

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ



Уфа 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Под редакцией В. В. Атрощенко

*Допущено Редакционно-издательским советом УГАТУ
в качестве учебного пособия для студентов очной и заочной форм обучения,
обучающихся по направлению подготовки
магистров 15.04.01 Машиностроение*

Учебное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ
ISBN 978-5-4221-1528-0

Уфа 2021

Авторы: В. В. Атрощенко, Р. Ф. Амиров, А. А. Касаткин, С. И. Фецак,
Н. И. Фецак, А. М. Ямилева

УДК 004.94:622.27(07)
ББК 32.972.13:35.514я7

Рецензенты:

*профессор кафедры сварки, обработки материалов давлением
и родственных процессов ТГУ д-р техн. наук А. И. Ковтунов;
доцент кафедры математики и информатики
Уфимского филиала Финуниверситета канд. техн. наук М. Ю. Лехмус*

Информационные технологии в нефтегазовой отрасли : учебное пособие / под ред. В. В. Атрощенко; [В. В. Атрощенко и др.] : [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2021. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-168.pdf

Рассмотрены функциональные возможности систем автоматизированного проектирования (CAD/CAM, CAE/CAPP/PDM), применяемых при проектировании объектов нефтегазодобывающего оборудования. Особое внимание уделено информационным технологиям для выполнения тепловых расчетов и проектирования сварных соединений. Приведены примеры применения программного обеспечения *Ansys, Solidworks, КОМПАС 3D*.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Системы автоматизированного проектирования технологических процессов в газонефтяном машиностроении», профиль «Сварочные технологии в нефтегазовой отрасли».

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

*Авторы: Атрощенко Валерий Владимирович
Амиров Рустэм Фердсович
Касаткин Алексей Александрович
Фецак Сергей Игоревич
Фецак Наталья Ивановна
Ямилева Альфия Маратовна*

Корректурa и верстка *О. А. Соколова*
Программирование и компьютерный дизайн *О. М. Толкачёва*

Подписано к использованию: 30.08.2021
Объем: 5,29 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.
Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: rik@ugatu.su

Все права на размножение, распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование, использование данного продукта запрещено.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие специализированных инструментов, позволяющих сократить срок выполнения инженерных работ, повысить их качество, а также качество выходной документации является залогом успешного и эффективного выполнения инженерных работ на нефтегазовом предприятии.

Сегодня нельзя обойтись без современных компьютерных технологий. Новые повышенные требования к методологии и качеству проектирования элементов сварных конструкций формируют современные тенденции развития сварки в нефтегазовой отрасли. Использование компьютерных технологий позволяет уже на этапе проектирования оценить конструктивные решения.

В первой главе рассмотрена структура, состав и компоненты САПР, применяемой в нефтегазовой отрасли.

Во второй главе основное внимание уделено технологии проектирования сварных соединений с помощью программного комплекса *SolidWorks*. Показано, каким образом следует использовать этот программный комплекс для проектирования сварных соединений.

Третья глава описывает основные функциональные возможности программно-методического комплекса *Компас-3D*. Приведены примеры моделирования.

Четвертая глава посвящена описанию возможностей программного комплекса *Ansys* для конечно-элементного моделирования сварных конструкций и технологических процессов. Приводятся теоретические сведения о методе конечных элементов и доступных для использования математических моделях в *Ansys Mechanical APDL* и соответствующих ему современных модулях *Ansys Workbench*. Рассматриваются основные этапы компьютерного моделирования тепловых процессов, напряженно-деформированного состояния и колебаний конструкций.

ГЛАВА 1. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Компьютерные технологии заметно повлияли на облик современной нефтегазовой отрасли и машиностроения в целом. Ни одна из множества задач, связанных с разведкой, добычей, транспортом, переработкой, хранением и реализацией нефти и газа, не может быть решена без применения компьютерных технологий.

1.1. Системы автоматизированного проектирования (САПР). Задачи, решаемые в САПР

Все бизнес-процессы, протекающие в нефтегазовой отрасли, в последнее время получили развитие с помощью применения компьютерных технологий. Компьютерные технологии сегодня оказывают существенное влияние на способы проектирования, на технологию и на организацию производства.

Компьютеры и программное обеспечение становятся частью технологической цепочки на предприятиях нефтегазовой отрасли при использовании цифровых систем управления оборудованием. Главным условием успешного и эффективного выполнения инженерных работ является срок их выполнения, их качество, а также качество выходной документации. Это можно достигнуть только с помощью компьютерных технологий.

Несмотря на свою относительную новизну, компьютерные технологии и прошли длительный и плодотворный путь своего совершенствования. Многие компьютерные средства и технологии, сегодня реализованы в виде систем автоматизированного проектирования (математического, информационного, программного, организационного и других видов обеспечений). С развитием компьютерной техники компьютерные технологии и моделирование в САПР нефтегазовой отрасли значительно изменяются в положительную сторону. Программное обеспечение сегодня становится более мощным и функционально-полным.

Проектирование с помощью систем автоматизированного проектирования является процессом взаимодействия человека (проектировщика) и средств автоматизации. Человек выполняет

только те операции, которые нельзя выполнить с помощью формальных математических методов. Например, такие как постановка задач и принятие решений.

Многие научные методы и рекомендации по созданию и эксплуатации компьютерных технологий доведены до уровня промышленных стандартов, которые официально приняты на международном и государственном уровнях [1–11].

Разработка и техническая подготовка производства нефтегазовой промышленности предусматривает выполнение определенной стандартами последовательности взаимосвязанных процессов [12, 13]. К основным процессам принято относить конструкторское и технологическое проектирование (КТПП). Вспомогательными процессами считают организацию информационной поддержки КТПП и управление бизнес-процессами промышленного предприятия. Современные компьютерные технологии проектирования поддерживают целый комплекс инженерных работ на ключевых этапах жизненного цикла изделия (ЖЦИ). Это процесс проектирования, конструкторско-технологической подготовки производства [14].

Под термином «САПР» понимается компьютерная технология, состоящая из CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM систем [14–18].

CAD-системы (*Computer-Aided Design*) предназначены для решения конструкторских задач и автоматизации оформления проектно-конструкторской документации. Современные *CAD*-системы позволяют выполнять 2D- и 3D-геометрическое моделирование деталей и сборок, разрабатывать на основе геометрических моделей полный комплект технической документации: чертежи, спецификации, ведомости и т.д. [14].

CAM-системы (*Computer-Aided Manufacturing*) предназначены в основном для создания процессов обработки изделий на автоматизированном технологическом оборудовании и генерации программ для этого оборудования [13–15].

CAE-системы (*Computer-Aided Engineering*) предназначены для реализации метода конечных элементов, с помощью которого можно проводить моделирование и численные расчеты практически любых физических полей [19–21]. К *CAE* можно отнести подсистемы, каждая из которых позволяет автоматизировать определенную инженерную задачу: расчеты на прочность, анализ аэро-, гидро-,

термодинамических процессов, моделирование работы машин и механизмов и пр. [14].

CAPP-системы (*Computer-Aided Process Planning*) предназначены для планирования и проектирования технологических процессов, трудового и материального нормирования, разработки технологической документации [14].

PDM-системы (*Product Data Management*) предназначены для интеграции и хранения комплексной информационной модели изделия, включая геометрические и инженерно-физические модели, исходные данные и результаты расчетов, чертежи, программы для работы автоматизированного технологического оборудования и другие конструкторские и технологические документы, результаты измерений и контроля и т.д. [14, 22].

САПР в нефтегазовой отрасли развивается по следующим направлениям:

- проектирование технологического оборудования и процессов переработки нефтепродуктов (технологическое проектирование, проектирование АСУТП);
- проектирование объектов предприятий нефтегазовой отрасли (дорожное, электротехническое, архитектурно-строительное проектирование);
- подготовка производства технологического оборудования для отрасли;
- проектирование трубопроводов и вспомогательного оборудования (компрессорные станции);
- обеспечение производственных служб рабочих, эксплуатационной и ремонтной документацией;
- инженерное сопровождение всех видов работ;
- поддержка научно-исследовательских работ (анализ, моделирование, прогнозирование).

На рис. 1.1 показаны задачи, которые может решать комплексная САПР нефтегазовой отрасли.

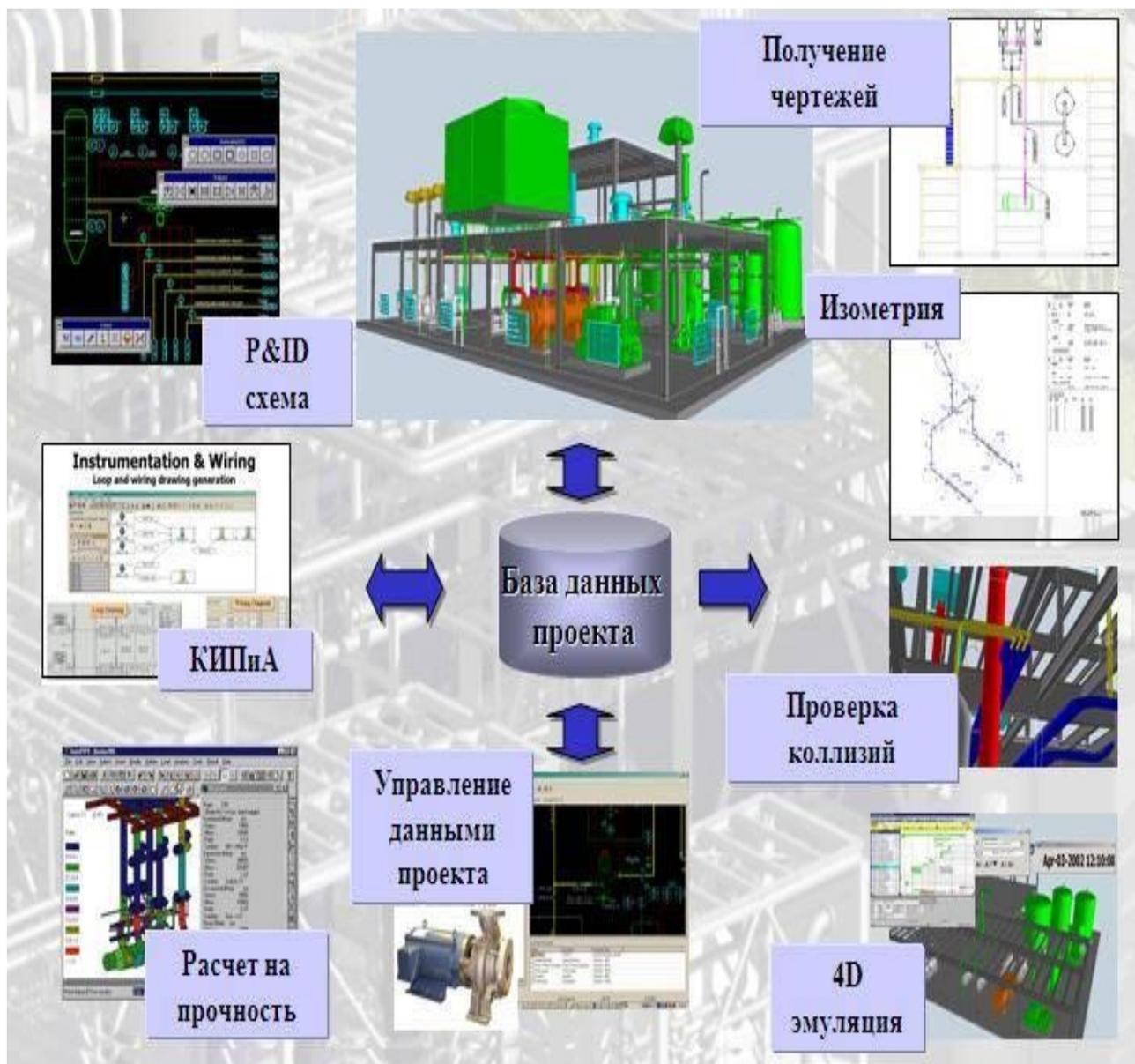


Рис. 1.1. Задачи, решаемые комплексной САПР в нефтегазовой отрасли

САПР, используемые в нефтегазовой отрасли, включают в себя создание трехмерных моделей, получение монтажно-компоновочных чертежей, расчеты на прочность и т.д. На предприятиях нефтегазовой отрасли создается единое информационное пространство. В данном пространстве могут работать различные САПР. Таким образом, обеспечивается передача информации, документооборот проектной, конструкторской, эксплуатационной и исполнительной документации, организуется хранилище данных. Единое информационное пространство позволяет сопровождать объект проектирования на протяжении всего жизненного цикла, начиная со стадии проекта и заканчивая эксплуатацией.

1.2. Основные термины и определения компьютерных технологий

Автоматизированная система (АС) (automated system) – это организационно-техническая система, которая обеспечивает выработку решений на основе автоматизации информационных процессов в различных сферах деятельности (управление, проектирование, производство и т.д.). В зависимости от вида деятельности выделяют следующие виды АС: автоматизированные системы управления (АСУ), системы автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) и др. В зависимости от вида управляемого объекта (процесса) АСУ делят на АСУ технологическими процессами (АСУТП), АСУ предприятиями (АСУП) и т.д. АС состоит из пользователей АС и комплекса средств автоматизации его деятельности, реализующих информационную технологию выполнения установленных функций.

Пользователь автоматизированной системы (user) – это лицо, участвующее в функционировании АС, или использующее результаты ее функционирования.

Автоматизированное рабочее место (АРМ) – это программно-технический комплекс АС, предназначенный для автоматизации деятельности определенного вида.

Интегрированная автоматизированная система (integrated) – это совокупность двух или более взаимоувязанных АС, в которой функционирование одной из них зависит от результатов функционирования другой.

Комплекс средств автоматизации (КСА) (automation means complex) – это совокупность взаимосогласованных программно-технических (ПТК), программно-методических комплексов (ПМК) и компонент программного, технического и информационного обеспечения.

Программно-методический комплекс (ПМК) (software-methodical complex) – это совокупность программного, информационного и методического обеспечения. При необходимости в состав ПМК могут быть включены математическое и лингвистическое обеспечение.

Автоматизированное проектирование – это процесс проектирования, осуществляемый при участии человека.

Автоматическое проектирование – это процесс проектирования, осуществляемый без участия человека.

Информационное средство – это упорядоченная информация, постоянно находящаяся на носителе данных.

Информационная технология – это приемы, способы и методы применения средств вычислительной техники при выполнении функций сбора, хранения, обработки, передачи и использования данных [44].

Информационная модель – это модель объекта, представленная в виде информации [14]. Она описывается параметрами и величиной.

Информационная модель изделия – это совокупность данных, описывающая различные свойства реального изделия, интересующие разработчика модели и пользователя [14].

Электронный макет – это электронная модель изделия, описывающая его внешнюю форму и размеры, позволяющая оценить его взаимодействие с элементами производственного и эксплуатационного окружения [14].

Программное (*software*), информационное (*information support*), организационно-методическое (*organizational and methodical support*), математическое (*mathematical support*), лингвистическое (*linguistic support*) и эргономическое (*antropotechnical support*) обеспечения являются составными частями современной САПР.

1.3. Структура, состав и компоненты САПР. Типовой состав модулей нефтегазовой САПР

САПР – это человеко-машинная система, инициируемая и управляемая пользователем или целым коллективом пользователей, составляющих неотъемлемую организационную часть системы. В соответствии с системным подходом необходимо рассматривать САПР в процессе ее работы в единстве и взаимовлиянии всех составляющих систему подсистем и модулей. Системное определение САПР содержит действующий ГОСТ на САПР [1, 14].

САПР – это организационно-техническая система, входящая в структуру проектной организации и осуществляющая проектирование при помощи комплекса средств автоматизации

проектирования (КСАП). Или «Система, состоящая из персонала и комплекса средств автоматизации его деятельности, реализующая информационную технологию выполнения установленных функций» (по ГОСТ 34.003-90).

Структура САПР

По выше приведенному определению, автоматизированную систему следует рассматривать, с организационной точки зрения, учитывая персонал (рис. 1.2).

Персонал – это специалисты, которые выполняют работу в соответствии со своими должностными обязанностями и принадлежат определенному подразделению предприятия. Персонал можно разбить на три группы: целевой персонал и пользователи, управляющий персонал и обеспечивающий персонал.

Целевой персонал составляют инженерно-технические работники, выполняющие основные проектные операции и процедуры. К ним относятся также специалисты, участвующих в моделировании и разработке изделий и технической документации [14].

Управляющий персонал – это руководители отделов автоматизации и информационных технологий, а также системные администраторы и администраторы баз данных, которые регламентируют работу технических и программных средств, администрируют права пользователей и управляют электронным документооборотом и трафиком компьютерных сетей [14] (*IT-менеджеры*).

Обеспечивающий персонал предназначен для обеспечения бесперебойного функционирования, ремонта, проведения плановых и регламентных работ всех составляющих комплекса САПР средств обеспечения (инженеры-электроники, системные программисты, техники, операторы, лаборанты и другие специалисты, напрямую не связанные с проектной деятельностью) [14].

