется окно создания сетки конечных элементов. Для разбивки используется конечный элемент «Тетраэдр». При наличии больших вычислительных мощно-

стей можно использовать конечный элемент «Криволинейный тетраэдр». Убедитесь, что в поле размер выбран параметр «Относительный» и выставьте его значение на 0,02. Значения остальных параметров оставьте по умолчанию. Завершите создание сетки ✓. Ориентировочный вид сетки показан на рис. 4.4.

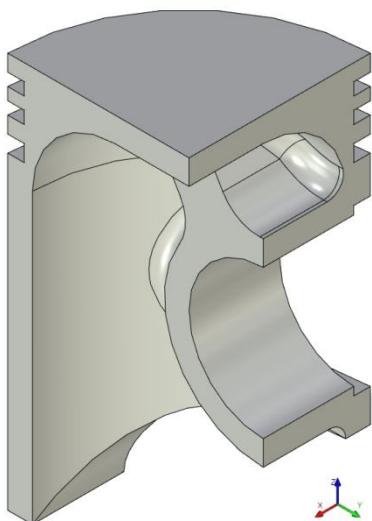


Рис. 4.3 – 3D-модель четверти поршня

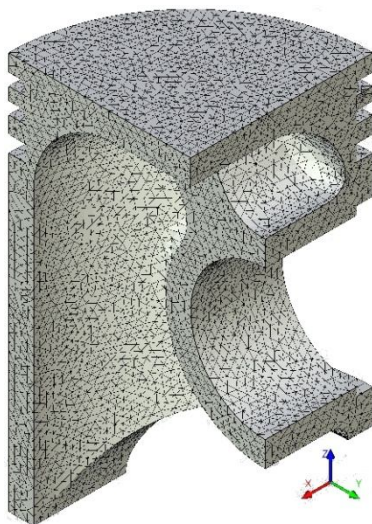








Рис. 4.4 – КЭ сетка поршня

Все граничные условия в модели показаны на рис. 4.5.

Воспользуйтесь инструментом «Давление»  (подменю инструмента «Сила» ) панели «Условия» вкладки «Анализ». Выберите верхнюю поверхность  (днище) поршня. Тип нагрузки «Равномерная». В поле «Значение» введите максимальную величину давления из табл. 4.1 (для своего варианта).

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  (на панели «Условия» вкладки «Анализ») выберите «Частичное закрепление» . Укажите внутреннюю грань  бобышки поршня (которой поршень соединяется с поршневым пальцем). Оставьте прямоугольную систему координат. Снимите галочки с направлений

осей X и Y (боковые направления). В поле оси Z (вертикальное направление) должен стоять ноль. Завершите создание закрепления ✓.

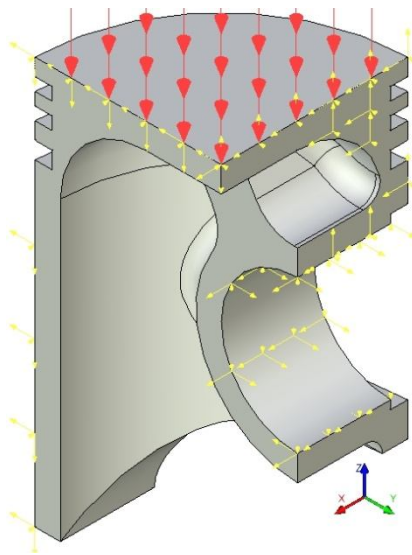


Рис. 4.5 – Нагрузки и закрепления КЭ модели поршня

В выпадающем списке инструмента «Закрепление» выберите «Симметрия». В поле «Тип симметрии» выберите «Круговая». В поле «1-я плоскость симметрии» укажите одну грань отсечения поршня (параллельной плоскости YZ). В поле «2-я плоскость симметрии» укажите вторую грань отсечения поршня, повернутую относительно первой на 90 градусов (параллельной плоскости XZ). В качестве оси вращения выберите находящееся на их пересечении ребро. Завершите создание симметрии ✓.

