

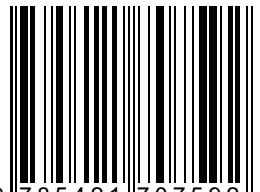
The background of the cover features several 3D CAD models. On the left, there is a detailed assembly of a gearbox or transmission with multiple gears and shafts. On the right, there is a large, circular flange-like component with a central hole and a dimension of 0.425. Below these, a complex piping system with various pipes, valves, and tanks is shown. The models are rendered in a semi-transparent style, revealing internal components.

Е. М. Кузнецова, А. К. Остапчук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САД-СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ 3D-МОДЕЛЕЙ

Учебное пособие

ISBN 978-5-4217-0759-2



9 785421 707592

Курганский
государственный
университет



Библиотечно-издательский
центр

65-48-12

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

Е. М. Кузнецова, А. К. Остапчук

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САД-СИСТЕМ
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ 3D-МОДЕЛЕЙ**

Учебное пособие

Курган 2026

ББК 30.2-5-05я73
УДК 621.01(075.8)
К 89

Рецензенты:

Кафедра «Технология машиностроения» Тюменского индустриального университета (профессор кафедры, д-р техн. наук, доцент, Виктор Евгеньевич Овсянников);

Структурное подразделение высшего образования Курганского института железнодорожного транспорта (профессор кафедры, д-р техн. наук, профессор, Виктор Иванович Чарыков).

Печатается по решению методического совета Курганского государственного университета.

Кузнецова Е. М.

Использование САД-систем для автоматизированного проектирования 3D-моделей : учебное пособие / Е. М. Кузнецова, А. К. Остапчук. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2026. – 96 с.

В учебном пособии рассмотрены принципы 3D-моделирования и прототипирования, реверс-инжиниринга, основы работы в T-Flex CAD, принципы подготовки технологической документации.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 15.03.01 «Машиностроение», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.03.04 «Управление в технических системах», 27.03.01 «Стандартизация и метрология»

ISBN 978-5-4217-0759-2

© Курганский государственный университет, 2026

© Кузнецова Е. М.,
Остапчук А. К., 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОТОТИПИРОВАНИЕ.	7
1.1 Сфера использования 3D-моделирования и прототипирования.....	8
1.2 Виды прототипов	9
1.3 Этапы технологического цикла прототипирования.....	10
Технологии быстрого прототипирования.....	10
1.4 Инженерное 3D-моделирование.....	12
1.5 ПО для создания трехмерных моделей.....	12
2 ТЕХНОЛОГИЯ 3D-ПЕЧАТИ	13
2.1 Виды 3D-принтеров	14
2.2 Как создаются 3D-модели	14
3 ВВЕДЕНИЕ В CAD: ИНТЕРФЕЙС T-FLEX	16
3.1 Интерфейс T-FLEX	16
3.2 Основные понятия и методы построения чертежа в T-Flex.....	17
4 ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: ЗАВИСИМЫЕ РАЗМЕРЫ, ПРИВЯЗКИ.	21
4.1 Параметрический чертеж	21
4.2 Построение параметрического чертежа в T-FLEX CAD.....	21
4.3 Построение чертежа с использованием вариационного проектирования (Эскиз с Ограничениями)	23
4.4 Построение параметрического чертежа на основе линий построения	25
5 ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ В T-FLEX CAD.....	28
5.1 Операции «Выталкивание», «Вращение», «Булева», «Примитивы»	28
5.2 Операции «Массив», «Копия», «Симметрия»	35
5.3 Операция «По сечениям»	45
5.4 Операция «По траектории».....	48
6 РАСШИРЕННЫЕ ОПЕРАЦИИ В T-FLEX CAD.....	51
6.1 Операция «Оболочка».	51
6.2 Операция «Спираль»	53
7 СБОРКА.....	59

7.1 Создание сборки с помощью ЛСК	60
7.2 Создание сборки с помощью сопряжений	63
7.3 Создание сборочного чертежа по 3D-модели	65
8 ПОНЯТИЕ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА	70
8.1 Этапы реверс-инжиниринга	70
8.2 Практическое применение реверс-инжиниринга	73
9 ЗАДАНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ	74
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	75
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	78
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	81
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	83
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	86
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	88
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	95

ВВЕДЕНИЕ

Современное инженерное проектирование невозможно представить без использования компьютерных технологий. CAD-системы (Computer-Aided Design) стали неотъемлемой частью образовательного процесса и производственной практики в таких областях, как машиностроение, приборостроение, архитектура, промышленный дизайн и аддитивные технологии. Они позволяют не только значительно ускорить разработку технических решений, но и обеспечить высокую точность, гибкость при внесении изменений и интеграцию с другими этапами жизненного цикла изделия от расчетов и анализа до изготовления и сопровождения.

В условиях стремления к технологическому суверенитету и активного импортозамещения особое значение приобретают отечественные программные решения. Одной из таких систем является T-Flex CAD – мощная параметрическая CAD-платформа, разработанная российской компанией «ТОП СИСТЕМЫ». Она сочетает в себе современные возможности трехмерного моделирования, гибкую параметризацию, поддержку стандартов ЕСКД и высокую степень интеграции с производственными процессами. Благодаря этому T-Flex CAD широко применяется как в промышленности, так и в учебных заведениях, становясь важным инструментом подготовки конкурентоспособных инженерных кадров.

Настоящее учебное пособие разработано с целью формирования у студентов технических вузов прочных теоретических знаний и практических навыков работы в среде T-Flex CAD. В нем последовательно рассматриваются ключевые аспекты трехмерного проектирования: от основ построения эскизов и твердотельных моделей до создания сложных сборок, оформления конструкторской документации и подготовки моделей к 3D-печати. Особое внимание уделено методологии параметрического проектирования.

Пособие также включает актуальные темы, такие как реверс-инжиниринг, что отражает тенденции цифровизации и обратного проектирования физических объектов, а также задания для лабораторных и контрольных работ, способствующие активному усвоению материала.

Учебное пособие может быть использовано обучающимися направлений подготовки 15.03.01 «Машиностроение», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»,

27.03.04 «Управление в технических системах», 27.03.01 «Стандартизация и метрология» при изучении дисциплин «Инженерная и компьютерная графика» и «Основы САПР».

Также учебное пособие может быть полезно при профессиональной переподготовке или повышении квалификации инженерно-техническим работникам отделов главного конструктора.

1 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОТОТИПИРОВАНИЕ

Технологии трехмерного прототипирования позволяют изготавливать физические образцы изделий непосредственно по цифровым 3D-моделям. Ранее для получения прототипов применялись традиционные методы субтрактивного производства, т. е. механическая обработка заготовок на фрезерных, токарных и шлифовальных станках. Такой подход требовал значительных трудозатрат, длительного времени на изготовление и высокой квалификации оператора. Кроме того, сложные геометрические формы, особенно с внутренними полостями или тонкими элементами, зачастую были технологически недостижимы.

Современные аддитивные технологии кардинально изменили ситуацию: прототип, полностью соответствующий цифровой модели, может быть изготовлен за считанные минуты или часы. Процесс автоматизирован, что минимизирует влияние человеческого фактора и повышает воспроизводимость результатов.

Технологический цикл начинается с создания 3D-модели в любой CAD-системе. После верификации геометрии и утверждения конструкторской документации модель экспортируется в формат, совместимый с системой управления принтера (обычно STL или 3MF), и передается на печать. В зависимости от требований к точности, механическим свойствам и назначению изделия выбирается соответствующая технология аддитивного производства:

- FDM/FFF (экструзия термопластичного филамента),
- SLA/DLP (стереолитография на основе фотополимерных смол),
- SLS/SLM (селективное лазерное спекание/плавление порошковых материалов: полимеров или металлов), а также другие методы, включая струйную печать и связывание порошков.

Выбор материала напрямую определяется технологией печати и эксплуатационными требованиями к прототипу. В качестве исходных материалов могут использоваться термопластичные полимеры (PLA, ABS, PETG и др.), фотополимерные смолы, гипсовые композиты, а также металлические и керамические порошки.

Ключевым параметром, влияющим на качество поверхности и точность воспроизведения геометрии, является толщина рабочего слоя (разре-

шение по оси Z). Уменьшение толщины слоя повышает детализацию и снижает ступенчатость, однако увеличивает время печати. Окончательное решение по режимам и материалам принимается оператором на основе технического задания, функционального назначения прототипа и экономических ограничений.

Таким образом, аддитивное производство обеспечивает гибкость, скорость и высокую степень соответствия цифровой модели физическому объекту, что делает его неотъемлемой частью современного инженерного проектирования и опытного производства.

1.1 Сфера использования 3D-моделирования и прототипирования

Применение аддитивных технологий выходит далеко за рамки опытного производства деталей и охватывает широкий спектр отраслей – от архитектуры и дизайна до медицины и строительства.

В архитектурной и строительной практике 3D-прототипирование используется для изготовления физических макетов зданий и сооружений. Такие модели служат не только демонстрационным инструментом при взаимодействии с заказчиком, но и средством верификации проектных решений: на ранних этапах проектирования возможно визуально и тактильно оценить пропорции, геометрическую корректность, эргономику и компоновку объекта. Это позволяет своевременно внести корректировки в чертежную документацию, минимизируя риски ошибок на стадии строительства. Современные строительные 3D-принтеры способны изготавливать не только масштабные модели, но и несущие конструкции полноразмерных жилых домов с использованием специализированных цементных или полимерных композитов.

В сфере промышленного дизайна аддитивное производство применяется для изготовления функциональных и представительских образцов: от элементов интерьера и мебели до музыкальных инструментов, сувенирной продукции, бижутерии и потребительских товаров. Особенно востребован данный подход при создании малосерийных или индивидуальных изделий, где традиционные методы производства экономически нецелесообразны.

Особое значение аддитивные технологии приобрели в медицинской отрасли. На основе данных компьютерной или магнитно-резонансной томографии создаются точные анатомические модели внутренних органов, костных структур и зубочелюстной системы. Эти прототипы используются

как для обучающих целей (в качестве наглядных пособий при подготовке студентов-медиков), так и для клинического применения: планирования сложных хирургических вмешательств, изготовления индивидуальных имплантов, ортопедических протезов конечностей, хирургических шаблонов и инструментов. К 2030 году биопечать тканей и органов с использованием биосовместимых материалов и живых клеток внесена в Стратегию развития аддитивных технологий в Российской Федерации.

Кроме того, технология позволяет оперативно изготавливать запасные и ремонтные детали для бытовой и коммерческой техники, особенно в случаях, когда оригинальные компоненты сняты с производства или недоступны на рынке. Это повышает ремонтпригодность оборудования и снижает простои в работе.

Таким образом, аддитивное производство демонстрирует высокую универсальность, обеспечивая быстрое, точное и экономически эффективное решение задач в самых разных инженерных и прикладных областях.

1.2 Виды прототипов

Прототип – это физическая или цифровая модель изделия, создаваемая на различных этапах проектирования с целью оценки его функциональных, конструктивных и эстетических характеристик. В зависимости от целей применения выделяют следующие типы прототипов [1]:

- **Функциональные прототипы** – предназначены для проверки работоспособности изделия в условиях, приближенных к реальным. Их задача – подтвердить соответствие конструкции заданным эксплуатационным требованиям.
- **Визуальные (демонстрационные) прототипы** – фокусируются на внешнем виде, пропорциях, цвете и текстуре поверхности. Используются для презентаций, маркетинговых исследований и согласования дизайна с заказчиком.
- **Концептуальные прототипы** – создаются на ранних стадиях разработки для визуализации и верификации исходной идеи продукта. Как правило, не обладают полной функциональностью.
- **Конструктивно-дизайнерские прототипы** – служат для отработки деталей компоновки, сборки, взаимодействия элементов и принятия решений по окончательному конструктивному исполнению.

В зависимости от решаемых задач 3D-моделирование и прототипирование условно подразделяются на следующие направления:

- **Промышленное прототипирование** – характеризуется повышенными требованиями к точности, геометрической и размерной стабильности, а также соответствию материалу и технологии серийного производства. Применяется при разработке деталей и узлов механизмов.
- **Презентационное прототипирование** – ориентировано на высокое качество поверхности и точную передачу визуальных характеристик изделия. Используется в промышленном дизайне, архитектуре и рекламе.
- **Товарное прототипирование** – направлено на создание выставочных или предсерийных образцов продукции и/или ее упаковки для тестирования на рынке или участия в выставках.
- **Транспортное прототипирование** – охватывает разработку моделей и функциональных компонентов для авиационной, космической, автомобильной и судостроительной отраслей, где критически важны аэродинамика, массогабаритные характеристики и соответствие нормативным стандартам.

1.3 Этапы технологического цикла прототипирования

- 1) Формализация требований – определение целей, функциональных и геометрических параметров, ограничений и критериев оценки.
- 2) Концептуальное проектирование – выбор архитектуры изделия и метода изготовления прототипа.
- 3) Цифровое моделирование – построение точной 3D-модели в САД-системе с учетом технологических и эксплуатационных ограничений.
- 4) Верификацию и итерационную доработку – тестирование цифровой или физической модели, анализ отклонений, внесение корректировок.
- 5) Физическое изготовление – реализация модели с использованием аддитивных, субтрактивных или гибридных технологий.

Технологии быстрого прототипирования

Технологии быстрого прототипирования (ТБП) базируются на аддитивном принципе формообразования – послойном наращивании материала,

в отличие от традиционных субтрактивных методов (фрезерование, точение), где материал удаляется из заготовки.

3D-модели создаются либо методом параметрического или прямого моделирования в CAD-средах, либо на основе данных обратного проектирования (реверс-инжиниринга) с использованием 3D-сканирования.

В зависимости от типа используемых материалов ТБП подразделяется на следующие группы:

- На основе жидких фотополимеров, например, стереолитографии (SLA) или технологии Ballistic Particle Manufacturing (BPM), где материал послойно отверждается под действием УФ-излучения или термического воздействия.
- На основе порошковых материалов, включая полимерные, керамические и металлические порошки. Формирование осуществляется методами селективного лазерного спекания (SLS) или плавления (SLM).
- На основе листовых материалов, например, технологии Laminated Object Modeling (LOM), при которой слои бумаги, пластика или металла склеиваются и последовательно вырезаются по контуру.

Требования к прототипу определяются его назначением, однако в общем случае он должен:

- однозначно идентифицироваться как репрезентативная модель изделия;
- точно воспроизводить заданную геометрию и габаритные размеры;
- выполнять возложенные функции в пределах установленных условий эксплуатации;
- обладать достаточной механической прочностью и стабильностью для прохождения испытаний.

Особенности прототипирования деталей и механизмов заключаются в необходимости учета не только геометрии, но и физико-механических свойств материалов, планируемых к использованию в серийном производстве. В отличие от презентационных макетов, где приоритет отдается внешнему виду, инженерные прототипы требуют соответствия нагрузкам, тепловым режимам, трибологическим и другим эксплуатационным факторам. Аддитивное прототипирование на ранних стадиях проектирования позво-

ляет выявить и устранить конструктивные недостатки до запуска дорогостоящего производства, тем самым снижая риски и сокращая время вывода продукта на рынок.

1.4 Инженерное 3D-моделирование

Инженерное 3D-моделирование – это создание трехмерных моделей, которые служат основой для проектирования и изготовления механических и электронных систем. Этот процесс позволяет инженерам и конструкторам работать более эффективно и оптимизировать конструкции.

Инженерное моделирование отличается от объектов трехмерной графики результатом. Суть в том, что при инженерном моделировании необходимо получить реальное воплощение объекта. Это не просто процесс макетирования, а получение технического документа с информацией, по которой в дальнейшем и будет реализован объект. 3D-моделирование деталей и механизмов позволяет разработчикам создавать детализированные трехмерные модели, что критически важно в инженерной сфере, где каждая деталь имеет значение [1].

1.5 ПО для создания трехмерных моделей

Для создания 3D-моделей используются специализированные CAD-программы. Самыми известными программами для создания 3D моделей и технологической документации являются: AutoCad, Inventor, Fusion 360, SolidWorks, FreeCAD, Компас 3D, T-Flex CAD, Sketch Up. В рамках импортозамещения рекомендуется использовать отечественное ПО: Компас 3D и T-Flex CAD.

2 ТЕХНОЛОГИЯ 3D-ПЕЧАТИ

Трехмерная (3D) печать – это аддитивный технологический процесс, заключающийся в послойном формировании физического объекта на основе цифровой трехмерной модели. Создание изделия осуществляется с использованием специализированного оборудования, которое последовательно наносит и фиксирует сотни или даже тысячи микрослоев материала, формируя объемную структуру, как правило, снизу вверх.

В отличие от традиционных устройств вывода двумерной информации (например, струйных или лазерных принтеров), 3D-принтер является средством пространственного формообразования, реализующим цифровую модель в трех координатах. Входными данными для печати служит файл, содержащий геометрическое описание объекта (обычно в форматах STL, 3MF или OBJ), сгенерированный в CAD- или САПР-системе.

Истоки аддитивных технологий восходят к середине XX века, однако практическая реализация метода послойного синтеза была предложена лишь в 1986 году американским инженером Чарльзом Халлом, который разработал технологию стереолитографии (SLA) – процесса фотополимеризации жидкой смолы под воздействием ультрафиолетового лазера. В том же году Халл основал компанию 3D Systems и в 1987 году представил первое промышленное устройство для аддитивного производства, получившее название «установка для стереолитографии», поскольку термин «3D-принтер» на тот момент еще не был устоявшимся [2].

Первоначально такие системы имели габариты производственного оборудования и стоимость, исчислявшуюся десятками, а в ряде случаев – сотнями тысяч долларов США, что ограничивало их применение исключительно крупными промышленными и исследовательскими организациями. По мере развития технологий, стандартизации процессов и удешевления компонентной базы, 3D-принтеры стали компактнее, надежнее и доступнее. Это позволило расширить их применение на малый и средний бизнес, образовательные учреждения, а также частных пользователей.

Современные аддитивные системы работают с широким спектром материалов: от термопластов (таких как PLA, ABS, PETG) и фотополимерных смол до металлических и керамических порошков, композитов, биосовместимых гидрогелей и даже пищевых субстанций (например, шоколада или теста). Благодаря этому 3D-печать сегодня применяется не только для из-

готовления промышленных деталей, прототипов и потребительских товаров, но и в таких высокотехнологичных областях, как биомедицина (печать тканей и органоидов), аэрокосмическая промышленность, пищевая инженерия и строительство.

Таким образом, 3D-печать эволюционировала от узкоспециализированной промышленной технологии в универсальный инструмент цифрового производства, обеспечивающий высокую степень кастомизации, сокращение циклов разработки и локализацию производственных процессов.

2.1 Виды 3D-принтеров

FDM — послойная печать расплавленным пластиком

Это самый распространенный и понятный тип принтера. Он плавит пластиковую нить (филамент) и выкладывает ее слой за слоем, создавая модель снизу вверх.

SLA — печать с помощью лазера

Вместо пластика принтер использует жидкую смолу, которая застывает под действием лазера. Лазер «рисует» каждый слой в прозрачной ванне, и из жидкости постепенно появляется готовая модель.

DLP — печать светом проектора

Этот метод похож на SLA, но вместо лазера используется мини-проектор, который сразу засвечивает целый слой смолы. Это делает печать быстрее, чем у SLA-принтеров.

2.2 Как создаются 3D-модели

1) создать модель самостоятельно

Для этого используют специальные программы, которые называются САПР (системы автоматизированного проектирования) или CAD-программы.

Наиболее простые и популярные среди начинающих:

- Tinkercad — работает прямо в браузере, отлично подходит для детей и новичков;
- Blender — профессиональная программа для моделирования и анимации;
- T-FLEX CAD или Fusion 360 — инженерные системы, где создают детали для механизмов и роботов.

Преимущество: можно придумать и создать совершенно уникальный предмет, который существует только в вашей голове — от игрушки до корпуса для собственного робота.

2) скачать готовую модель из Интернета

Если нет времени моделировать самому, можно воспользоваться уже готовыми 3D-моделями.

Существуют специальные библиотеки и сайты, где тысячи пользователей делятся своими работами:

- Thingiverse.com — крупнейшая бесплатная коллекция моделей;
- Printables.com — сообщество, где выкладывают проверенные и качественные проекты;
- Cults3D.com — площадка с бесплатными и платными моделями, часто дизайнерскими.

Преимущество: можно быстро найти все — от брелока до корпуса квадрокоптера.

3) отсканировать реальный объект

Третий способ – 3D-сканирование. Для этого используется 3D-сканер. Программа делает много фотографий объекта, а затем создает из них объемную цифровую модель.

3 ВВЕДЕНИЕ В CAD: ИНТЕРФЕЙС T-FLEX

3.1 Интерфейс T-FLEX

При запуске учебной версии программы появляется следующее окно (рисунок 3.1). Если есть желание, можно зарегистрироваться (это ни к чему не обязывает, но надо указать свою электронную почту). Если регистрироваться не хотите, то просто нажимаете кнопку «Продолжить».

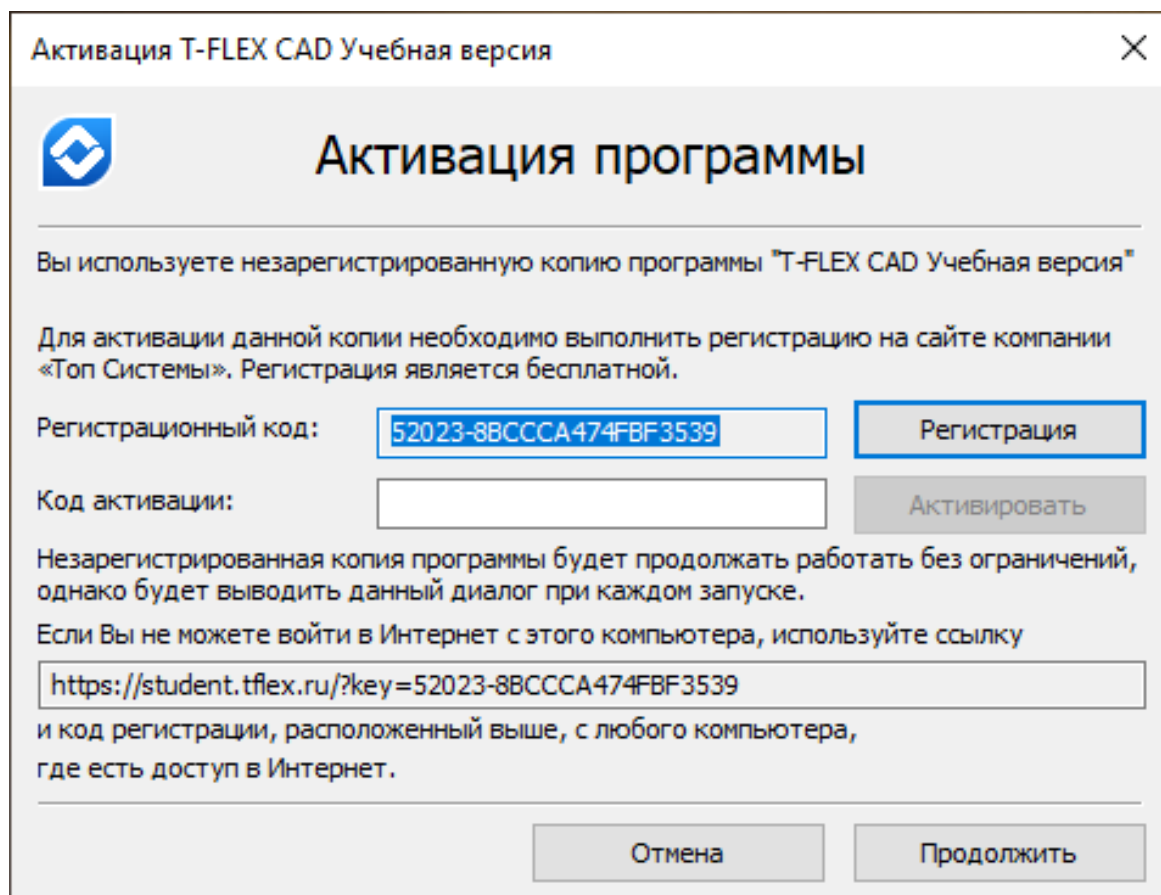


Рисунок 3.1 – Активация программы

Появляется окно приветствия T-Flex CAD (рисунок 3.2). Как и во многих ПО для 3D-моделирования в приветственном окне находятся следующие элементы:

- 1) окно 3Д модели, Параметров и Документов;
- 2) недавно открытые документы;
- 3) шаблоны документов для открытия;
- 4) полезные ссылки, учебники, форум.

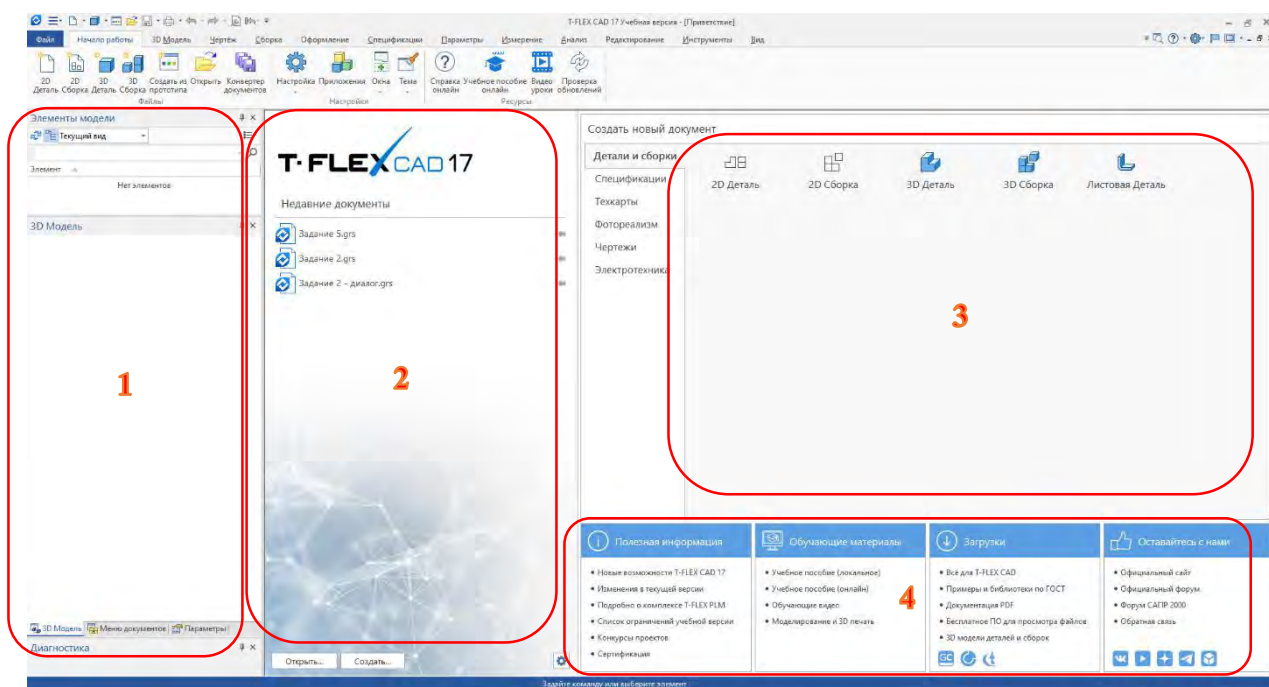
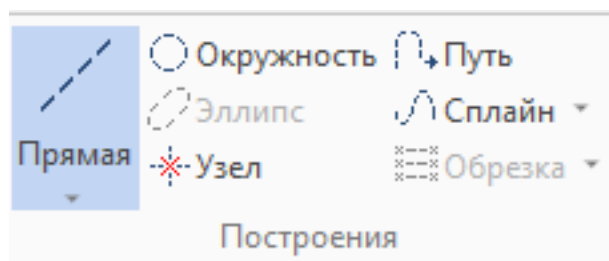


Рисунок 3.2 – Окно приветствия в T-Flex CAD

3.2 Основные понятия и методы построения чертежа в T-Flex

Система T-FLEX CAD использует при создании чертежа несколько типов элементов.

Элементы построения



Формируют каркас чертежа. К элементам построения относятся линии построения и узлы – основные элементы, формирующие параметрическую модель чертежа. С помощью задания различных типов линий построения и узлов устанавливается взаимосвязь элементов построения и определяется порядок расчета их положения при параметрическом изменении чертежа.

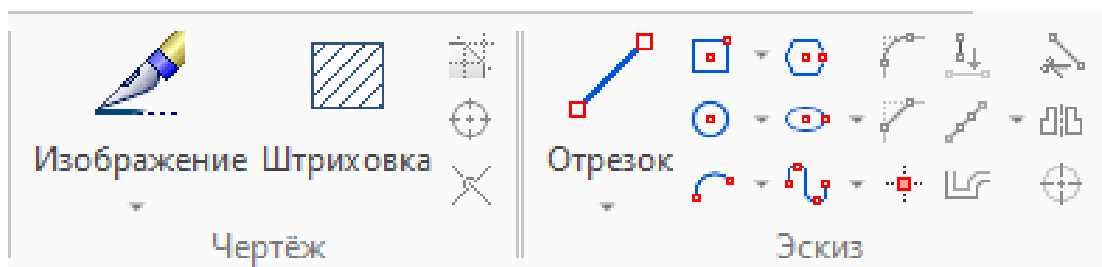
Линии построения – это базовые элементы параметрической модели в T-FLEX CAD. Они являются тонкими конструкционными линиями, с помощью которых создается параметрический каркас чертежа. К линиям построения относятся бесконечные прямые, окружности, эллипсы, сплайны,

A toolbar containing icons for various drawing and editing functions: a text box icon, a dashed line icon, a solid line icon, a blue square icon, a red 'X' icon, a circle icon, an oval icon, a wavy line icon, a green 'X' icon, a blue line icon, a blue arrow icon, a grid icon, a 3D cube icon, a scissors icon, and a red 'X' icon.

Наиболее распространенным типом узла является узел, построенный на пересечении двух линий построения.

- прямая, проходящая через узел, под углом к другой прямой;
- окружность, проходящая через два узла и т. д.

Элементы изображения



18

Линии изображения – основные графические элементы, формирующие чертеж. Привязка линий изображения осуществляется к элементам построения, к точкам сочленения линий изображения.



Линии эскиза – линии, формирующие основное изображение чертежа.



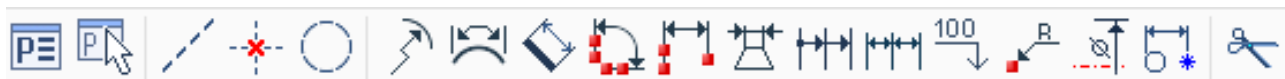
К линиям эскиза относятся отрезки прямых между двумя узлами, полные линии построения (окружности, сплайны и т. д., кроме бесконечных прямых), а также участки линий построения, ограниченные двумя узлами.

Штриховки и заливки – замкнутые одноконтурные или многоконтурные области, заполненные различными способами.



Контуры штриховок привязываются к узлам и линиям построения. При изменении положения узлов изменяются контуры штриховок. При этом автоматически изменяется заполнение штриховок в соответствии с изменением контуров.

Размер – стандартный элемент оформления чертежей. Состоит из совокупности линий и текстовой информации. Размер создается на основе линий построения и узлов. Система T-FLEX CAD поддерживает простановку размеров нескольких стандартов: ЕСКД, ANSI, архитектурный ANSI. Размеры автоматически изменяются при параметрическом изменении чертежа.



Фрагменты – чертежи системы T-FLEX CAD, которые могут использоваться в других чертежах, для получения составных (сборочных) чертежей. Фрагментом может быть любой чертеж системы T-FLEX CAD.

Под параметрическим фрагментом системы T-FLEXCAD понимается чертеж, при нанесении которого на другой чертеж можно задать его положение и параметры, от которых зависит его изображение.

Картинки – графические изображения, сохраненные в различных форматах файлов.

Копии – элемент, отображающий копию исходного изображения с различными параметрами преобразования.

Элементы управления – специальные элементы T-FLEX CAD. Используются для создания специальных диалогов пользователя, являющихся наиболее удобным и простым средством управления внешними переменными параметрической модели.

Чертежный вид – элемент T-FLEX CAD, позволяющий содержимое одной страницы отображать на другой странице в необходимом масштабе. Основное назначение – объединение на одном чертеже элементов, выполненных в разном масштабе. Наиболее распространенным является использование чертежного вида для построения выносных элементов [3].

Вспомогательные элементы

Переменная – элемент системы, предназначенный для задания негеометрических зависимостей между значениями различных параметров. Основное назначение переменных – это использование их значений в качестве параметров линий построения. Например, в качестве параметра прямой, параллельной заданной и расположенной от нее на каком-то расстоянии, можно использовать не только число, но и переменную.

База данных – таблица, содержащая информацию в упорядоченном виде. Базы данных используются для хранения информации, необходимой для чертежа.

Отчеты – текстовые документы, которые создаются с помощью текстового редактора системы T-FLEX CAD и могут включать в себя переменные системы. Служат для создания разнообразных текстовых документов [3].

4 ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: ЗАВИСИМЫЕ РАЗМЕРЫ, ПРИВЯЗКИ

4.1 Параметрический чертеж

Базовый принцип автоматизированного проектирования системы T-FLEX CAD – это параметризация. При этом, в отличие от другой отечественной программы Компас 3D, параметризация в T-FLEX включена автоматически и не требует дополнительных настроек. Основная идея параметризации заключается в том, что элементы чертежа (линии, окружности и т. д.) связаны между собой и фиксируются размерами, которые задаются с помощью постоянных чисел, математических выражений, переменных, уравнений и условий. Изменяя эти значения, можно легко изменять чертеж, модель или сборку. Также возможно использовать этот чертеж в качестве элемента параметрической библиотеки для использования его в других, более сложных, чертежах. При этом можно задавать его положение и параметры для изменения изображения.

4.2 Построение параметрического чертежа в T-FLEX CAD

В T-FLEX CAD существует два способа создания параметрического чертежа: при помощи команд «Эскиз» и «Ограничения» (рисунок 4.1, а) или на основе линий построения (рисунок 4.1, б).