Комплекс средств автоматизации проектирования (КСАП) – это совокупность взаимосогласованных комплексов программного, технического и информационного обеспечения, разрабатываемая, изготавливаемая и поставляемая как продукция производственно-технического назначения (рис. 1.2). В общем случае комплекс средств автоматизации состоит из программно-технических (ПТК),

программно-методических (ПМК) комплексов и отдельных компонентов обеспечений: математического и организационного [14].

Математическое обеспечение САПР включает в себя совокупность математических методов, моделей и алгоритмов обработки информации, используемых при работе системы [14].

Программное обеспечение (ПО) (software) представляет собой совокупность компьютерных программ с соответствующей программной документацией (по ГОСТ 19.101-77). Согласно требованиям, ПО должно иметь иерархическую структуру и быть составлено из отдельных модулей и подсистем [14]. Программные модули и подсистемы должны выполнять преобразование информации. Они должны быть написаны на одном из стандартных языков программирования и удовлетворять принятым соглашениям о представлении данных. Различают *общесистемное ПО* и *прикладное ПО*. Общесистемные ПО составляют программы, предназначенные для организации вычислительного процесса, например, операционные системы, системы управления базами данных, текстовые и табличные редакторы и т.д. Прикладное ПО, представляющее собой совокупность программ, предназначенных для реализации проектных процедур и информационных технологий [14].

Информационное обеспечение (ИО) составляет совокупность информации, используемой в процессах автоматизированного проектирования. ИО включает в себя архив технических документов, справочники, классификаторы, комплекс нормативной документации, набор входных и выходных данных компьютерных программ и т.п. [14].

Методическое обеспечение представляет собой совокупность документов. Эти документы описывают технологию работы АС, методы выбора и применения пользователями технологических приемов для получения конкретных результатов.

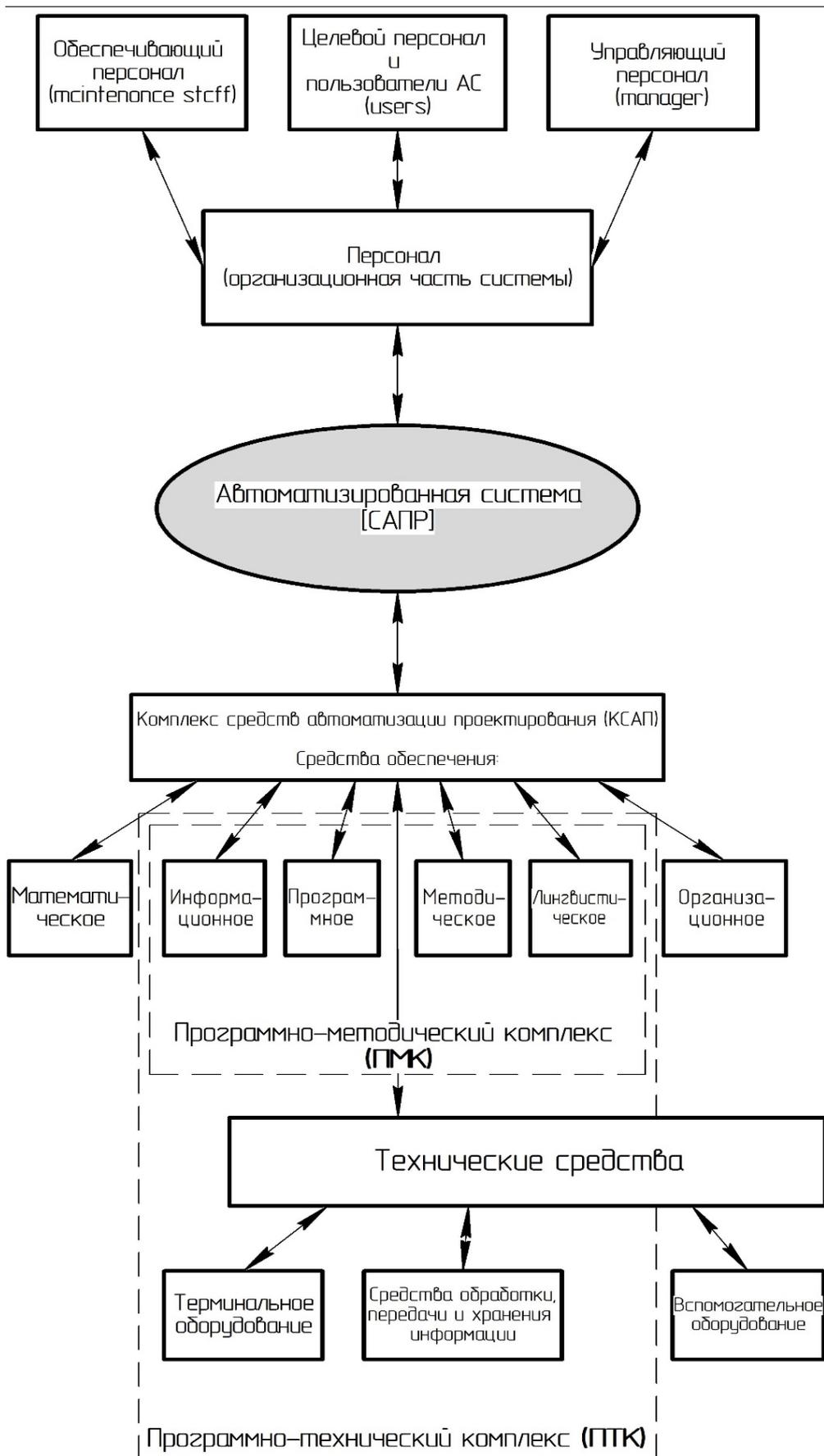


Рис. 1.2. Структура САПР

Под методическим обеспечением понимают ведомости эксплуатационных документов, описания САПР, инструкции по эксплуатации КСАП, описания программного обеспечения, описания языков программирования, руководства по техническому обслуживанию [14].

Руководства пользователя АС, руководства администратора АС и руководства системного и прикладного программиста, оператора и т.д. являются методическим обеспечением программно-методических комплексов [14].

Лингвистическое обеспечение является совокупностью правил, используемых при общении человека с САПР. Совокупность универсальных алгоритмических языков программирования и специализированных проблемно-ориентированных языков составляет лингвистическое обеспечение.

Организационное обеспечение представляет совокупность документов, устанавливающих организационную структуру системы, права и обязанности пользователей и эксплуатационного персонала, необходимых для выполнения конкретных автоматизируемых функций, принципы деятельности в условиях работы системы, а также формы представления результатов работы. По форме организационное обеспечение может состоять из положений, инструкций, приказов, штатных расписаний, должностных инструкций и других организационно-распорядительных документов, регламентирующих организационную структуру подразделений проектной организации и их взаимодействие с комплексом средств автоматизированного проектирования [14].

Техническое обеспечение (ТО) (*hardware*) – это совокупность технических средств, необходимых для функционирования АС». В зависимости от назначения ТО делится на группы: терминальное оборудования; средства обработки, передачи и хранения информации; вспомогательное оборудование.

Компьютеры, используемые для организации автоматизированных рабочих мест (АРМ), и периферийное оборудование в совокупности составляет *терминальное оборудование*.

Средства обработки, передачи и хранения информации – это серверы, компьютеры коллективного доступа, хранилища данных, оборудование локальных и глобальных компьютерных сетей.

Вспомогательное оборудование – это оборудование для обеспечения работы терминального оборудования и средств обработки, передачи и хранения информации.

Программные комплексы и подсистемы.

Система автоматизированного проектирования имеет иерархическую структуру подсистем. Подсистемы связаны с функциональным назначением или организационной структурой предприятия. На рис. 1.3 показана иерархическая структура САПР.

Подсистемы могут функционировать автономно или быть встроенными в состав основной системы. В свою очередь подсистемы могут иметь собственное внутреннее деление на уровни – подсистемы, для которых уровень, расположенный выше, рассматривается как родительская система. Например, САД-, САМ-, САЕ-системы, можно рассматривать, как подсистемы комплексной САПР предприятия, а в состав САД-системы входят подсистемы геометрического моделирования и разработки проектно-конструкторской документации [14].

Все системы, по своему служебному назначению, различаются на проектирующие и обслуживающие.

Проектирующие подсистемы имеют объектную ориентацию и реализуют определенный этап проектирования [14].

Обслуживающие подсистемы имеют общесистемное применение и обеспечивают поддержку функционирования прикладных (проектирующих) подсистем [14].

В системах автоматизированного проектирования можно выделить две части: «программно-методический» и «программно-технический» комплекс.

Комплексная САПР

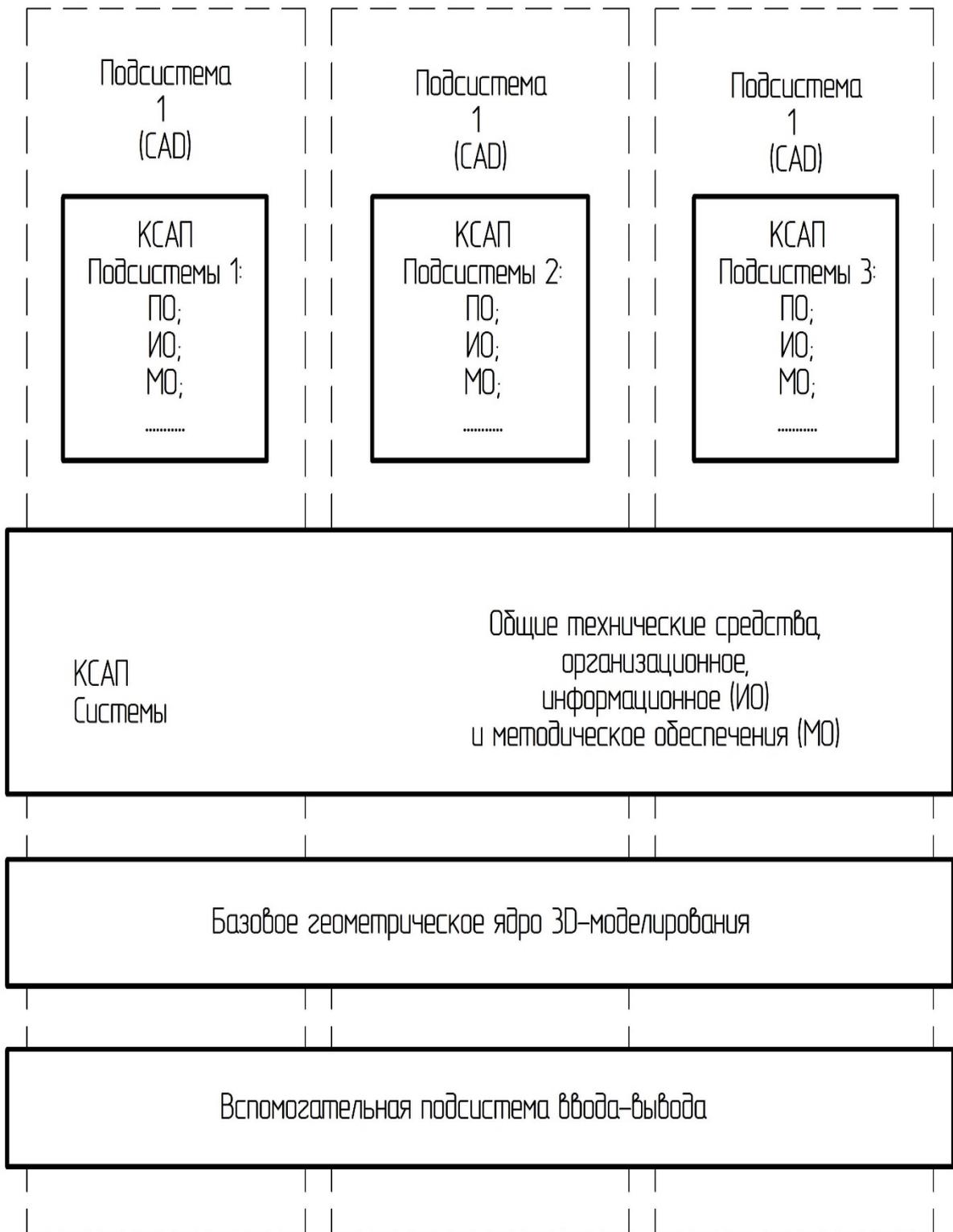


Рис. 1.3. Иерархическая структура САПР

Программно-методический комплекс (ПМК) представляет совокупность компонентов программного, информационного и методического обеспечения, включая иногда компоненты математического и лингвистического обеспечения, необходимую для получения проектного решения. Как правило, ПМК является коммерческим информационным продуктом, разрабатываемым фирмами-производителями [14].

Программно-технический комплекс (ПТК) состоит из взаимосвязанного программного и технического обеспечений, достаточных для автоматизированного выполнения определенной задачи [14].

Типовой состав модулей нефтегазовой САПР

В настоящее время сложился следующий типовой состав модулей и подсистем (табл. 1.1). Данный состав используется практически в любой системе нефтегазовой отрасли.

Таблица 1.1

Типовой состав САПР

Базовая часть системы, обеспечивающая геометрическое моделирование технических объектов (CAD)
<ul style="list-style-type: none"> - Гибридное твердотельное и поверхностное моделирование деталей. - Моделирование и анализ больших сборок неограниченного размера и степени вложенности компонент. - Параметризация 2D- и 3D-моделей деталей и сборок. - Получение ассоциативных плоских проекционных видов, разрезов и сечений. - Анализ интерференции компонент. - Расчет геометрических параметров деталей и сборок.
Модули промышленного дизайна, компьютерной графики и виртуальной реальности
<ul style="list-style-type: none"> - Создание фотореалистических изображений деталей и сборок. - Управление цветом, текстурами и оптическими свойствами поверхностей, прозрачностью тел. - Визуализация растровых изображений геометрических моделей с использованием различных технических средств. - Анимация геометрических и графических моделей, в том числе моделирование разнесения и кинематики движения частей сборок.

<p>Подсистема компьютерного конструирования и инженерной графики, обеспечивающая учет стандартов и нормалей машиностроения</p>
<ul style="list-style-type: none">- Автоматизация моделирования конструктивных элементов машиностроительных изделий (фаски, скругления, отверстия, ребра жесткости и т.п.).- Создание и использование параметрических фрагментов типовых конструктивных элементов (проточки, вырезы, бобышки и пр.).- Автоматизация нанесения размеров и обозначений на чертежах.- Автоматизация разработки и оформления эскизов и чертежей в соответствии с определенной системой стандартов и правил (форматы, шаблоны оформления, печать документов).- Автоматизация подготовки машиностроительных спецификаций, ведомостей, табличных и текстовых конструкторских документов.
<p>Прикладные модули и подсистемы проектирования изделий с учетом специфики изготовления и эксплуатации</p>
<ul style="list-style-type: none">- Проектирование штампованных деталей из листовых материалов.- Трассировка трубопроводов, электропроводки и других коммуникаций.- Автоматизация проектирования металлических сборных и сварных конструкций и т.д.
<p>Объектно-ориентированные проектно-конструкторские подсистемы, обеспечивающие автоматизацию расчетно-графических работ</p>
<ul style="list-style-type: none">- Автоматизация проектирования зубчатых соединений и редукторов.- Автоматизация проектирования металлоконструкций из профилей.- Автоматизация разработки штампов для листовой штамповки.- Автоматизация разработки штампов для объемной штамповки.- Автоматизация проектирования пресс-форм для деталей, изготавливаемых из пластмасс и т.д.
<p>Подсистема инженерного анализа на базе МКЭ, обеспечивающая моделирование физического состояния конструкций и процессов (CAE)</p>
<ul style="list-style-type: none">- Модули для инженерного анализа с использованием МКЭ, в том числе моделирование и анализ силовой работы конструкций.- Моделирование и анализ физических полей, течения жидкости и газа, термодинамики и других процессов.- Моделирование поведения машин и механизмов, в том числе динамики движения и т.д.

<p align="center">Подсистема автоматизации проектирования технологических процессов и разработки технологической документации (САРР)</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Проектирование технологических процессов по процессам-аналогам. - Проектирование ТП на базе конструктивно-технологических параметров (элементов). - Расчет режимов резания, сварки, термообработки. - Планирование сборочных операций. - Трудовое и материальное нормирование. - Генерация и оформление технологических карт и ведомостей.
<p align="center">Подсистема моделирования технологических процессов металлообработки и программирования оборудования с ЧПУ(САМ)</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Модуль разработки управляющих программ для фрезерных станков с ЧПУ. - Модуль разработки управляющих программ для токарных станков и обрабатывающих центров. - Модуль разработки программ для электроэрозионного оборудования. - Модуль разработки программ для раскроя листового материала, и т.д.
<p align="center">Подсистема реверсивного инжиниринга, измерения и контроля материальных моделей</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Модуль сопряжения с цифровыми контрольно-измерительными машинами и устройствами. - Модуль восстановления геометрической модели по облаку точек. - Модуль автоматизации измерения деталей сложной формы, анализа и сравнения их с геометрической мастер-моделью. - Модуль обмена данных и сопряжения с цифровыми установками быстрого прототипирования (PR) и т.д.
<p align="center">Модули и средства системной интеграции(PDM), обмена данными и прикладного программирования (API)</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Подсистема управления инженерными данными и организации групповой работы пользователей. - Модули трансляции моделей в стандартные и популярные форматы хранения и передачи данных. - Модули интеграции с другими системами автоматизации и управления. - Средства пользовательского интерфейса для прикладных систем (API) и т.д.