Воспользуйтесь инструментом «Расчёт». В поле «Метод расчёта» оставьте «Автоматический выбор». В поле «Тип элемента» выберите «Линейная интерполяция». Для увеличения точности расчёта можно использовать «Квадратичную интерполяцию». Однако «Квадратичная интерполяция» требует на порядок больших вычислительных ресурсов. Остальные параметры оставьте по умолчанию. Нажмите «ОК». В открывшемся окне «Результаты» выберите нужные параметры: суммарные перемещения, эквивалентные напряжения и коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям. Запустите расчёт.



Если при расчёте систему уравнений решить не удаётся, то возможно не хватает памяти. Попробуйте увеличить размер сетки КЭ.


Откройте подпапку «Результаты» папки «Задача_1_0 (Прочность)». Выведите картины распределения суммарных перемещений, эквивалентных напряжений и коэф. запаса по статической прочности (по пределу текучести). Для распределения коэф. запаса выберите линейную шкалу (щелчок левой кнопкой мыши на шкале открывает окно свойств).

Сделайте скриншоты. Занесите в отчёт максимальные значения. Сравните полученное значение минимального рассчитанного коэф. запаса с допустимым (минимальный 1,3, максимальный 2,5). Сделайте вывод о прочности. Если нормы прочности не удовлетворяются, приведите рекомендации по изменению конструкции поршня.

4.3 Расчёт прочности шатуна

Полный алгоритм расчёта приведён в пункте 4.2 для поршня. Рекомендуется ознакомиться сначала с ним, а затем переходить к данному разделу. Поскольку шатун также имеет две плоскости симметрии, для расчёта можно использовать его четверть.


Создайте копию детали «Шатун», назовите её «Шатун прочность» и откройте в T-FLEX CAD. Используйте инструмент «Отсечение»  чтобы сначала отсечь от шатуна половину рабочей плоскостью «Вид слева», а затем отсечь  ещё четверть рабочей плоскостью «Вид спереди».







Однако, в отличие от поршня, сила от поршневого пальца действует не на всю внутреннюю поверхность верхней головки шатуна, а только на сектор в 120 градусов. Начните чертить  на внутренней цилиндрической поверхности верхней головки шатуна. Откроется развёртка этой поверхности. Проведите линию на

расстоянии $((2\pi/3) \cdot \text{Ш8})$ от левого края развёртки, как показано на рис. 4.6.



Рис. 4.6 – 3D-профиль на внутренней поверхности верхней головки шатуна

Разделите внутреннюю поверхность верхней головки шатуна, используя инструмент «Разделение граней»  (на панели «Специальные» вкладки «3D-модель»). Выберите метод разделения «Проецирование по нормали». В поле «Разделяемые объекты» укажите нужную грань, а в поле «Разделяющие объекты» укажите созданный выше 3D-профиль. Вид верхней головки шатуна после разделения грани показан на рис. 4.7.

Для проведения прочностного расчёта выберите пиктограмму «Создать задачу»  (или ) на вкладке «Анализ». В выпадающем списке выберите «Конечно-элементный анализ» . На вкладке «Задача» в поле «Тип» выберите «Статическая прочность» . Добавьте в окно «Элемент» тело шатуна. Завершите создание задачи . Автоматически откроется окно создания сетки конечных элементов. Для разбивки используется конечный элемент «Тетраэдр». Убедитесь, что в поле размер выбран параметр «Относительный» и выставьте его значение на 0,01. Значения остальных параметров оставьте по умолчанию. Завершите создание сетки . Ориентировочный вид сетки показан на рис. 4.8.