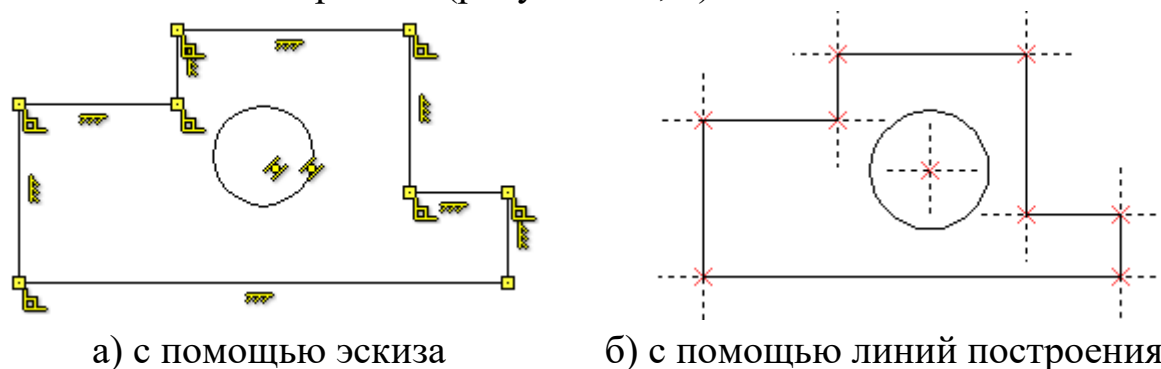


Рисунок 4.1 – Построение чертежа

Первый способ основан на механизме вариационной параметризации, т. е. геометрические и размерные зависимости создаются непосредственно на линиях изображения. Второй способ основан на истории построений, т. е. пользователь самостоятельно определяет геометрические зависимости между линиями построений, а затем на основе этих элементов строит линии изображения чертежа (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Сравнение способов параметризации в T-FLEX CAD

Проектирование на основе истории построений	Вариационное проектирование (Эскиз)
Положение геометрического элемента относительно ранее построенных элементов определяется при его создании	Положение геометрического элемента можно задать или изменить в любой момент посредством ограничений
Циклические зависимости невозможны (ранее построенные элементы не могут зависеть от элементов, построенных позднее)	Допустимы циклические связи между элементами
Параметрическая модель является всегда полностью и однозначно определенной	Модель может быть не полностью определенной, что с одной стороны позволяет удобно ее модифицировать, но с другой может приводить к непредсказуемым результатам при параметрических изменениях
Пересчет модели требует лишь однократного прохода, что позволяет быстро считать модели с большим количеством элементов	Пересчет модели требует специализированного расчета системы ограничений, что ограничивает размерность модели и скорость вычислений
Использует элементы построения, на основе которых создаются линии изображения	Не требует использования линий построения. Зависимости накладываются посредством ограничений и управляющих размеров
Переменные используются при задании параметров элементов построения	Переменные используются в качестве значений управляющих размеров, а также для подавления ограничений и управляющих размеров с целью качественных изменений в схеме параметризации
Переопределение зависимостей между элементами является достаточно сложной, иногда невыполнимой процедурой	Переопределение зависимостей между элементами сводится к удалению ограничений и созданию новых ограничений
Автоматическое выявление зависимостей и установка взаимосвязей между элементами затруднено	Возможно автоматическое выявление взаимосвязей и создание ограничений как при создании элементов модели, так и для ранее созданных элементов, например, для импортированных чертежей и эскизов

4.3 Построение чертежа с использованием вариационного проектирования (Эскиз с Ограничениями)

При создании чертежа в режиме вариационного проектирования используется команда «Эскиз», в рамках которой система автоматически формирует геометрические и размерные ограничения между элементами эскиза. Данный подход основан на принципе вариационной геометрии, при котором геометрические примитивы (отрезки, дуги, окружности и др.) связываются между собой через явно заданные или автоматически распознаваемые зависимости – ограничения (рисунок 4.2).

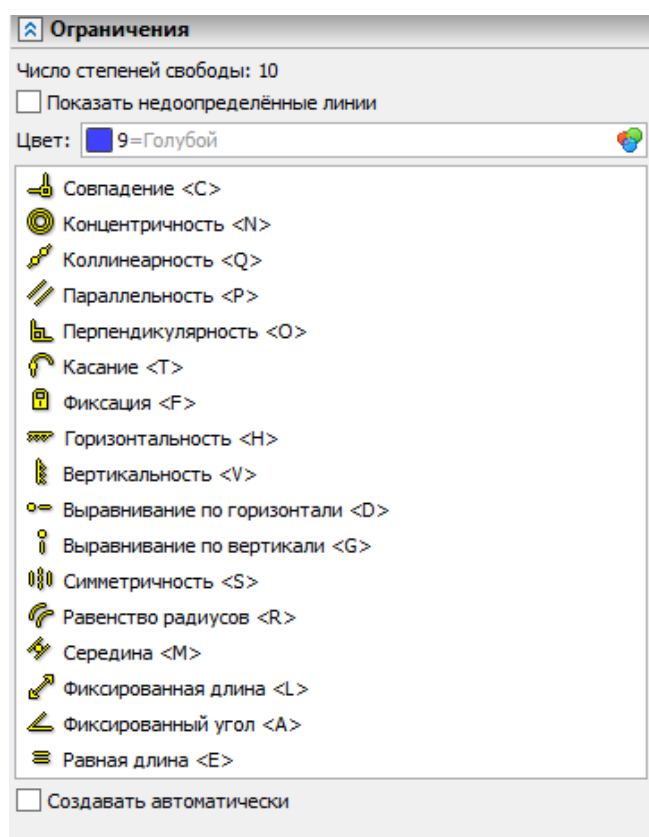


Рисунок 4.2 – Ограничения, накладываемые на элементы эскиза

В процессе построения эскиза CAD-система в реальном времени анализирует взаимное расположение создаваемых объектов и автоматически накладывает типовые геометрические ограничения: горизонтальность, вертикальность, параллельность, перпендикулярность, касание, соосность, симметричность и др. Пользователь при этом может дополнительно вручную задавать или корректировать ограничения в соответствии с проектными требованиями.

Управляющие размеры (dimensional constraints)  служат для количественного определения геометрии эскиза – задают длины отрезков, радиусы дуг, величины углов и расстояния между объектами. Эти размеры являются не просто аннотациями, а активными параметрами, участвующими в решении системы уравнений, описывающих геометрию эскиза. Изменение значения управляющего размера приводит к автоматическому перестроению всей связанной геометрии с сохранением всех заданных ограничений.

Управляющие размеры могут быть введены как вручную – пользователем в процессе редактирования эскиза, – так и автоматически – системой при импорте геометрии или в ходе интерактивного построения, если включен соответствующий режим. Это обеспечивает гибкость при проектировании: инженер может сначала задать топологическую структуру эскиза с помощью геометрических ограничений, а затем доопределить ее метрическими параметрами, либо работать в смешанном режиме (рисунок 4.3).

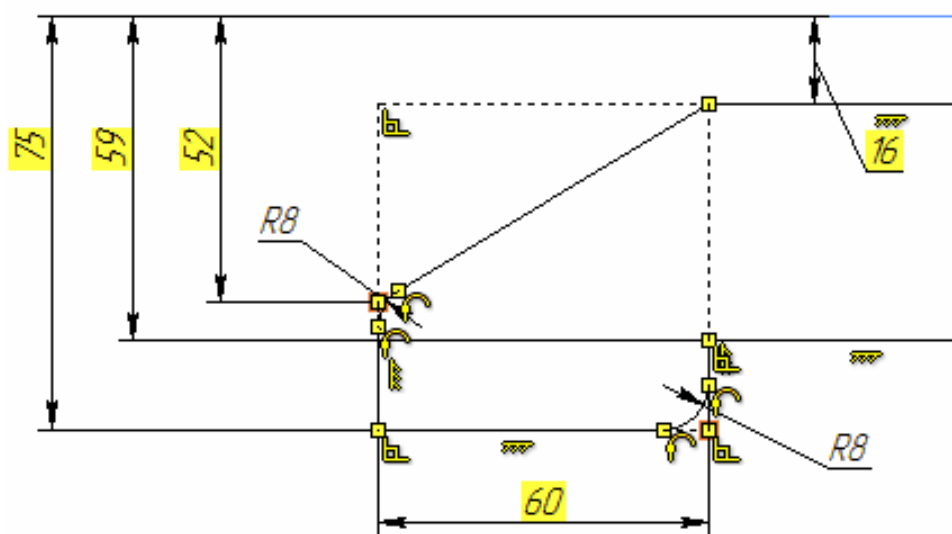


Рисунок 4.3 – Чертеж с управляющими размерами и ограничениями

Таким образом, вариационное проектирование позволяет создавать полностью определенные и управляемые эскизы, в которых геометрия задается не координатами отдельных точек, а через логические и метрические взаимосвязи. Это обеспечивает высокую степень интеллектуальной адаптивности чертежа: при внесении изменений система автоматически пересчитывает положение всех зависимых элементов, сохраняя проектные намерения конструктора и соответствие техническим требованиям.

4.4 Построение параметрического чертежа на основе линий построения

Процесс построения чертежа в параметрической CAD-системе начинается с формирования вспомогательной геометрической основы, так называемого параметрического каркаса, состоящего из элементов построения. Эти элементы задаются на начальном этапе и служат геометрическими и логическими привязками для последующего формирования изображения.

Первыми создаются базовые линии построения — как правило, вертикальные и горизонтальные прямые, определяющие систему отсчета и основные ориентиры компоновки. На их основе строятся вторичные элементы: параллельные и перпендикулярные прямые, касательные окружности, дуги, угловые конструкции и другие геометрические примитивы. При этом каждое новое построение устанавливает геометрические зависимости (например, параллельность, перпендикулярность, касание, совпадение), которые фиксируются в логической структуре документа.

В точках пересечения или сопряжения элементов построения автоматически генерируются узлы (точки привязки), используемые в дальнейшем как опорные объекты для построения дополнительных геометрических сущностей. Все зависимости между элементами сохраняются системой, что обеспечивает ассоциативность и параметричность чертежа: при изменении положения, ориентации или размеров исходных (базовых) элементов все зависимые объекты автоматически перестраиваются в соответствии с заданными геометрическими и логическими связями (рисунок 4.4).

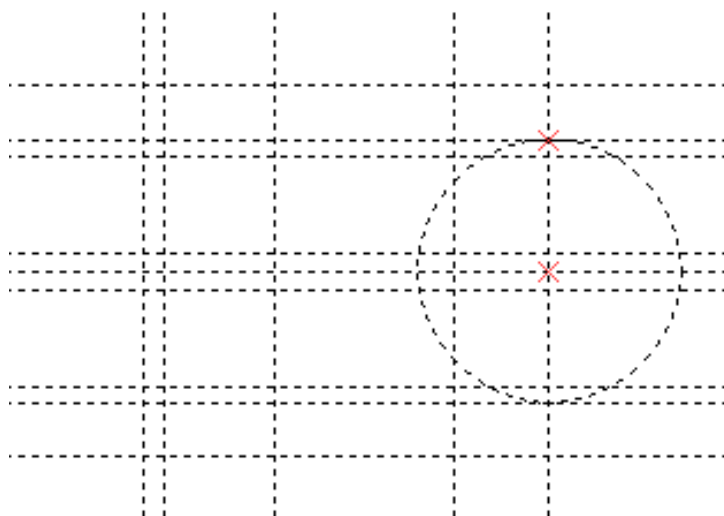


Рисунок 4.4 – Пример отображения линий построения и узлов

После формирования параметрического каркаса выполняется нанесение основных линий изображения — отрезков, дуг, окружностей и других графических примитивов, составляющих видимую часть чертежа. Эти элементы строго привязываются к ранее созданным узлам и линиям построения, что гарантирует их корректное позиционирование и устойчивость при последующих модификациях (рисунок 4.5).

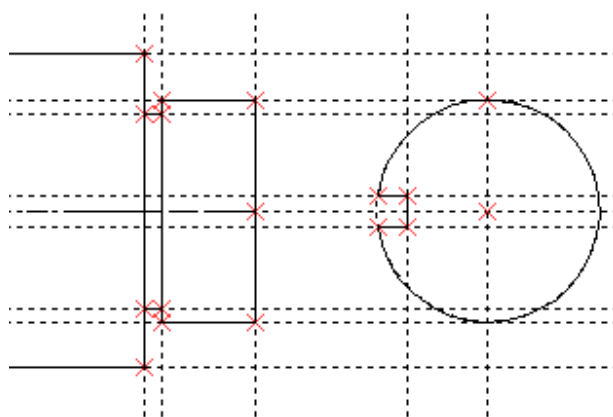


Рисунок 4.5 – Пример нанесения линий изображения на каркас

На этапе оформления чертежа производится простановка размеров, которые также ассоциативно привязываются к геометрическим элементам. Задаются контуры штриховок с указанием типа заполнения, наносится текстовая информация (обозначения, надписи, технические требования). При необходимости текстовые объекты также могут быть привязаны к узлам или линиям построения, что обеспечивает их синхронное перемещение при изменении геометрии чертежа. Дополнительно проставляются обозначения шероховатости, допусков формы и расположения, другие элементы в соответствии с требованиями ЕСКД (рисунок 4.6).

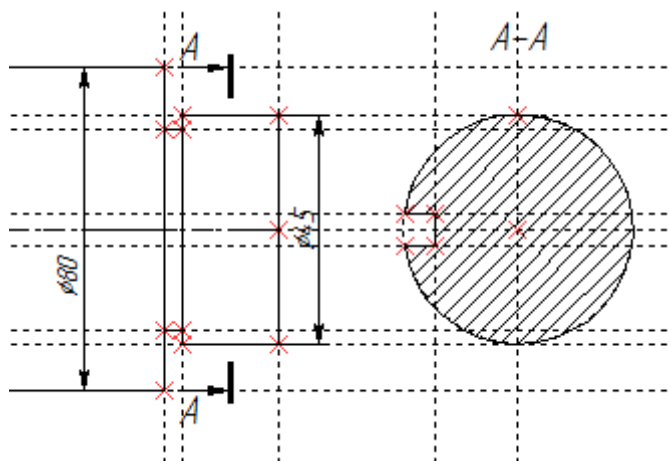


Рисунок 4.6 – Нанесение элементов оформления чертежа

Ключевой особенностью параметрического подхода является возможность управления геометрией через числовые параметры. Такие параметры могут включать расстояния, углы, радиусы, координаты и другие метрические характеристики. Их значения задаются либо напрямую при создании элемента, либо через переменные – именованные величины, которым присваиваются константы или аналитические выражения. В состав выражений могут входить:

- другие переменные,
- арифметические и логические операции,
- условные конструкции (например, IF-THEN-ELSE),
- вызовы стандартных математических функций (синус, косинус, логарифм и др.),
- ссылки на внешние источники данных (например, таблицы из баз данных или Excel-файлов).

Это позволяет реализовать интеллектуальную параметризацию: изменение одного ключевого параметра (например, габаритной длины изделия) автоматически перестраивает всю геометрию чертежа, включая размерные надписи, штриховки и текстовые аннотации, обеспечивая целостность и согласованность документации.

Таким образом, параметрическое чертежное проектирование не только повышает точность и скорость разработки, но и обеспечивает гибкость при внесении изменений, что особенно критично при проектировании семейств изделий, выполнении итераций или адаптации конструкции под изменяющиеся требования.

5 ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ В T-FLEX CAD

5.1 Операции «Выталкивание», «Вращение», «Булева», «Примитивы»

Операция «Выталкивание» является одной из наиболее часто используемых базовых операций в системах твердотельного моделирования. Позволяет формировать объемное тело путем прямолинейного перемещения плоского замкнутого контура (сечения) в заданном направлении на определенное расстояние.

По умолчанию направление выталкивания совпадает с нормалью к плоскости исходного контура. Однако система предоставляет возможность задать произвольный вектор направления, что расширяет функциональность операции для построения наклонных или асимметричных конструкций.

Операция «Вращение» предназначена для создания тел или поверхностей путем вращения формообразующего контура вокруг заданной оси. Угол поворота может составлять полный оборот (360°) либо быть ограничен пользовательским сектором.

В качестве исходного контура вращения допускается использовать:

- плоские или пространственные элементы проволочной геометрии,
- грани, ребра или поверхности существующих тел.

Поддерживается множественный выбор однотипных элементов, что позволяет формировать сложные составные вращаемые объекты.

Ось вращения и угловые границы могут быть заданы привязкой к существующим геометрическим элементам модели (ребрам, осям, плоскостям и т. п.). Все привязки сохраняются в параметрической структуре документа, обеспечивая ассоциативность: при изменении исходных объектов операция автоматически перестраивается с учетом новых геометрических зависимостей.

Дополнительно доступны параметры скругления ребер результирующего тела, что позволяет сразу формировать готовые к производству модели с учетом технологических требований.

Операции, объединенные в группу «Примитив», позволяют создавать базовые геометрические тела: Параллелепипед, Цилиндр, Конус, Шар, Тор, Призму и Пирамиду без создания дополнительных элементов построения.

«Булева» – операция, предназначенная для создания нового тела на основе двух или более уже существующих тел. В результате выполнения операции создается новое тело, являющееся комбинацией исходных тел.

Рассмотрим основные 3D-операции в системе T-FLEX CAD на примере кулачка (рисунок 5.1).

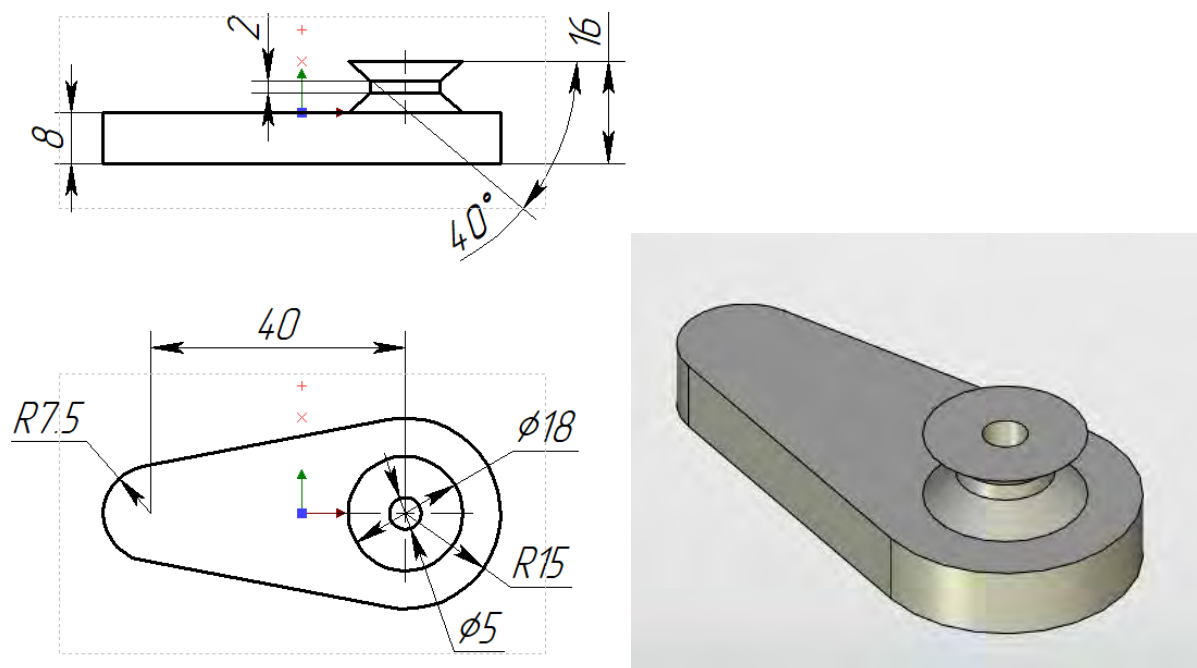


Рисунок 5.1 – Чертеж и 3D-модель кулачка

Все модели создаются в шаблоне «3D-Деталь». В новом открывается 3D-пространство с основными плоскостями и осями. Для удобства проекционного черчения эти плоскости в интерфейсе T-Flex CAD называются Вид спереди (XZ), Вид слева (YZ) и Вид сверху (XY).

Для построения кулачка проще всего использовать два профиля (форма кулачка на виде сверху и форма катушки на виде спереди или виде слева) и три трехмерных операции («Выталкивание», «Вращение» и «Булева» операция). Для сквозного отверстия можно использовать операцию «Отверстие» или примитив «Цилиндр».

Для первого профиля выберем плоскость вид сверху и нажмем иконку

«Чертить на РП»



Выбранная плоскость развернется по нормали и примет вид 2D (рисунок 5.2).

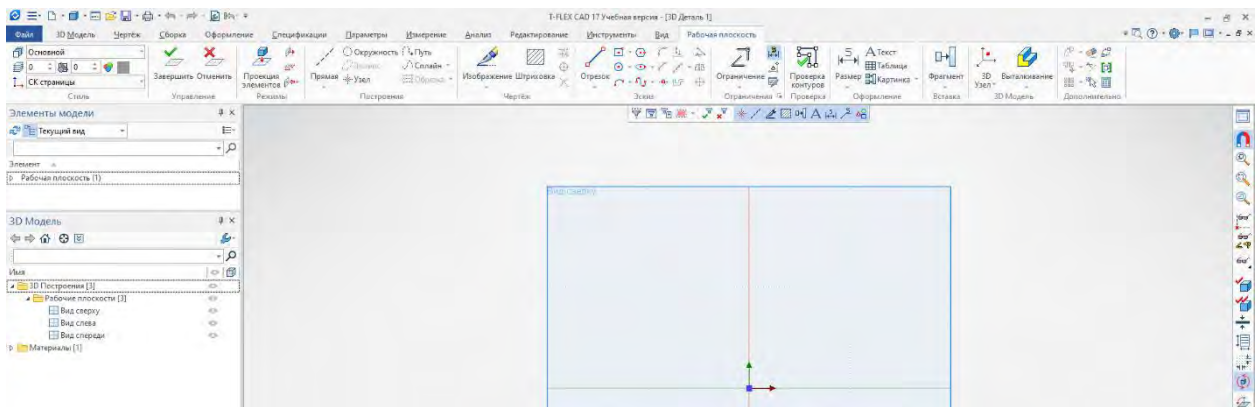
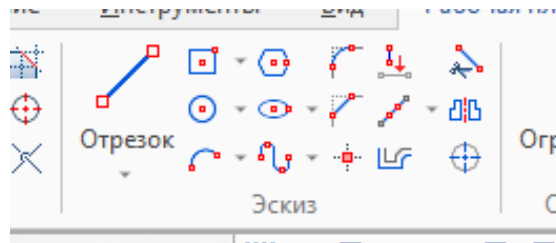


Рисунок 5.2 – Вид рабочей плоскости и набор инструментов ленты «Рабочая плоскость»

В качестве примера параметризацию модели осуществляем через инструменты эскиза.



Необходимо выполнить следующее построение (рисунок 5.3).

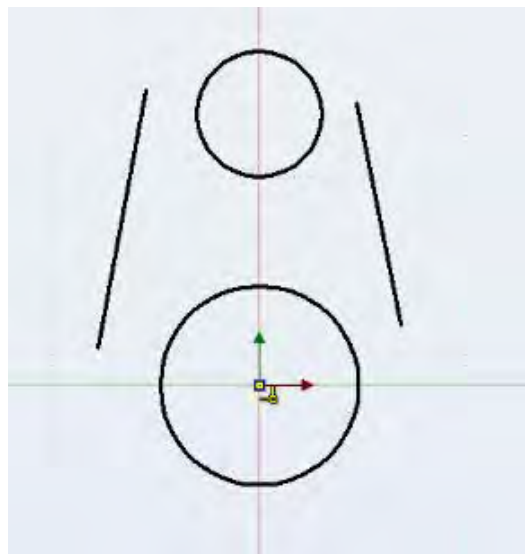
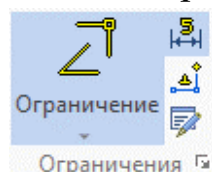


Рисунок 5.3 – набросок контура кулачка

Нужный вид зададим с помощью ограничений.



Используем следующие ограничения (рисунок 5.4):

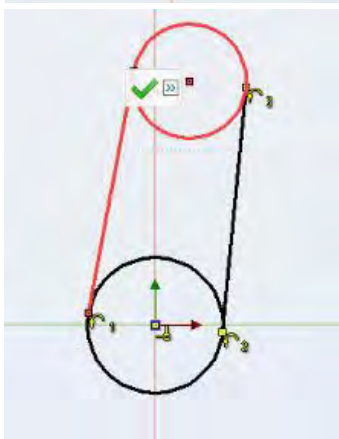
1)



«Совпадение» для
«склеивания» концов

 Совпадение <C>

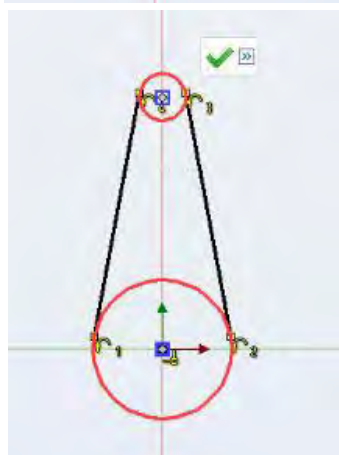
2)



«Касание»
для выравнивания
окружностей и отрезков

 Касание <T>

3)



«Выравнивание
по вертикали»
для выравнивания
окружностей

 Выравнивание по вертикали <G>

Рисунок 5.4 – Применение ограничений

Если нижняя окружность не привязана к началу координат (пересечение красной и зеленой линии), то необходимо добавить ограничение «Совпадение» для начала координат и центра нижней окружности.

Следующие ограничения задаются размерами «диаметры окружностей» и «расстояние между центрами окружностей» (рисунок 5.5).

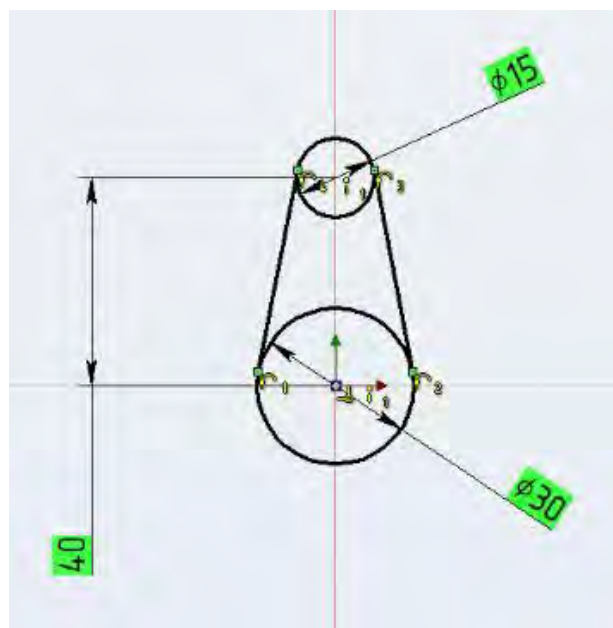


Рисунок 5.5 – Размеры кулачка

Зеленые рамки на размерах обозначают, что профиль полностью задан, т. е. нет степеней свободы.

Далее для формирования профиля трехмерной операции необходимо убрать самопересечения (несколько линий из одного узла) и/или разрывы (не связанные между собой точки) профиля. В данном случае разрывов нет, но есть самопересечения (окружности и отрезки). Убираем их с помощью

инструмента «Обрезка» в панели «Эскиз» . Команда подсвечивает удаляемый участок элемента синим цветом (рисунок 5.6, а). Результат обрезки на рисунке 5.6, б.

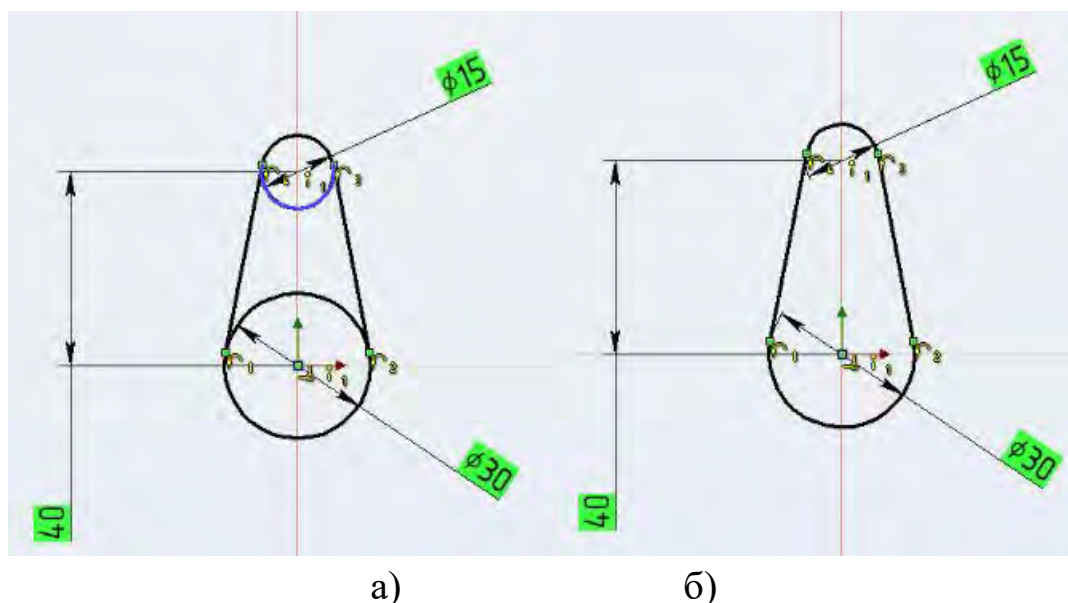
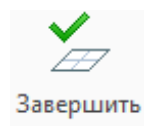


Рисунок 5.6 – Использование инструмента «Обрезка»



Завершаем построение эскиза.

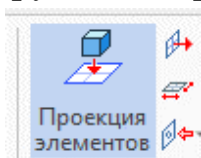
Выбираем профиль на 3D пространстве или в дереве 3D модели и при-



меняем к нему операцию «Выталкивание» на длину 8 мм.

Для следующего профиля нам понадобится плоскость «Вид слева». Выбираем ее, нажимаем кнопку «Чертить на РП».

Далее профиль катушки нам необходимо привязать к верхней грани кулачка. Она видна в 3D-пространстве, но в построении пока не участвует. Чтобы спроецировать нужную грань на рабочую плоскость, выбираем в ленте «Рабочая плоскость» инструмент «Проекция элементов».



Затем выбираем нужную грань. Подтверждаем выбор . На виде слева появилась линия изображения проецируемой грани, и теперь к ней можно привязывать элементы эскиза.

С помощью тех же элементов эскиза формируем профиль катушки и задаем размеры (рисунок 5.7).

Примечание: если контур состоит только из прямых отрезков его можно выполнять непрерывным вводом, указывая необходимые точки. При этом ограничения «Совпадение», «Горизонтальность», «Вертикальность» задаются автоматически.

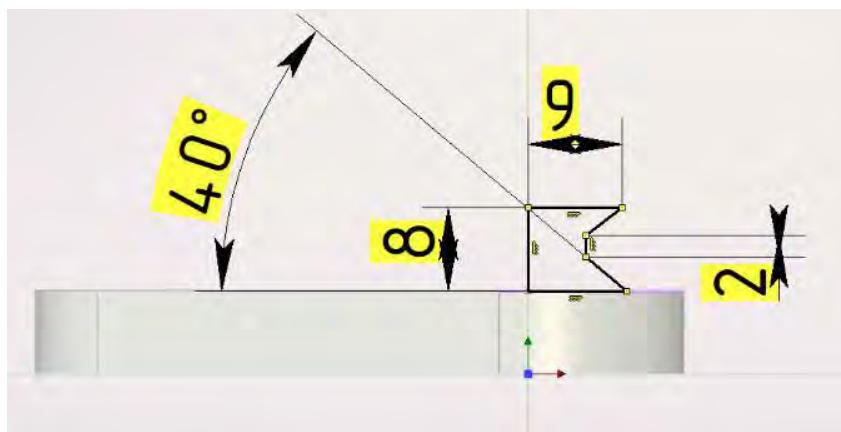


Рисунок 5.7 – Профиль катушки

Затем с помощью ограничений фиксируем и выравниваем профиль (рисунок 5.8):

- 1) «Выравнивание по вертикали» – начало координат и левый вертикальный отрезок (или любая его точка).
- 2) «Выравнивание по вертикали» – правые точки (концы наклонных отрезков).
- 3) «Равная длина» – наклонные отрезки.

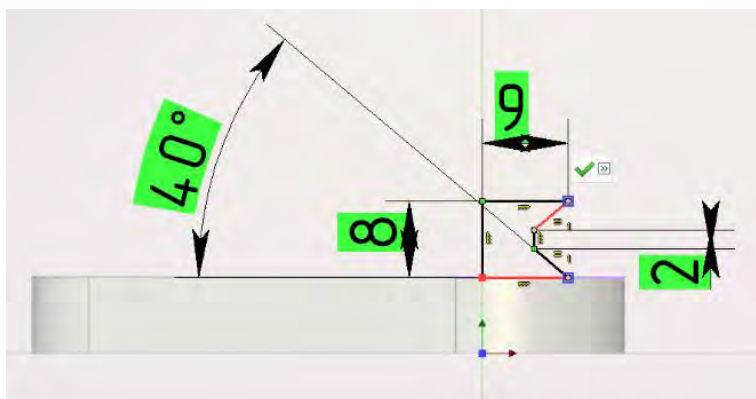


Рисунок 5.8 – Результат ограничений

Завершаем эскиз и применяем к полученному профилю операцию «Вращение». В качестве оси вращения выбираем левый край профиля (вертикальная линия, проходящая по оси Z глобальной системы координат). Кроме того, при задании тела вращения можно выбрать способ соединения с предыдущим телом («Сложение», «Вычитание», «Пересечение»). В данном случае используется сложение тел. Итог операции на рисунке 5.9.