**Библиотеки и базы данных, стандартных и нормализованных деталей.
Электронные конструкторские и технологические справочники**

- База данных шаблонов конструкторских документов.
- Библиотека типовых фрагментов чертежей и схем.
- Библиотека типовых общетехнических нормалей: крепежа, подшипников, профилей и пр.
- Библиотека деталей трубопроводов и вентиляции.
- Библиотека конструкторских обозначений и технических требований.
- Библиотека геометрических конструктивов: отверстий, проточек, канавок, пазов, бобышек и пр.
- Библиотека деталей штампов и пресс-форм.
- Справочник материалов и сортаментов.
- База данных шаблонов технологических документов.
- Библиотека технологических обозначений и текстов.
- Справочник технологического оборудования.
- Справочник станочных приспособлений и инструментов и т.д.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение и поясните назначение и место САПР в общем комплексе задач автоматизации нефтегазового комплекса.
2. Расшифруйте аббревиатуру, дайте определение и поясните термина *CAD*-система.
3. Расшифруйте аббревиатуру, дайте определение и пояснит термина *CAM*-система.
4. Расшифруйте аббревиатуру, дайте определение и поясните термина *CAE*-система.
5. Расшифруйте аббревиатуру, дайте определение и поясните термина *CAPP*-система.
6. Расшифруйте аббревиатуру, дайте определение и поясните термина *PDM*-система.
7. Дайте определение САПР по стандарту и поясните роль системного подхода к разработке и внедрению автоматизированных систем предприятия.
8. Приведите и прокомментируйте структурную схему САПР.
9. Перечислите основные средства обеспечения САПР.

10. Что входит в состав программно-методических и программно-технических комплексов?

11. Приведите типовой состав модулей САПР нефтегазовой отрасли.

12. Перечислите направления применения САПР в нефтегазовой отрасли.

Список литературы

1. ГОСТ 23501.101-87. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения.

2. ГОСТ 23501.108-85. Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначения.

3. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на информационные системы. Термины и определения.

4. ГОСТ 34.601-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на информационные системы. Стадии создания.

5. ГОСТ Р ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества.

6. ГОСТ Р ИСО 10303-11-2004. Системы автоматизированного производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Ч.II. Методы списания. Справочное руководство по языку EXPRESS.

7. ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы автоматизированного производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Ч.1. Общие представления и основополагающие принципы.

8. ГОСТ Р ИСО 10303-239-2008. Системы автоматизированного производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Ч.239. Прикладные протоколы. Поддержка жизненного цикла изделия.

9. Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования.

10. Р 50.1.031-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Ч. 1.

11. Виртуальная сборка Boeing 787 Dreamliner. CNews: 12.12.06. — <http://www.cnews.ru/news/top/index.shtml/2006/12/12/227859>

12. Ковшов А. Н. Информационная поддержка жизненного цикла изделия машиностроения: принципы, системы и технологии CALS/ИПИ/ А. Н. Ковшов, Ю. Ф. Назаров, И. М. Ибрагимов и др. М.: Академия, 2007. 304с.

13. Кондаков А. И. САПР технологических процессов: учебник для студ. высш. учеб. Заведений/ А. И. Кондаков. М.: Академия, 2007. 272с.

14. Черепашков Н. В. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении / Н. В. Черепашков, Н. В. Носов. Волгоград : ИН-ФОЛИО, 2009. 591 с.
15. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE)/ К.Ли. СПб.: Питер, 2004. 504с.
16. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования/ И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 336с.
17. <http://www.cadcamcae.lv/>
18. <http://www.sapr.ru/>
19. Галлагер Р. МКЭ: Основы / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 215с.
20. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике/ Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 541с.
21. Клебанов Я. М. Современные методы компьютерного моделирования процессов деформирования конструкций / Я. М. Клебанов, В. Г. Фокин, А. Н. Давыдов: учебное пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2004. 100с.
22. Колчин А. Ф. Управление жизненным циклом продукции / А. Ф. Колчин, М. В. Овсянников, А. Ф. Стрекалов, С. В. Сумароков. М.: Анахарсис, 2002. 304 с.

ГЛАВА 2. ПРИМЕНЕНИЕ *SOLIDWORKS* ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сварное соединение представляет собой участок конструкции изделия, на котором его элементы соединены сваркой. Сварка – это технология создания неразъемного соединения с жесткой механической связью. По взаимному расположению соединяемых элементов различают сварные соединения: стыковые, тавровые, нахлесточные и угловые. Каждое из соединений имеет свои специфические признаки в зависимости от способа сварки – дуговой, роликовой и т.д.

Сварной шов – это участок соединения, связывающий свариваемые элементы. Он образуется в результате кристаллизации расплавленного металла или пластической деформации при сварке давлением, или в результате сочетания кристаллизации и деформации. «Прежде чем приступать к созданию модели сварного соединения в *SolidWorks* (компания *Dassault Systemes*), проектировщику необходимо в полной мере владеть теоретическими основами сварки, четко представлять себе классификацию сварных швов и соединений и руководствоваться требованиями стандартов, регламентирующих правила проектирования сварных деталей и оформления конструкторской документации» [1].

В *SolidWorks* сварные швы могут создаваться во время сборки, или непосредственно на деталях. Существует три способа проектирования сварных соединений. Если модель необходимо только для оформления чертежа, то сварные швы в твердом теле создавать не надо. Их достаточно будет нанести на чертеж в виде условных обозначения. Если модель будет участвовать в расчете массово-инерционных характеристик или в прочностном анализе, то потребуется создать сварные швы в виде твердого тела.

SolidWorks представляет собой трехмерный программный комплекс, предназначенный для автоматизации проектных и конструкторских работ. Программа имеет традиционный вид для операционных систем *MS Windows* с русскоязычным интерфейсом и документацией.

2.1. Конфигурации *SolidWorks* (SWS)

Компания *Dassault Systemes* сегодня выпускает три конфигурации: стандартную конфигурацию *SolidWorks*, профессиональную конфигурацию *SolidWorks*, премиальную конфигурацию *SolidWorks*.

Стандартная конфигурация *SolidWorks* является базовой и включает следующие возможности:

- гибридное параметрическое твердотельное и поверхностное геометрическое 3D-моделирование с функциями автоматизации и построения геометрических конструктивов;
- автоматизация конструирования деталей изделий с использованием библиотек стандартных элементов и вариационной параметризации;
- автоматизация проектирования больших сборок и изделий с возможностью контекстного редактирования деталей;
- автоматизация проектирования изделий с учетом специфики изготовления и функционального назначения: штамповкой из листового материала; конструированием пресс-форм и штампов и т.д.;
- автоматизация проектирования сварных конструкций с автоматизацией разделки под сварку и библиотекой стандартных элементов;
- создание чертежных видов по 3D-модели с автоматизацией простановки размеров и обозначений, с указанием технических требований;
- имитация работы механизмов и контактных взаимодействий;
- трансляции данных в различные форматы [1].

Профессиональная конфигурация *SolidWorks* включает функциональные возможности стандартной *SolidWorks* и ряд следующих дополнительных подсистем:

- *Toolbox* – графические библиотеки (базы данных) стандартных изделий;
- *FeatureWorks* – распознавание импортированной геометрии;
- *PhotoWorks* – создание фотореалистичных растровых изображений по 3D-моделям;
- *Animator* – создание анимации на основе 3D-моделей;
- *3D Instant Website* – создание интерактивных 3D-моделей для публикации в Интернет;

– *eDrawings Professional* – просмотр и согласование документов и результатов экспресс-анализа *COSMOSXpress*, *MoldflowXpress*».

Премиальная конфигурация *SolidWorks* дополняет возможности профессиональной *SolidWorks* следующими модулями:

- *Routing* – проектирование трубопроводов и электрожгутов с использованием библиотек стандартных элементов;
- *COSMOSWorks Designer* – расчет на прочность конструкций в упругой зоне, постановка и решение контактных задач, расчет сборок;
- *COSMOSMotion* – решение задач кинематики и динамики.

2.2. Основы работы в *SolidWorks*

Используемый в *SolidWorks* принцип трехмерного проектирования позволяет создавать сложные объемные 3D-модели изделий и сборок и представлять их в виде плоских чертежей и другой документации по действующим стандартам.

К основным решаемым задачам системы *SolidWorks* относятся:

- 1) 3D-моделирование разных твердых тел;
- 2) проведение расчетов на прочность деталей;
- 3) создание разнообразных чертежей и документов;
- 4) проектирование изделий из листового материала;
- 5) проектирование сварных конструкций;
- 6) разработка электрических схем;
- 7) перевод данных в различные форматы и др.

Твердотельная модель, созданная в *SolidWorks*, дает возможность получить представление о характеристиках объекта и придать ему максимальное соответствие с проектируемым изделием. Элементы в системе получаются из плоских эскизов. Процесс создания трехмерных моделей основан на методах реальных технологических процессов, т.е. добавление и снятие материала. Модели создаются в результате комбинации трехмерных примитивов путем их последовательного наращивания к базовому элементу.

Начало работы с SolidWorks

Запуск программы осуществляется как из меню Пуск, так и с Рабочего стола нажатием на значок . После того как программа загрузится, появится начальный экран программы *SolidWorks*,

который состоит из панели задач (в правой части экрана), стандартной панели инструментов (в левом верхнем углу), поиском по справке в *SolidWorks*, а также диалоговое окно: добро пожаловать в *SolidWorks* (рис. 2.1).

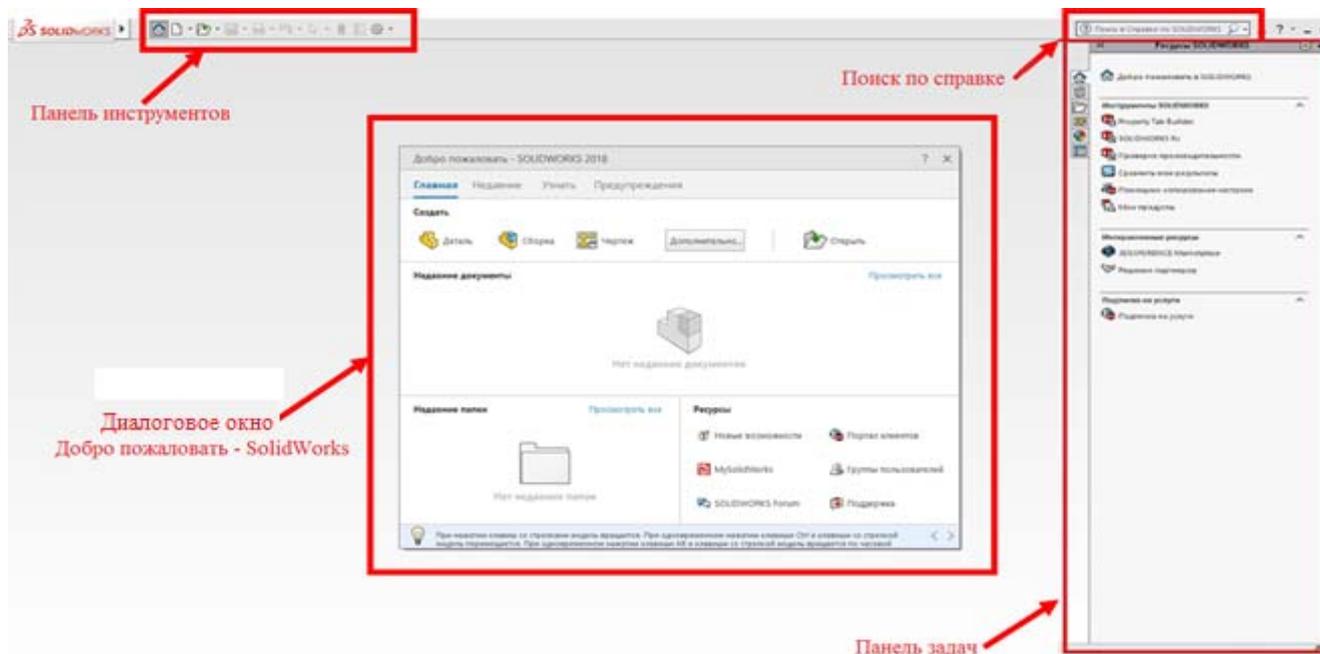


Рис. 2.1. Начальный экран

Для открытия меню программы *SolidWorks* нужно навести курсор мыши на логотип *SolidWorks* в левом верхнем углу. Закрепить меню можно нажатием мыши на «гвоздик» (рис. 2.2).

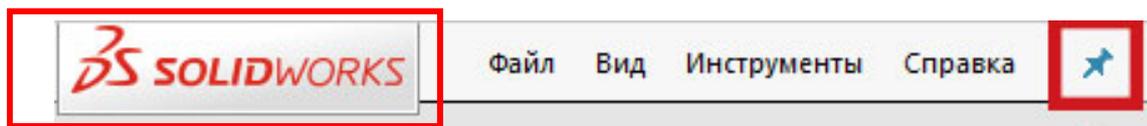


Рис. 2.2. Действие – Закрепить меню

Далее необходимо создать документ. Выбираем его тип – Деталь, Сборка или Чертеж. Используем меню программы *Файл – Новый*, или шаблон документа в диалоговом окне: *Деталь, Сборка или Чертеж*. В графической области, появившейся на экране, создается документ. Если документ уже существует используем меню *Файл – Открыть*.

Этапы проектирования можно отслеживать через *Дерево конструирования* или *Дерево построения (Feature Manager)* (рис. 2.3).

Оно представляет собой последовательность элементов, образующих деталь. Дерево содержит полную информацию о проектируемом объекте. Кроме того, здесь размещен список деталей, входящих в сборку.

Через Дерево можно выбрать и просмотреть элементы деталей и сборок, изменить последовательность их создания, а также отобразить требуемые размеры.

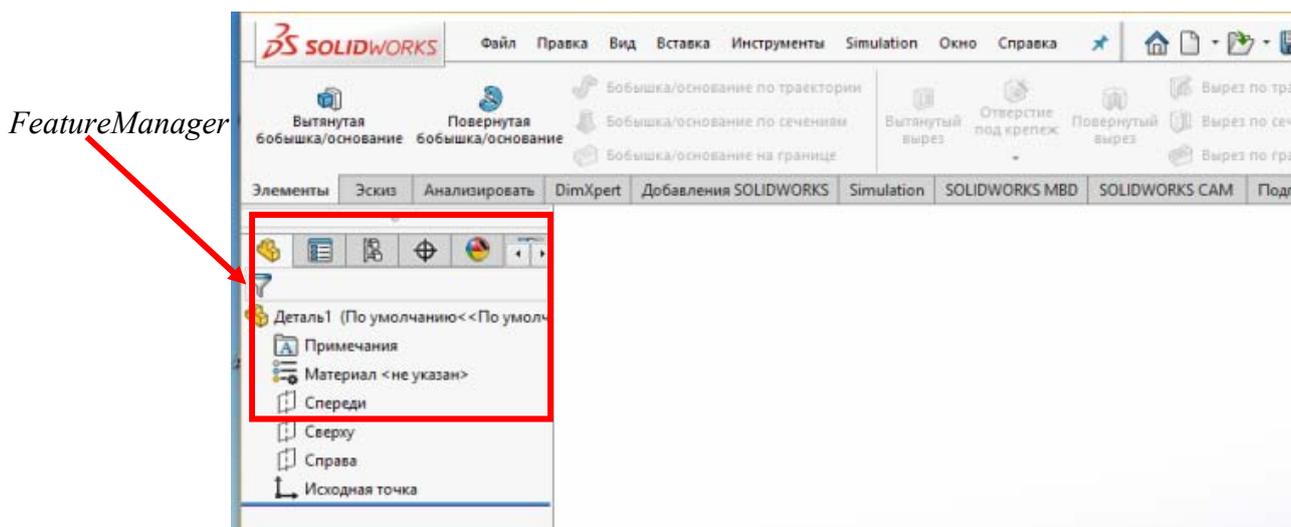


Рис. 2.3. Дерево конструирования

Для построения новой модели в Дереве предусмотрены:

- исходная точка (нулевые координаты);
- три взаимно перпендикулярные плоскости: *Спереди*, *Сверху*, *Справа*.

Интерфейс пользователя настраивается на панели инструментов.

При создании детали *Диспетчер команд* (расположен на контекстной панели инструментов) содержит пункты: *Элементы* и *Эскиз*, а для построения сборки: *Сборка* и *Эскиз* [2]. «Меню в верхней части окна содержит все команды *SolidWorks*. В нижней части окна выводится информация по выполняемой функции. При проектировании детали выбор объектов из Деревя производится по нажатию левой кнопки мыши. При нажатии правой кнопки мыши запускается всплывающее меню объекта.

Для создания 3-мерной модели детали необходимо:

1. Выбрать плоскость для построения *Эскиза*.
2. Построить плоский эскиз, проставить необходимые размеры и определить связи [2].