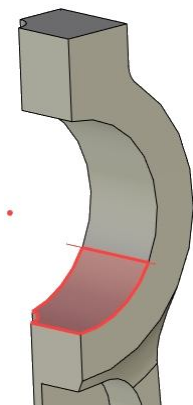














Рис. 4.7 – Поверхность для приложения нагрузки на шатуне

Воспользуйтесь инструментом «Сила»  панели «Условия» вкладки «Анализ». Выберите поверхность на рис 4.7. Тип нагрузки «Равномерная». В поле «Значение» введите максимальную величину силы из графика датчика «Сила на шатун», делённую на четыре (поскольку моделируется только четверть шатуна). В поле «Направление» снимите галочку опции «По нормали» и укажите «1» в поле «Z» и «0» в полях «X» и «Y». Стрелочки должны быть направлены вниз.

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  выберите «Частичное закрепление» . Укажите внутреннюю грань  нижней головки шатуна (которой шатун соединяется с коленчатым валом).

Оставьте прямоугольную систему координат. Снимите галочки с направлений осей X и Y (боковые направления). В поле оси Z (вертикальное направление) должен стоять ноль. Завершите создание закрепления .

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  выберите «Симметрия» . В поле «Тип симметрии» выберите «Круговая» . В поле «1-я плоскость симметрии» укажите одну грань  отсечения шатуна (параллельной плоскости YZ). В поле «2-я плоскость симметрии» укажите вторую грань  отсечения шатуна, повернутую относительно первой на 90 градусов (параллельной плоскости XZ). В качестве оси вращения выберите находящееся на их пересечении ребро . Завершите создание симметрии .

Все граничные условия в модели показаны на рис. 4.9.

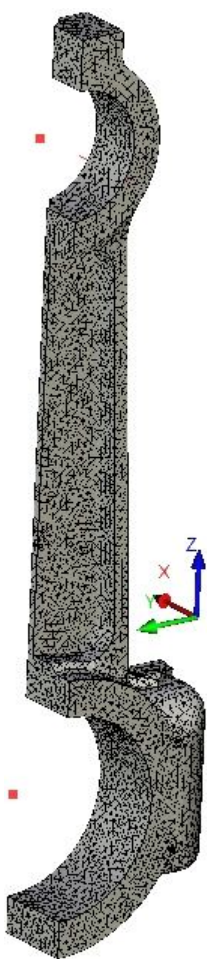


Рис. 4.8 – КЭ сетка шатуна

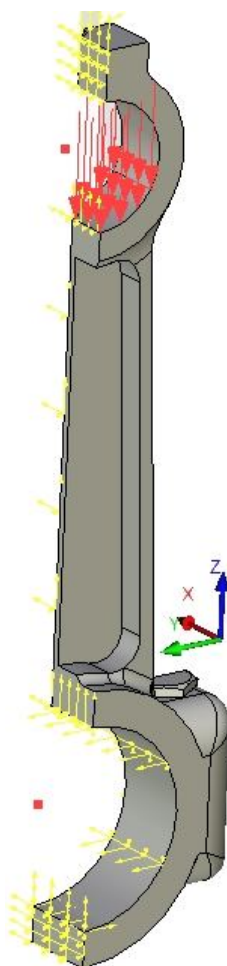





Рис. 4.9 – Нагрузки и закрепления КЭ модели шатуна

Воспользуйтесь инструментом «Расчёт» . Настройки расчёта и требуемые результаты те же, что и у поршня в разделе 4.2.

Сделайте вывод о прочности. Если нормы прочности не удовлетворяются, приведите рекомендации по изменению конструкции шатуна.

4.4 Расчёт прочности коленчатого вала

Полный алгоритм расчёта приведён в пункте 4.2 для поршня. Рекомендуется ознакомиться сначала с ним, а затем переходить к данному разделу. Коленчатый вал имеет только одну плоскость симметрии²⁵, проходящую через оси всех поршней. Для расчёта можно использовать его половину. Также упростим расчёт, взяв только две шатунные шейки: первую и вторую, поскольку картина распределения напряжений в третьей и четвёртой шейке будет похожей. Также в модели останется носок вала, первая и вторая коренные шейки.