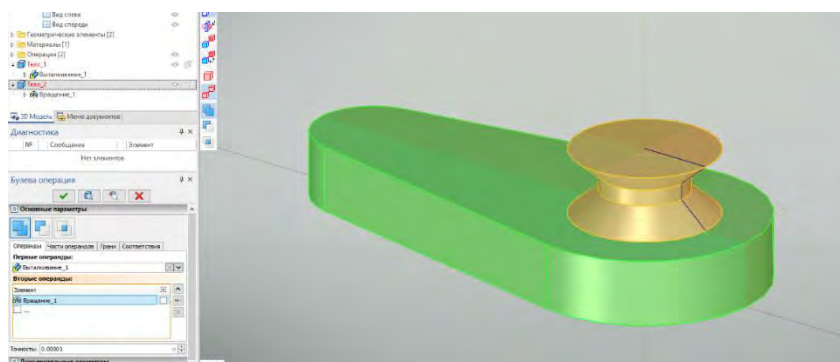


Рисунок 5.9 – Операция «Вращение»

Центральное отверстие сформируем с помощью примитива «Ци-

линдр» 
Примитив

с параметрами: Диаметр 5 мм, Высота 16 мм.



Затем к полученным телам применяем Булевы операции: «Сложение» – Тело 1 (кулачок) и Тело 2 (катушка) (если при создании тела вращения «Сложение» не выбрали); «Вычитание» – Тело 1-2 (кулачок с катушкой) и Тело 3 (Цилиндр). Готово.

5.2 Операции «Массив», «Копия», «Симметрия»

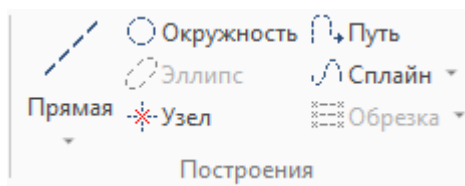
На примере 3D-модели пластиковой бутылки (рисунок 5.10) рассмотрим следующие операции твердотельного моделирования: «По сечениям», «По траектории», «Массив».



Рисунок 5.10 – Эскиз пластиковой бутылки с размерами

Начнем построение с поперечных профилей бутылки (горлышко, основная часть, донышко). Параметризацию выполняем с помощью линий построения, а не линий эскиза.

Выберем инструмент «Прямая» в панели инструментов «Построения».

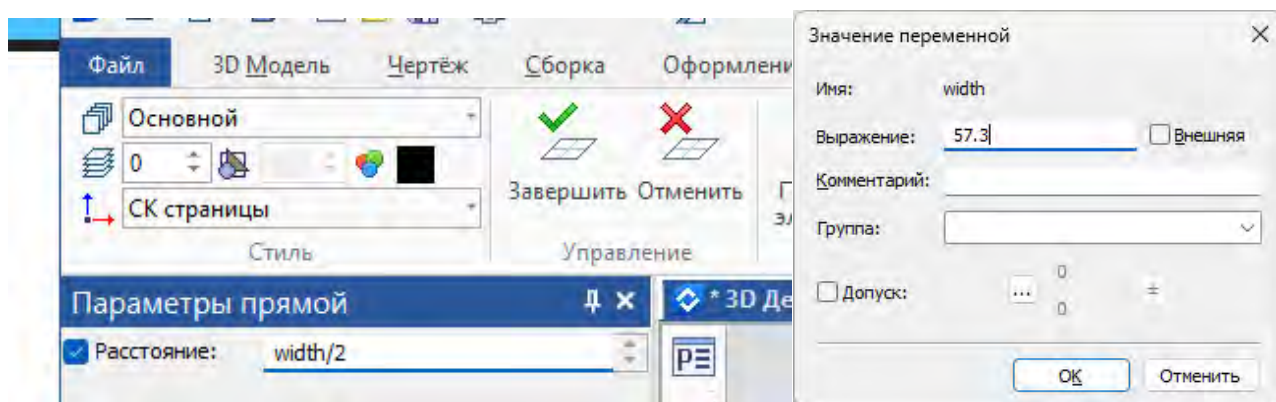


Всегда все построения начинаем с базы – две перпендикулярные прямые и узел . При указании положения этих двух прямых указываем начало координат (если привязка не работает, то необходимо проверить, включены ли привязки в мини ленте).



Затем с помощью параллельных линий формируем контур профиля бутылки.

В качестве базовой линии указываем горизонтальную линию и отводим мышь вверх – появится еще одна горизонтальная линия и слева в окне параметров указано расстояние, на котором она будет. Чтобы перейти в окно задания расстояния, нужно кликнуть на него ЛКМ или нажать горячую клавишу <d>. Затем указать расстояние через переменную (чтобы сделать бутылку параметрической и менять ее размеры и объем): $width/2$ (имя переменной можно придумать самостоятельно). Указываем половину ширины бутылки, т. к. профиль будет симметричным относительно начала координат и задаем ее значение.



Затем с помощью инструмента «Симметрия»  панели «Прямая» создаем симметричную прямую относительно базовой горизонтальной ли-

нию. Аналогично делаем с вертикальными линиями. Строим, делаем симметрию. Расстояние указываем такое же как и для горизонтальной линии (рисунок 5.11).



Рисунок 5.11 – Начало контура донышка бутылки

Для скругления профиля используем «Окружность» панели «Построения».

Окружность строим касательной к верхней горизонтальной линии и в точке пересечения базовой вертикальной и верхней линии (рисунок 5.12).

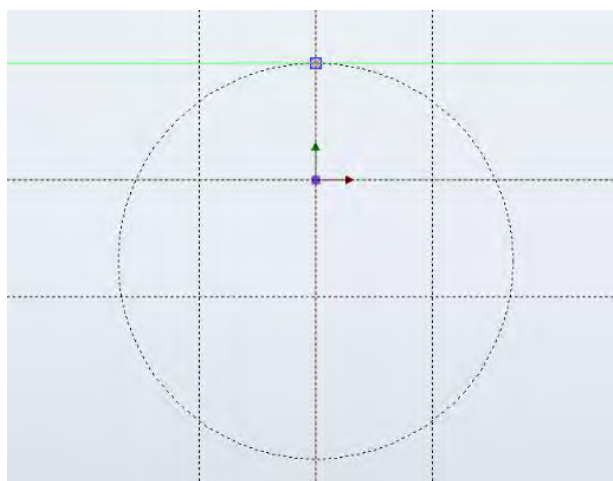


Рисунок 5.12 – Создание окружности

Размер окружности задаем также через переменную (рисунок 5.13). Размер окружности можно задать через радиус (горячая клавиша <r>) или диаметр (горячая клавиша <d>).

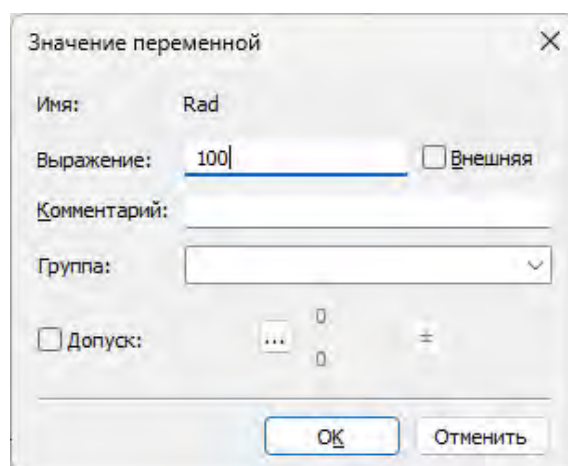


Рисунок 5.13 – Задание размера окружности

Чтобы сделать остальные окружности, используем инструмент «Массив». В панели инструментов «Дополнительно». По умолчанию на иконке показан «Линейный массив», но долгим нажатием на черный треугольник рядом с пиктограммой можно переключить на «Круговой массив» (рисунок 5.14).

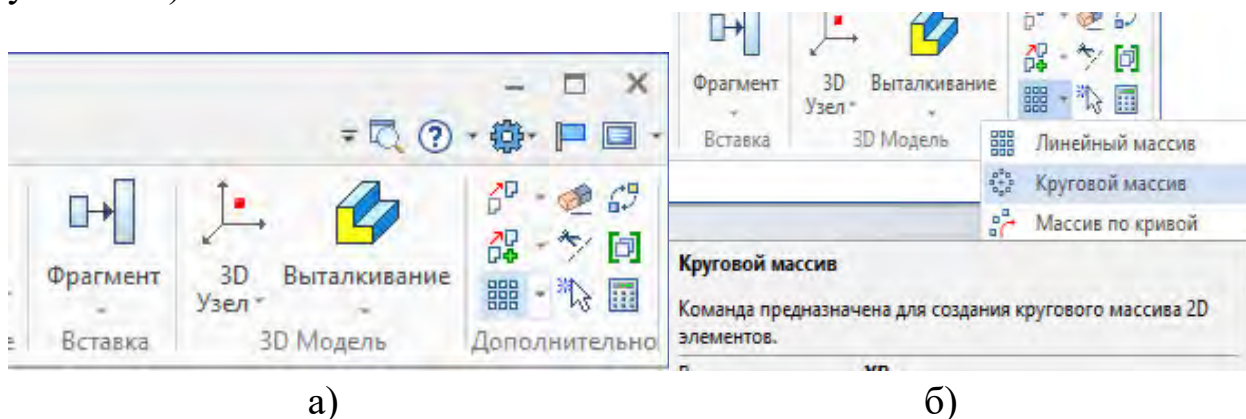


Рисунок 5.14 – Панель «Дополнительно» (а) и выбор вида массива (б)

Указываем элементы, которые надо скопировать, т. е. окружность. Подтверждаем выбор зеленой галочкой. В качестве Способа задания выбираем «Количество копий и общий угол».

Затем указываем центр массива – начало координат (рисунок 5.15).

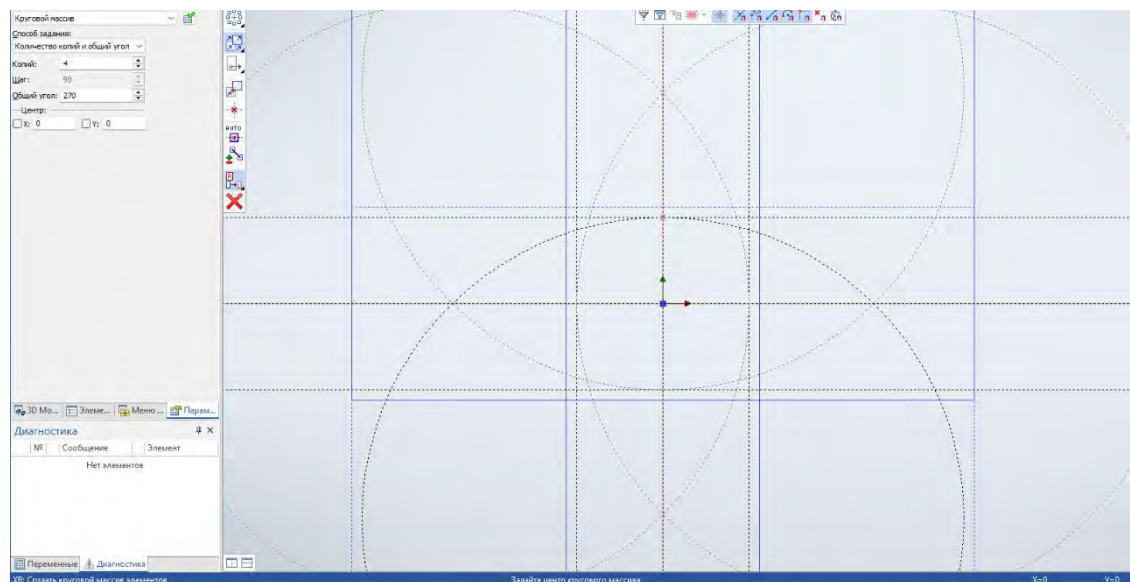


Рисунок 5.15 – Результат массива окружностей

Затем делаем угловые скругления: добавляем окружность, касательную к двум окружностям, радиусом 12,8 мм (рисунок 5.16). С помощью массива делаем 4 копии.

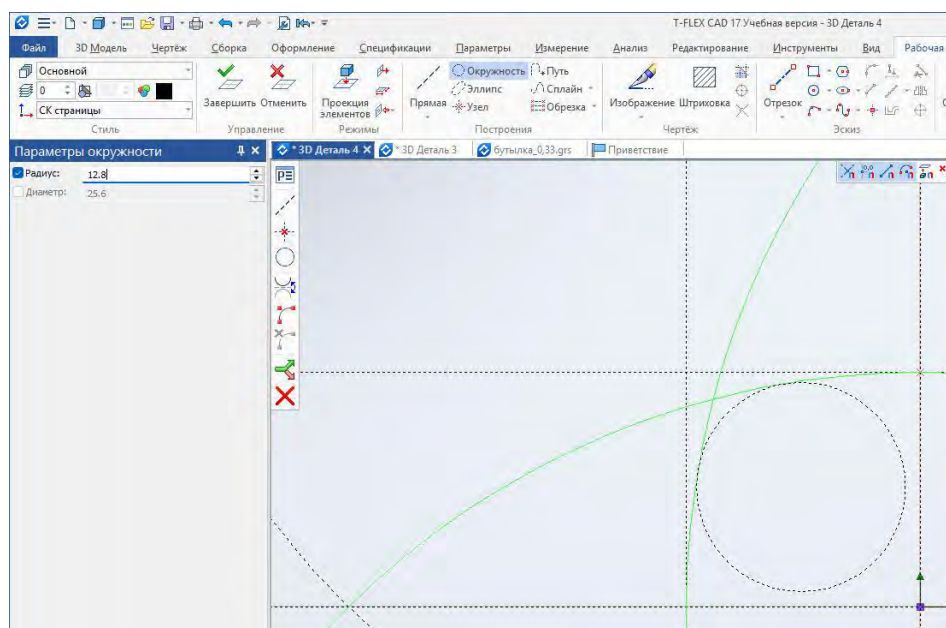
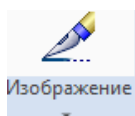


Рисунок 5.16 – Скругление

Обводим полученный контур с помощью инструмента «Изображе-



ние». Начинаем с точки касания (пересечения) маленькой и большой окружности, затем указываем линию, вдоль которой будет переме-

щаться обводка, потом следующая и т. д. Если обводка пошла не в ту сторону, разворачиваем ее кнопкой . Завершаем обводку в исходной точке (рисунок 5.17).

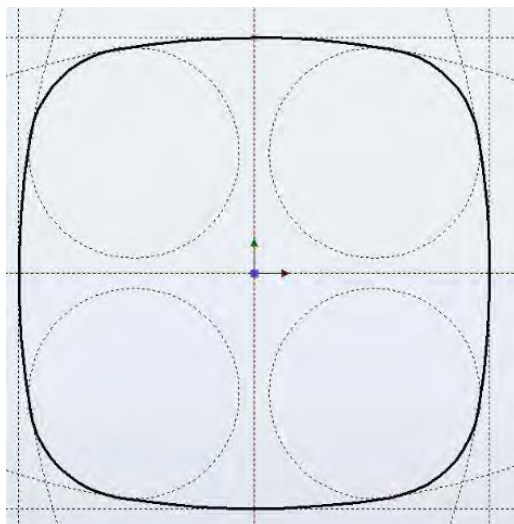
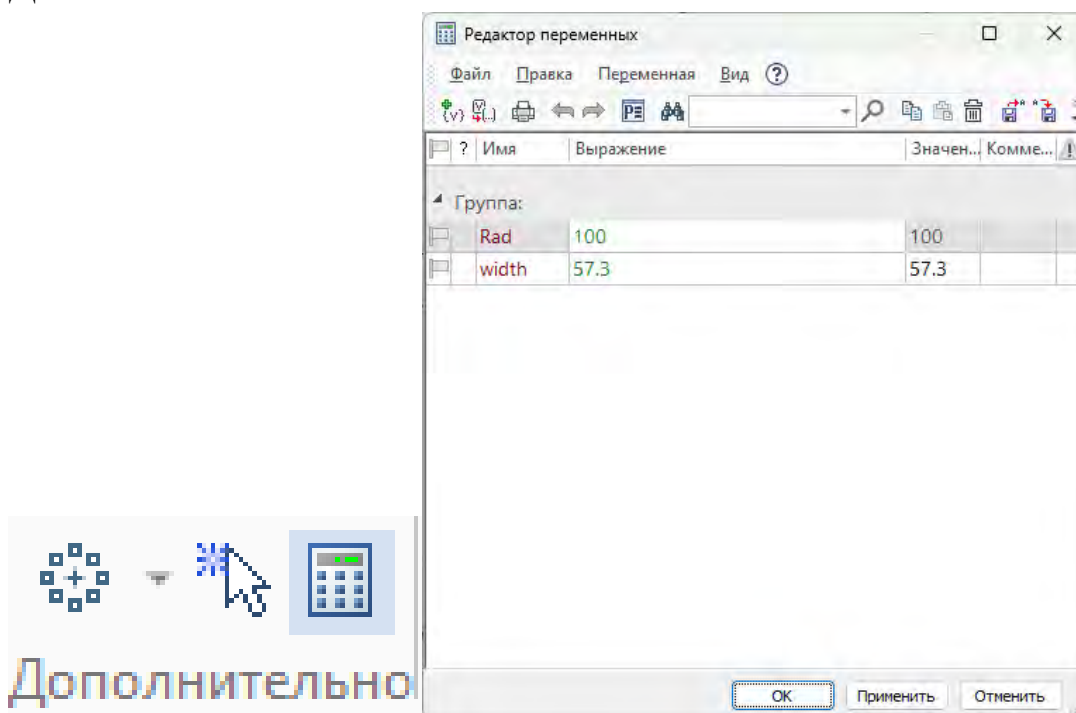


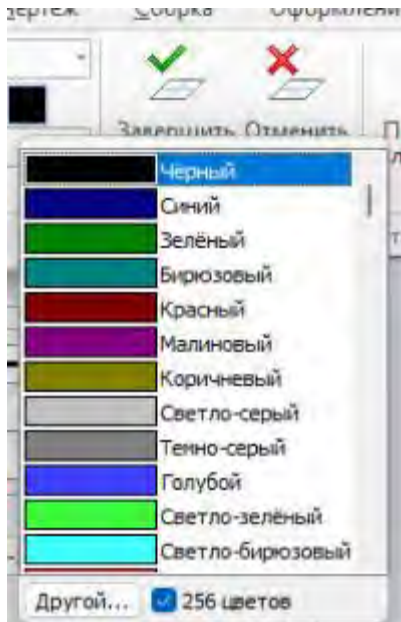
Рисунок 5.17 – Результат обводки контура построений с помощью «Изображение»

Теперь можно проверить работу параметрического эскиза. Откроем редактор переменных – пиктограмма в виде калькулятора в панели инструментов «Дополнительно».

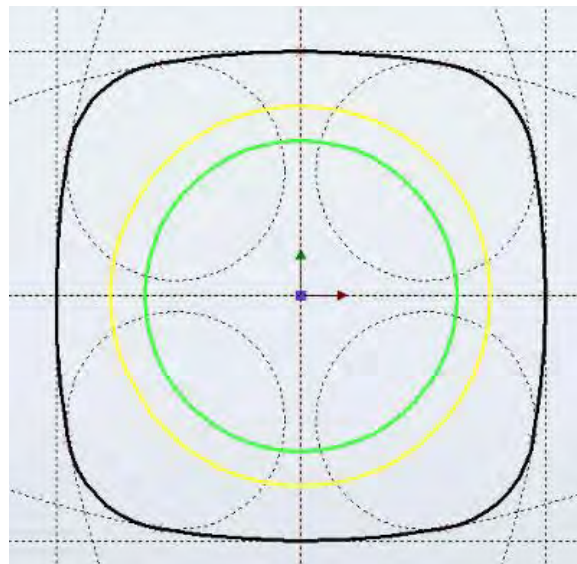


Меняя значения переменных, можем увидеть, как меняется размер профиля.

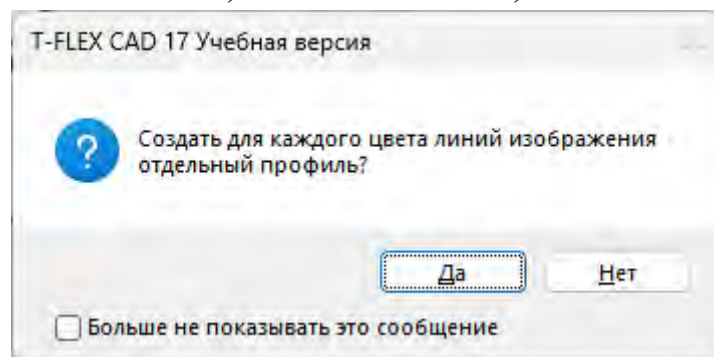
Профили горлышка бутылки и ее доньшка строим на том же виде сверху. Строим две окружности с центром в начале координат диаметрами 36,5 мм и 44,5 мм. Для создания трех отдельных профилей при завершении работы с рабочей плоскостью при обводке окружностей для каждой из них выбираем другой цвет (рисунок 5.18).



а)



б)



в)

Рисунок 5.18 – Выбор цвета линии изображения (а), результат команды (б), окно при завершении работы с рабочей плоскостью (в)

Строим боковой контур бутылки, который будет направляющим для операции «По сечениям». Для профиля выбираем любую вертикальную плоскость («Вид слева» или «Вид спереди»). Аналогично предыдущим построениям создаем две перпендикулярные прямые и узел между ними в начале координат. Затем от базовой горизонтальной линии откладываем две прямые на расстоянии 10 мм и $H = 154$ мм. Затем от второй снизу линии (на расстоянии 10 мм от базы) откладываем еще одну линию на расстоянии

94,2 мм. И от самой верхней вниз на 21,5 мм. Знак «-» перед значением расстояния показывает, что линия откладывается вниз (рисунок 5.19).

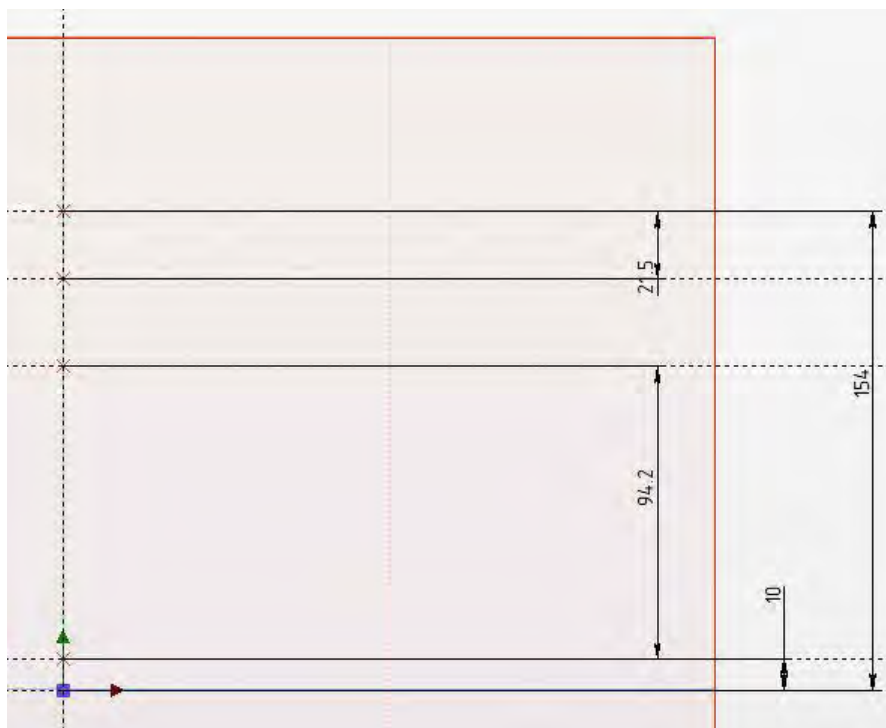


Рисунок 5.19 – Построения горизонтальных опорных линий

Теперь делаем вертикальные линии. От базовой вертикальной линии (центр будущей бутылки) откладываем влево прямые на расстояния: $36,5/2$ (половина ширины горлышка); $44,5/2$ (половина ширины доньшка); $width/2$ (половина ширины бутылки). Переменную мы создавали на виде сверху. Затем создадим наклонную линию от горлышка до ширины бутылки и сделаем скругление у доньшка. Потом выполним обводку разными цветами и добавим несколько 3D-узлов на точки пересечения горизонтальных линий



и центра бутылки (рисунок 5.20).

И к каждому из созданных профилей по отдельности применим операцию «Круговой массив»  Массив. Массив операций выполняется аналогично массиву построений. В качестве оси кругового массива указываем любые два 3D-узла.

Теперь надо разместить профили горлышка, доньшка и самой бутылки вдоль высоты самой бутылки.

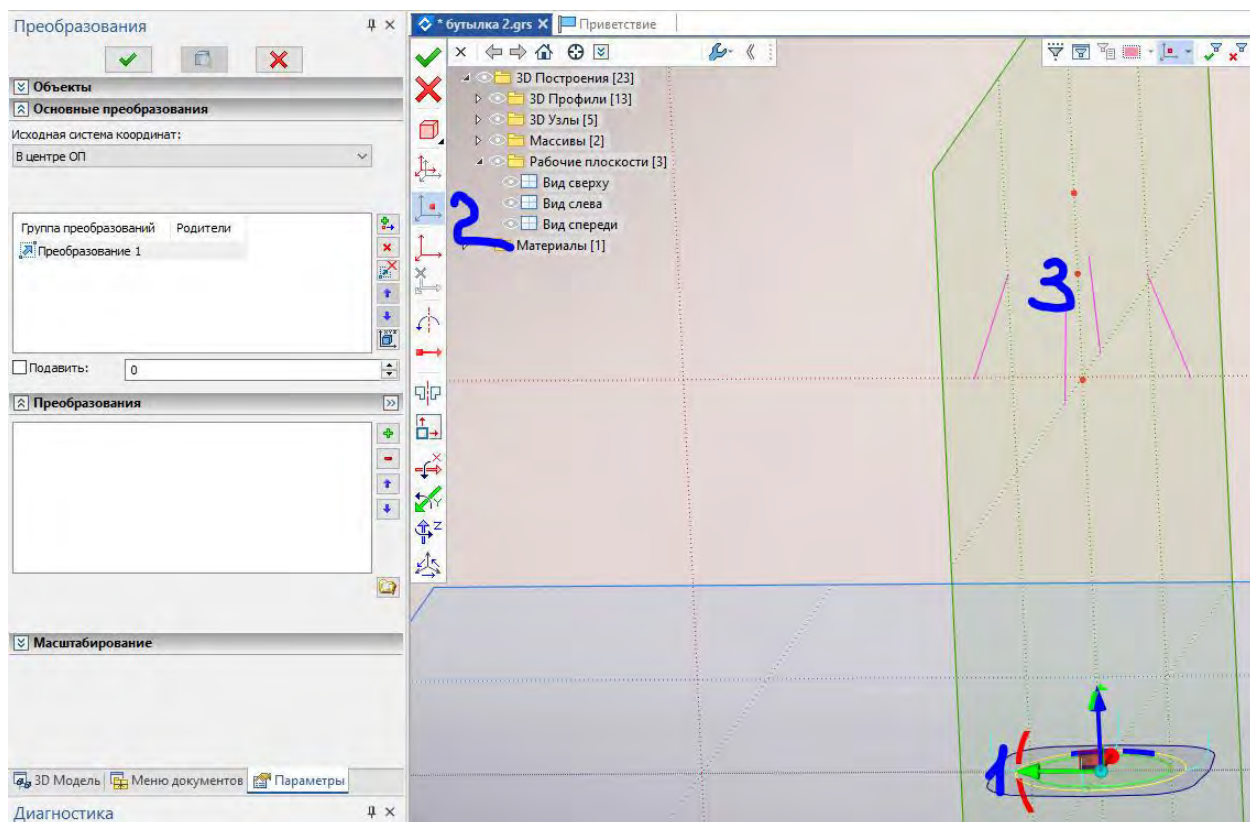


Рисунок 5.21 – Перемещение профилей

Для второго профиля бутылки используем инструмент «Копия» . Порядок действий показан на рисунке 5.22.

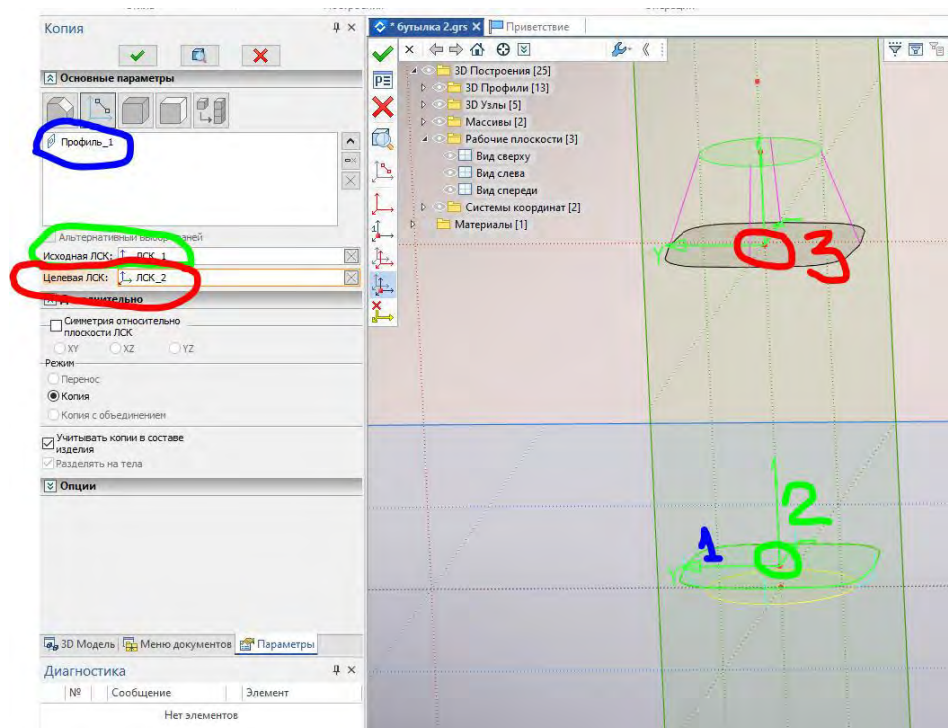


Рисунок 5.22 – Операция «Копия»

5.3 Операция «По сечениям»

Операция «По сечениям» предназначена для создания тел или поверхностей сложной пространственной формы на основе набора поперечных сечений.

В качестве базовых элементов могут выступать геометрические объекты трех типов:

- точки,
- проволочные кривые (замкнутые или разомкнутые),
- поверхности или грани.

Результат операции определяется типом исходных сечений и настройками: при использовании замкнутых плоских контуров формируется твердое тело, в остальных случаях – поверхностная структура.

Формирование результирующей геометрии осуществляется с учетом:

- заданных направляющих кривых, управляющих траекторией перехода между сечениями,
- условий соответствия точек (позволяющих контролировать топологию развертки),
- граничных условий (касание, кривизна, направление нормалей).

В состав операции встроен оптимизационный модуль, который при наличии аналитически описываемых форм (цилиндрических, конических, сферических и др.) стремится заменить сплайновые аппроксимации на точные аналитические поверхности. Это повышает точность модели, упрощает последующую обработку в САМ-системах и улучшает совместимость с другими CAD-приложениями.

По ранее полученным профилям создадим твердотельную модель.

Выбираем операцию «По сечениям»  По сечениям .

Далее необходимо выбрать те сечения, которые участвуют в образовании 3D-тела. Причем указываем их в порядке размещения в пространстве. Так как у нас есть переход с окружности на сложную форму, появляется следующее окно (рисунок 5.23). Подтверждаем.

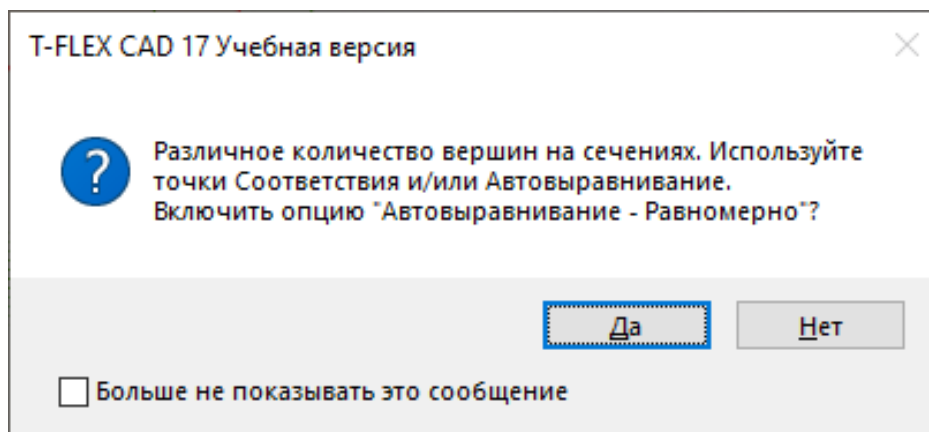


Рисунок 5.23 – Переход формы

При создании тела по сечениям важно выбирать профили, указывая точки примерно в одном и том же месте, т. к. при произвольном указании точек может получиться несоответствие профилей (рисунок 5.24).

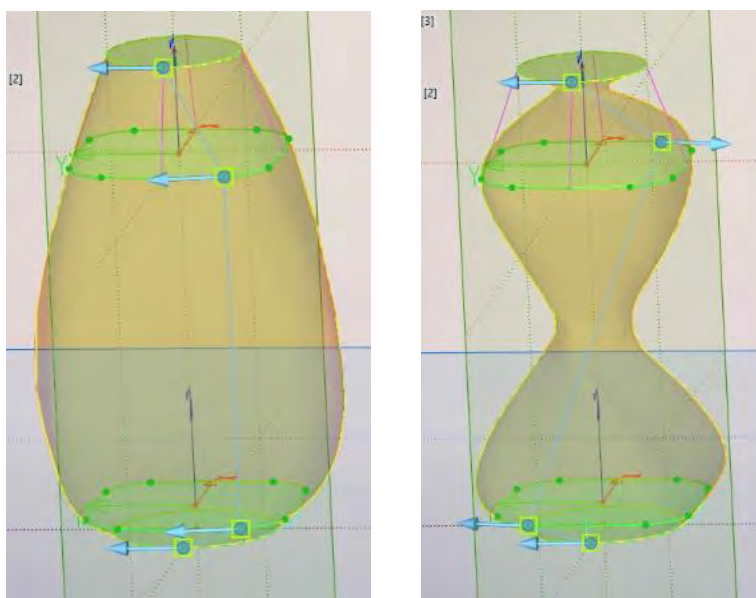


Рисунок 5.24 – Различный результат операции «По сечениям»

Исправить неудачный вариант можно с помощью вкладки «Соответствие» операции «По сечениям» (рисунок 5.25). В синхронизации выбираем позицию «По минимальному расстоянию».