3. Для придания объема плоским эскизам необходимо их вытянуть, повернуть и т.д.» [2].

В качестве примера работы программы рассмотрим основные этапы создания цилиндрической детали методом Вытянутой бобышки.

Создание ступенчатого цилиндра

Для создания цилиндра необходимо выполнить следующие действия:

1. Создать новый документ – *деталь*.

2. Нажать кнопку *Вытянутая бобышка*, как показано на рис. 2.4.

3. Построить *Эскиз* трехмерного элемента. Для этого выбрать плоскость *Спереди*.

4. На закладке *Эскиз* инструментом *Окружность* построить в графической области окружность произвольным радиусом с центром в Исходной точке с нулевыми координатами (рис. 2.5).

5. Для автоматического нанесения размеров необходимо пометить дугу окружности и установить размер с помощью *Автоматическое нанесение размеров* (рис. 2.6). Программа также позволит установить допуски на размер.

6. Для сохранения эскиза нажать значок *Выход*. В левой части экрана появится окно *Менеджера*. Система предложит выбрать параметры создаваемого элемента в этом окне. Необходимо выбрать *Вытянуть*. В графической области будет отображаться предварительный вид создаваемого трехмерного элемента (рис. 2.7).

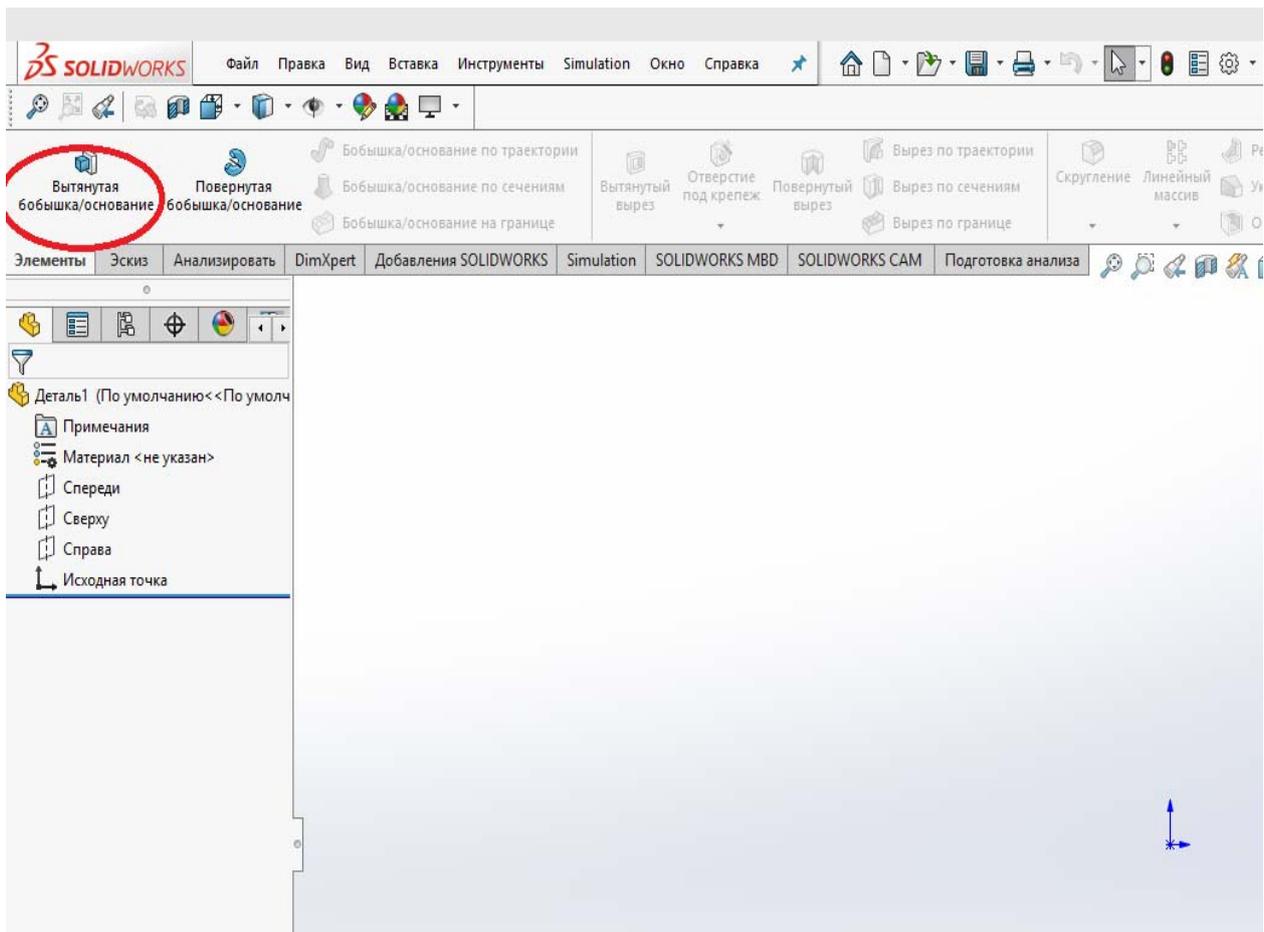


Рис. 2.4. Создание ступенчатого цилиндрического элемента-начало

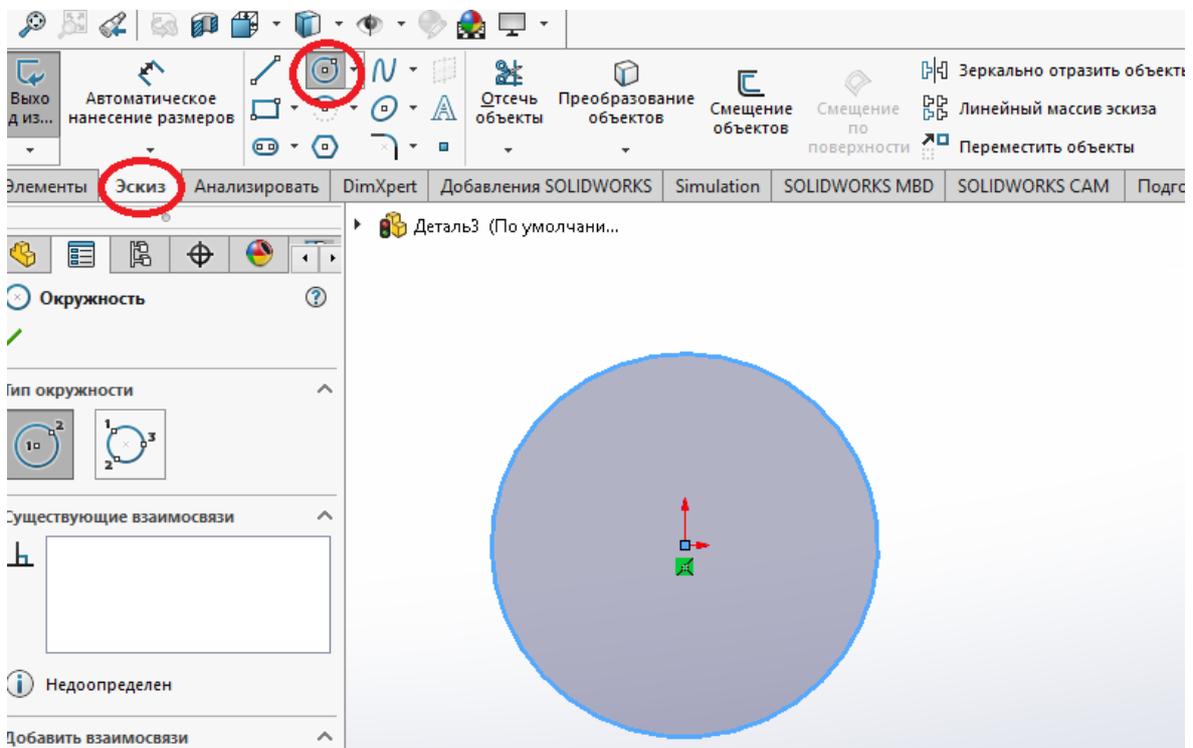


Рис. 2.5. Построение окружности

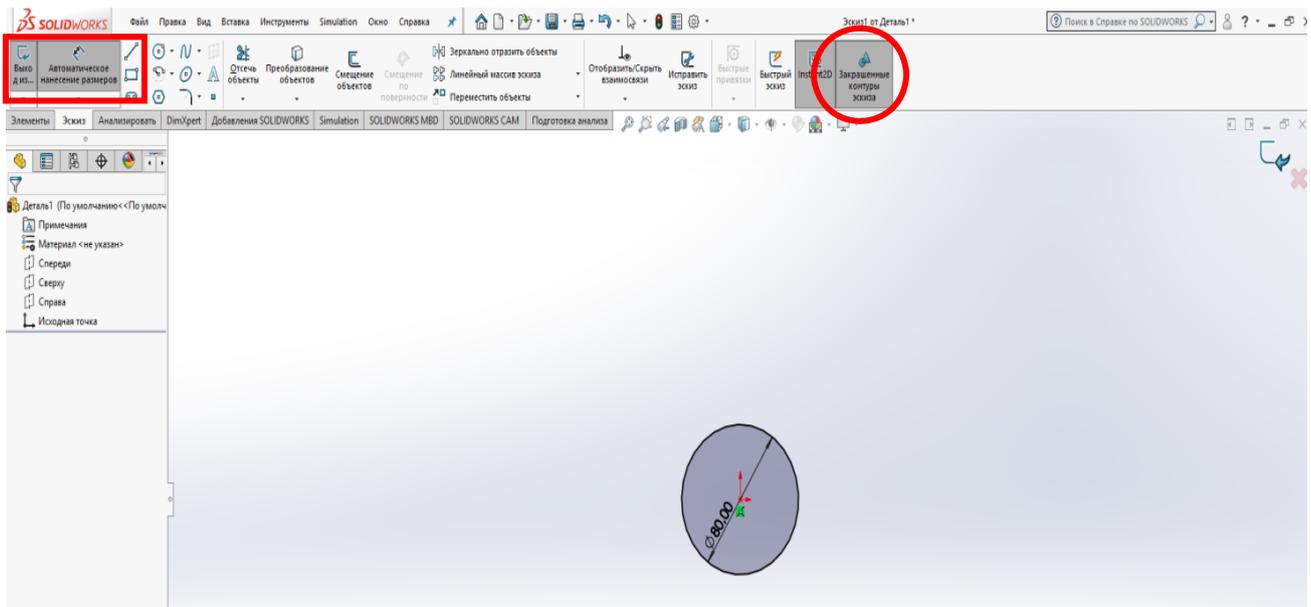


Рис. 2.6. Автоматическое нанесение размера

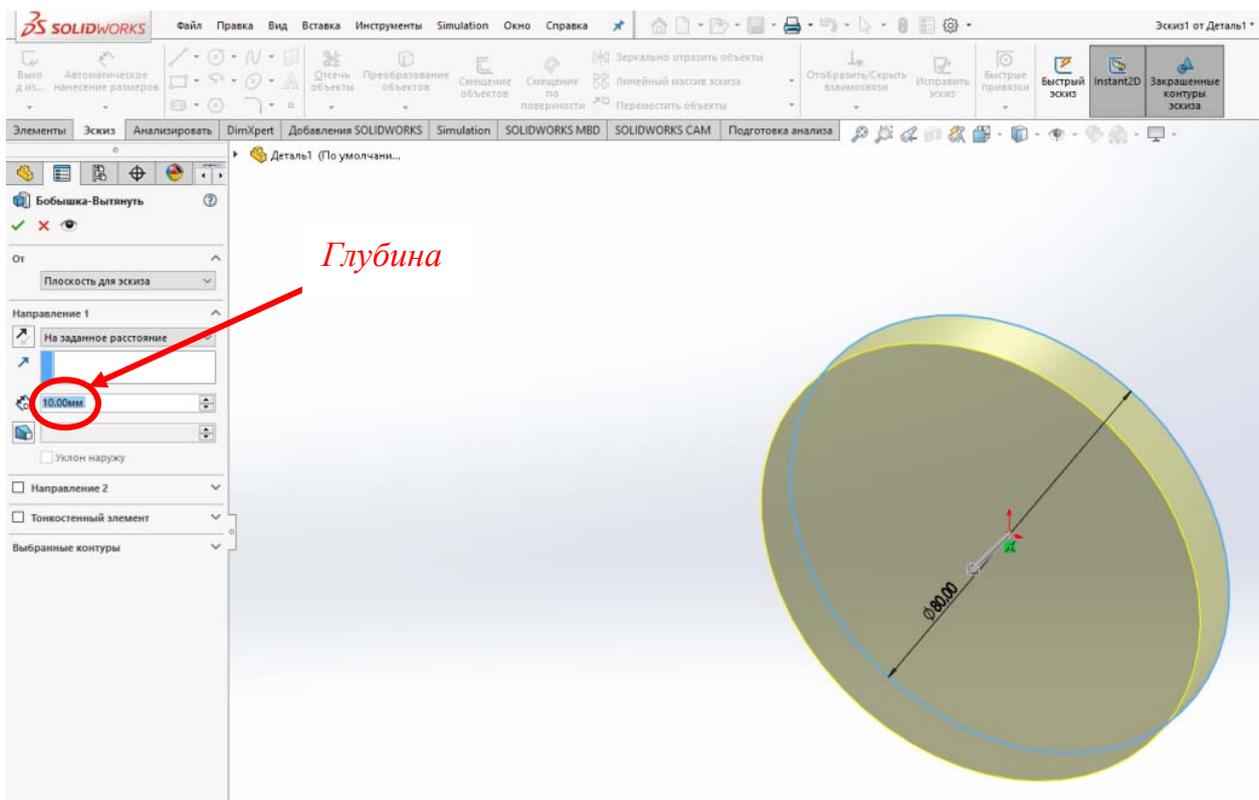


Рис. 2.7. Предварительное отображение трехмерного элемента

7. В разделе *Направление 1* окна Менеджера необходимо установить параметр *Глубина* равным 100 мм (рис. 2.8).

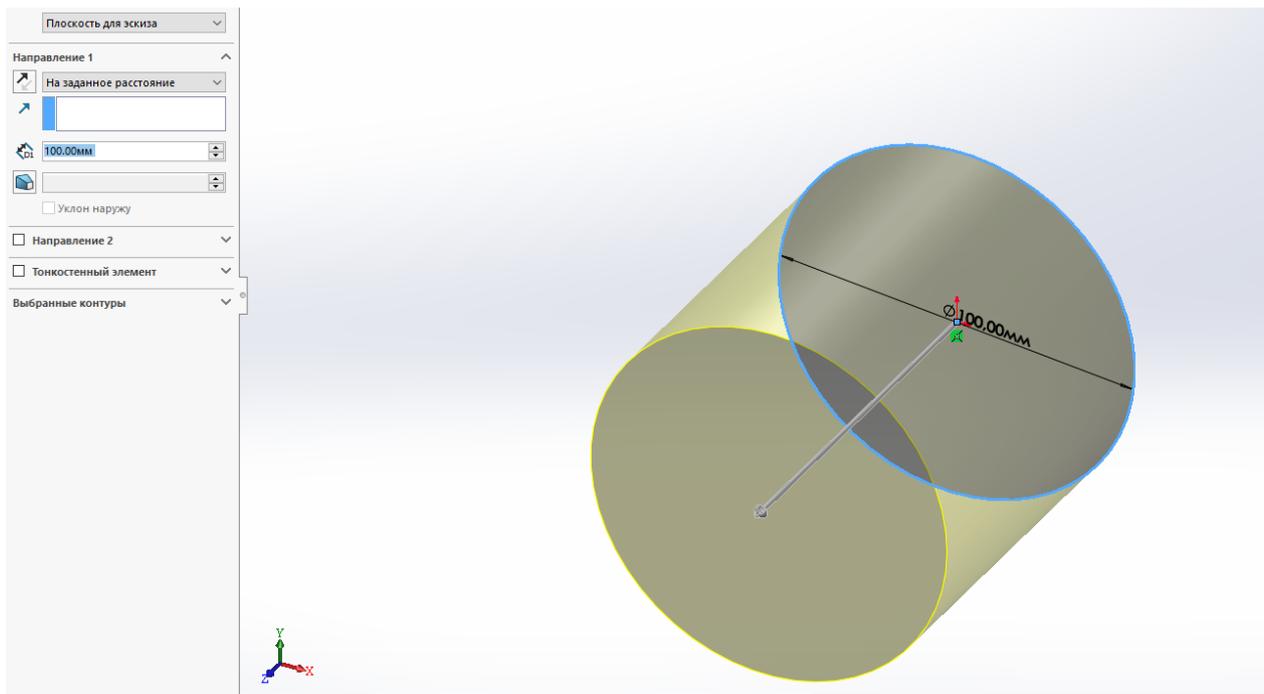


Рис. 2.8. Установка глубины трехмерного элемента

8. Нажать *Enter* или *Ok*. В правом верхнем углу экрана в окне *Угол* находится значок принятия элемента для выбора в графической области. Этот элемент называется основанием (рис. 2.9).