Создайте копию детали «Коленчатый вал», назовите её «КВ прочность» и откройте в T-FLEX CAD. Используйте инструмент «Отсечение»  чтобы сначала отсечь от коленчатого вала лишние колена рабочей плоскостью симметрии, относительно которой копировался коленчатый вал, а затем отсечь  ещё половину рабочей плоскостью «Вид спереди».

В отличие от давления газов на поршень, сила от шатуна действует не на всю наружную поверхность шатунной шейки, а только на сектор в 120 градусов. Для простоты моделирования будем

²⁵ Плоскость, относительно которой при построении отражалась половина коленчатого вала, не является плоскостью симметрии в прочностном расчёте. Потому что, во-первых, обе половинки не совсем одинаковы. А во-вторых, нагрузки на каждую из четырёх шатунных шеек сильно различаются из-за того, что в один момент времени в каждом цилиндре идут разные процессы.

прикладывать нагрузку только на одну шатунную шейку, поскольку сила на остальные шатунные шейки в этот момент меньше²⁶.

Причём нечётные варианты (1, 3, 5, 7, 9) прикладывают нагрузку от шатуна на первую шатунную шейку коленчатого вала, а чётные варианты (2, 4, 6, 8, 10) – на вторую.

Начните чертить  на наружной цилиндрической поверхности нужной шатунной шейки. Откроется развёртка этой поверхности. Проведите линию на расстоянии $((5\pi/6) \cdot B_4)$ от левого края развёртки, как показано на рис. 4.10. Визуально убедитесь, что угол от вертикальной плоскости действительно около 60 градусов.

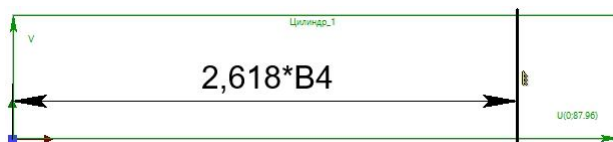



Рис. 4.10 – 3D-профиль на наружной поверхности шатунной шейки KB

Разделите наружную поверхность выбранной шатунной шейки коленчатого вала, используя инструмент «Разделение граней»  (на панели «Специальные» вкладки «3D-модель»). Выберите метод разделения «Проецирование по нормали». В поле «Разделяемые объекты» укажите нужную грань, а в поле «Разделяющие объекты» укажите созданный выше 3D-профиль.

Вид отсечённой части коленчатого вала после разделения граней показан на рис. 4.11.

²⁶ Такой подход является очень упрощённым. Для того, чтобы правильно моделировать коленчатый вал, нужно взять полный коленчатый вал, и выделить поверхности для приложения нагрузок на каждой шатунной шейке. При расчёте движения механизма нужно создать датчики, измеряющие нагрузку на каждую шатунную шейку. По графику для нужной шатунной шейки нужно найти не только максимальное значение нагрузки, но и время, когда оно достигается. Затем нужно переписать значения нагрузок с остальных трёх графиков в этот момент времени, и приложить их к соответствующим шейкам.