Готовый результат операции «По сечениям» на рисунке 5.26.

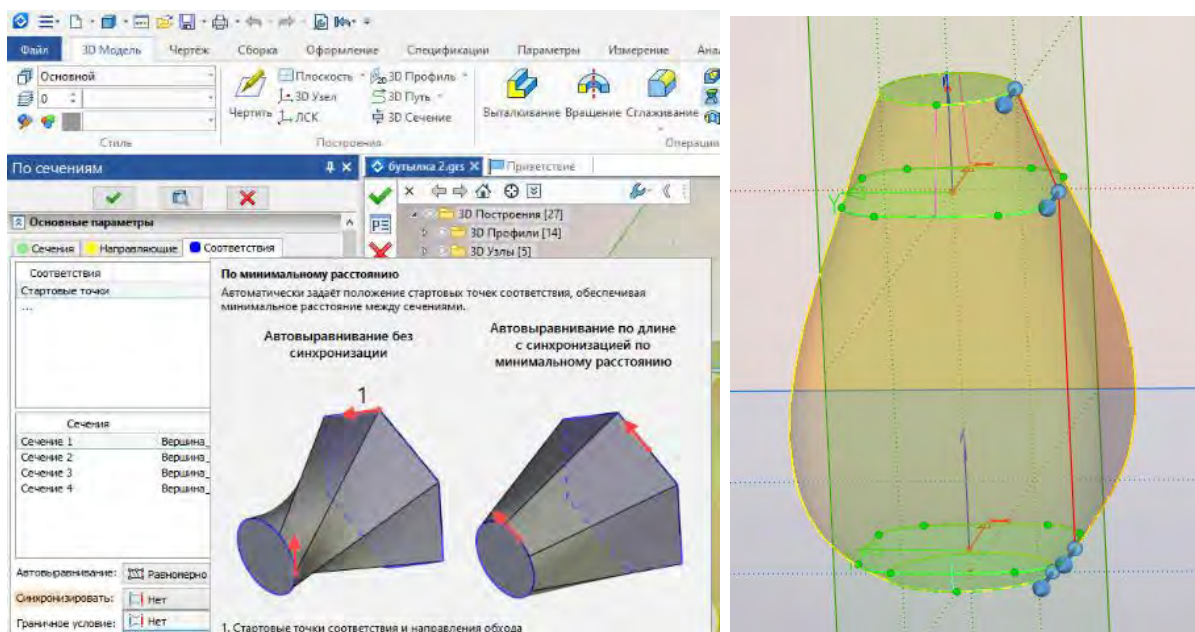


Рисунок 5.25 – Синхронизация профилей операции «По сечениям» и результат синхронизации

Боковой профиль тела по сечениям можно задать с помощью «Направляющих». В качестве направляющих возьмем созданный массив. В некоторых случаях может возникнуть ошибка генерации. Обойти эту проблему можно либо точной привязкой профилей и направляющих, либо созданием нескольких простых тел из двух сечений и их последующим сложением.

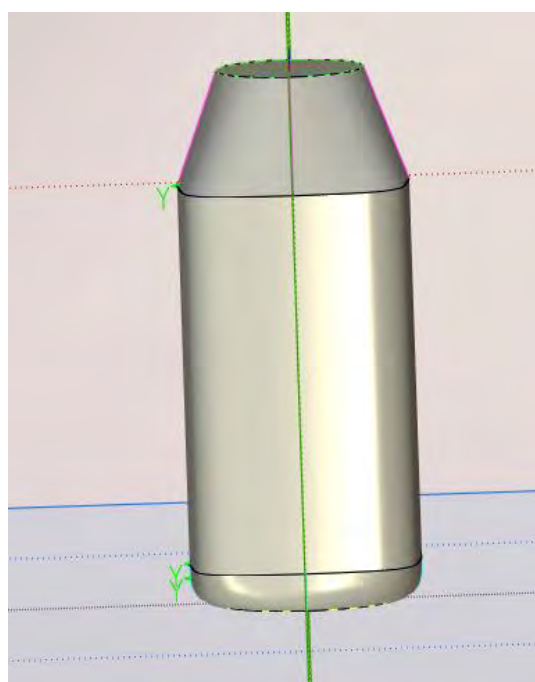


Рисунок 5.26 – Результат операции «По сечениям»

5.4 Операция «По траектории»

Операция «По траектории» позволяет создавать трехмерную геометрию путем перемещения исходного профиля (контура) вдоль заданной пространственной траектории с возможным использованием одной или нескольких направляющих кривых. Данная операция относится к классу кинематических методов моделирования, где результирующий объект представляет собой объем или поверхность, описываемую следом движения сечения в пространстве.

Исходный контур может быть задан в виде проволоочной геометрии (замкнутой или разомкнутой кривой) либо в виде поверхностного тела. В зависимости от типа контура и параметров операции результатом может быть либо твердотельная модель, либо поверхностная структура.

В практике проектирования выделяют два основных варианта применения операции:

- формирование тела по направляющим – когда форма сечения деформируется в соответствии с профилем нескольких направляющих кривых;
- формирование тела по траектории – когда контур перемещается вдоль единственной пространственной кривой.

В процессе перемещения возможно управление кинематическими параметрами сечения, включая:

- ориентацию (угловое положение относительно траектории – с сохранением нормали, заданной плоскости или по закону Френе);
- кручение (вращение контура вокруг касательной к траектории по заданному закону);
- масштабирование (изменение размеров сечения вдоль траектории по линейному или нелинейному закону).

Такой уровень контроля над геометрией движения обеспечивает высокую гибкость при проектировании сложных форм от аэродинамических поверхностей и трубопроводов до эргономичных корпусов и декоративных элементов и широко применяется в промышленном дизайне, машиностроении и архитектурном моделировании.

Создадим рукоятку рычага.

Сначала создадим 3D-путь, по которому будет создаваться твердотельное тело. Профиль выполняем на виде «Спереди», привязка линий построения к началу координат. Размеры и профиль эскиза указаны на рисунке 5.27.

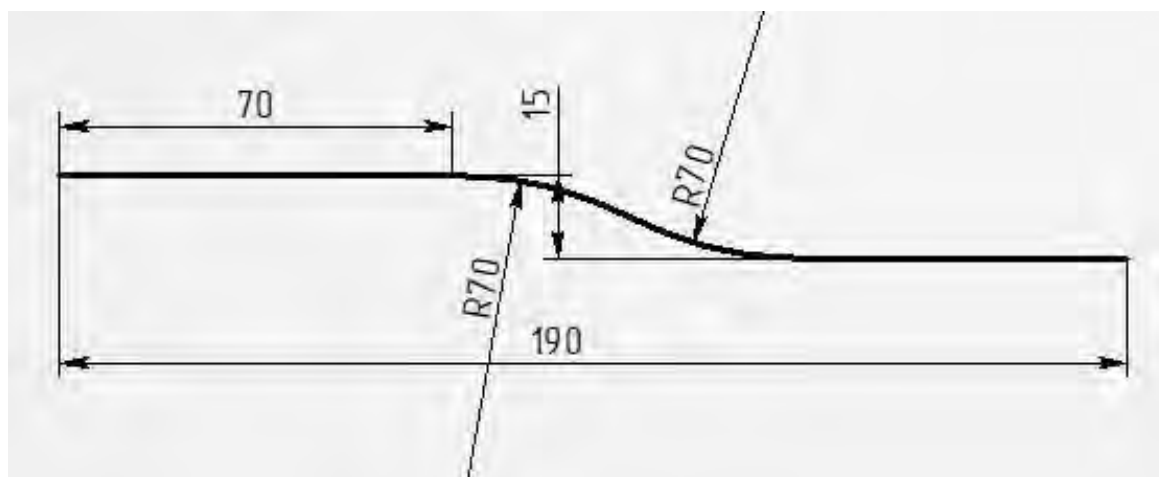


Рисунок 5.27 – Профиль рукоятки

Затем на виде «Слева» создадим профиль, который будет перемещаться вдоль траектории (рисунок 5.28).

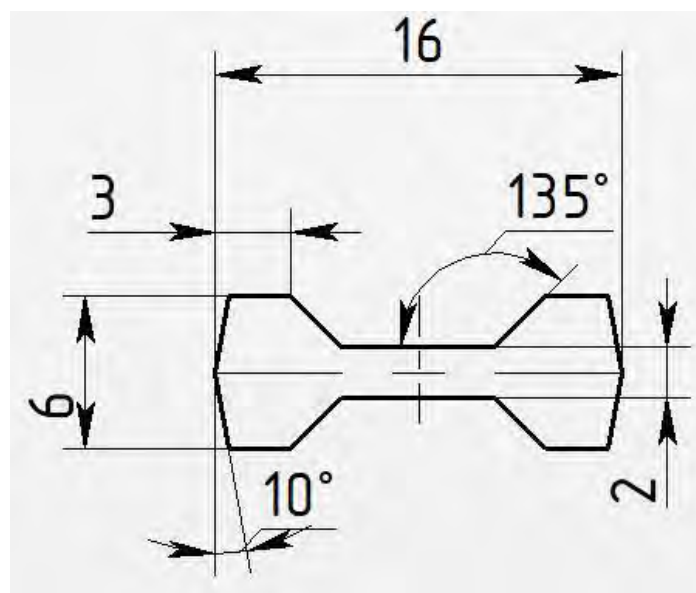


Рисунок 5.28 – Поперечный профиль рукоятки

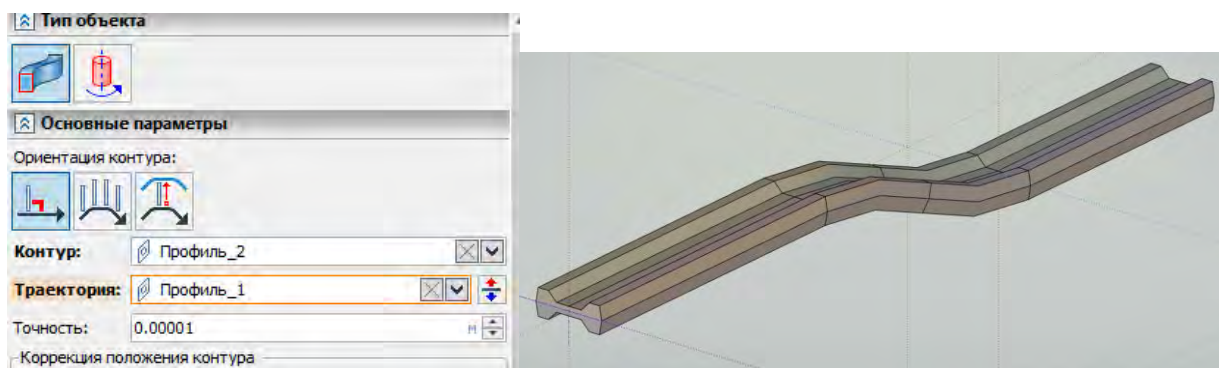


Рисунок 5.29 – Параметры и результат операции «По траектории»

К ребрам во время операции можно применить сглаживание (рисунок 5.30).

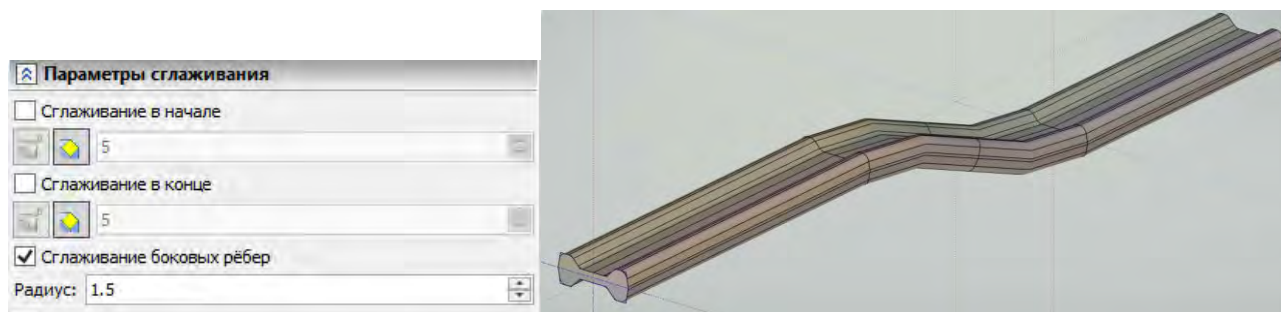


Рисунок 5.30 – Параметры и результат операции «По траектории» со сглаживанием ребер

6 РАСШИРЕННЫЕ ОПЕРАЦИИ В T-FLEX CAD

Сделаем резьбу на горлышке бутылки (рисунок 6.1), полученной в предыдущих главах, с помощью операции «Спираль». И сделаем бутылку полый с помощью операции «Оболочка».



Рисунок 6.1 – Пример горлышка с резьбой

К верхней грани применим выталкивание до 3D-узла 1 и с помощью булевой операции «приклеим» его к предыдущему телу.

6.1 Операция «Оболочка»

Операция предназначена для преобразования массивного твердого тела в тонкостенную конструкцию заданной толщины. Результатом является полое тело, стенки которого формируются путем смещения исходных поверхностей на фиксированное или переменное расстояние, при этом одна или несколько граней могут быть исключены из операции (например, для создания технологических отверстий или доступа внутрь полости).

Принцип формирования оболочки основан на построении эквидистантных (равноудаленных) поверхностей относительно каждой выбранной грани исходного тела. Смещение выполняется вдоль нормали к поверхности и может быть направлено:

- наружу: увеличение габаритов тела;
- внутрь: формирование внутренней полости;
- в обе стороны: симметричное утолщение стенок.

Базовое значение толщины стенки задается глобально для всего тела, однако система поддерживает локальную корректировку параметров смещения для отдельных граней. Это позволяет моделировать конструкции с переменной

толщиной стенок, что особенно актуально при проектировании изделий, подчиняющихся требованиям прочности, жесткости или технологичности литья и штамповки.

Объем, заключенный между исходными поверхностями и их эквидистантными копиями, формирует замкнутую полость, ограниченную сплошными стенками. При исключении одной или нескольких граней полость становится открытой, что соответствует реальным конструктивным решениям (корпуса с крышками, кожухи, емкости и т. п.).

Операция «Оболочка» широко применяется в машиностроении, промышленном дизайне и аддитивных технологиях, где критически важны снижение массы изделия, экономия материала и соблюдение требований к тонкостенным конструкциям. Благодаря параметрической природе операции, любое изменение толщины или геометрии исходного тела автоматически приводит к перестроению оболочки с сохранением целостности модели.

Операция «Оболочка» находится в панели «Расширенные»  Оболочка.

В качестве грани указываем «верх бутылки», т. е. ту грань, где потом будет горлышко (рисунок 6.2).

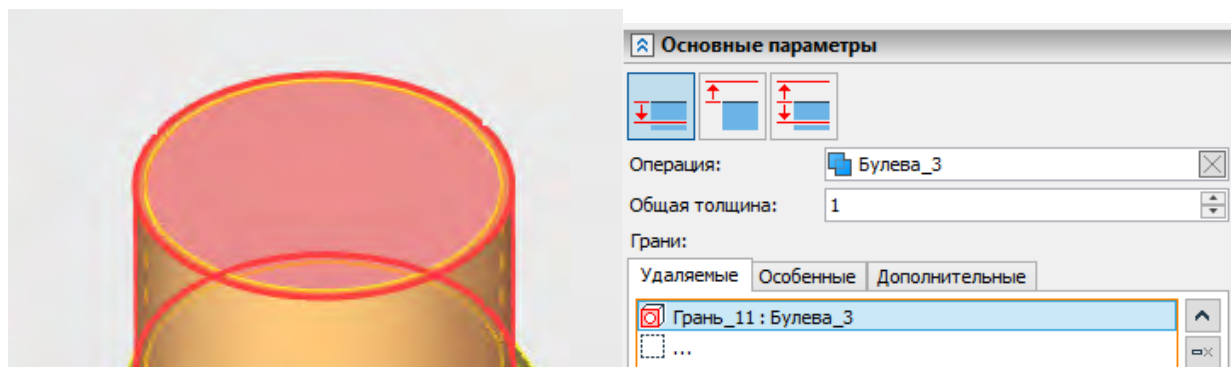


Рисунок 6.2 – Параметры операции

Формирование оболочки можно сделать внутрь (1), наружу (2) или симметрично (3). Общая толщина – это толщина «пластика» нашей бутылки. Поставим 1 мм.

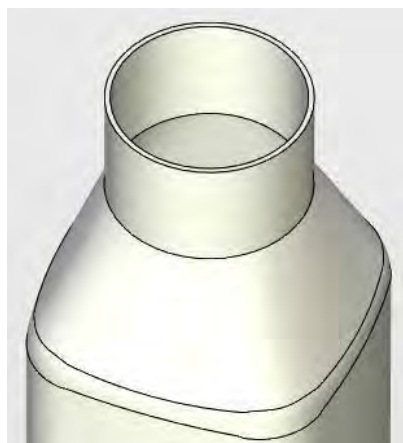


Рисунок 6.3 – Результат операции

6.2 Операция «Спираль»

На виде спереди создадим новый профиль. Это будет профиль резьбы. Добавим два 3D-узла (рисунок 6.4).

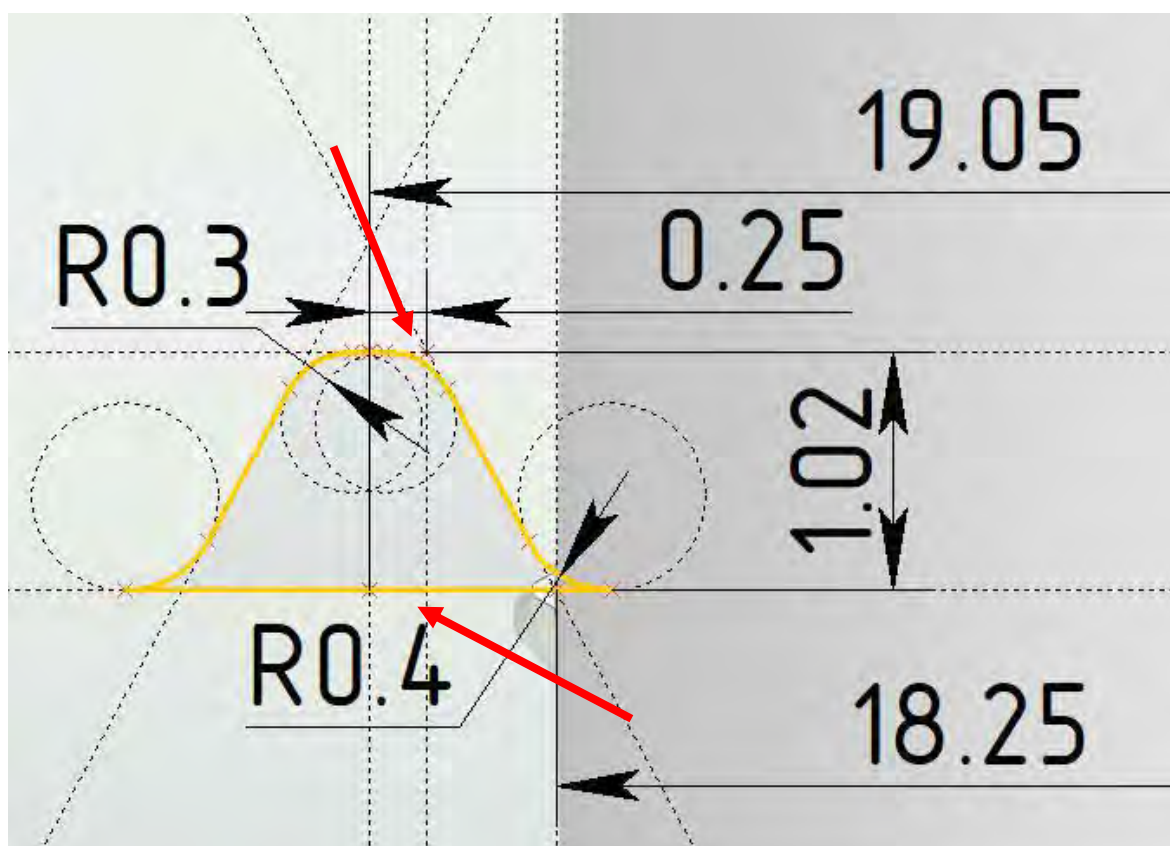


Рисунок 6.4 – Профиль резьбы

Завершаем эскиз (рисунок 6.5).

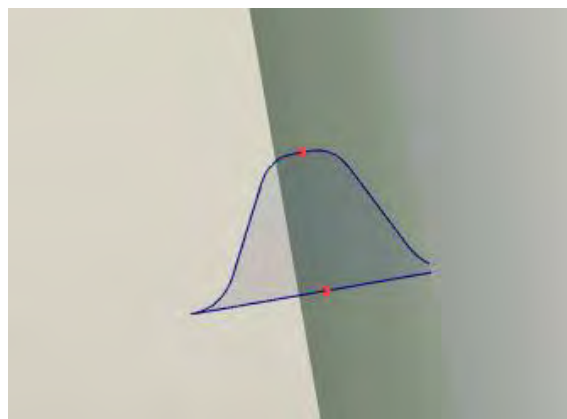
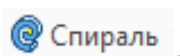


Рисунок 6.5 – Профиль резьбы с 3D-узлами

Выбираем инструмент «Спираль» на панели «Расширенные»



Далее мы можем строить спираль вдоль оси по двум точкам, по пути, по оси, по точке и направлению (рисунок 6.6).

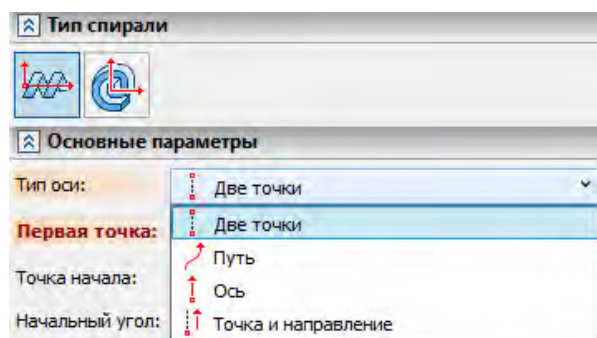


Рисунок 6.6 – Параметры команды «Спираль»

Выберем тип оси «Две точки». Укажем 3D-узлы для формирования оси спирали (рисунок 6.7).

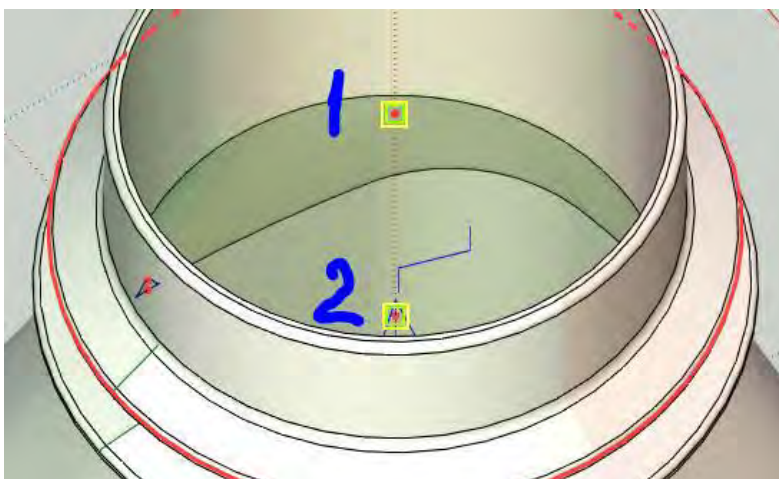


Рисунок 6.7 – Выбор 3D-узлов

Укажем контур, точку привязки и направление (рисунок 6.8).

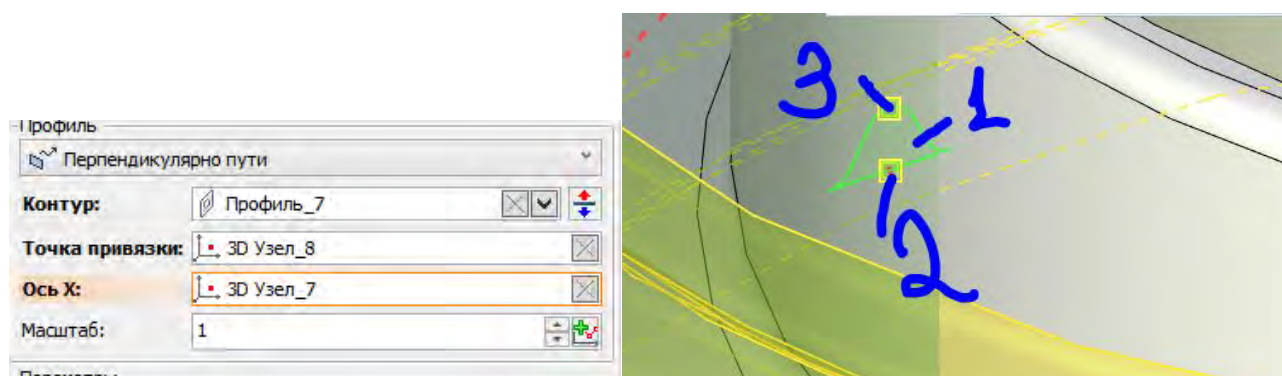
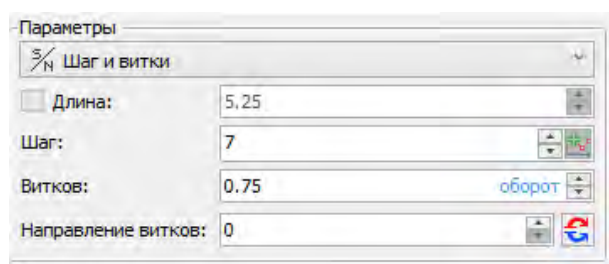
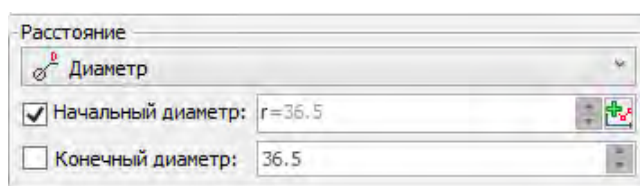


Рисунок 6.8 – Задание профиля и направления резьбы

В параметрах укажем Шаг и витки, шаг 7, витки 0,75, направление 0 (по часовой стрелке) (рисунок 6.9, а) и укажем диаметр спирали (рисунок 6.9, б).



а)



б)

Рисунок 6.9 – Параметры спирали

На предпросмотре можно увидеть предварительный результат команды (рисунок 6.10).

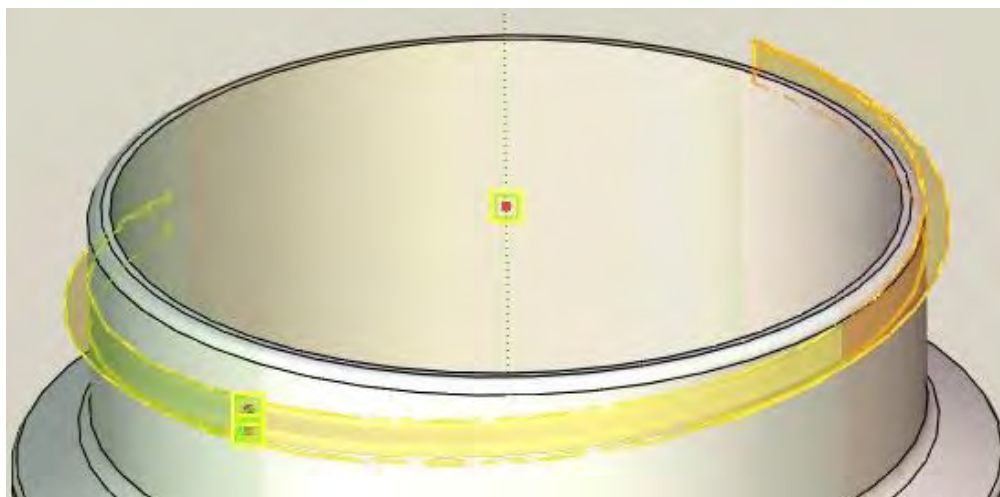


Рисунок 6.10 – Предварительный результат команды «Спираль»

Укажем точку начала спирали (рисунок 6.11).

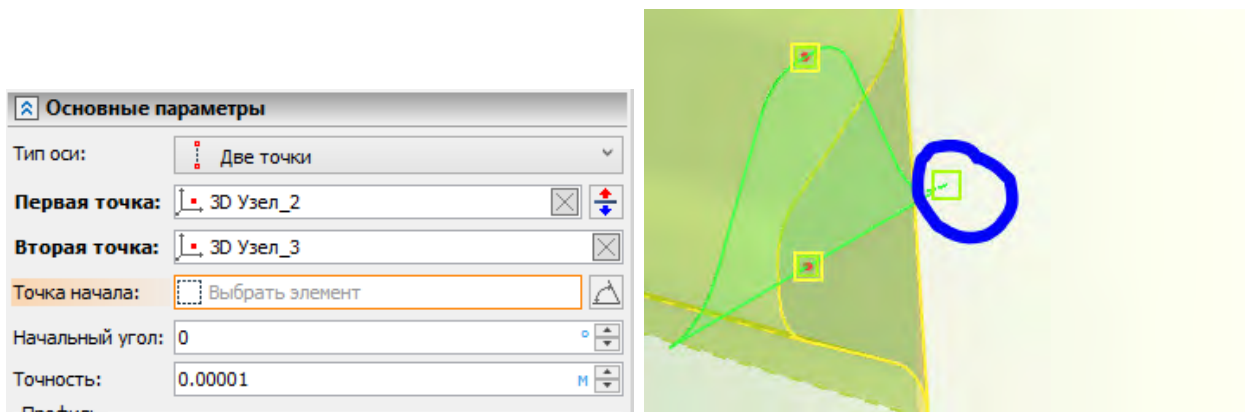


Рисунок 6.11 – Редактирование положения профиля резьбы

Для более реального профиля резьбы сделаем плавное уменьшение профиля до плоскости. Для этого зададим график изменения масштаба (рисунок 6.12).

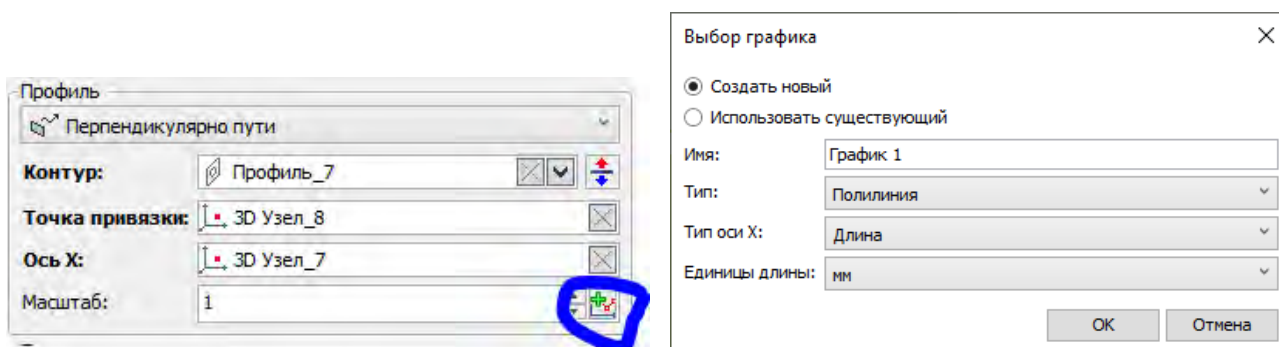


Рисунок 6.12 – Задание графика изменения масштаба

В начале и в конце спирали он минимальный, а на основной длине – равен 1. Можно задать точки следующим образом (рисунок 6.13) или сделать более плавный переход. Или можно задать функцию изменения масштаба. На рисунке 6.14 показано плавное сужение профиля резьбы по заданному графику изменения масштаба.