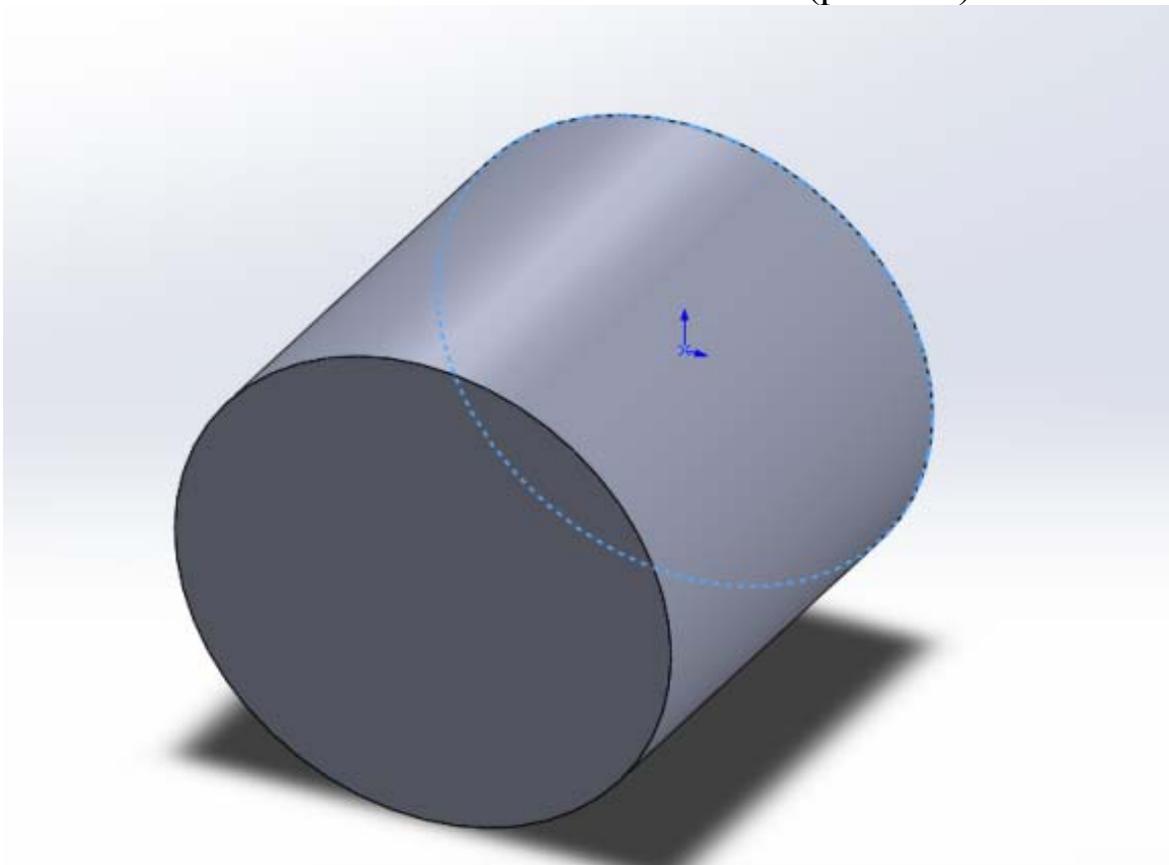


Рис. 2.9. Основание трехмерного элемента

9. Сохранить деталь под именем Деталь1.sldprt.

Используя панель *Стандартные виды* можно изменить ориентации вида. Существует шесть стандартных видов: *Спереди*, *Сзади*, *Сверху*, *Снизу*, *Справа*, *Слева*, а также изометрические проекции *Изометрия*, *Диметрия*, *Триметрия* (рис. 2.10). Ориентации видов соответствуют расположению основных плоскостей: *Спереди*, *Сверху*, *Справа*.

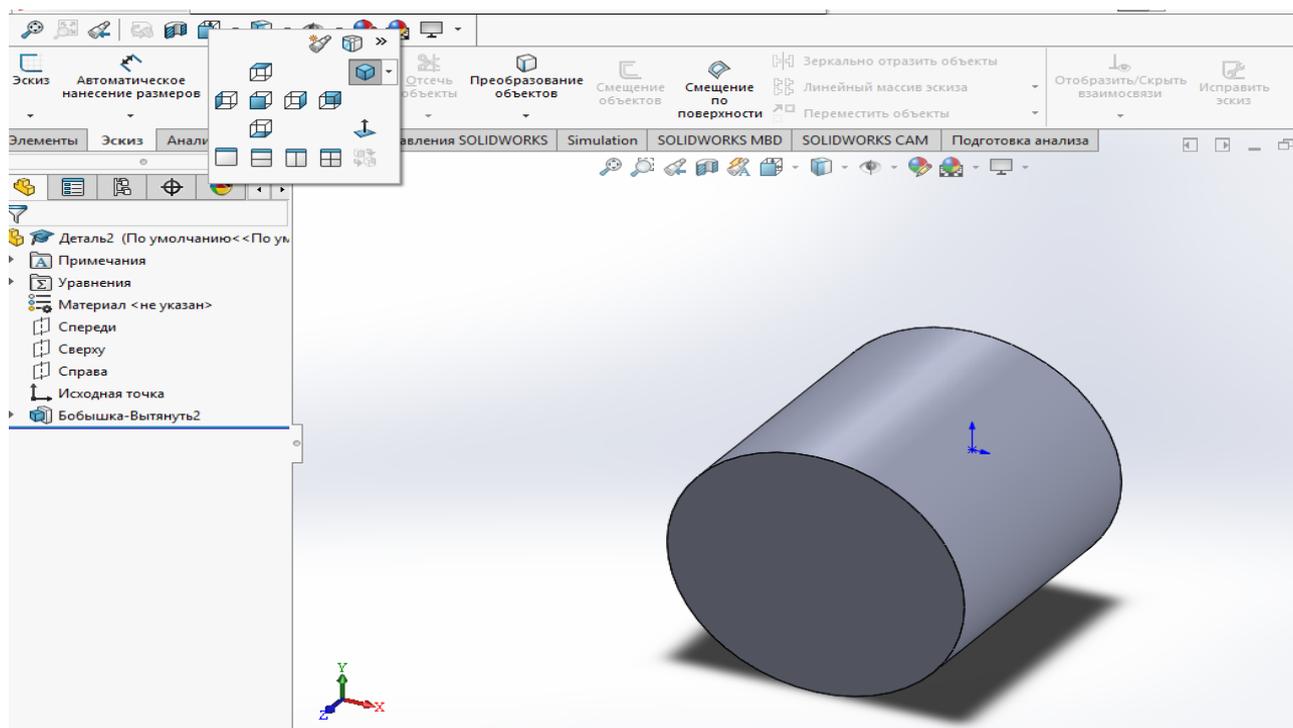


Рис. 2.10. Инструменты «Стандартный вид»

Всплывающее меню в левом нижнем углу графического окна предназначено для установки вида. В нем отображается текущая ориентация вида. Здесь можно также задать число видов: *Один вид*, *Два вида*, *Четыре вида* (рис. 2.11).

Построения дополнительных элементов на гранях или на рабочих поверхностях построенной модели можно проводить через стандартные плоскости (рис. 2.12–2.13).

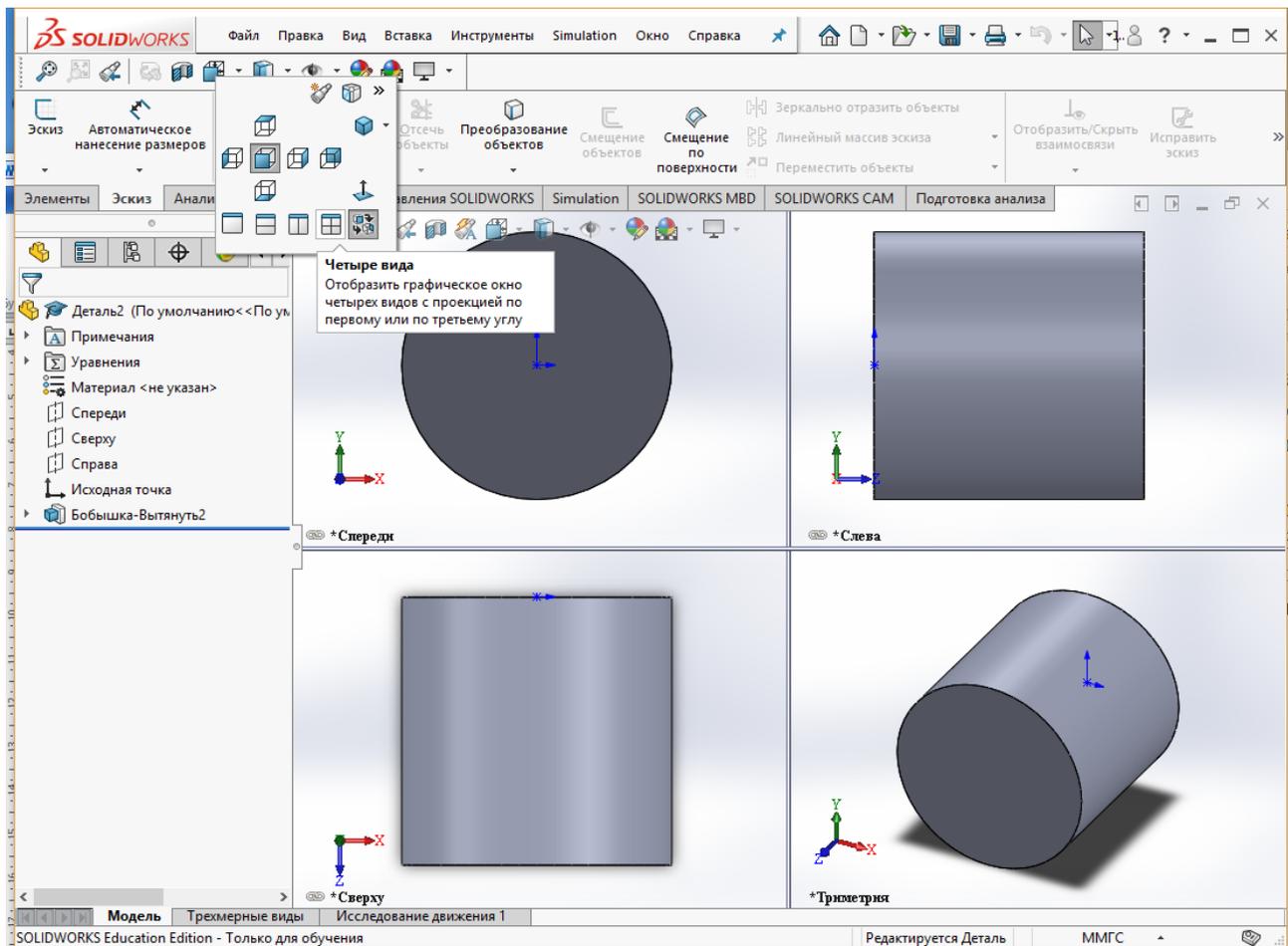


Рис. 2.11. Текущая ориентация вида и количество видов в графической области

Для создания выреза четверти модели необходимо выбрать вид сверху и создать эскиз в виде двух отрезков (рис. 2.14).

Выбрать команду *Вытянутый вырез*. Направление для выреза определяется стрелкой на отрезке, указывающей на ту часть, которая будет удалена. В результате этих действий получим требуемую модель (рис. 2.15).

При работе с системой *SolidWorks* удобно пользоваться меню *Поиск по справке*, находящейся в правом верхнем углу экрана. Возникающие вопросы можно решить также нажатием кнопки *Help?* на панели инструментов.