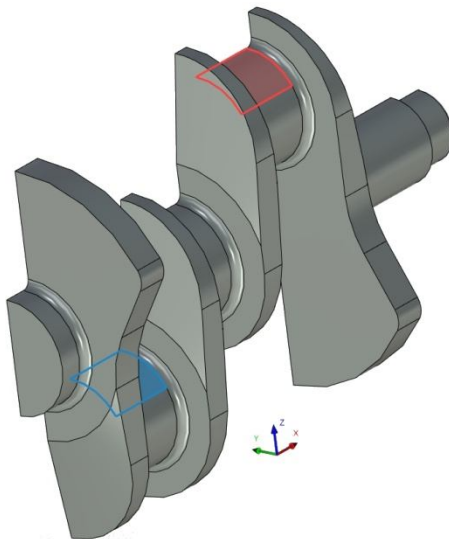


















Рис. 4.11 – Поверхность для приложения нагрузки на КВ





Для проведения прочностного расчёта выберите пиктограмму «Создать задачу»  (или ) на вкладке «Анализ». В выпадающем списке выберите «Конечно-элементный анализ» . На вкладке «Задача» в поле «Тип» выберите «Статическая прочность» . Добавьте в окно «Элемент» тело коленчатого вала. Завершите создание задачи . Автоматически откроется окно создания сетки конечных элементов. Для разбивки используется конечный элемент «Тетраэдр». Убедитесь, что в поле размер выбран параметр «Относительный» и выставьте его значение на 0,01. Значения остальных параметров оставьте по умолчанию. Завершите создание сетки . Ориентировочный вид сетки показан на рис. 4.12.

Воспользуйтесь инструментом «Сила»  панели «Условия» вкладки «Анализ». Выберите поверхность на рис 4.11. Тип нагрузки «Равномерная». В поле «Значение» введите максимальную величину силы из графика датчика «Сила на КВ», делённую пополам (поскольку моделируется только половина коленчатого вала). В


поле «Направление» снимите галочку опции «По нормали» и укажите «1» в поле «Z» и «0» в полях «X» и «Y». Стрелочки должны быть направлены вниз.

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  выберите «Частичное закрепление» . Укажите на грани  коренных шеек коленчатого вала (которыми коленчатый вал соединяется с коренными подшипниками). Оставьте прямоугольную систему координат. Снимите галочки с направлений осей X и Y (боковые направления). В поле оси Z (вертикальное направление) должен стоять ноль. Завершите создание закрепления .

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  выберите «Симметрия» . В поле «Тип симметрии» выберите «Зеркальная» . В поле «1-я плоскость симметрии» укажите грань  отсечения коленчатого вала (параллельной плоскости XZ). Завершите создание симметрии .

Снова используйте инструмент «Симметрия» . В поле «Тип симметрии» выберите «Зеркальная» . В поле «1-я плоскость симметрии» укажите грань  отсечения на коренной шейке коленчатого вала (параллельной плоскости YZ). Завершите создание симметрии .

Все граничные условия в модели показаны на рис. 4.13.

Воспользуйтесь инструментом «Расчёт» . Настройки расчёта и требуемые результаты те же, что и у поршня в разделе 4.2.

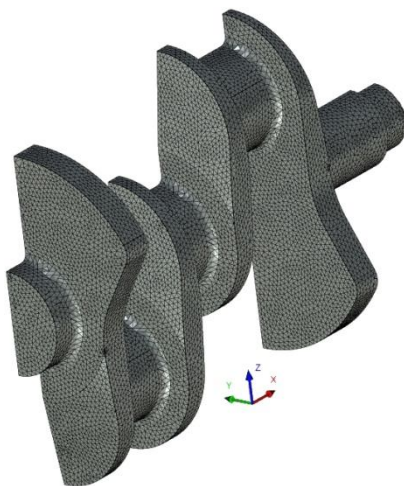


Рисунок 4.12 – КЭ сетка КВ

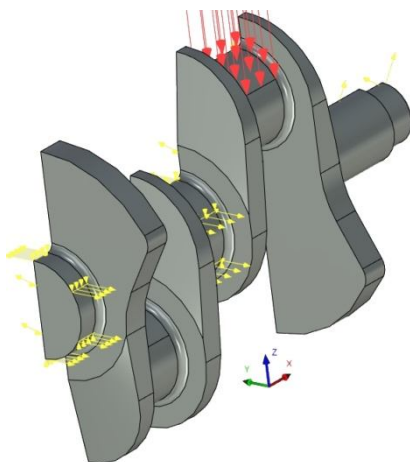







Рис. 4.13 – Нагрузки и закрепления КВ

Сделайте вывод о прочности. Если нормы прочности не удовлетворяются, приведите рекомендации по изменению конструкции коленчатого вала.

4.5 Расчёт собственных частот коленчатого вала


Откройте сборку «КШМ» (или перейдите на вкладку «КШМ»).