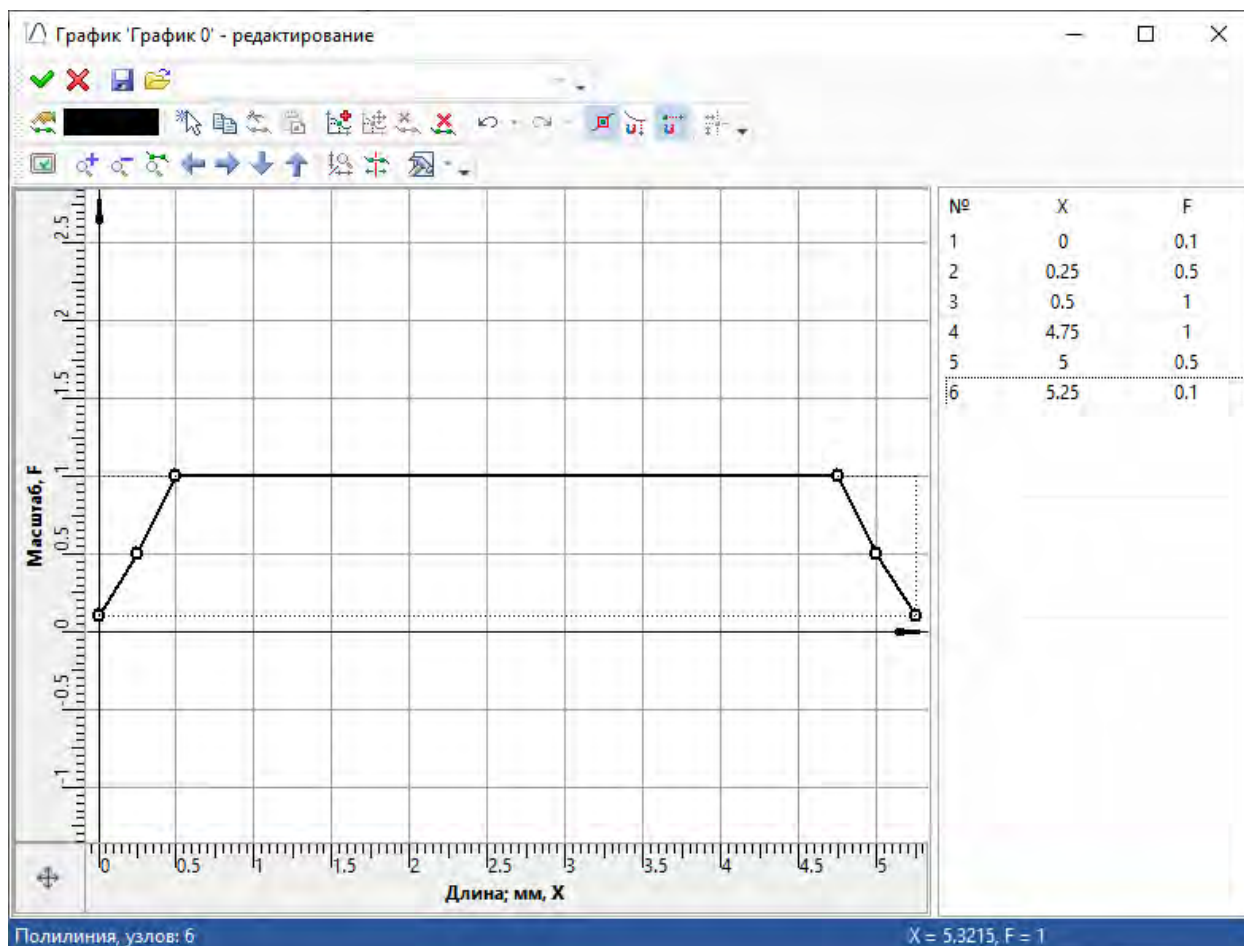


Рисунок 6.13 – График изменения масштаба

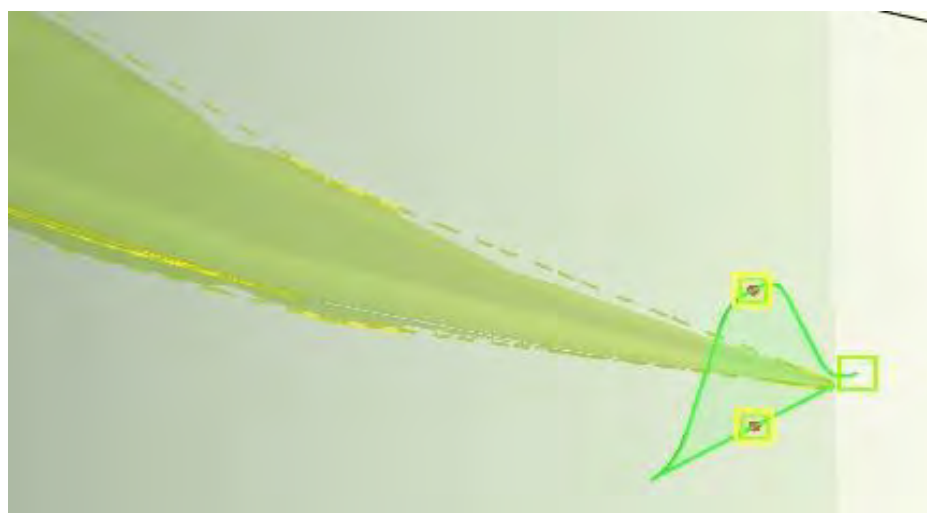


Рисунок 6.14 – Результат команды

Для второй спирали параметры такие же, кроме начального угла. Сдвигаем спираль на 180. Для масштаба используем существующий график (График 0) (рисунок 6.15).

Тип спирали

Основные параметры

Тип оси: Две точки

Первая точка: ☐ Ребро_36 : Булева_5

Вторая точка: ☐ 3D Узел_3

Точка начала: ☐ Вершина_29 : Профиль_7

Начальный угол: 180

Точность: 0.00001

Профиль

 Перпендикулярно пути

Контур: ☐ Профиль_7

Точка привязки: ☐ 3D Узел_8

Ось X: ☐ 3D Узел_7

Масштаб: 1=График 0

Параметры

☒ Шаг и витки

☐ Длина: 5.25

Шаг: 7

Витков: 0.75 оборот

Направление витков: 0

Расстояние

☒ Диаметр

☒ Начальный диаметр: r=36.5

☐ Конечный диаметр: 36.5

Рисунок 6.15 – Параметры второй спирали

7 СБОРКА

Каждый документ системы T-FLEX CAD 3D, содержащий трехмерную модель, может быть вставлен в другую трехмерную модель в качестве детали. Собранная таким образом модель называется сборочной. Также в сборке можно использовать внешние модели, импортированные из других систем в соответствующем формате.

В сборочном документе хранятся связи с файлом фрагмента. При изменении файла фрагмента происходит автоматическое их обновление и, соответственно, меняется компонент сборочной модели. Каждый фрагмент может иметь внешние переменные, которые управляют параметрическими связями детали. В любой момент можно изменить сам файл детали-фрагмента, либо задать другие значения внешних переменных фрагмента. Во втором случае файл фрагмента не изменяется, а компонент сборки пересчитывается в соответствии со значениями внешних переменных.

Для каждого фрагмента в своем файле можно заполнить данные для спецификации. В этом случае после создания сборочной модели можно автоматически получить спецификацию.

По сборочной модели можно получить чертежи, спроецировав необходимые виды, разрезы, сечения, затем проставить требуемые размеры и элементы оформления.

Для создания сборочной 3D-модели методом «снизу-вверх» используются заранее созданные отдельные компоненты сборки – 3D-фрагменты. Создание сборки начинается с прототипа «3D-Сборка», в ленте выбираем соответствующие команды для вставки 3D-фрагментов (рисунок 7.1). Фрагменты можно вставлять готовые из файла, создавать непосредственно в файле сборки, добавлять ссылку фрагмент (рекомендуется только для использования на одном рабочем месте без переноса файлов), делать единичные и множественные копии фрагментов.

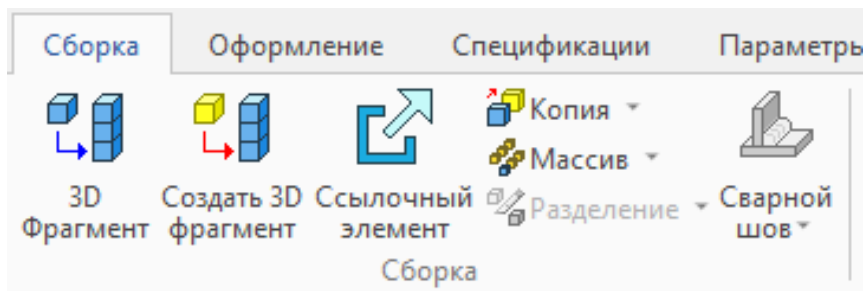


Рисунок 7.1 – Команды ленты «Сборка»

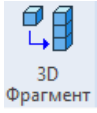
При создании сборочной 3D-модели используются локальные системы координат для сборки и сопряжения для проверки работы сборки.

Примечание: использование локальных систем координат позволяет создавать сборки при условии, что для каждого 3D-фрагмента глобальные системы координат определены правильно и привязаны к конструктивным элементам фрагмента.

7.1 Создание сборки с помощью ЛСК

Рассмотрим сборку через ЛСК на примере ролика в учебном пособии T-Flex CAD. Сборочная модель состоит из основания, двух опор, двух втулок, оси и ролика. Модели для сборки находятся в файлах учебного пособия.

При создании 3D-сборок для вставки детали или сборочной единицы

используется операция «3D-Фрагмент» . Для выбора фрагмента из файла используем команду «Выбрать файл» . Из списка файлов выберем «Основание». Вставка 3D-фрагмента будет выполнена в абсолютных координатах. Подтверждаем команду .

Фрагменты в сборку можно добавлять и без вызова команды «Выбрать файл» методом drag&drop (перетаскивание) из «Меню документов» на поле 3D-пространства.

Следующим фрагментом добавим опору. И укажем ей ЛСК для привязки (рисунок 7.2).

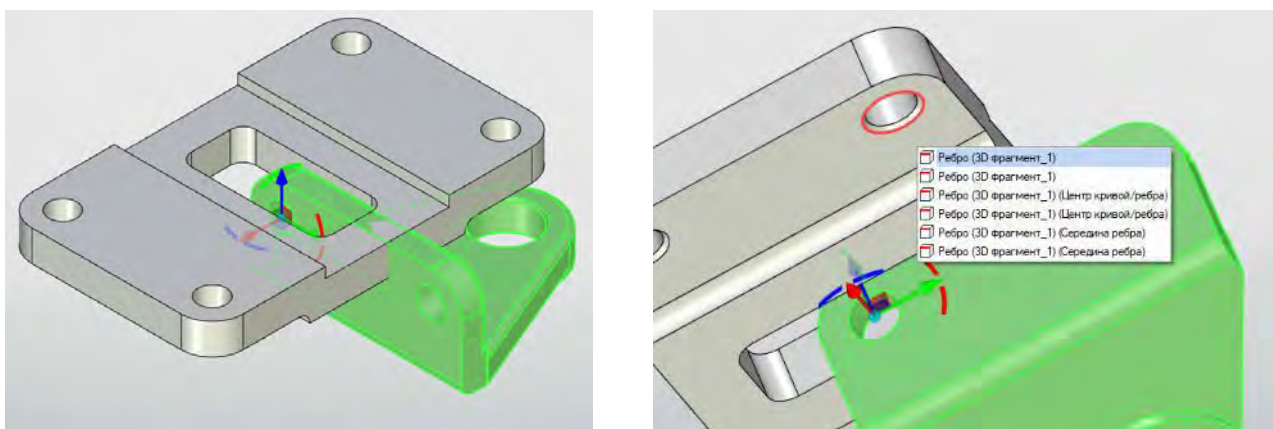


Рисунок 7.2 – Выбор элемента основания для привязки опоры

Если в сборке используется несколько одинаковых фрагментов их можно вставить командой «Повторить предыдущий фрагмент» . Вставим вторую опору и зафиксируем ее у второго отверстия.

Таким же способом вставим две втулки. Привязку ЛСК делаем к опоре (рисунок 7.3).

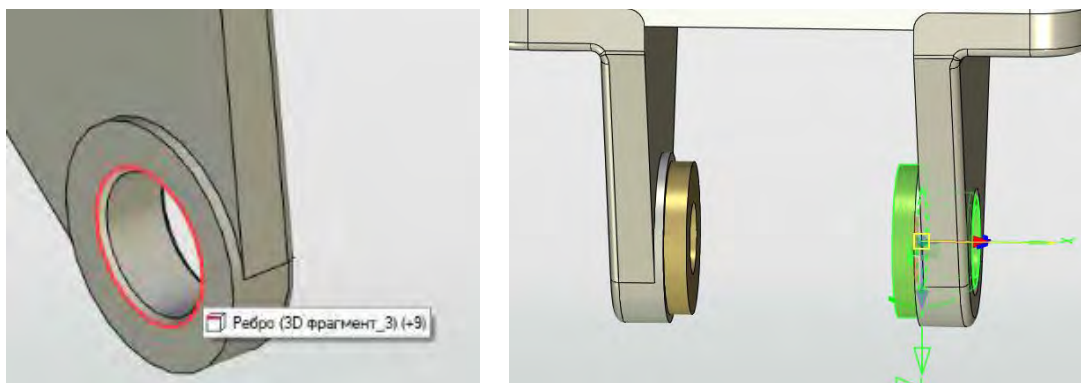
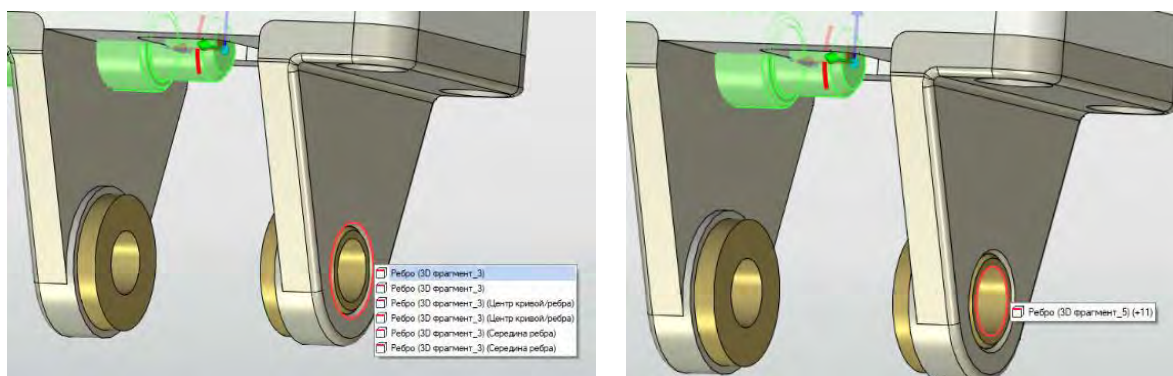


Рисунок 7.3 – Вставка втулок

Ось привяжем либо к опоре (рисунок 7.4, а), либо к втулке (рисунок 7.4, б).



а)

б)

Рисунок 7.4 – Привязка фрагмента «Ось»

У ролика исходная система координат находится в центре модели, поэтому привязывать его будем к ЛСК оси (рисунок 7.5).

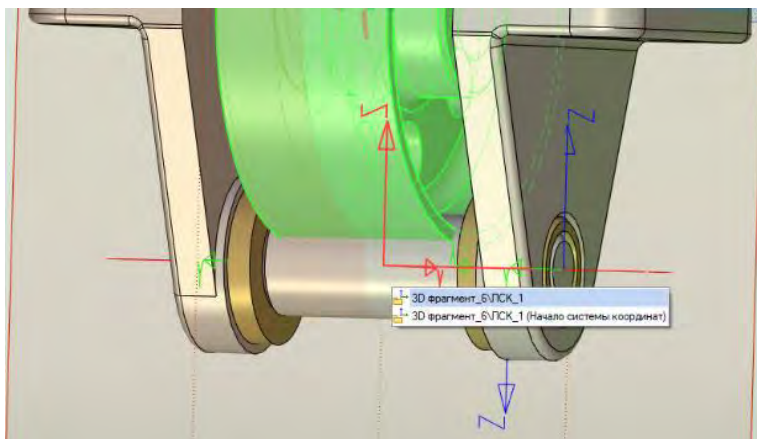


Рисунок 7.5 – Привязка ролика к ЛСК оси

Сборка собрана, но для проверки фрагментов на возможность перемещения необходимо задать степени свободы.

Зафиксируем основание (нет свободы перемещения). Выберем основание в окне «3D-Модель» или в 3D-пространстве и, кликнув правой кнопкой мыши, вызовем всплывающее меню и в «Сопряжения» выберем «Зафиксировать положение» (рисунок 7.6).

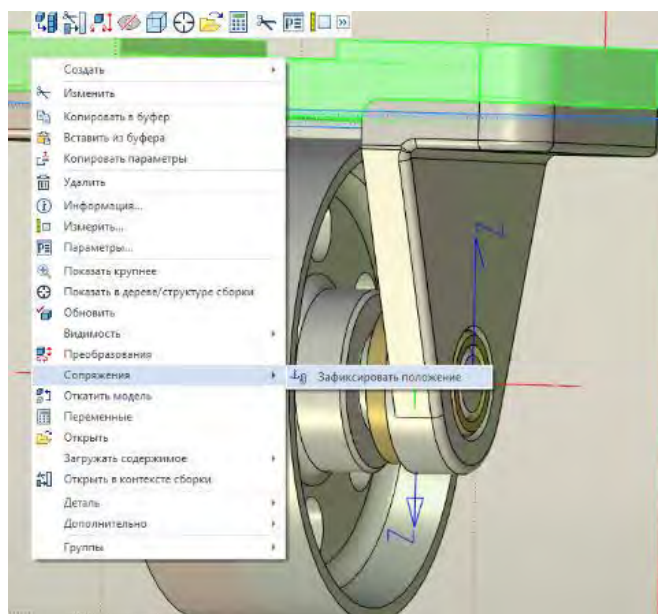


Рисунок 7.6 – Фиксация положения фрагмента

Степень свободы будет создана для фрагмента «Ось», этот фрагмент присоединен к неподвижной втулке, а ролик крепится к оси, т. е. неподвижен относительно оси.

Выберем ось и также в всплывающем меню вызовем параметры фрагмента. В закладках «Степени свободы» установим флаг «Поворот вокруг оси», ось X (рисунок 7.7).

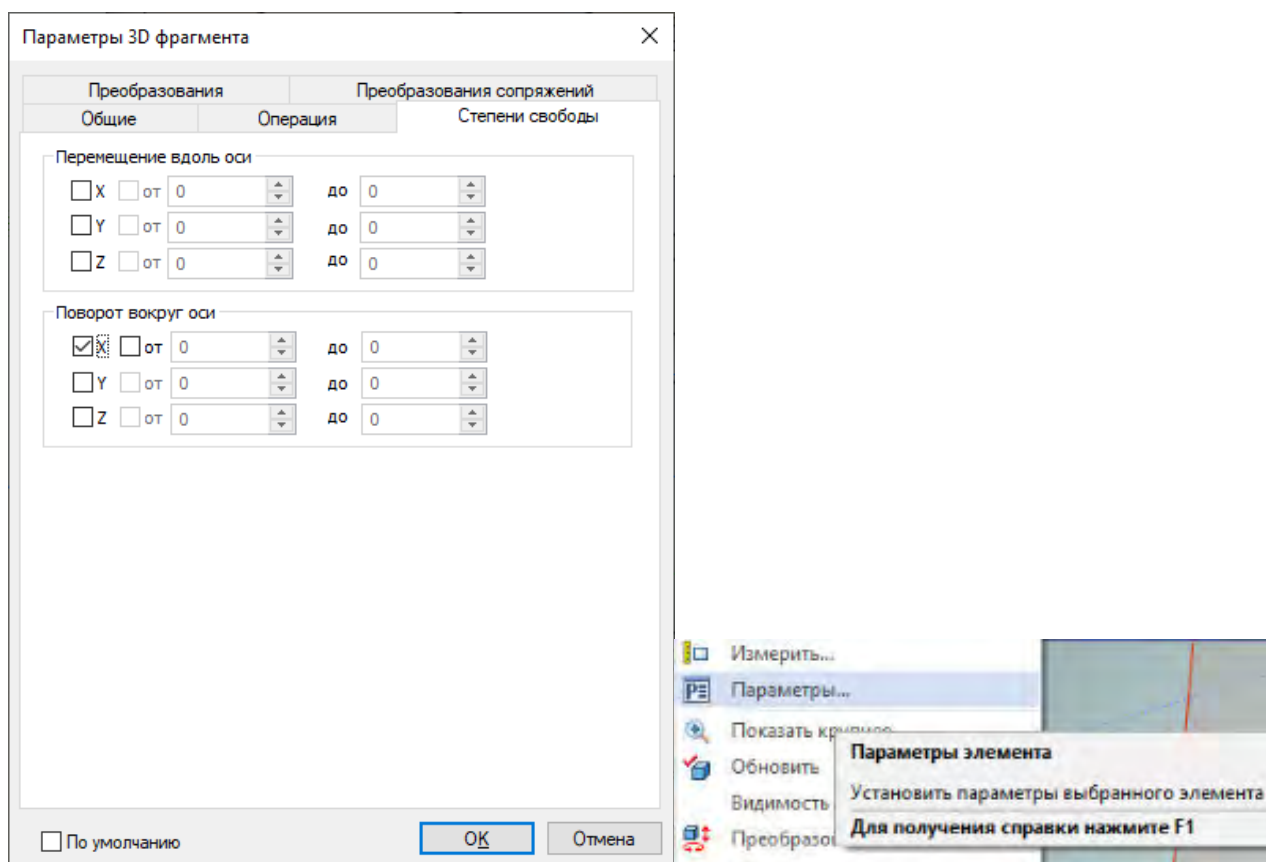


Рисунок 7.7 – Задание степеней свободы

Для проверки сборки выберем команду «Переместить»  во вкладке ленты «Сборка».

Теперь, если мы выберем и будем удерживать ролик, перемещая курсор, ролик будет вращаться вместе с осью.

7.2 Создание сборки с помощью сопряжений

Выбор и добавление фрагментов в сборку аналогичен предыдущему способу. Отличается только фиксация.

Добавим все фрагменты в сборку. Располагаем их в произвольном месте и порядке. Затем выберем команду «Создать»  в ленте «Сопряжение».

Для основания и опоры используем сопряжение «Соосность» отверстий (рисунок 7.8), при этом фиксируя основание.

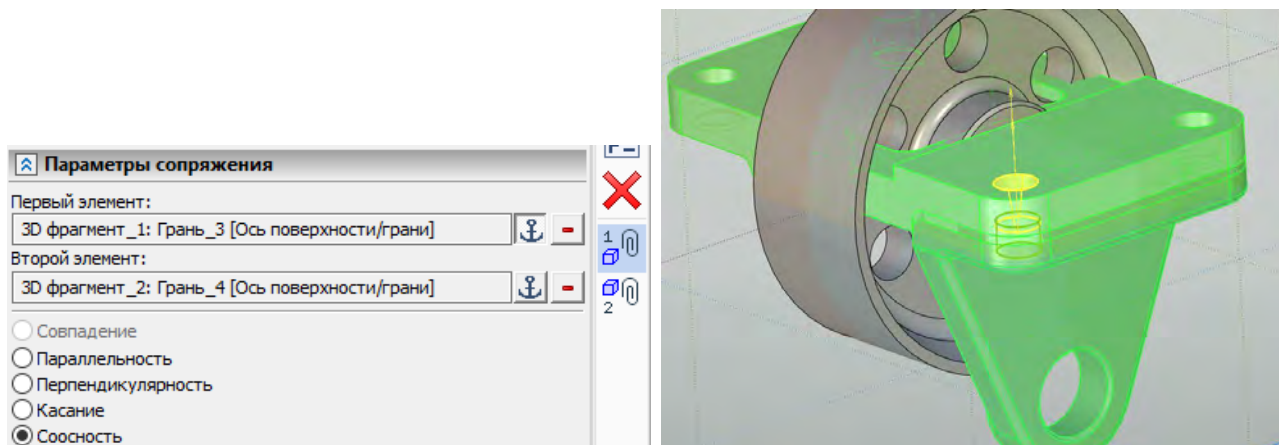


Рисунок 7.8 – Сопряжение «Соосность»

Для этих же фрагментов добавим еще два сопряжения: «Соосность» для второй пары отверстий и «Совпадение» плоских граней (рисунок 7.9).

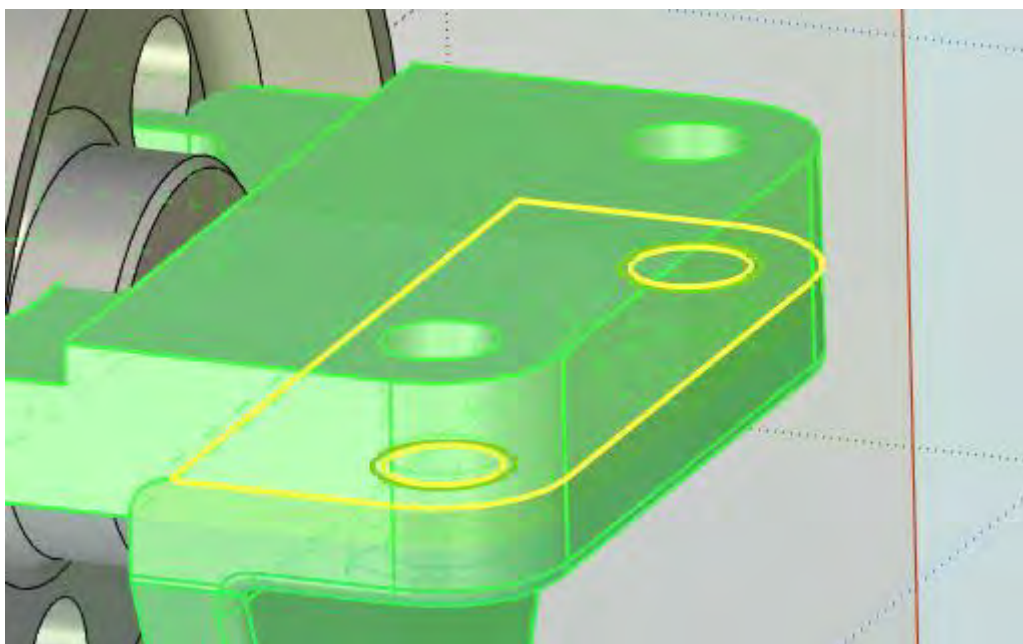


Рисунок 7.9 – Сопряжение «Совпадение»

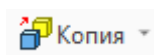
Для втулки и опоры используем сопряжения «Соосность» и «Совпадение».

Для оси и втулки используем сопряжения «Соосность» и «Совпадение».

Для оси и ролика используем сопряжения «Соосность» и «Совпадение».

Для ролика и опоры используем сопряжения «Расстояние».

Для создания второй опоры и втулки используем команду «Копия»

 . Укажем копируемые фрагменты, исходную и целевую ЛСК, симметрию относительно плоскости и подтвердим выбор (рисунок 7.10).

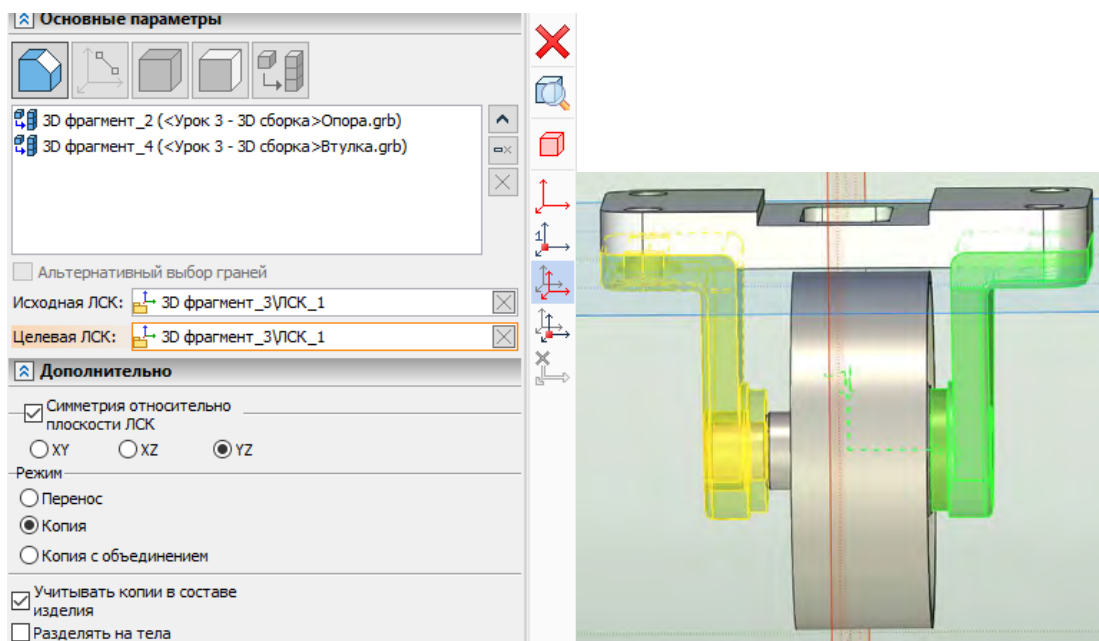


Рисунок 7.10 – Создание копии фрагментов

Проверяем сборку также через «Переместить».

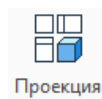
7.3 Создание сборочного чертежа по 3D-модели

T-FLEX CAD позволяет работать с чертежом и 3D-моделью в одном документе одновременно. Для того чтобы открыть 2D-страницу, в левом нижнем углу 3D-окна нажмем кнопку «Разделить по вертикали» .

При переключении между окнами можно увидеть автоматическое изменение набора команд «умной» ленты.

Для настройки масштаба чертежа, ориентации и формата листа, используются команды на панели «Вид» (рисунок 7.11).

Для автоматического построения чертежа используется команда



«Проекция», в которой можно выбрать отдельную проекцию для каждого вида или набор стандартных видов (рисунок 7.12). Результат построения по трем стандартным видам  показан на рисунке 7.13.

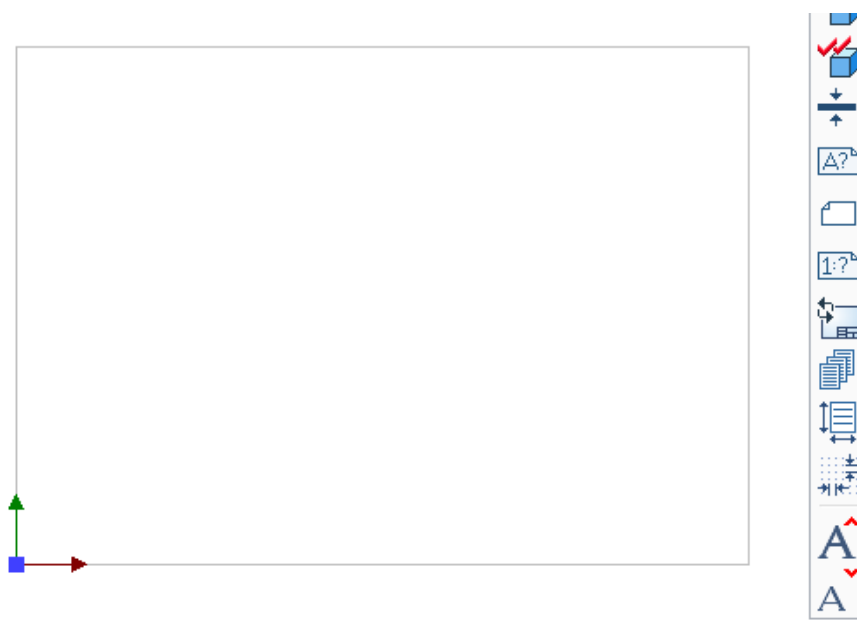


Рисунок 7.11 – Вид 2D-окна

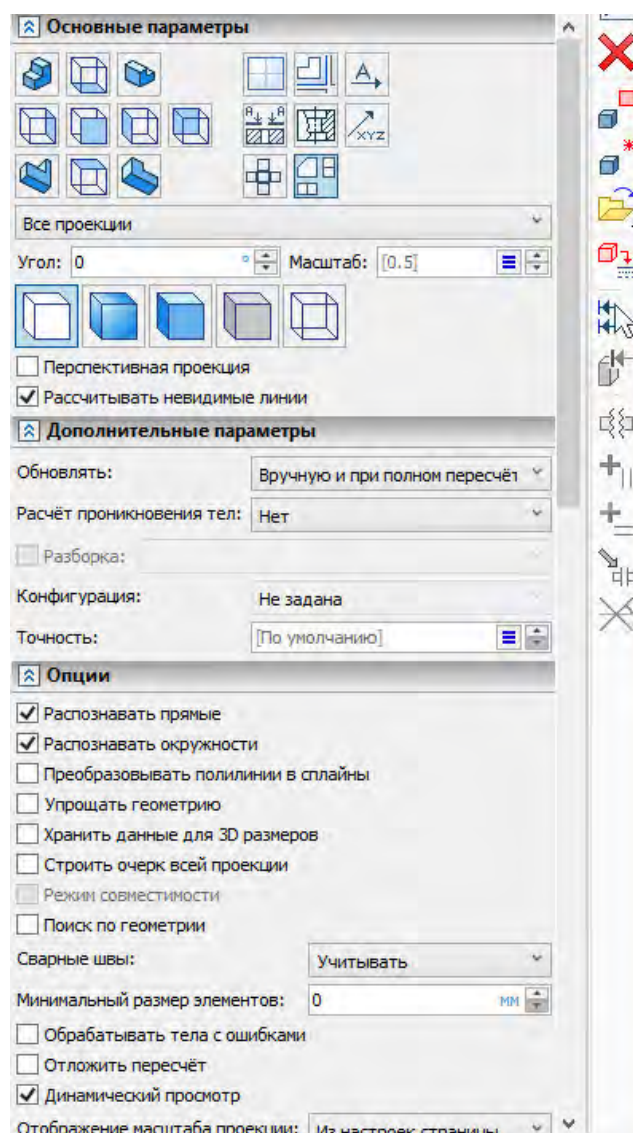


Рисунок 7.12 – Параметры команды «Проекция»

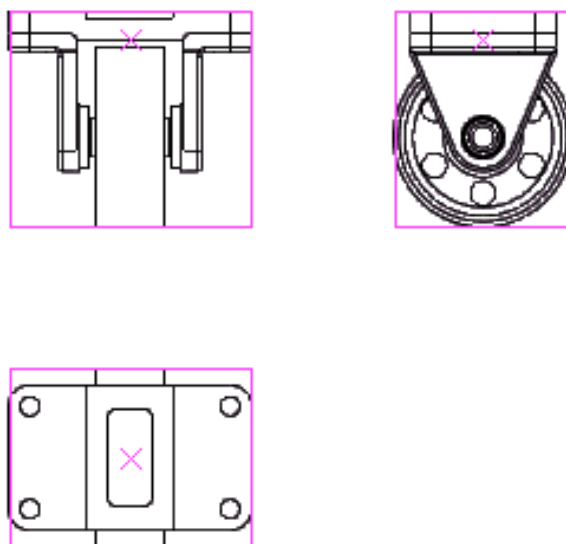
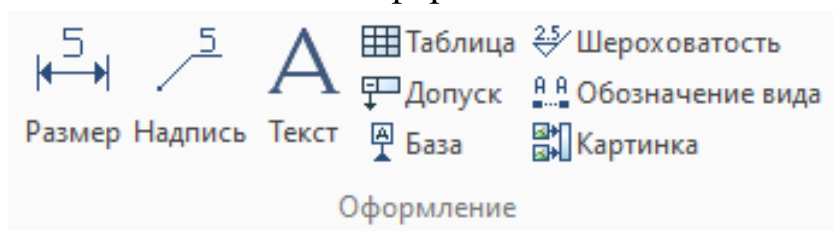


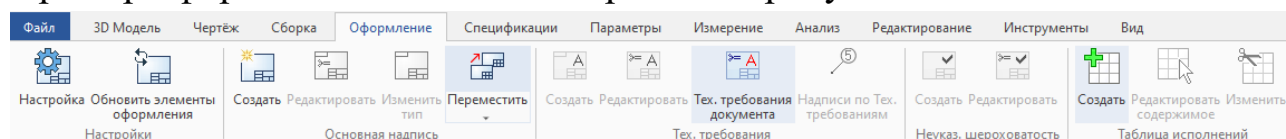
Рисунок 7.13 – Три стандартных вида сборочной модели

Основные элементы оформления чертежа (размеры, обозначения вида, надписи, текст, базы, допуски и т. д.) выполняются с помощью соответствующих команд вкладки «Оформление».