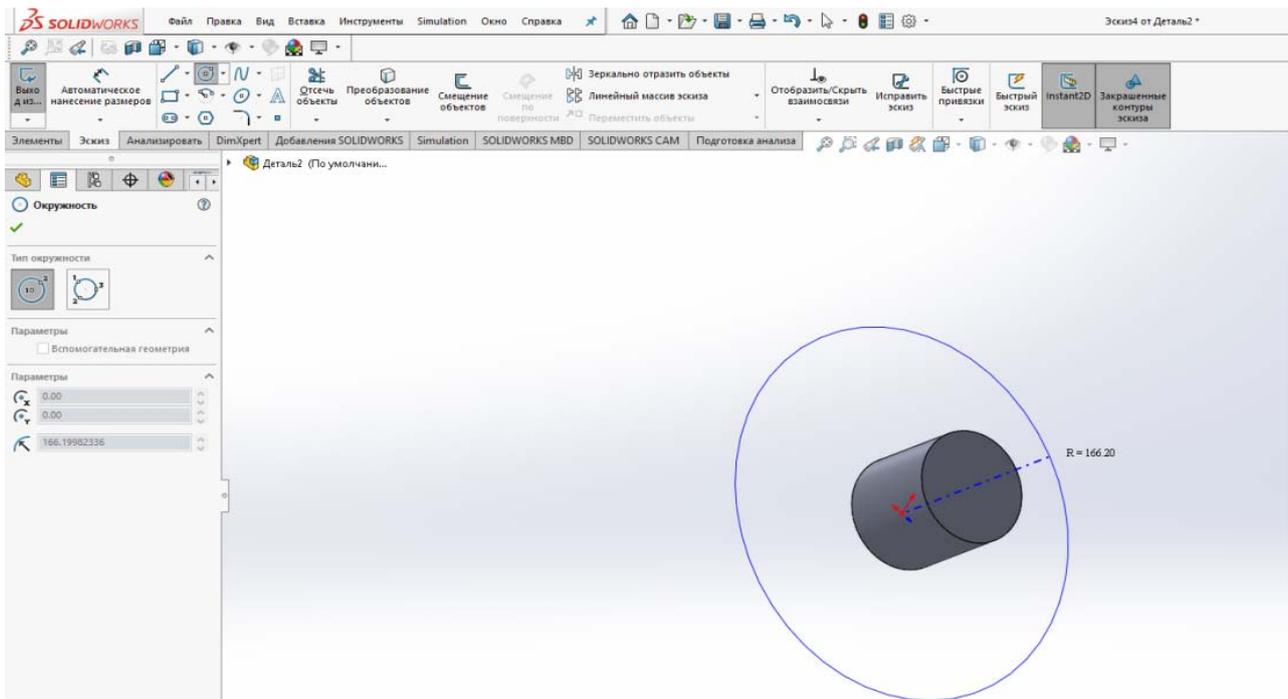


Рис. 2.12. Построение дополнительных элементов

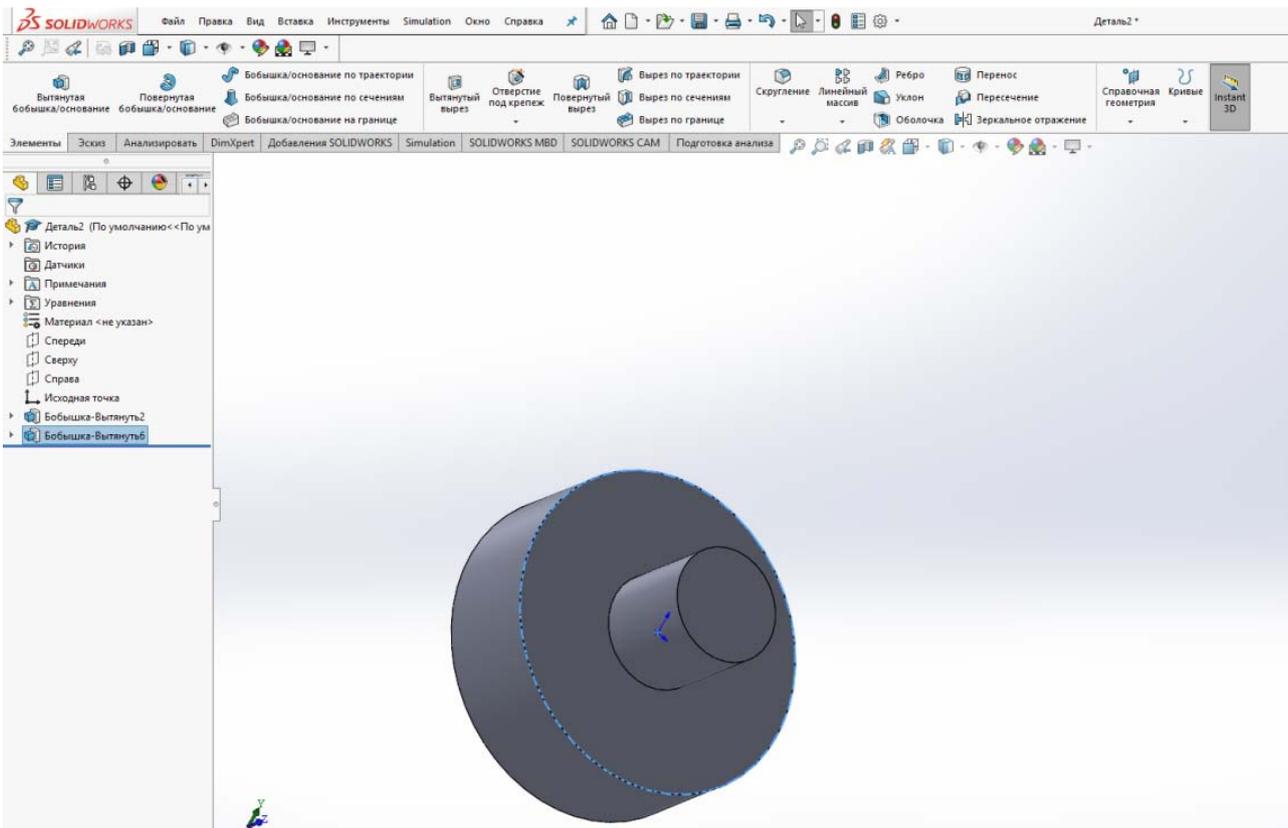


Рис. 2.13. Построение дополнительных элементов

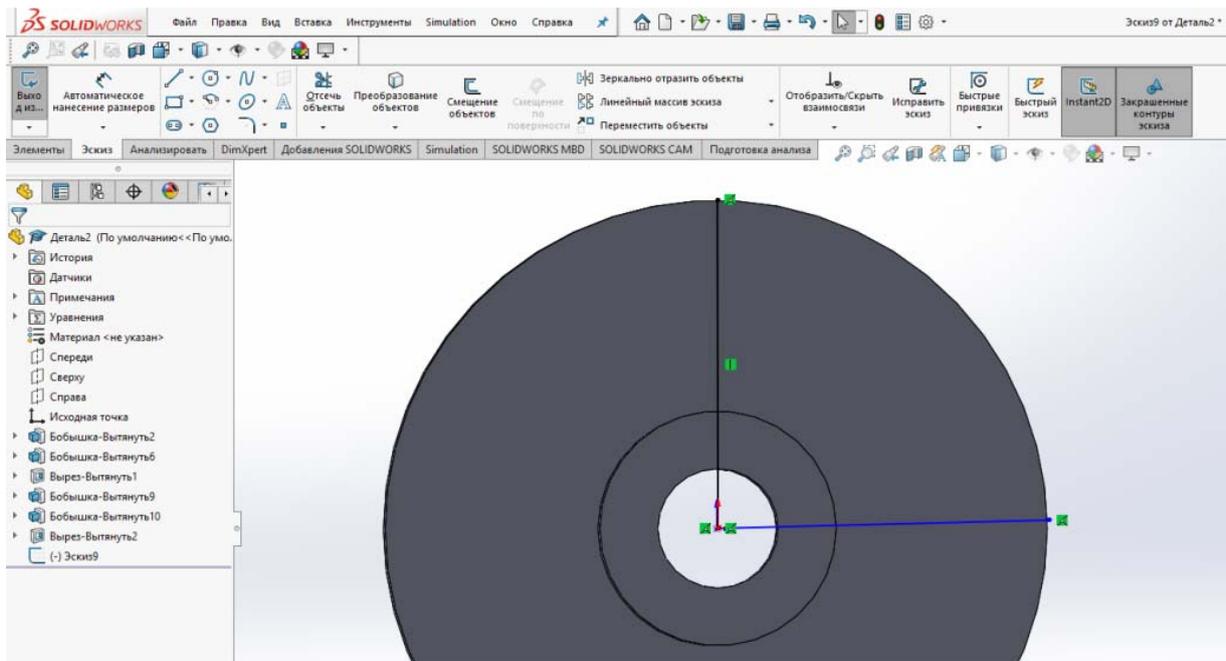


Рис. 2.14. Создание выреза

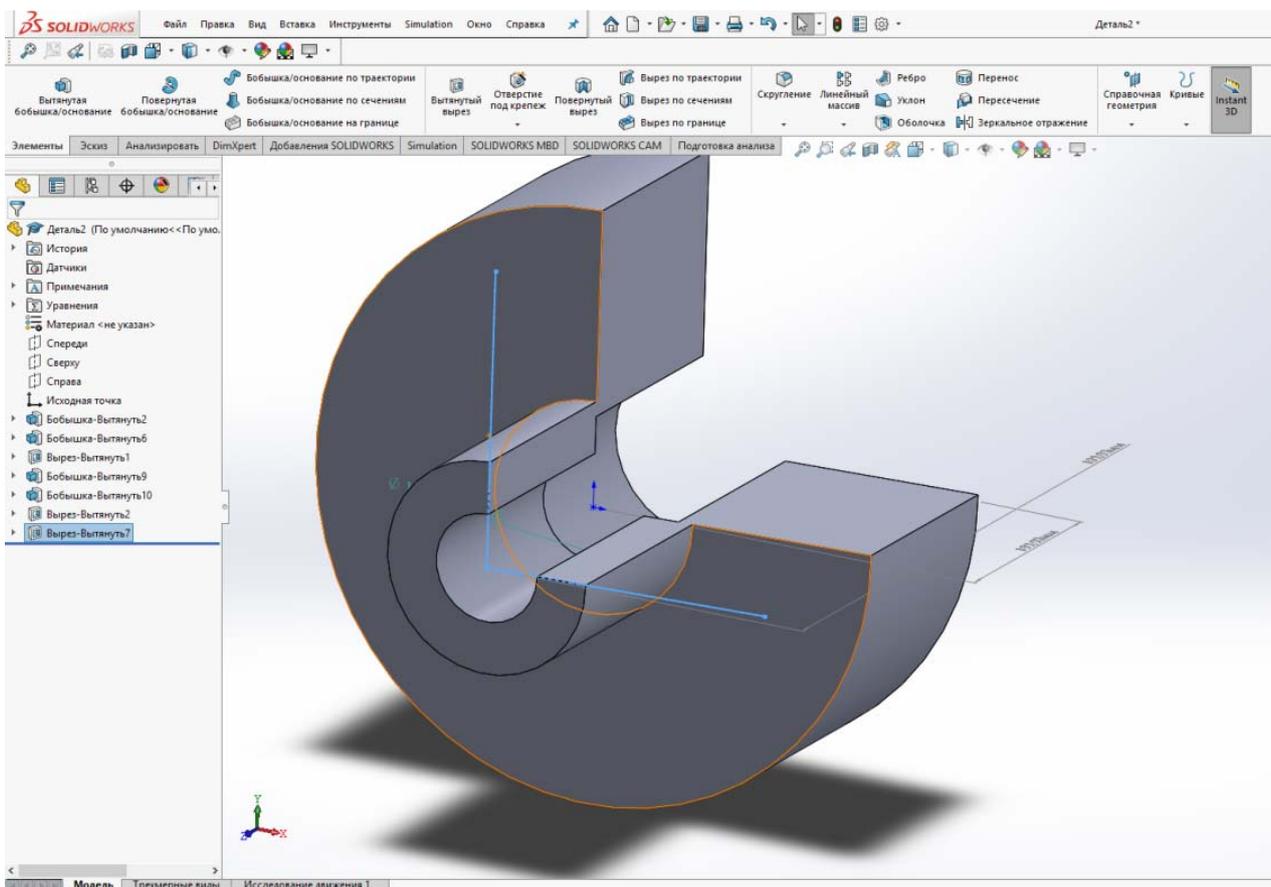


Рис. 2.15. Выполнение команды Вытянутый вырез

Для получения доступа к меню различных инструментов и команд в процессе работы в *SolidWorks* можно установить указатель на необходимый элемент модели или Дерева конструирования или нажать правую клавишу мыши.

2.3. Проектирование сварных конструкций в *SolidWorks*

Как уже говорилось, в *SolidWorks* сварные швы могут создаваться при сборке или в деталях.

Создадим сварную конструкцию «ступенчатый цилиндрический элемент». Изделие получается сваркой двух цилиндров различного диаметра. Для этого через меню *Деталь* необходимо построить модели цилиндров. Для дальнейшей работы зайти в меню *Сборка* и создать новый документ (рис. 2.16). Сборку можно создавать методом «снизу вверх» или «сверху вниз», а также комбинацией этих двух методов. Будем использовать метод проектирования «снизу вверх», что предполагает проектирование деталей и их дальнейшую вставку в сборку (сварку).

Используем меню *Вставка – Компонент – Из файла* (рис. 2.17).

Переместить модели деталей в графическую область (рис. 2.18).

Через меню *Вставка* войти в меню *Условия сопряжения* (рис. 2.19).

Для установки деталей по месту предполагаемой сварки необходимо воспользоваться менеджером свойств *Property Manager*

 в левой части экрана. Выбрать из меню  *Концентричность*. Отметить поверхности сопряжения и зафиксировать их зеленой галочкой (рис. 2.20).

На следующем этапе проектируем сварной шов. Воспользуемся меню *Вставка – Элемент сборки – Сварной шов* (рис. 2.21). Необходимо выбрать нужный тип сварного шва из списка, в которой перечислены виды швов и необходимая форма разделки кромок соединяемых элементов при автоматизированной и ручной сварке.

Далее указать в меню *Путь сварки*. Отметить на модели кромку (рис. 2.22). Если сварка необходима на нескольких поверхностях, то указать их как кромки 2, 3 и т.д.

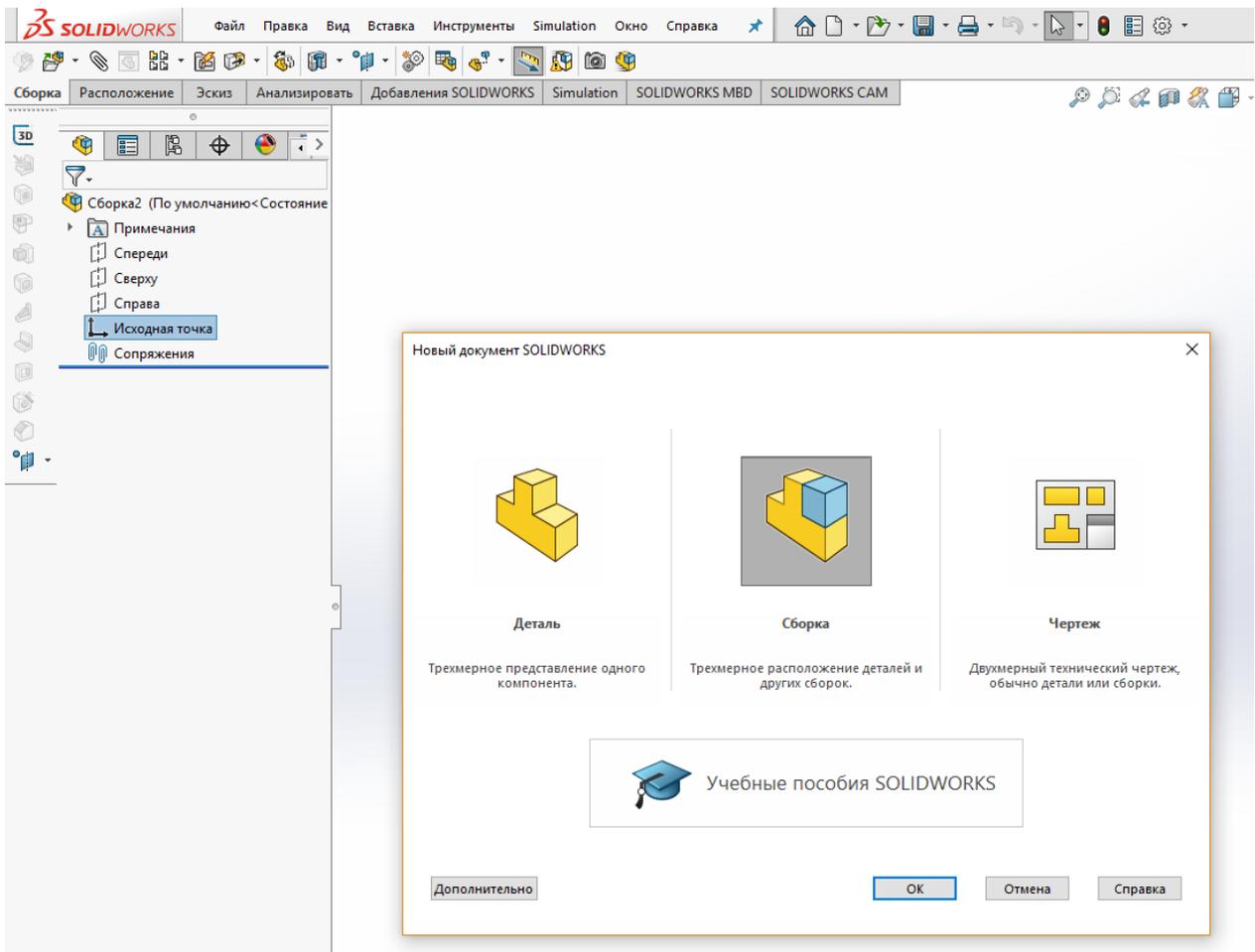


Рис. 2.16. Меню «Сборка»