Для проведения модального расчёта необходимо запустить модуль T-FLEX Анализ. Для этого перейдите на вкладку «Анализ». Выберите пиктограмму «Создать задачу»  (или ) на панели «Задача». И в выпадающем списке выберите «Конечно-элементный анализ» .





На вкладке «Задача» в поле «Тип» выберите «Собственные частоты» . Добавьте в окно «Элемент» коленчатый вал и маховик (см. рис. 4.14). Завершите создание задачи .

Автоматически откроется окно создания сетки конечных элементов. Оставьте основной элемент «Тетраэдр». Убедитесь, что в

поле размер выбран параметр «Относительный» и выставьте его значение на 0,01. В данном случае размер ребра конечного элемента задаётся как доля от самого большого ребра прямоугольника, охватывающего всю модель. Это означает, что вдоль этого ребра разместится сто конечных элементов.

Заданный размер корректируется системой таким образом, чтобы в итоге получить все элементы сетки с ребром примерно одного размера, близким к значению, указанному в параметрах. В случае нехватки оперативной памяти допустимо увеличить значение относительного размера максимум до 0,1. Либо можно поставить значение в поле размер на «Абсолютный» и явно указать нужный средний размер конечного элемента. Значения остальных параметров оставьте по умолчанию. Завершите создание сетки .

Скройте прочие детали сборки. Ориентировочный вид сетки показан на рис. 4.14. Теперь на панели будет находиться вкладка «Задачи», а в ней конкретная задача «Задача_1 (Собственные частоты)». Также папка «Задачи» появится в древе построения модели. В одной модели может быть несколько разных задач, но только одна из них является активной.

Создайте в передней части коленчатого вала (на оси носка вала под окружностью цилиндрической части, как показано на рис. 4.15) локальную систему координат инструментом "ЛСК"  панели "Построения" вкладки "3D-модель". Выберите тип "На все уровни" . Отключите галочку "Для привязки фрагмента" (поскольку эта ЛСК будет использована для ориентации закреплений). В поле "Начало координат" выберите нужное ребро  (окружность). В поле "Направление доворота" выберите цилиндрическую грань  коренной шейки, чтобы ось Z ЛСК была направлены вдоль оси коленчатого вала. Это обязательное условие задания цилиндрического типа закреплений, поскольку ось Z является осью

вращения в цилиндрической системе координат. Завершите создание ЛСК ✓.