Для построения разрезов используются сечения  в команде «Проекция» или команда «Местный разрез» . Результат команд «Обозначение вида» и «Сечение» на рисунке 7.14.

Для оформления технической документации (основная надпись (рисунок 7.15), технические требования и неуказанная шероховатость) используются соответствующие команды на вкладке «Оформление». Пример оформленный по ГОСТ чертежа на рисунке 7.16



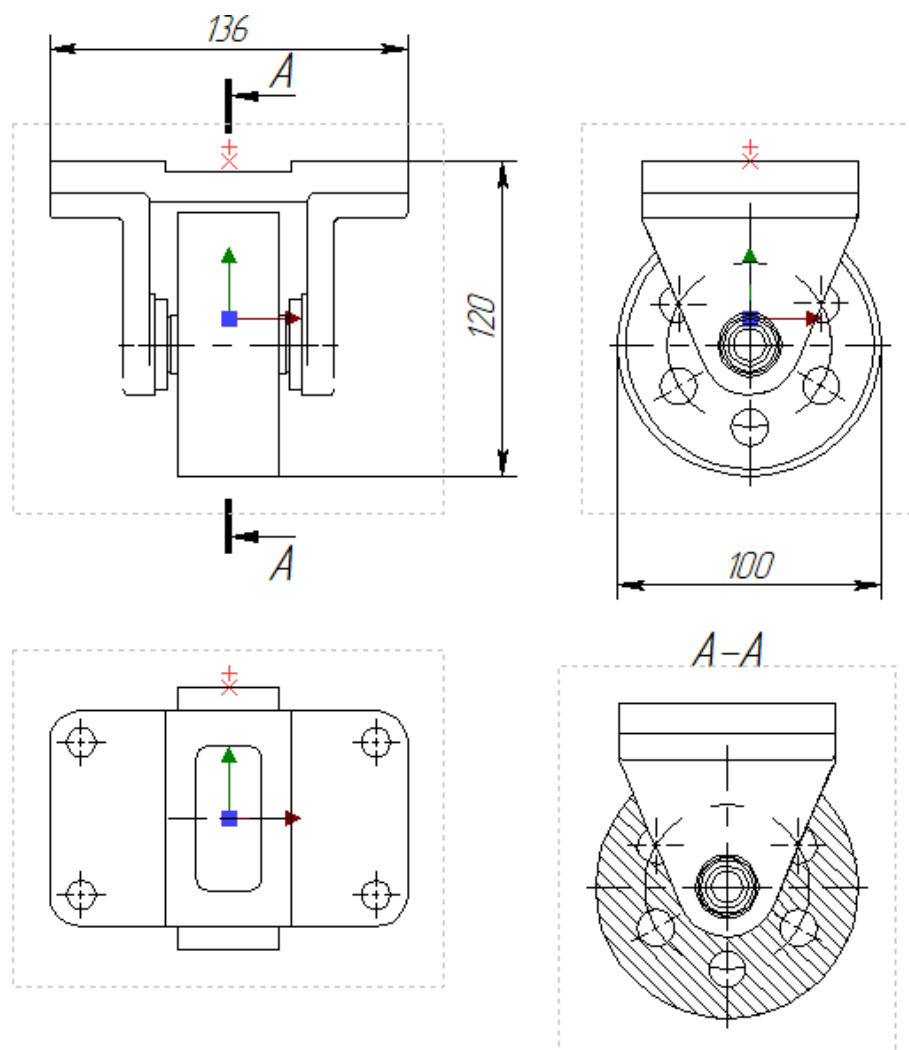


Рисунок 7.14 – Оформление чертежа

Конструкторский чертёж. Первый лист. ГОСТ 2.104-68

Основная надпись Дополнительные параметры

Тип документа: Чертеж Наименование документа: Сборочный чертёж

					СБ			
					Ролик			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб	
Разраб.	Иванов							
Провер.	Петров							
Т. контр.	Сидоров							
					Сборочный чертёж			
					Лист		Листов	1
					Ст0 ГОСТ 381			
Н. контр.	Кузнецов							
Утв.	Волков							

☐ Многострочное обозначение материала Копировал: Формат: А3

☐ Список переменных ☐ Просмотр

OK Отмена

Рисунок 7.15 – Создание основной надписи

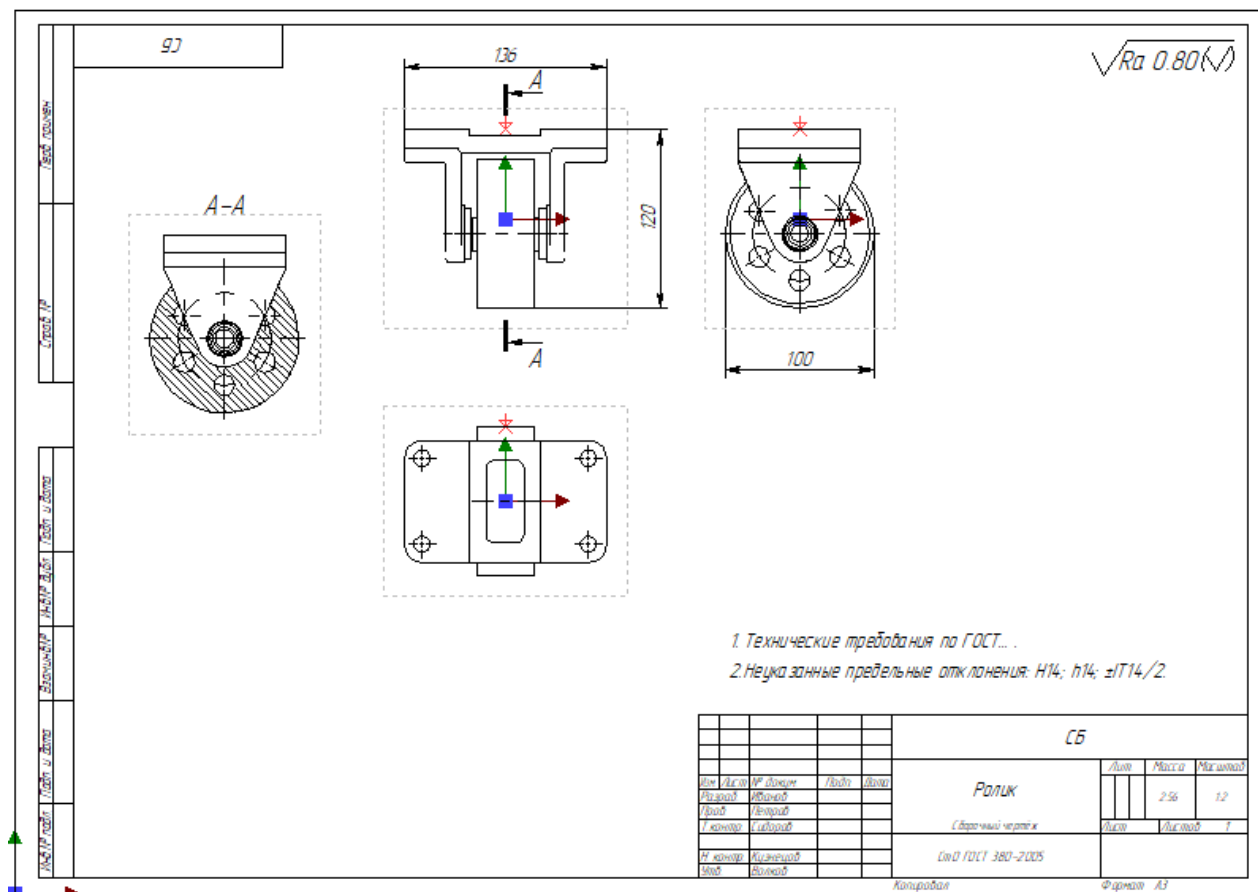


Рисунок 7.16 – Чертеж с оформлением (пример)

8 ПОНЯТИЕ РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГА

Реверс-инжиниринг (обратное проектирование) – это технологический процесс восстановления цифровой геометрической модели и/или комплекта конструкторской документации (КД) на основе физического образца изделия, при отсутствии или недоступности исходных проектных данных. В отличие от традиционного проектирования, где модель создается «с нуля» на основании технического задания, реверс-инжиниринг предполагает анализ существующего объекта с последующим извлечением его геометрических, топологических и функциональных характеристик.

Процедура включает сканирование изделия с использованием координатно-измерительных машин (КИМ), лазерных или оптических 3D-сканеров, обработку облака точек, построение полигональной или NURBS-поверхности, а также формирование точной параметрической 3D-модели в САД-среде. Параллельно выполняется замер ключевых размеров, анализ посадок, допусков и других технических параметров, необходимых для воссоздания полного комплекта КД в соответствии с требованиями ЕСКД.

Основная цель реверс-инжиниринга – оперативное получение достоверной и стандартизированной конструкторской документации (включая чертежи деталей и сборочных единиц, спецификации, 3D-модели и технические требования) для готового изделия. Эта документация служит основой для последующих этапов жизненного цикла продукта: изготовления, сертификации, ремонта, модернизации, восстановления утраченных компонентов или локализации производства.

Таким образом, реверс-инжиниринг представляет собой не просто копирование формы, а инженерный анализ и реконструкцию проектного замысла, обеспечивающий воспроизводимость изделия в условиях отсутствия исходных данных и соответствие современным стандартам проектирования и производства.

8.1 Этапы реверс-инжиниринга

Процесс обратного проектирования представляет собой последовательную цепочку операций, направленных на восстановление цифровой модели и конструкторской документации (КД) на основе физического образца изделия. Ниже приведены ключевые этапы данного процесса.

1) Предоставление исходных данных

Для инициализации работ исполнителю необходимо передать физический образец изделия и сопутствующую техническую информацию, включая:

- функциональное назначение детали;
- условия эксплуатации (температурный режим, нагрузки, агрессивность среды и др.);
- сопрягаемые компоненты и типы соединений;
- предполагаемый или известный материал.

Полнота исходных данных напрямую влияет на точность реконструкции и снижает риски ошибочной интерпретации геометрии или функциональных особенностей.

2) Измерение геометрии изделия

Существует два основных подхода к геометрическому анализу:

Контактные методы – с использованием штангенциркулей, микрометров, нутромеров, профилометров и координатно-измерительных машин (КИМ). Применяются преимущественно для деталей с простой геометрией, где достаточна точность ручных измерений. Результатом, как правило, служат двумерные эскизы с размерами.

Бесконтактные методы – основаны на 3D-сканировании с помощью лазерных, оптических или структурированных световых сканеров. Позволяют зафиксировать сложную свободную геометрию (аэродинамические поверхности, органические формы и т. п.). Результатом является облако точек, которое после постобработки (фильтрация шумов, триангуляция, сглаживание) преобразуется в полигональную (фасетную) модель.

В практике часто применяется комбинированный подход: 3D-сканирование обеспечивает полную геометрическую основу, а контактные измерения уточняют критически важные параметры: размеры сопрягаемых поверхностей, шероховатость, допуски формы и расположения. Эти данные вносятся в чертеж или непосредственно в атрибутивную информацию 3D-модели.

3) Определение материала и механических свойств

Для корректного воспроизведения изделия требуется идентификация материала и его характеристик. Используются методы:

- оптико-эмиссионного спектрального анализа (для определения химического состава);

- измерения твердости (по Роквеллу, Бринеллю и др.);
- механические испытания на растяжение, изгиб, ударную вязкость.

Полученные данные необходимы для выбора заменителя при локализации производства и для корректного моделирования в CAE-системах.

4) Разработка твердотельной 3D-модели

На основе измеренных данных в CAD-системе создается параметрическая или прямая твердотельная модель, максимально соответствующая оригиналу. При этом учитывается не только форма, но и логика конструкции, технологичность и функциональные связи.

5) Формирование конструкторской документации

Современные CAD-платформы позволяют автоматически генерировать чертежи, спецификации и управляющие размеры на основе 3D-модели. Однако все чаще применяется модельно-ориентированный подход (Model-Based Definition, MBD), при котором все технические требования (допуски, шероховатость, обозначения, примечания) наносятся непосредственно на цифровую модель. Это снижает объем бумажной документации, повышает однозначность интерпретации и упрощает передачу данных в САМ- и PLM-системы.

6) Модификация и оптимизация конструкции

При необходимости выполняется инженерная доработка модели: изменение радиусов скруглений, перенос ребер жесткости, корректировка присоединительных размеров. В более сложных случаях применяются алгоритмы топологической оптимизации, позволяющие снизить массу детали на 50–70 % при сохранении или даже улучшении прочностных характеристик.

7) Верификация конструкции

Подтверждение работоспособности изделия осуществляется двумя способами:

- изготовление и испытание опытного образца (например, методом 3D-печати или механообработки);
- виртуальное моделирование в CAE-системах (расчеты прочности, теплового режима, динамики и т. д.).

При достаточной точности численных моделей и наличии верифицированных методик расчеты могут заменить физические испытания, особенно на ранних этапах разработки.

8) Организация серийного производства

Готовая КД и 3D-модель передаются в технологический отдел для разработки маршрутной и операционной технологической документации. На современных предприятиях с ЧПУ-оборудованием 3D-модель используется в САМ-системах для генерации управляющих программ, что обеспечивает сквозную цифровую цепочку от проектирования до изготовления.

8.2 Практическое применение реверс-инжиниринга

Основная область применения – это локализация производства и обеспечение ремонтпригодности в условиях отсутствия исходной документации. Типовые сценарии включают:

- прекращение поставок импортных комплектующих вследствие санкционных ограничений, логистических сбоев или роста стоимости;
- выход из строя уникальных деталей в составе морально устаревшего оборудования, для которых отсутствуют запасные части и чертежи.

В таких случаях реверс-инжиниринг позволяет не только восстановить КД, но и адаптировать конструкцию под отечественные материалы, технологии и стандарты. Наличие собственной документации дает заказчику стратегическую независимость: возможность размещать заказы у нескольких производителей, организовывать внутреннее изготовление или проводить модернизацию без зависимости от иностранного правообладателя.

Таким образом, реверс-инжиниринг выступает не просто как инструмент копирования, а как метод обеспечения технологического суверенитета, повышения гибкости производственных цепочек и продления жизненного цикла критически важных изделий.

9 ЗАДАНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

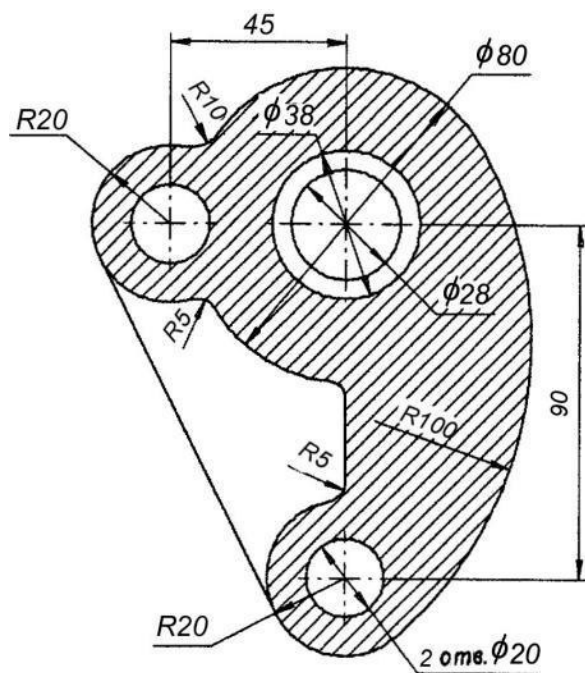
Подробные пошаговые описания выполнения лабораторных и контрольных работ находятся в методических указаниях [3; 4] и на облачных сервисах:

https://drive.google.com/drive/folders/1eMkz1b0w379rJKx9O4QypTIwt8_LjwWj?usp=drive_link

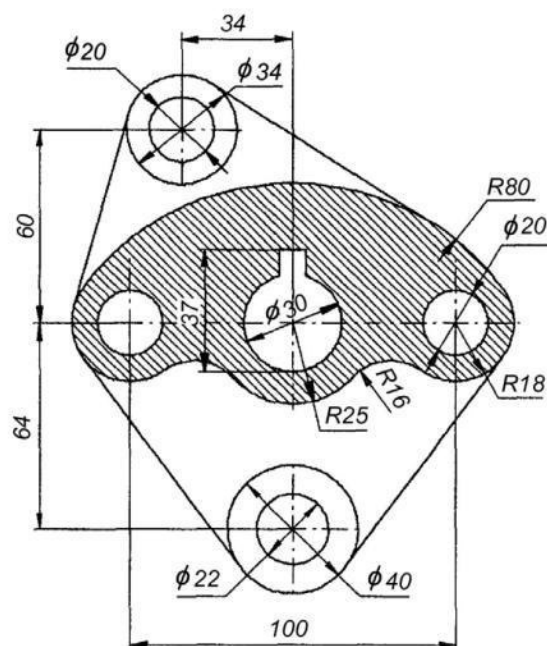
Варианты заданий для выполнения лабораторных и контрольных работ приведены в приложениях и на гугл диске.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

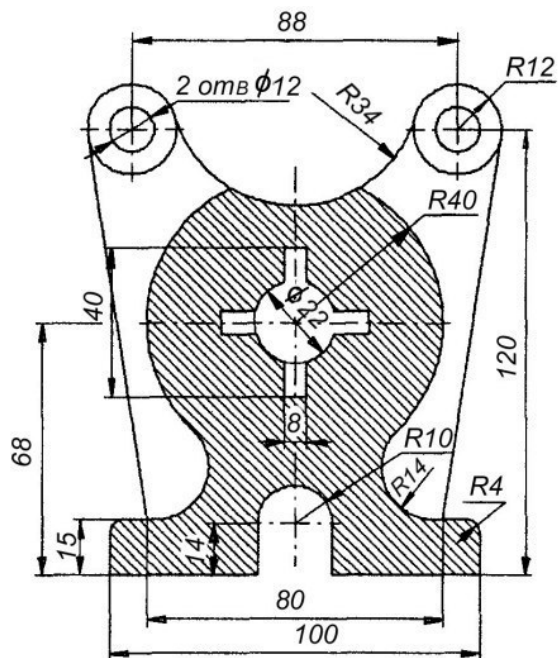
Задание 1 – Создание сопряжений с помощью инструментов «Построение».



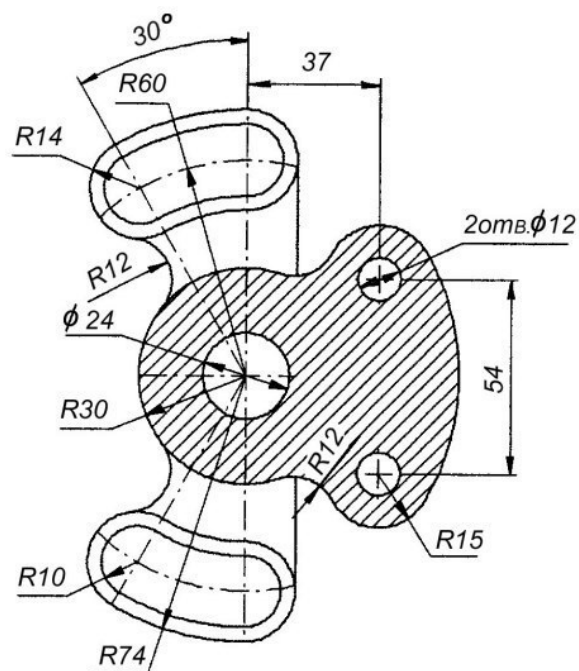
Вариант 1



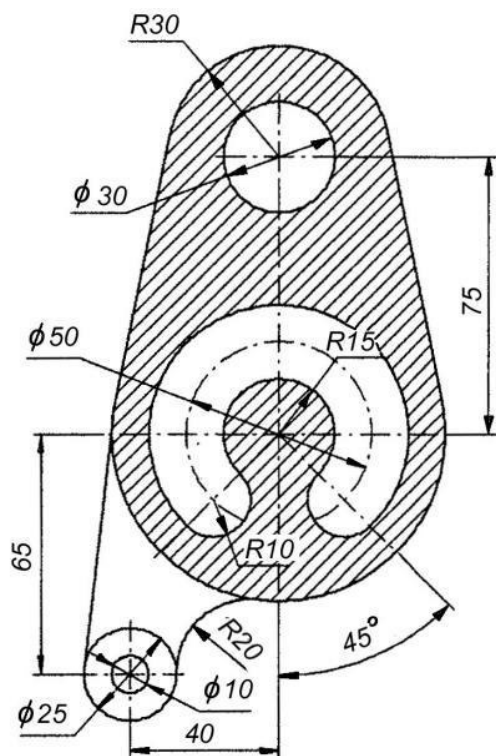
Вариант 2



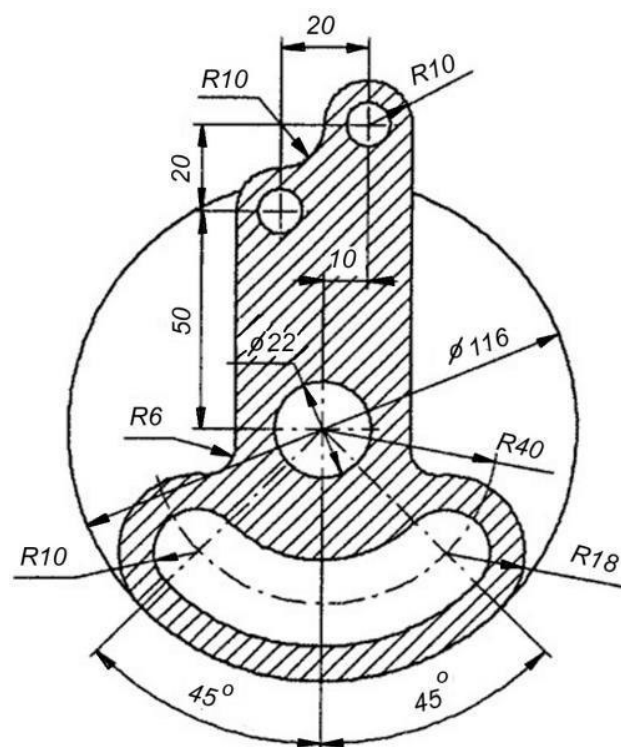
Вариант 3



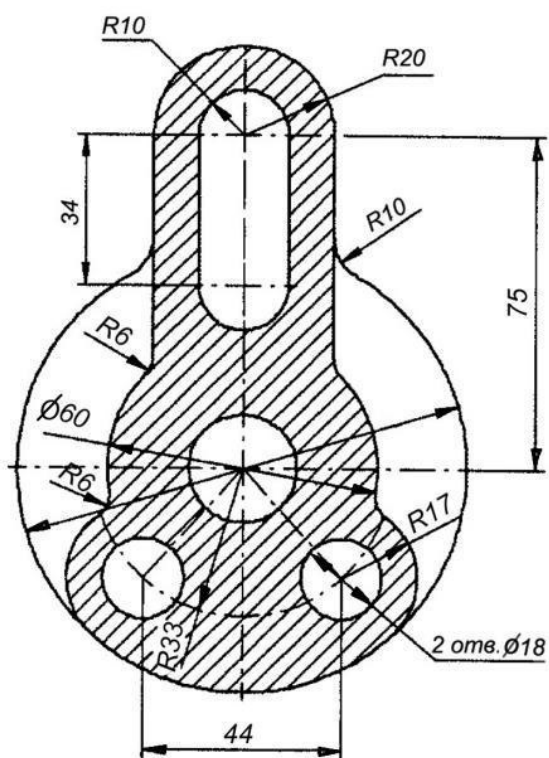
Вариант 4



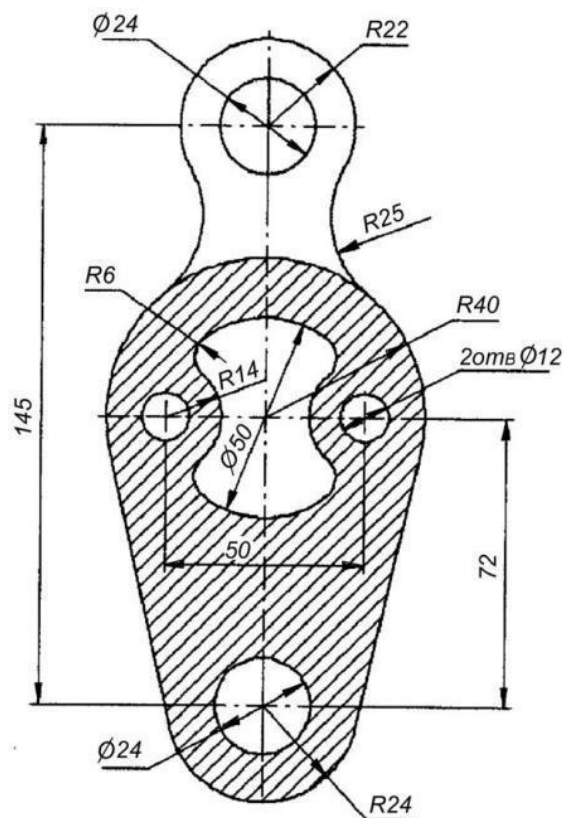
Вариант 5



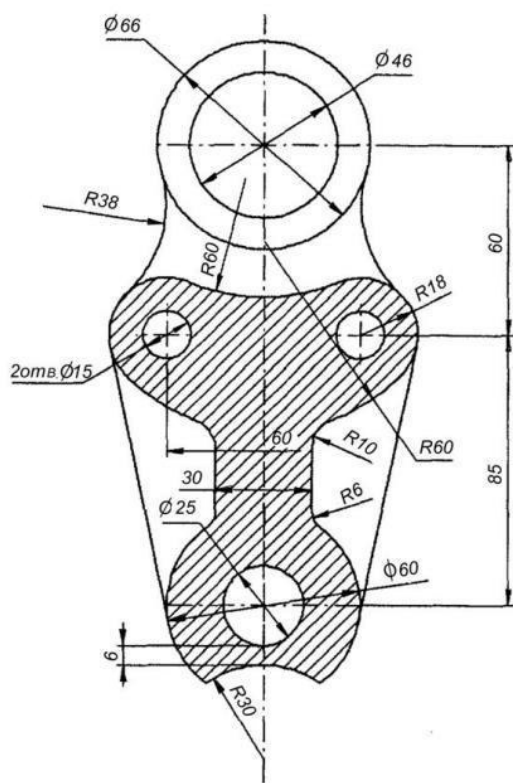
Вариант 6



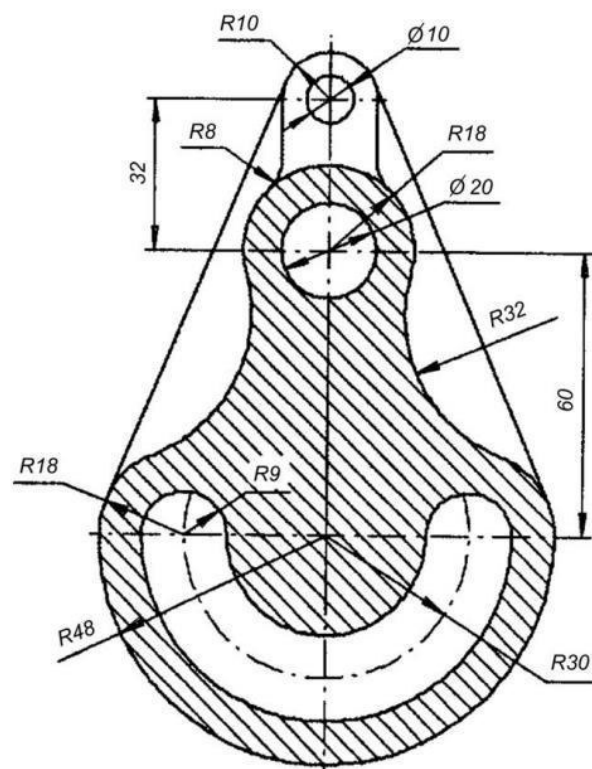
Вариант 7



Вариант 8



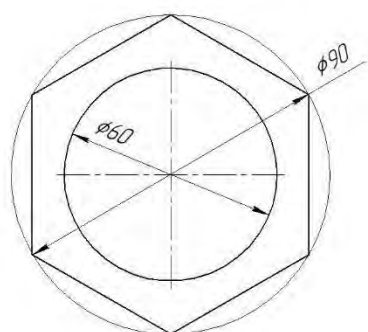
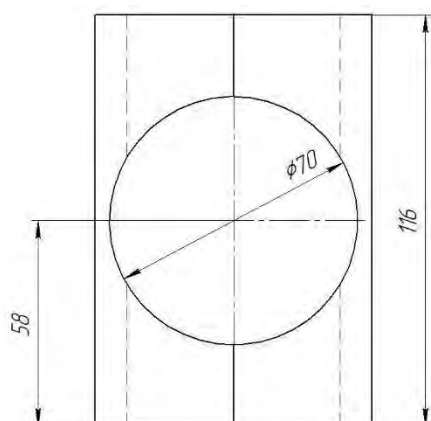
Вариант 9



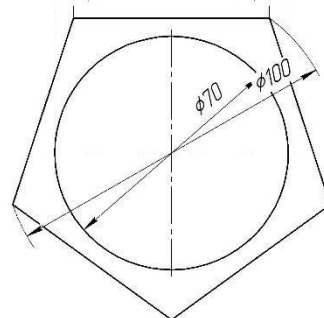
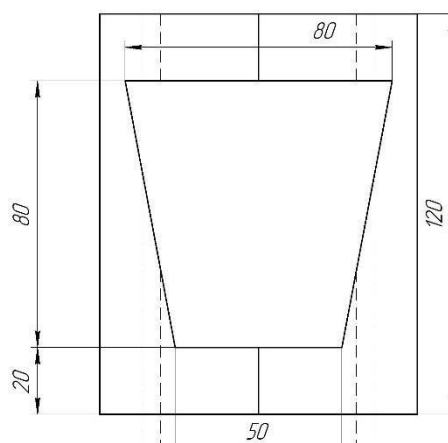
Вариант 10

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

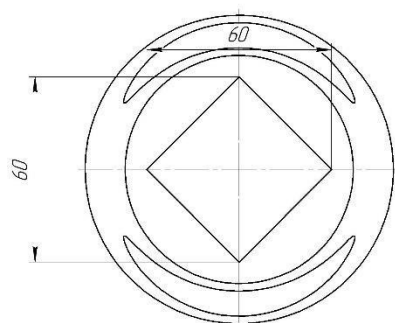
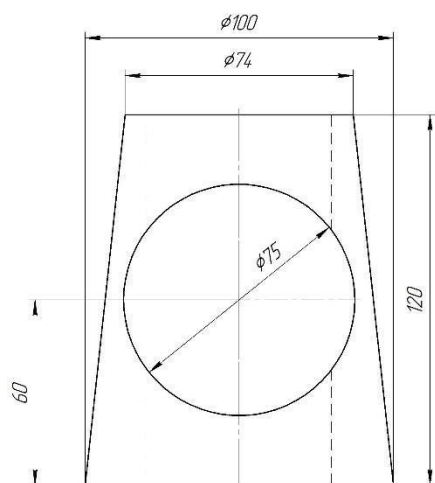
Задание 2 – Использование примитивов



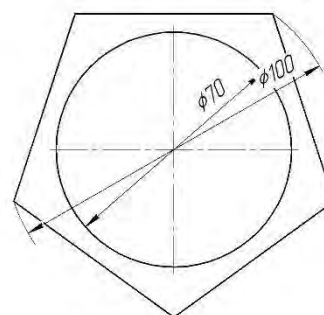
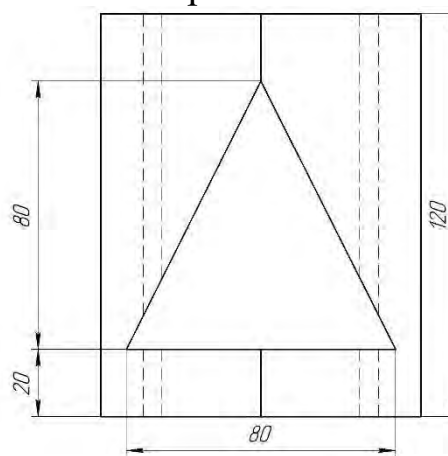
Вариант 1