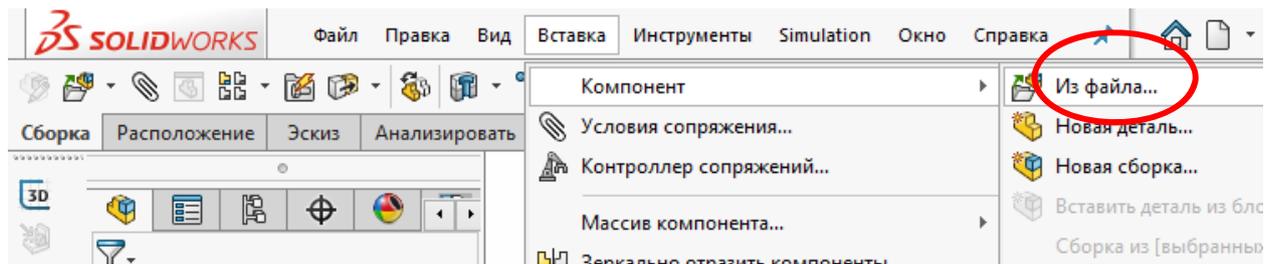


Рис. 2.17. Сборка из файла

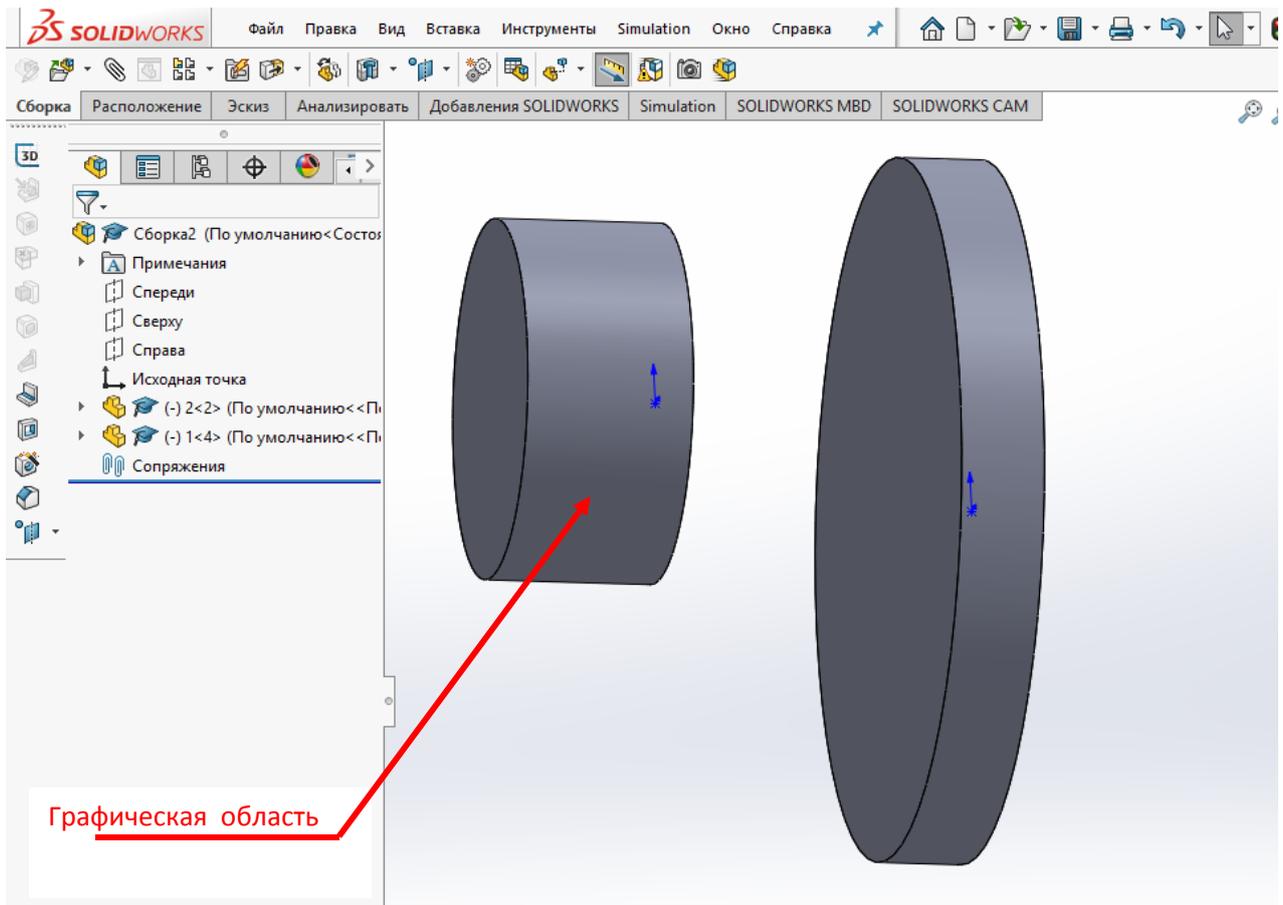


Рис. 2.18. Перемещение модели в графическую область

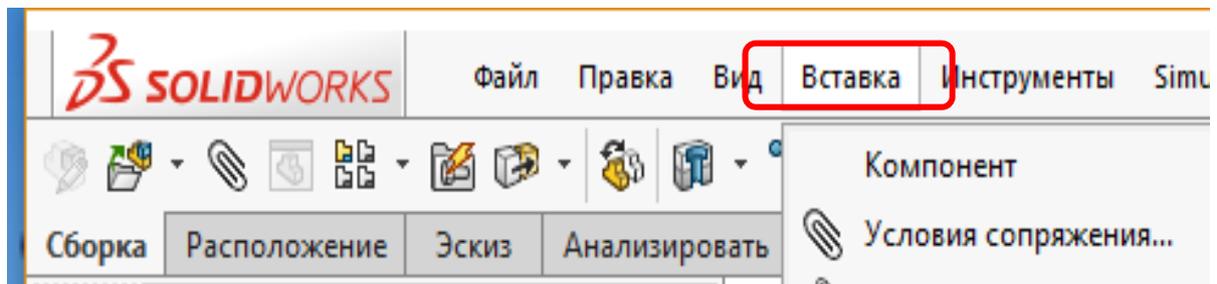


Рис. 2.19. Условия сопряжения

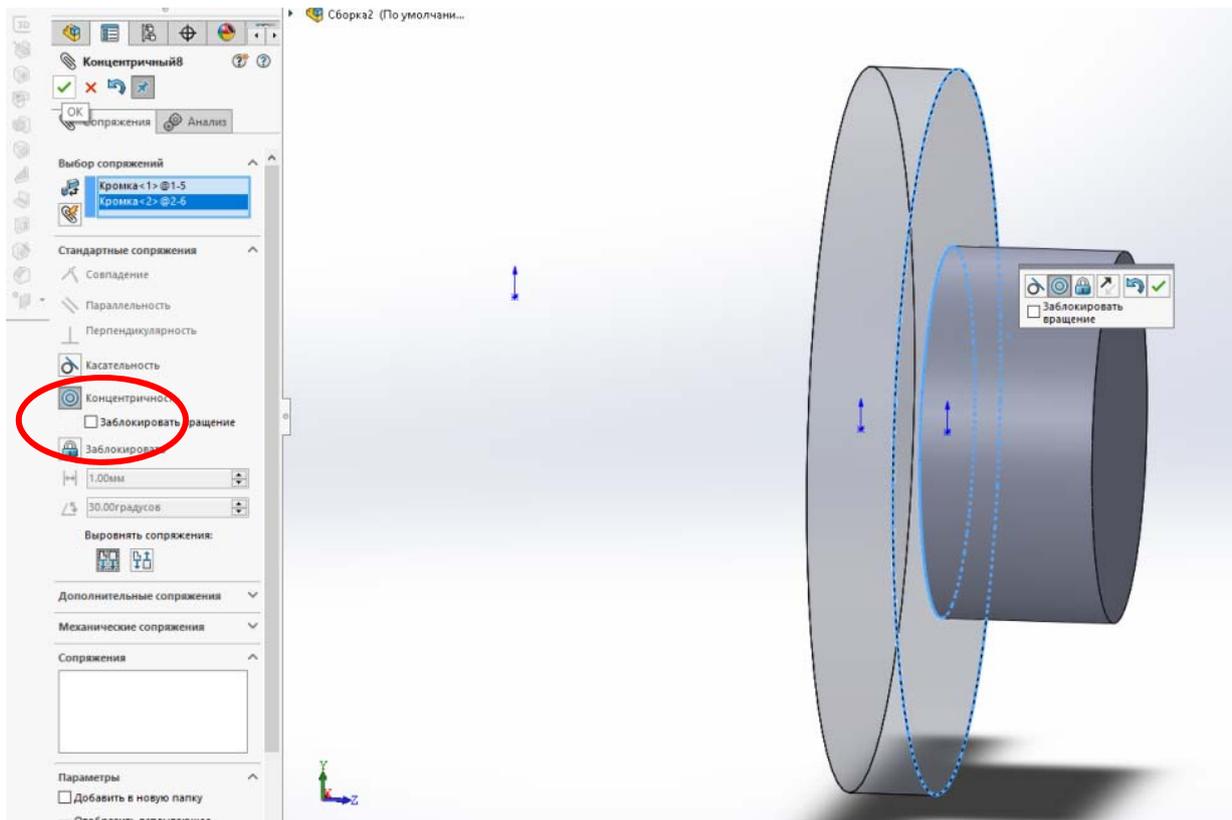


Рис. 2.20. Поверхность сопряжения

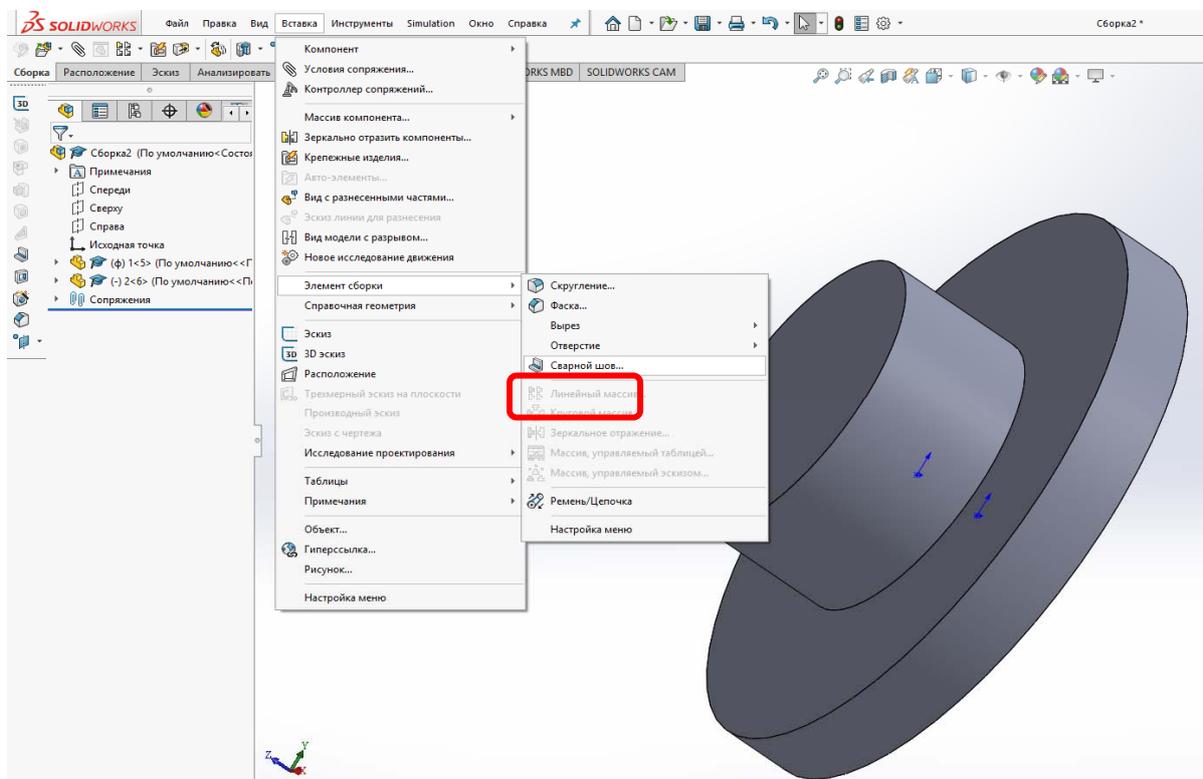


Рис. 2.21. Создание сварного шва

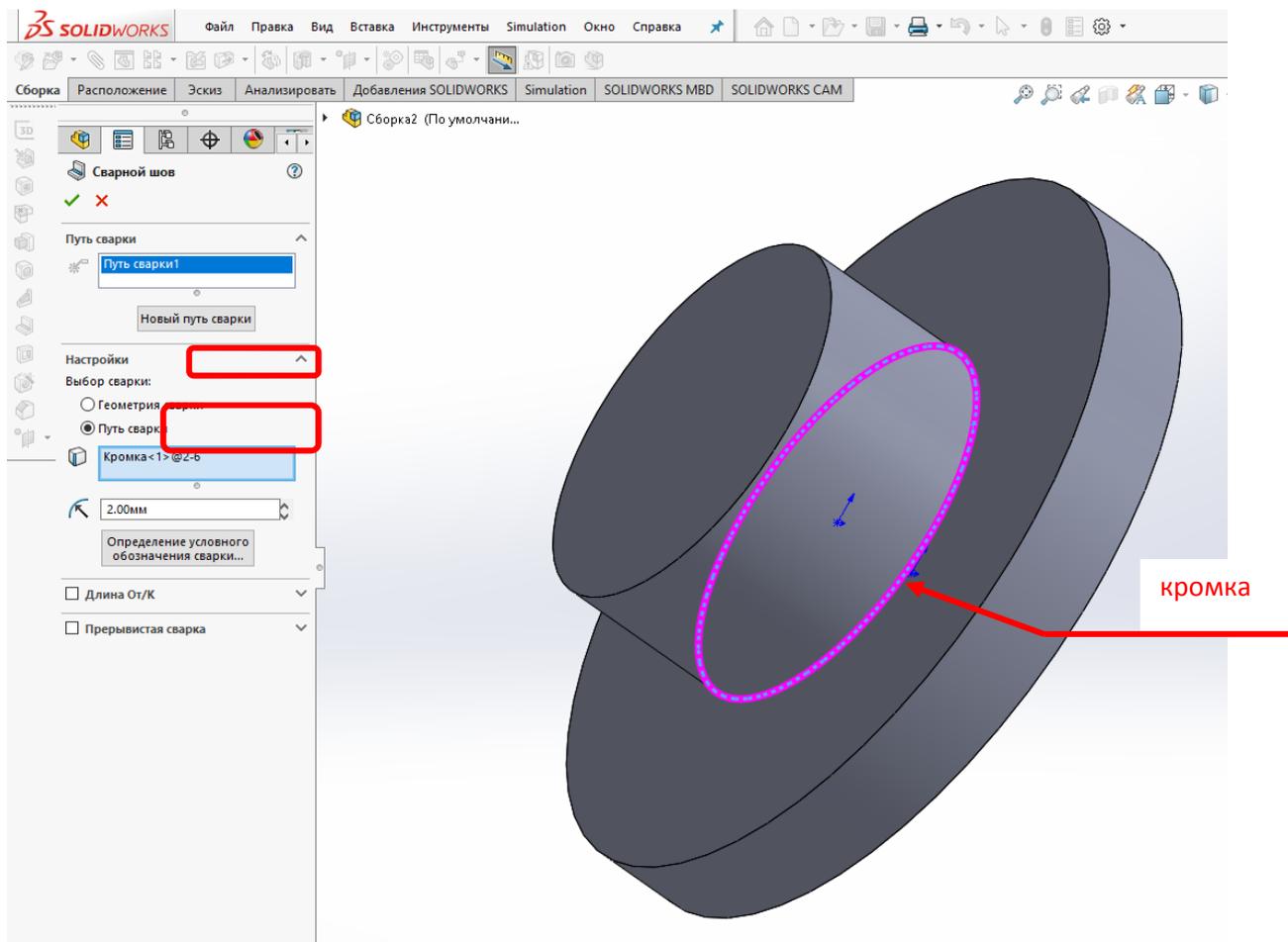


Рис. 2.22. Указание кромки

Толщина сварного шва задается меню  2.00мм. Для указания условного обозначения сварки необходимо использовать функцию «Определение условного обозначения сварки» (рис. 2.23).

В результате получим требуемую модель со сварным швом.

При создании нового элемента «Сварной шов» программа автоматически наносит на него обозначение сварного шва. Требуется только вписать необходимый текст в соответствии с требованием стандарта. Обозначение сварного шва будет отображено на чертеже.

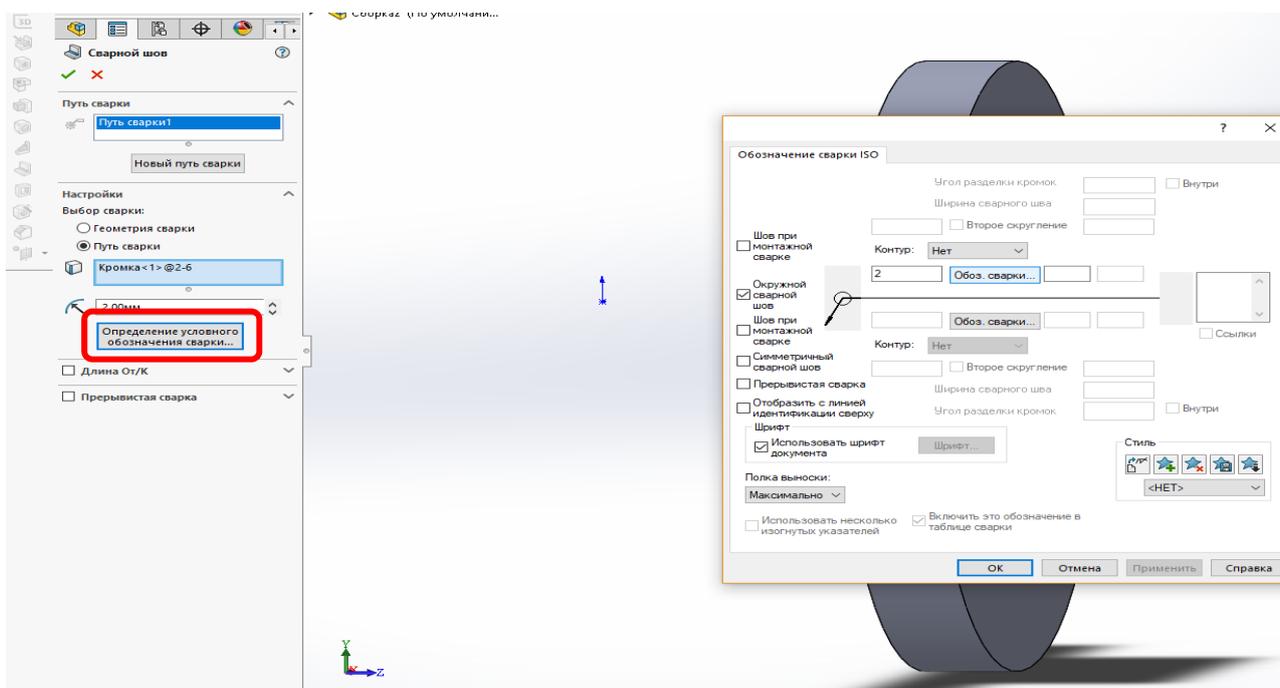


Рис. 2.23. Указание условного обозначения сварки

Обобщая полученную информацию о *SolidWorks* можно сделать следующие выводы:

1. Модель состоит из совокупности трехмерных твердотельных элементов.
2. Чертежи создаются на основе моделей. Чертеж можно создать путем черчения в документе Чертеж.
3. Сначала создается эскиз. Создается основание, а затем в модель добавляются другие элементы.
4. Проектирование сварных конструкций удобно проводить через меню Сборка;
5. Изменения, сделанные в одном документе или виде, автоматически отображаются во всех других документах и видах.
6. Чертежи можно создавать на любом этапе в процессе проектирования [1].

Приведенный выше материал не является полным описанием возможностей системы *SolidWorks*. Для детального изучения программы можно использовать справку системы, сеть Интернет и многочисленные учебники и учебные пособия.

Контрольные вопросы

1. Этапы проектирование деталей в SolidWorks.
2. Типы документа в SolidWorks.
3. Порядок создания цилиндрического твердотельного элемента.
4. Редактирование твердотельной модели.
5. Способы отображения модели и выбор элементов.
6. Порядок проектирования сварных конструкций.

Список литературы

1. <https://sapr.ru/article/6917>
2. Варакин А. А. Использование САПР SolidWorks в конструкторско-технологическом проектировании электронных средств: Методические указания. В 2 ч. Ч. 1. Основы создания трехмерных моделей. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. 52 с.

ГЛАВА 3. ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КОМПАС-3D

Система КОМПАС-3D (компания АСКОН) предназначена для сокращения сроков моделирования изделий и передачи технической документации на производство.

К основным возможностям комплекса относятся:

- 1) трехмерное проектирование изделий;
- 2) автоматизированная разработка необходимой конструкторской и технологической документации;
- 3) передачи данных для разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ.

Модель в КОМПАС-3D может строиться из геометрических объектов – пространственных точек и кривых, поверхностей, эскизов.

Геометрические объекты состоят из примитивов – вершин, ребер, граней.