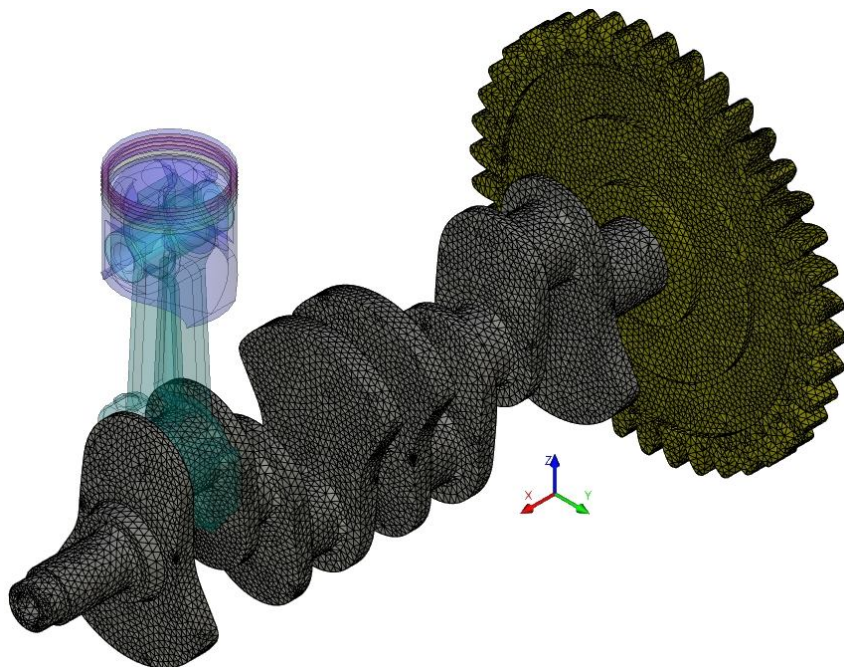







Рисунок 4.14 – Сетка конечных элементов модели коленчатого вал и маховика

В выпадающем списке инструмента «Закрепление»  выберите «Частичное закрепление» . Выберите в поле "Система координат" тип "Цилиндрическая". Выберите созданную ЛСК. Укажите на цилиндрическую грань  носка коленчатого вала (которой коленчатый вал соединяется с коренными подшипниками). Снимите галочку с направления "По окружности". В полях "Радиальное" и "По оси вращения" должны стоять нули. Завершите создание закрепления ✓.

Снова выберите инструмент «Частичное закрепление» . Выберите в поле "Система координат" тип "Цилиндрическая". Выберите созданную ЛСК. Укажите на цилиндрические грани  ос-

тальных четырёх коренных шеек коленчатого вала (в т.ч. под маховиком). Снимите галочку с направлений²⁷ "По окружности" и "По оси вращения". В поле "Радиальное" должен стоять ноль. Завершите создание закрепления ✓.

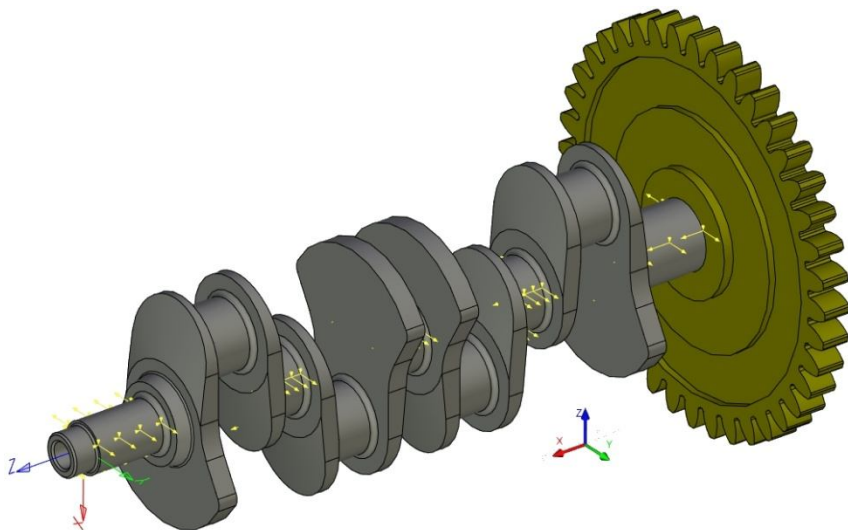



Рисунок 4.15 – Закрепления модели коленчатого вала с маховиком

Воспользуйтесь инструментом «Расчёт»  на панели «Расчёт» вкладки «Анализ». В поле «Метод расчёта» оставьте «Автоматический выбор». Для начала укажите количество рассчитываемых собственных частот равным 10.

В поле «Тип элемента» выберите «Линейная интерполяция». Это несколько снизит точность расчёта, существенно увеличив его скорость. Остальные параметры оставьте по умолчанию. Нажмите «ОК». В открывшемся окне «Результаты» выберите «Относительные перемещения, модуль».

²⁷ В осевом направлении закрепляется только один из пяти подшипников коленчатого вала, чтобы при тепловом удлинении (коленчатый вал, как и любое тело, при нагреве увеличивается) коленчатый вал не заклинил и не повредил подшипники.

Откройте подпапку «Результаты» папки «Задача_1 (Собственные частоты)». Занесите в отчёт таблицу полученных частот. Посмотрите формы колебаний.

Переведите частоту вращения n из об/мин в Гц, разделив на 60. Сравните частоту вращения в Гц с собственными частотами. Есть ли совпадение (от -5% до +5%)? Есть ли собственные частоты, которые меньше частоты вращения?