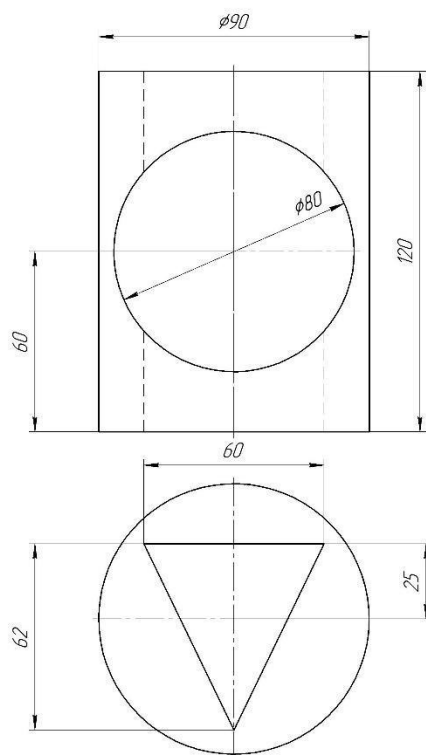
Вариант 2



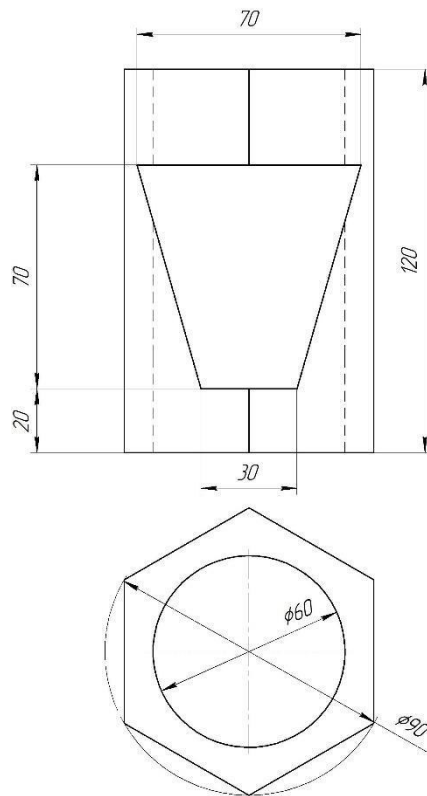
Вариант 3



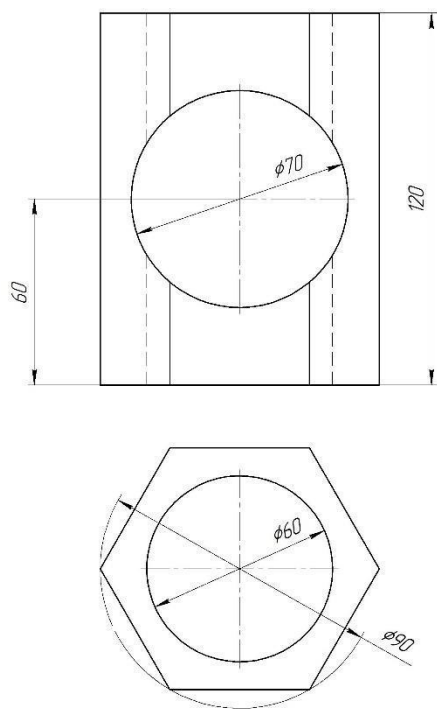
Вариант 4



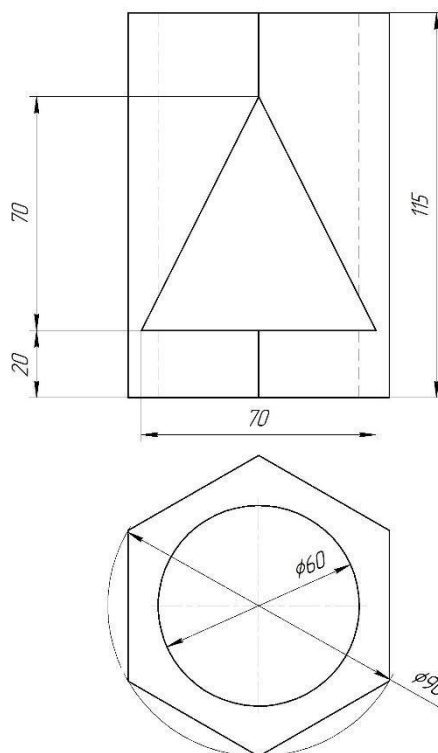
Вариант 5



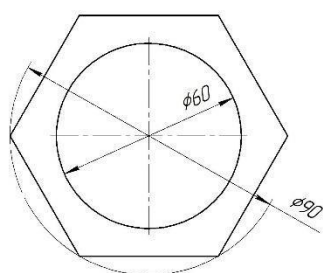
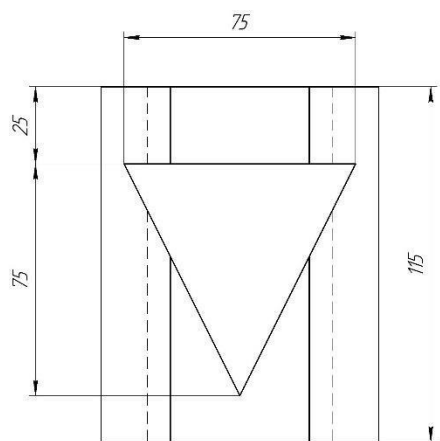
Вариант 6



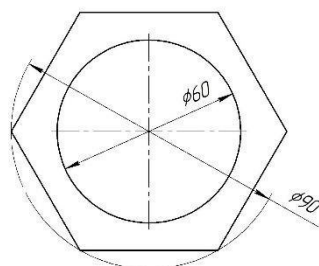
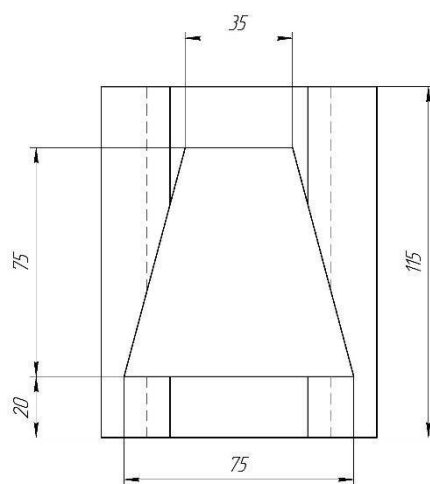
Вариант 7



Вариант 8



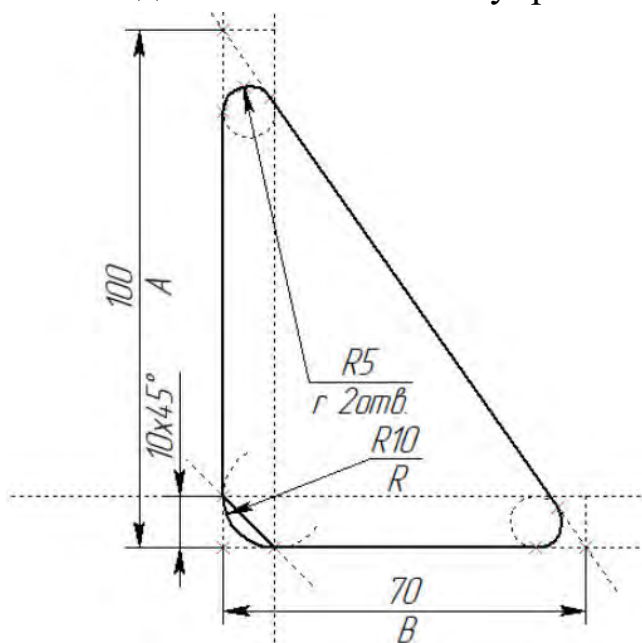
Вариант 9



Вариант 10

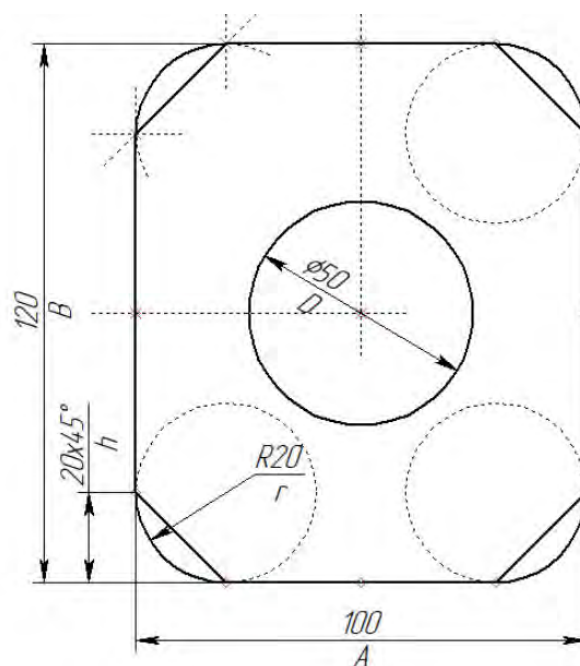
ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Задание 3 – Элементы управления. Создание окна диалога.

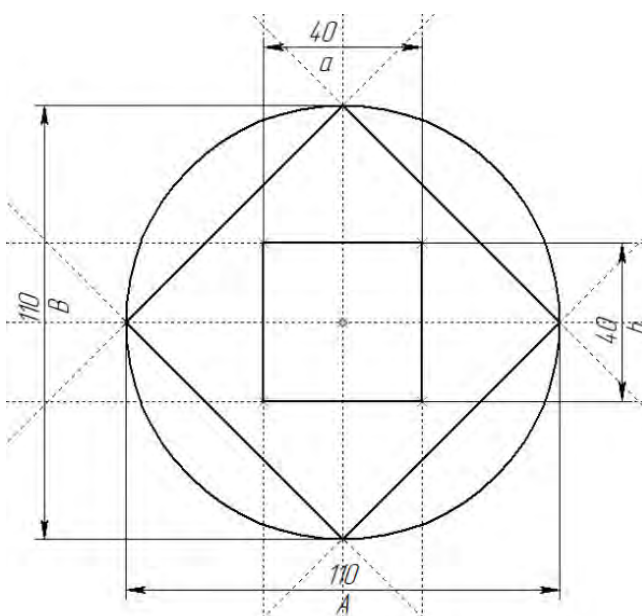


У фаски переменная любой буквой

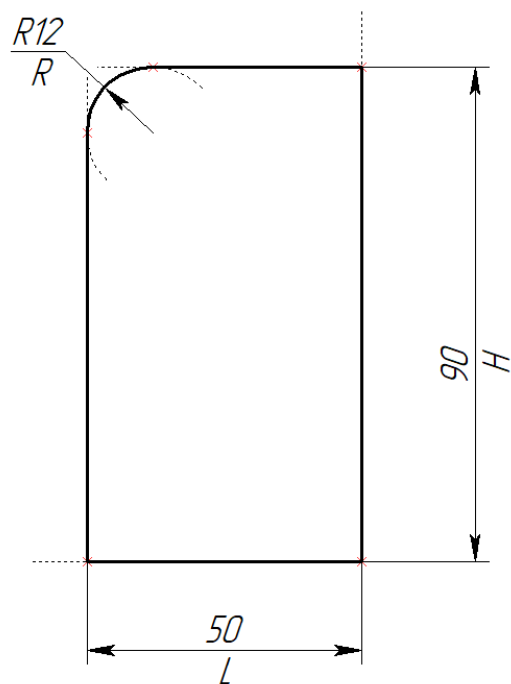
Вариант 1



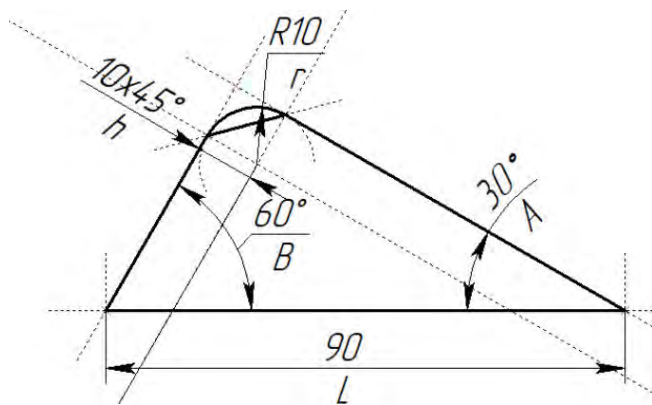
Вариант 2



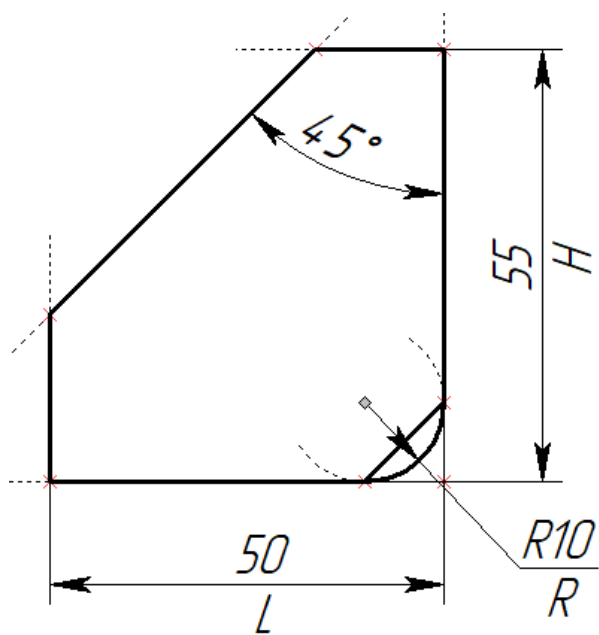
Вариант 3



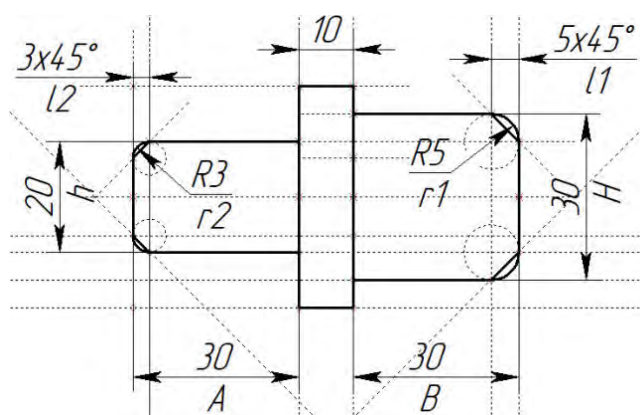
Вариант 4



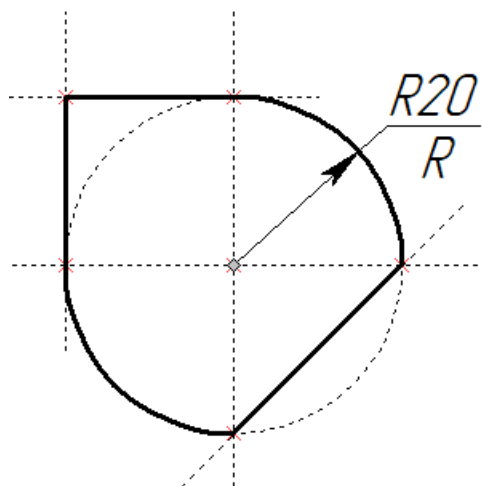
Вариант 5



Вариант 6



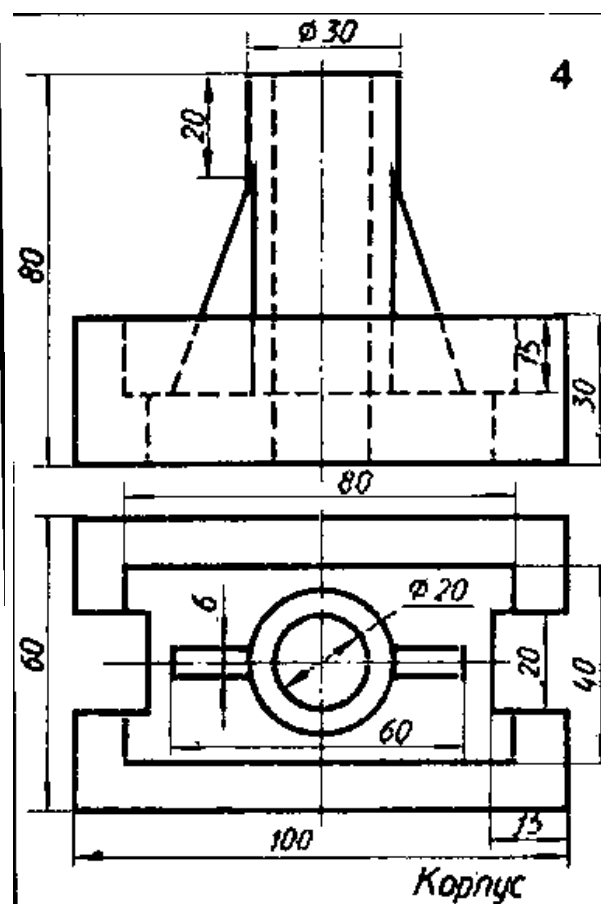
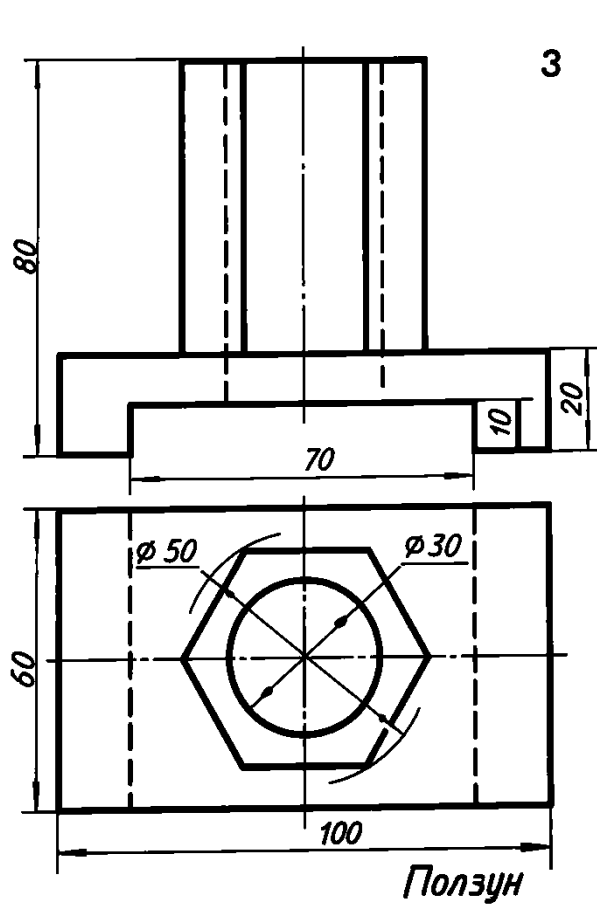
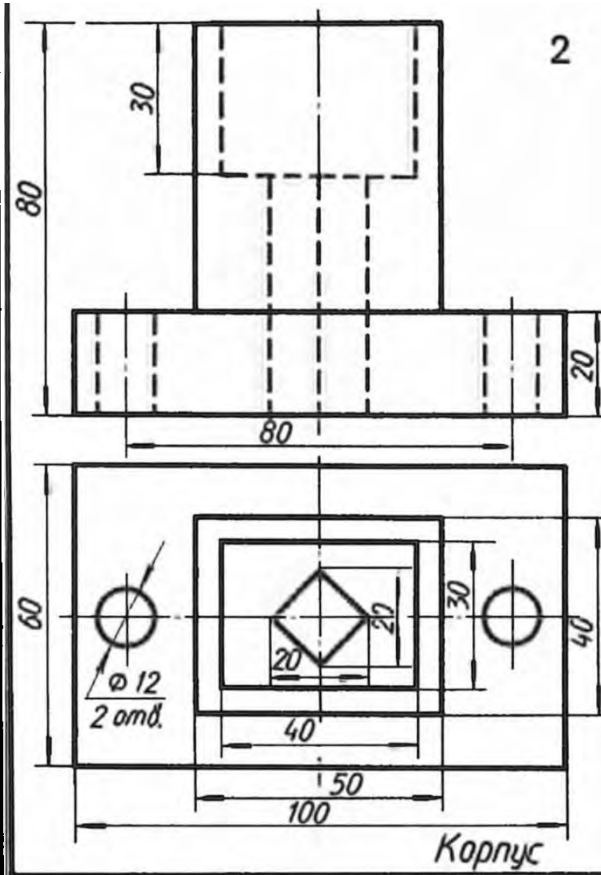
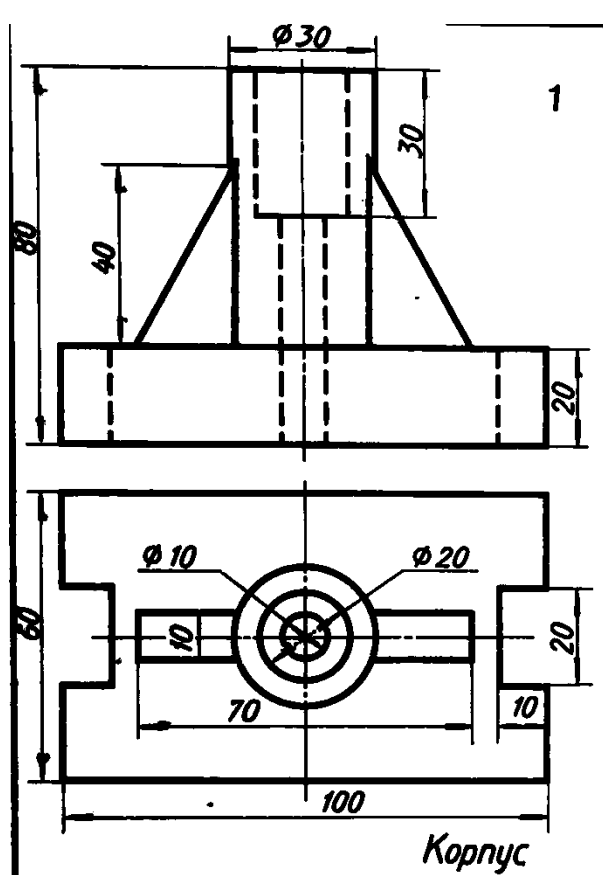
Вариант 7

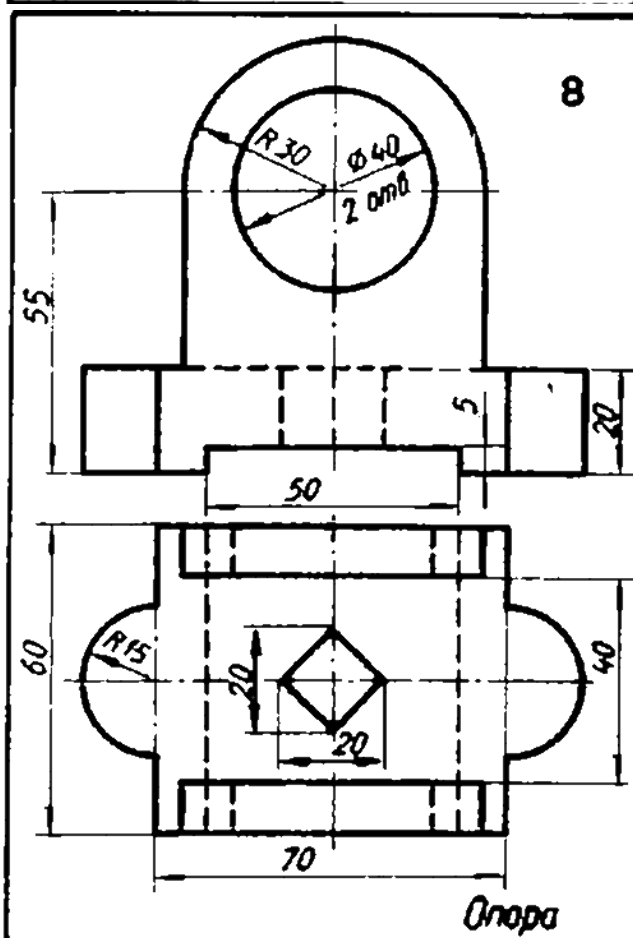
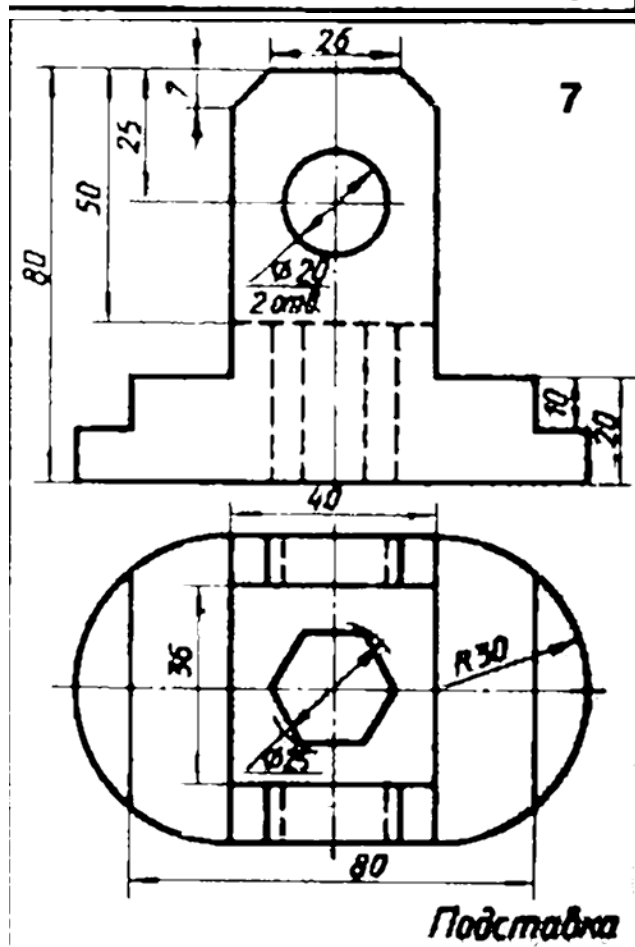
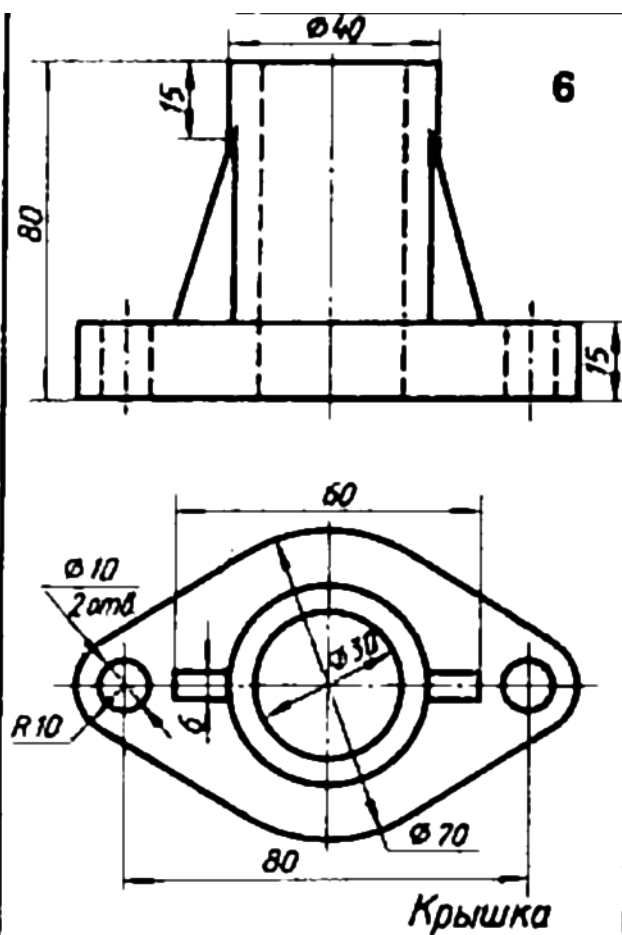
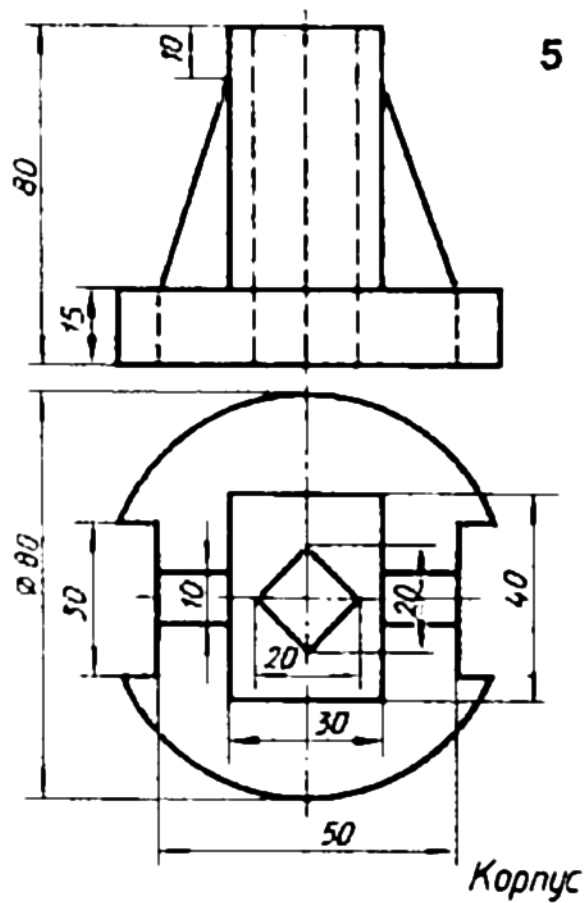


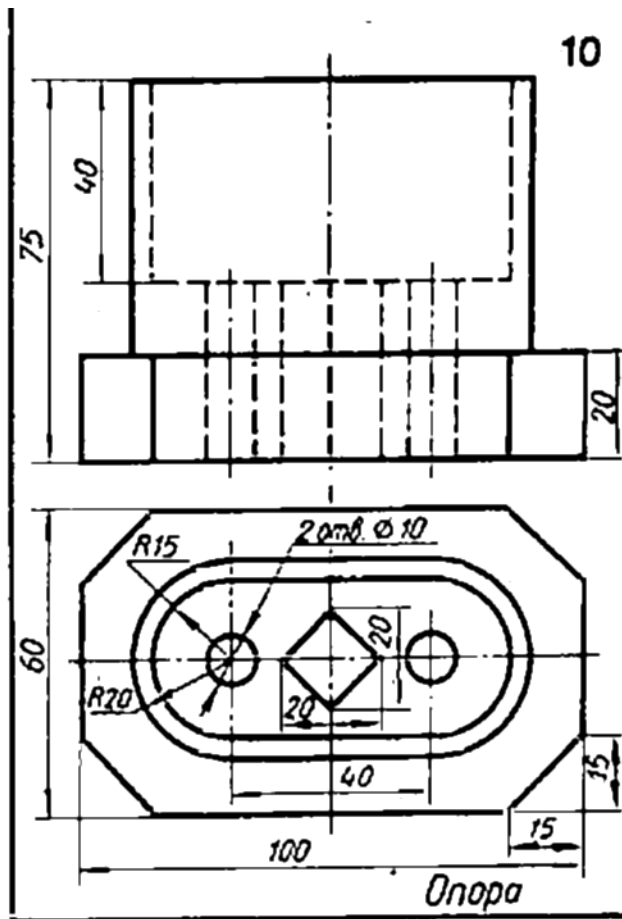
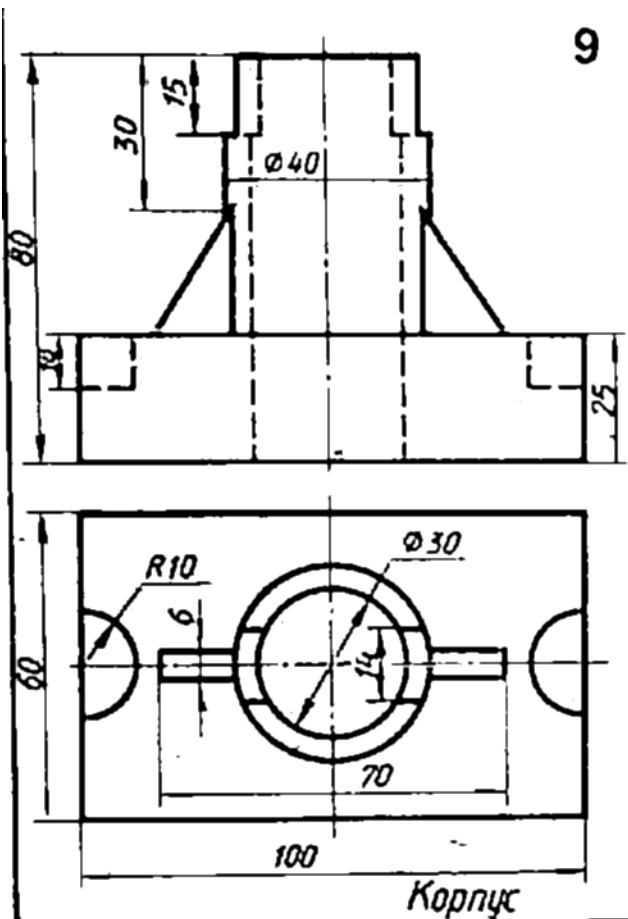
Вариант 8

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Задание 4 – Создание 3D модели по чертежу. Проектирование

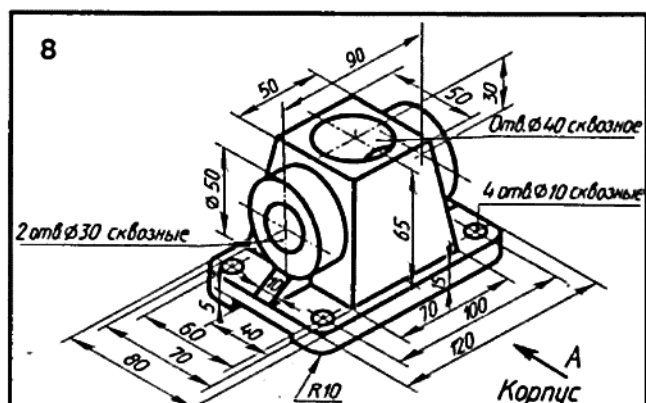
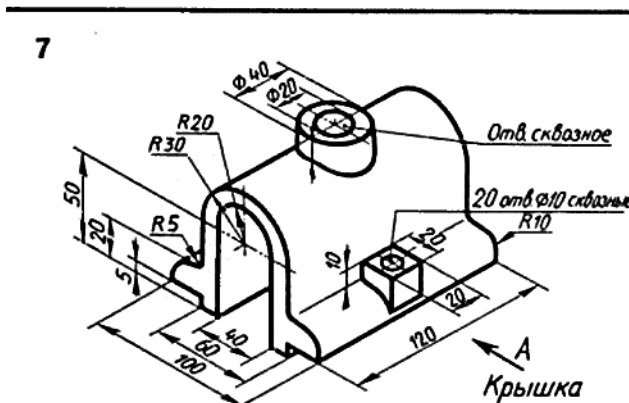
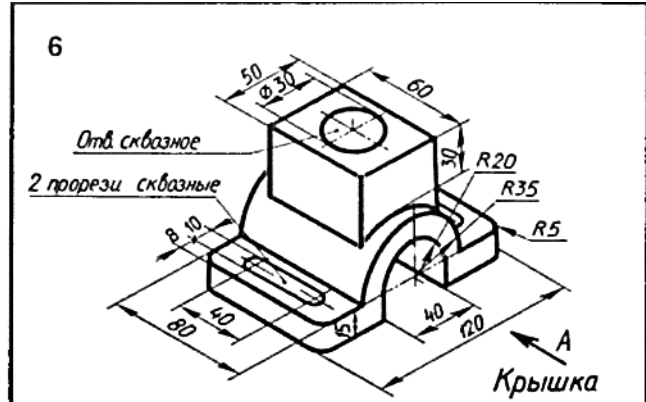
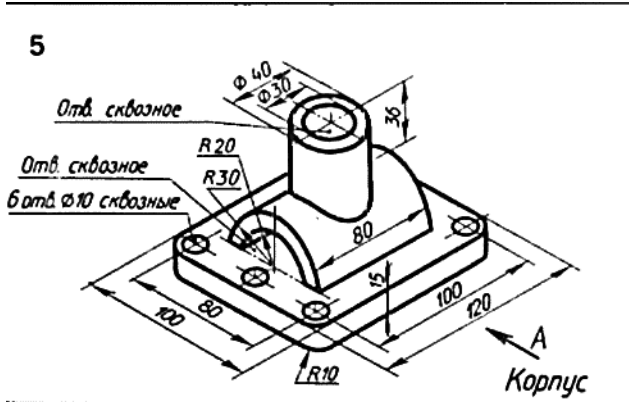
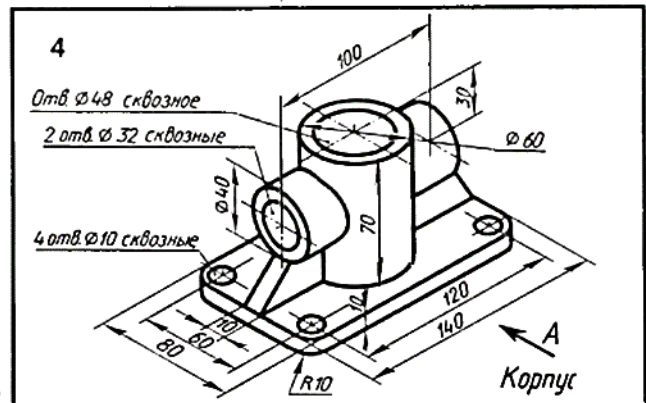
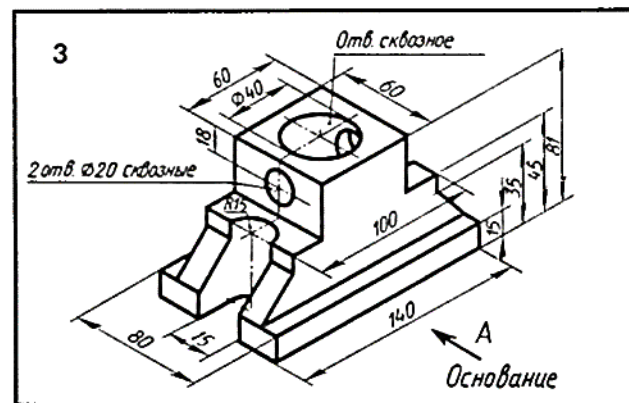
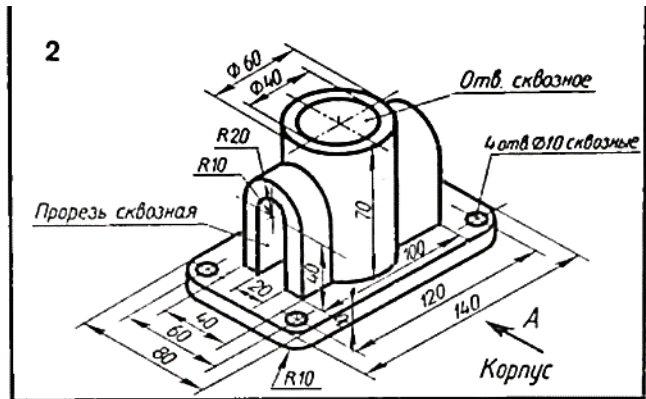
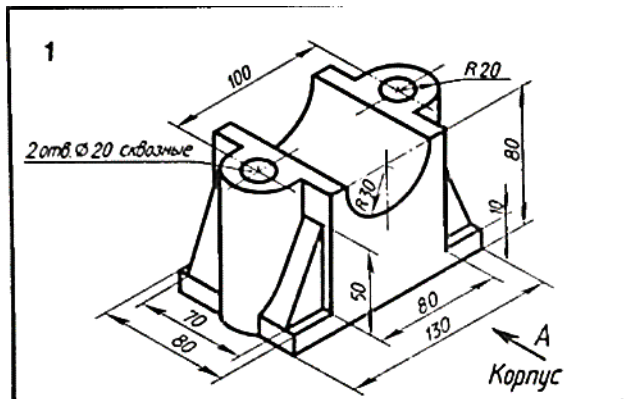


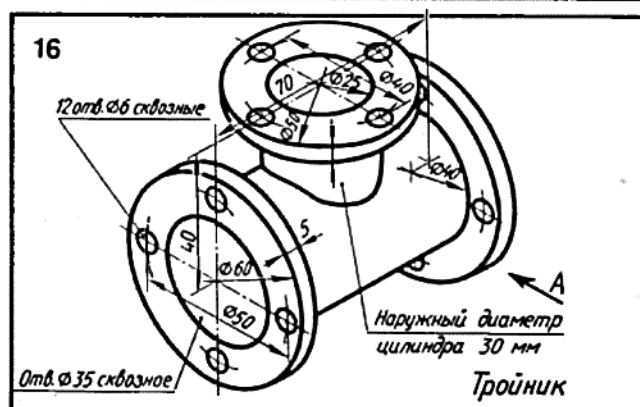
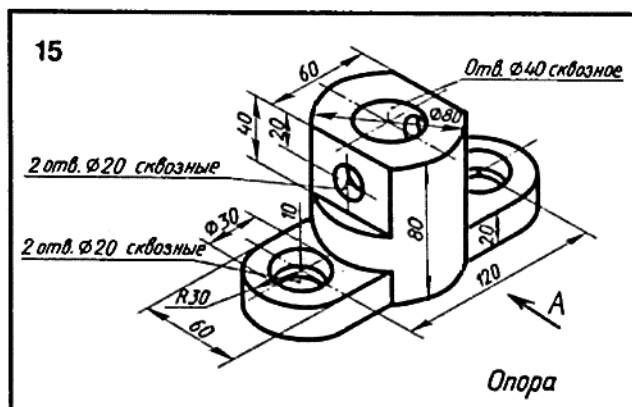
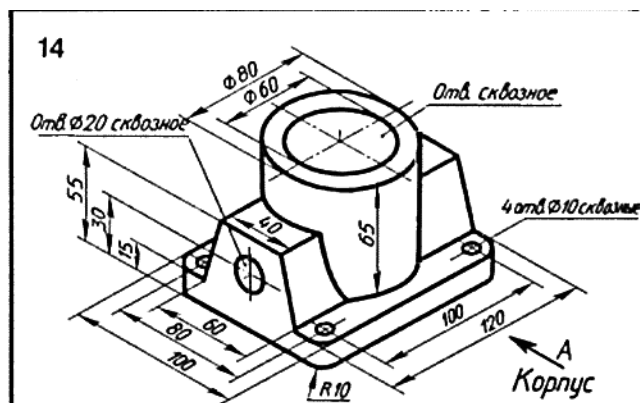
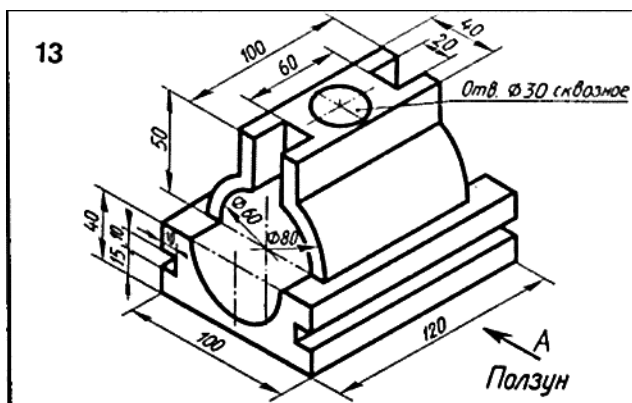




ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Задание 5 – Деталь 3D

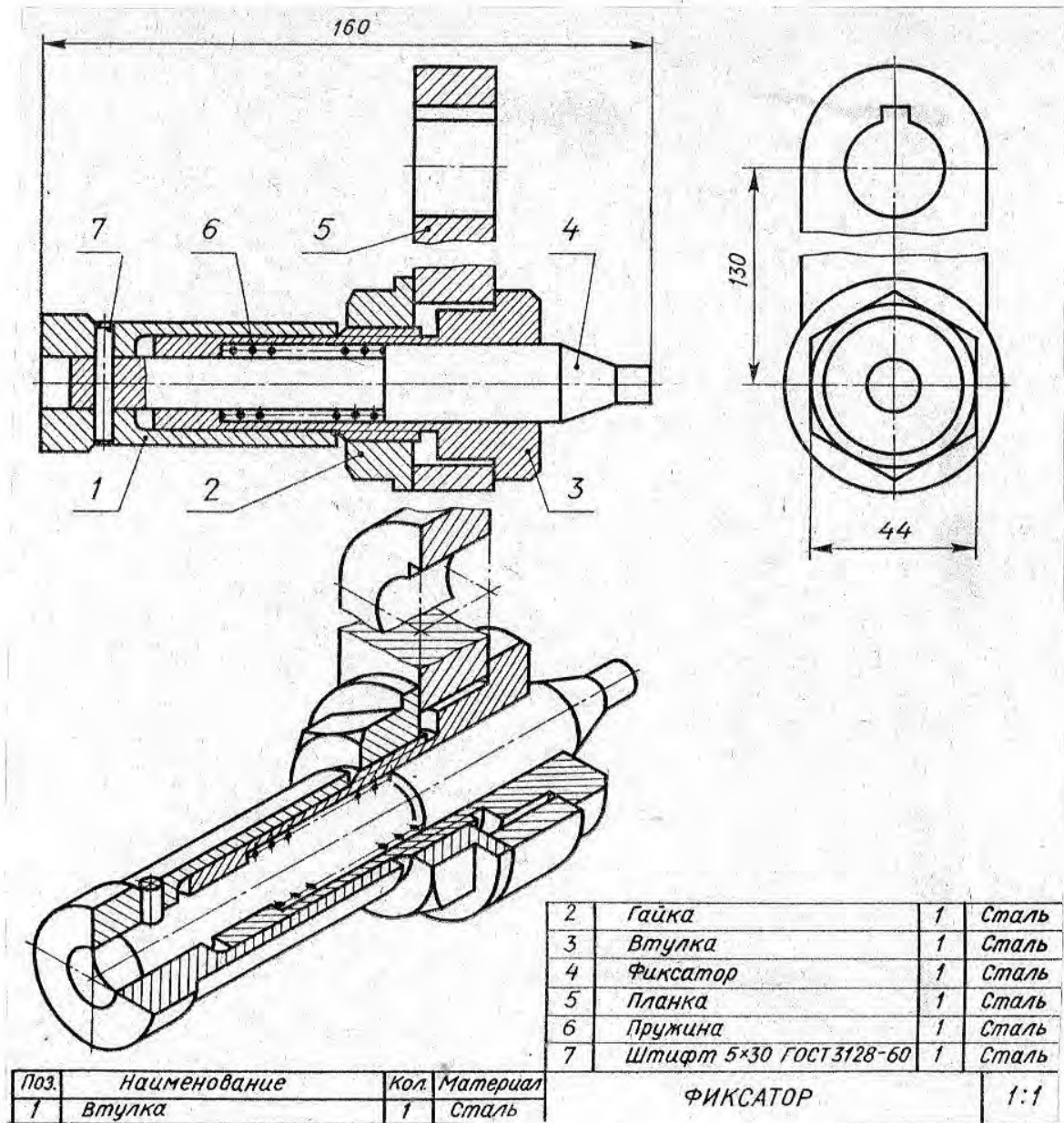




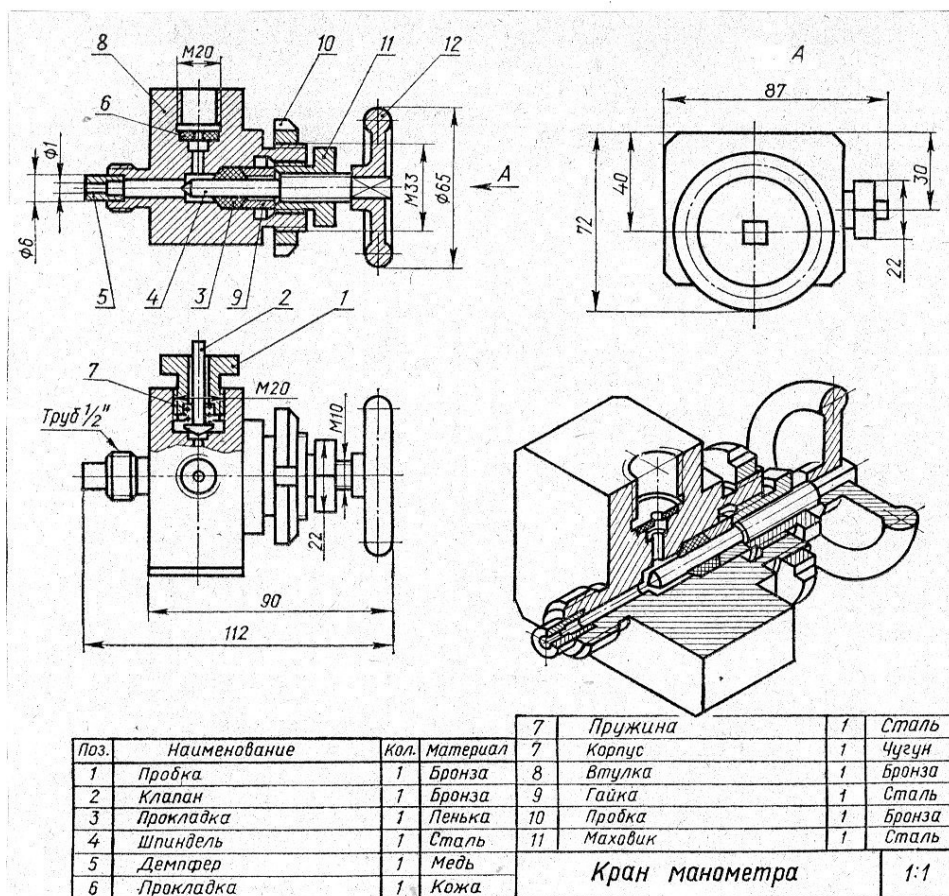
ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Задание 6 – Сборка 3D

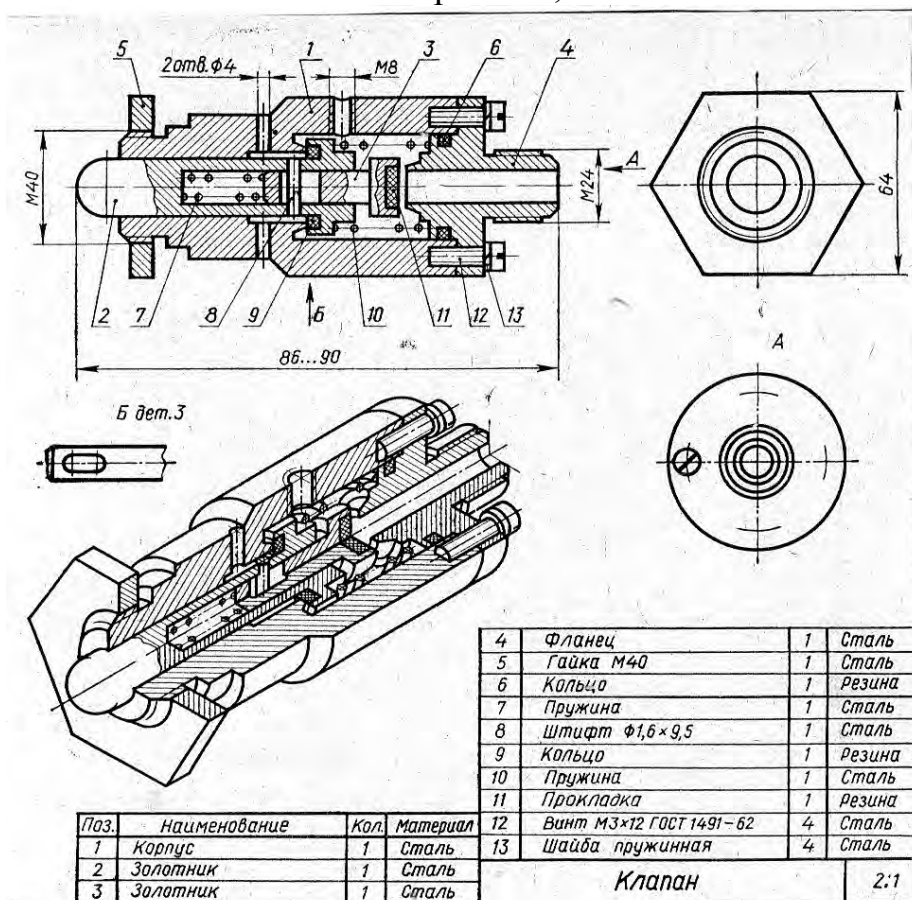
Выполнить 3D модели всех деталей сборочной единицы в T-Flex. Выполнить сборку в T-Flex



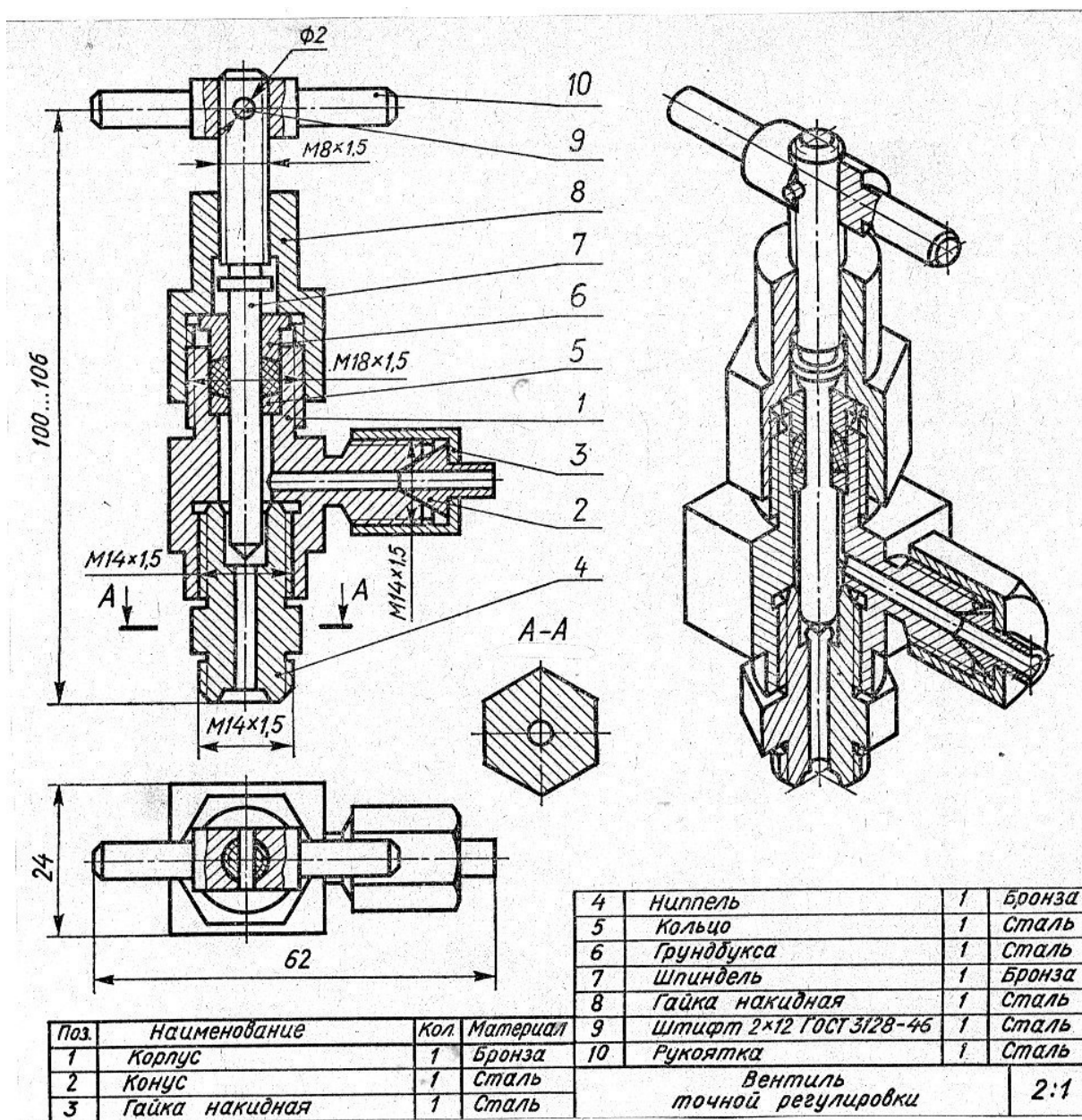
Вариант 1, 11



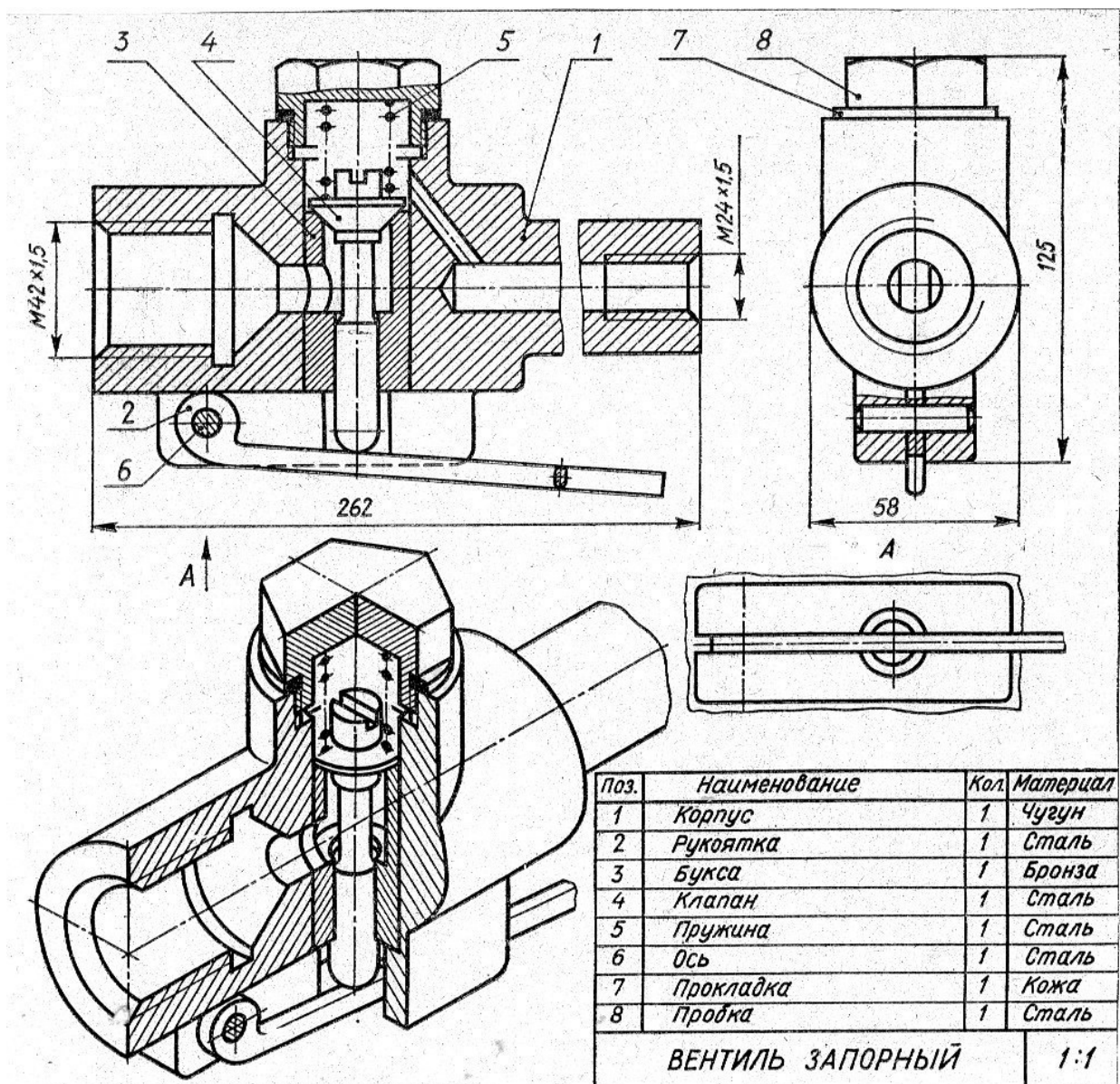
Вариант 2, 12



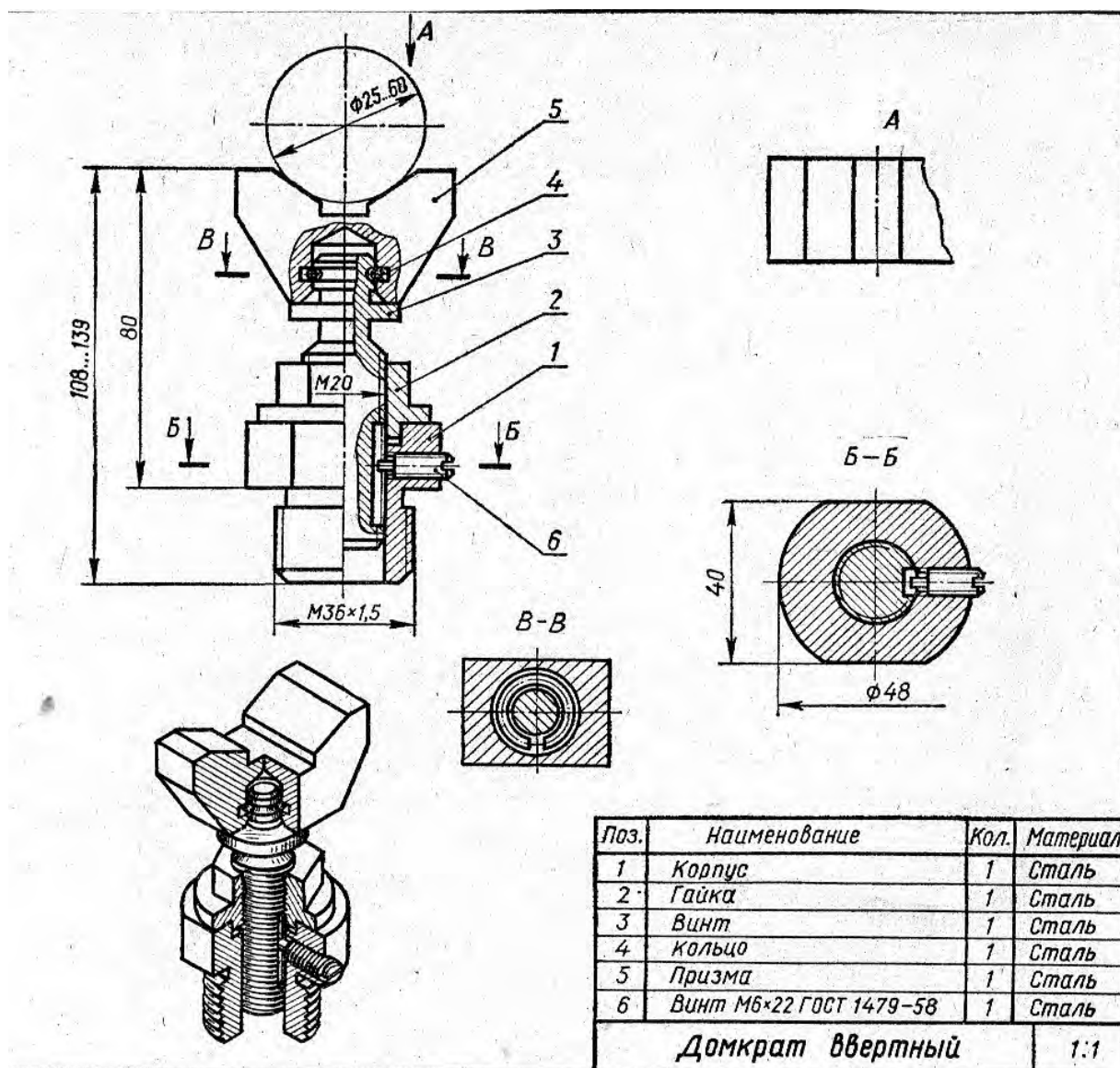
Вариант 3, 13



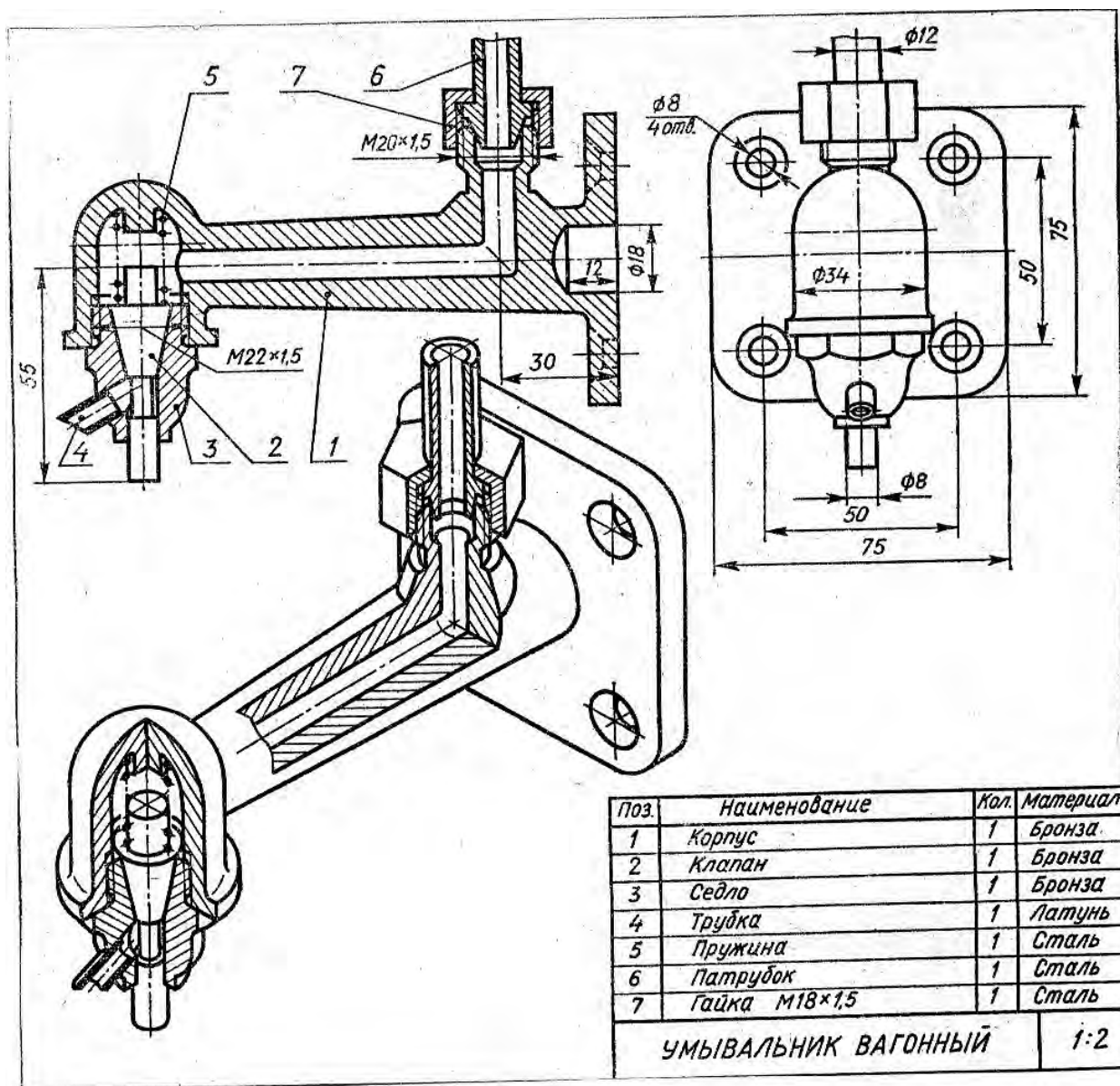
Вариант 4, 14



Вариант 7, 17



Вариант 8, 18



Вариант 9, 10

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 3D моделирование и прототипирование: что это такое? // Пром-цифра. Поставщик и интегратор цифровых решений и услуг. – URL: <https://promzyfra.ru/articles/3d-modelirovanie-i-prototipirovanie-chto-eto-takoe/> (дата обращения 15.11.2025).

2 Что такое 3D-принтеры? (История, применение, как выбрать) // Trashbox.ru. Технологии и культура. – URL: <https://trashbox.ru/topics/92193/chto-takoe-3d-printery-istoriya-primenenie-kak-vybirat> (дата обращения 15.11.2025).

3 Кузнецова Е. М. Автоматизированное проектирование моделей с использованием программных пакетов КОМПАС и T-Flex : метод. указ. / сост. Е. М. Кузнецова. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2017. – 26 с.

4 Кузнецова Е. М. Применение программного пакета T-Flex для разработки параметрических моделей : метод. указ. / сост. Е. М. Кузнецова. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. – 19 с.

Учебное издание

Кузнецова Елена Михайловна
Остапчук Александр Константинович

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САД-СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ 3D-МОДЕЛЕЙ

Учебное пособие

Редактор В. А. Лисина

Подписано в печать 25.08.2026	Формат 60x84 1/16	Бумага 80 г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ. л. 6,00	Уч.-изд. л. 6,00
Заказ 37	Тираж 100	

БИЦ Курганского государственного университета.
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.
Курганский государственный университет.