Если частота вращения больше, чем частота посчитанных форм, увеличьте количество рассчитываемых собственных частот, например, до 20.

Если совпадений нет, то на данном режиме работы не будет резонанса, а значит, коленчатый вал не разрушится.

А если все частоты больше частоты вращения, то резонансов не будет и при разгоне двигателя.

Добавьте в отчёт картинки первых пяти форм. И форму, частота которой совпадает с частотой вращения коленчатого вала (если она не входит в первые пять форм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучен алгоритм виртуального моделирования на примере простой задачи в ПО «T-FLEX PLM». Рассмотрены следующие этапы моделирования:

- создание частично параметризированной геометрии деталей;
- назначение материалов телам;
- создание сборки с сопряжениями;
- выполнение расчёта работы механизма;
- получение графиков интересующих параметров;
- построение сетки конечных элементов;
- задание граничных условий (нагрузок и закреплений);
- проведение расчёта перемещений, напряжений;
- проведение расчёта коэффициентов запаса;
- проведение расчёта собственных форм и частот;
- анализ результатов (определение интегральных параметров, вывод о выполнении норм прочности, поиск опасных частот).

Пакет «T-FLEX PLM» предлагает пользователю широкие возможности для реализации проектных решений, т.к., наряду с базовой CAD-частью, позволяет в своей среде прорабатывать вопросы технологии производства изделий и их дальнейшей эксплуатации без необходимости привлечения дополнительных узкоспециализированных программных средств.

Данная работа направлена на формирование умения использовать прикладные пакеты программ для решения профессиональных задач двигателестроения. А также эффективно использовать инструменты информационных технологий в разработке эскизных, технических и рабочих проектов изделий авиационной техники и технологических процессов. И использовать прикладные инженерные системы для разработки рабочей проектной и технической документации и оформления законченных проектно-конструкторских работ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Моделирование колебаний ротора турбомашины в T-FLEX PLM: метод. указания / сост. В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев, А.М. Уланов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2024. – 73 с.: ил.
2. Применение иммерсивных технологий для изучения двигателей: метод. указания / сост. В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев, И.Ф. Лейковский. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2023. – 32 с.: ил.
3. Прикладные расчеты двигателей автомобилей : лаб. раб. / А.М. Третьяков, А.М. Глёмин ; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2017. – 70 с.: ил.
4. T-FLEX Анализ: статические прочностные расчёты конструкций: метод. указания / сост. Т.Г. Костюченко, А.А. Игнатовская. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 32 с.: ил.
5. Конструирование и расчет двигателей : лаб. практ. : в 3 ч. Ч. 1 : Расчет деталей цилиндропоршневой и шатунной групп / сост. : В. А. Бармин, А. В. Предко. – Минск : БНТУ, 2016. – 50 с.
6. 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
7. Мелентьев В. С. Порядок выполнения расчётной работы по дисциплине «Основы метода конечных элементов» : электрон. метод. указания / В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев, А. М. Уланов. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013. – Электрон. и граф. дан. (10,6 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

8. Моделирование и расчёт методом конечных элементов : лаб. практ. / сост. Т.Г. Кличенков. – Владимир: Изд-во Владимирского государственного университета, 2013. – 38 с.: ил.

9. Глинкин, С. А. Расчет деталей поршневых двигателей внутреннего сгорания : учеб. пособие / С. А. Глинкин ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2013. – 107 с. – ISBN 978-5-9984-0379-8.

10. Создание твердотельных моделей в системе В T-FLEX CAD 3D: Учеб. пособие. / В.А. Гончарова, Е.В. Голова, И.А. Гущин, Ф.С. Сабиров – М.: МГТУ «Станкин», 2012 – 114 с.: ил.

11. Проектирование металлообрабатывающих инструментов и технологической оснастки в T-FLEX CAD : Учеб. пособие / Киричек А.В., Афонин А.Н. – М.: Машиностроение-1, 2007. - 158 с.: ил.