Помимо геометрических объектов модель в КОМПАС-3D может содержать:

- 1) элементы оформления – обозначения, размеры, допуски, посадки и т.п.;
- 2) объекты «измерение» – расстояния, площади и т.п.;
- 3) компоненты, являющиеся самостоятельными моделями.

Модель в КОМПАС-3D может быть:

- 1) твердотельной – представленной телами и обладающей ненулевой массой;
- 2) поверхностной – представленной поверхностями и обладающей нулевой массой;
- 3) сочетающей результаты твердотельного и поверхностного моделирования.

3.1. Функциональные возможности КОМПАС-3D

КОМПАС-3D – полноценная твердотельная система геометрического моделирования, позволяющая проектировать параметризованные детали и большие сборки неограниченного размера. Главное достоинство КОМПАС-3D – это сочетание двух компонент, позволяющее получать из 3D-моделей ассоциативные плоские виды и разрабатывать на их основе полный комплект проектно-конструкторской документации, соответствующей ГОСТ [1].

В основе КОМПАС-3D лежит геометрическое ядро и параметрические технологии. Основные функции геометрического ядра поддерживают автоматизацию разработки трехмерных параметрических моделей деталей сложной формы, сборочных единиц и многоуровневых сборок изделий. Параметризация дает возможность быстро получать модели типовых изделий на основе спроектированного прототипа [1].

Функциональные возможности системы КОМПАС-3D обеспечивают:

- моделирование изделий с целью создания конструкторской и технологической документации;
- моделирование изделий с целью расчета их геометрических характеристик;
- моделирование изделий для передачи геометрии в расчетные пакеты и подсистемы;
- моделирование деталей для передачи геометрии в любые подсистемы разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ;
- создание изометрических изображений изделий [1].

КОМПАС-3D позволяет создавать 3D-модели изделий тремя способами: «снизу вверх» (используя готовые компоненты из библиотек), «сверху вниз» (проектируя сборочные изделия) и либо смешанным способом.

КОМПАС-3D, поддерживает следующие возможности:

- твердотельное моделирование объемных деталей;
- создания конструктивных элементов;
- создание 3D-сборок изделий;
- параметризацию деталей;
- вставку стандартных изделий из библиотек в 3D-модель;
- расчет интерференции и касания деталей;
- наличие подсистем, учитывающих технологию изготовления изделий.

КОМПАС-3D в своем составе имеет модуль «Сварные швы». Данный модуль предназначен для создания 3D-моделей сварных изделий. Он *содержит* набор конструктивных элементов сварных швов.

3.2. Основы 3D моделирования в КОМПАС-3D



Для запуска программы заходим в меню *Пуск* и нажимаем значок КОМПАС-3D. На экране монитора появиться интерфейс программы (рис. 3.1). В левой части экрана находится история недавних деталей и сборок, которые ранее открывались программой. По центру, при каждом новом запуске КОМПАС отображается различные полезные подсказки для работы с программой.

В правой части экрана находится *Справка*, *Учебное пособие*. Здесь также возможность перейти по ссылкам на основные ресурсы компании Аскон.

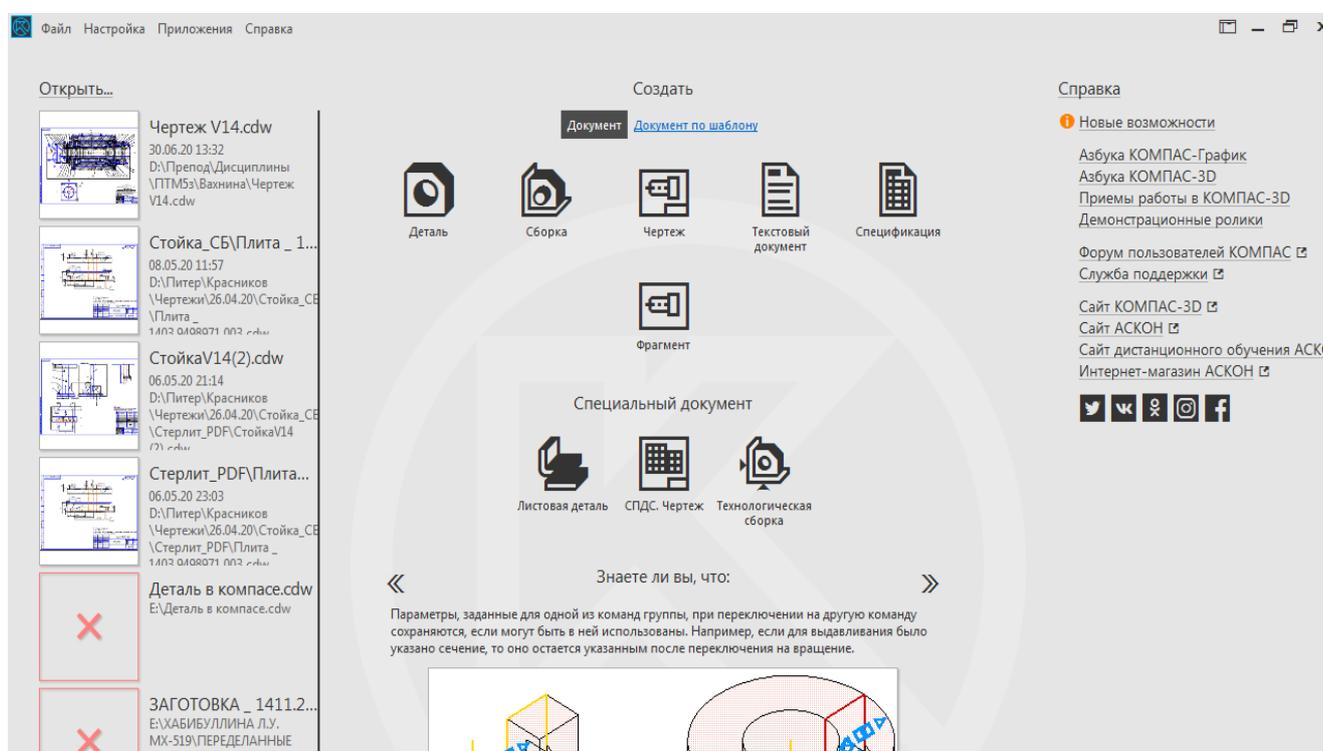


Рис. 3.1. Интерфейс программы КОМПАС-3D

В верхней части находятся типы документов, которые необходимы для начала работы (рис. 3.2).

Деталь. Расширение файла - *.m3d*. Основной документ для создания 3D моделей.

Сборка. Расширение файла *.a3d*. 3D сборка состоит из нескольких деталей, связанных между собой.

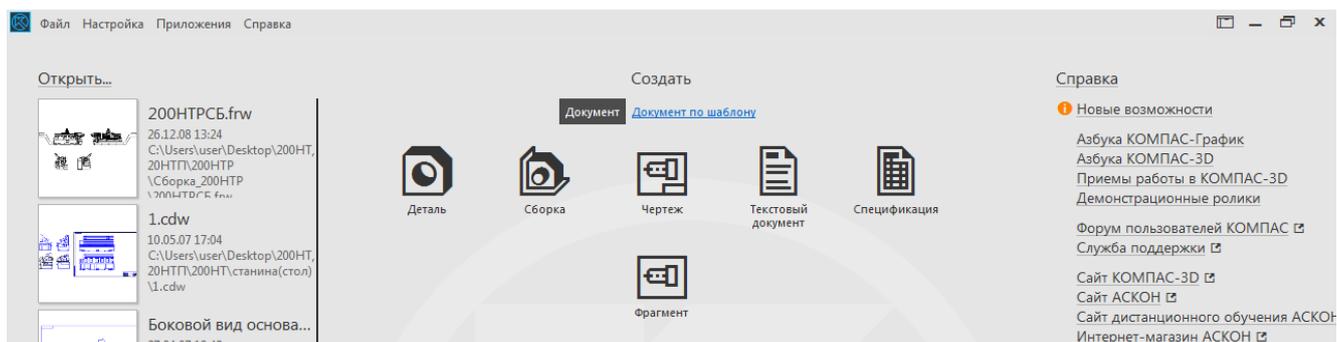


Рис. 3.2. Типы документов для начала работы

Чертеж. Расширение файла – *.cdw*. Является основным графическим документом. Чертежи можно создавать на основе 3D модели или с нуля. Выбирается только формат чертежа. Остальные элементы оформления создаются автоматически.

Текстовый документ. Расширение файла *.kdw*. Заполняется пояснительной информацией, техническими требованиями и другими текстовыми записями.

Спецификация. Расширение файла *.spw*. Необходим для создания спецификации.

Фрагмент. Расширение файла *.frw*. Отличие от *Чертежа* в отсутствии рамки и основных надписей. Размеры листа не ограничены.

Для того чтобы создать любой из рассмотренных типов документов, нужно на начальном этапе выбрать необходимый тип документа или нажать на *Файл–Создать* (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Выбор типа документа

Также можно создать еще одну вкладку двойным щелчком левой кнопки мыши на пустую область вкладок. Еще раз выбрать тип документа, который необходим (рис. 3.4).

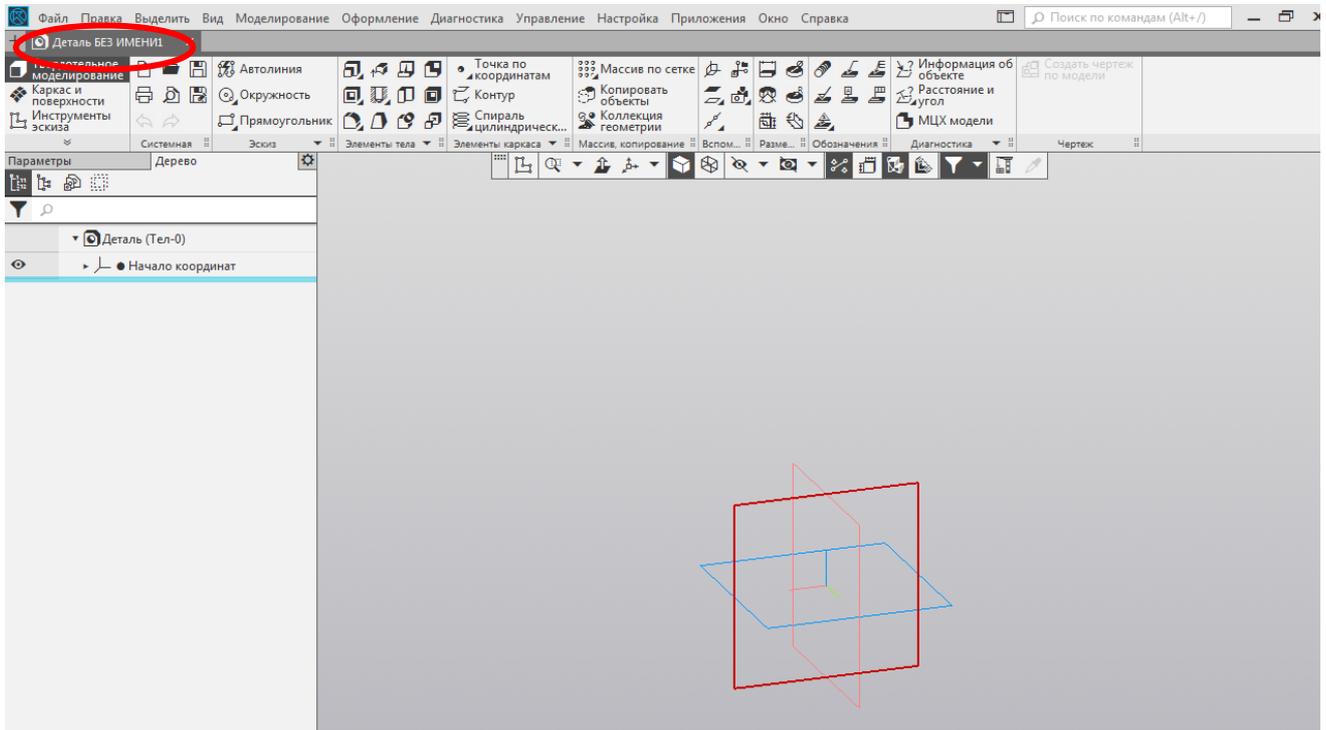


Рис. 3.4. Создание вкладки на пустой области вкладок

Между вкладками можно свободно переключаться, или закрывать ненужные вкладки.

Рассмотрим интерфейс главного окна системы. Вверху идет главное меню (рис. 3.5).

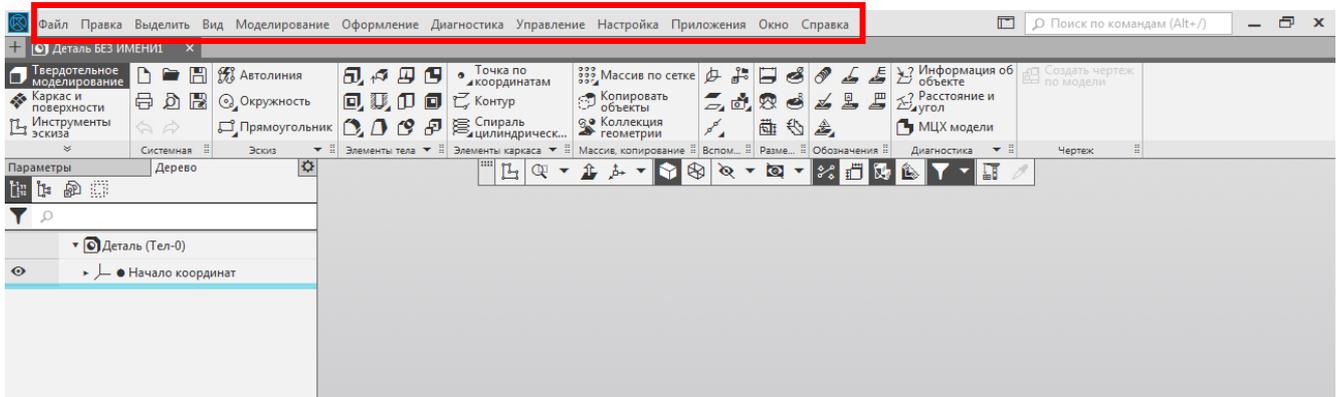


Рис. 3.5. Главное меню

Следующая строка закладок документов. Еще ниже – идет инструментальная область. Слева список наборов инструментов. Также этот набор можно раскрыть, изменить на другой (рис. 3.6).

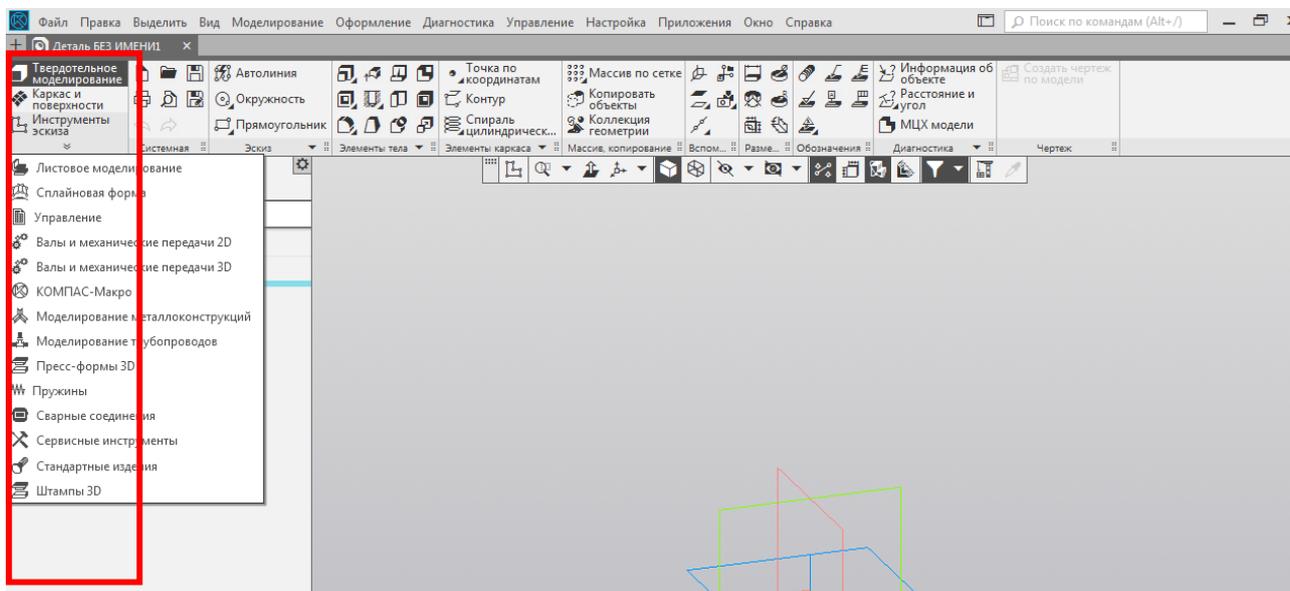


Рис. 3.6. Набор инструментов

При этом наполнение всех инструментов зависит от типа набора инструментов. Например, для набора инструментов эскиза наполнение будет изменяться.

В центре, вверху рабочего экрана, расположена панель быстрого доступа, ее можно перемещать влево или вправо (рис. 3.7).

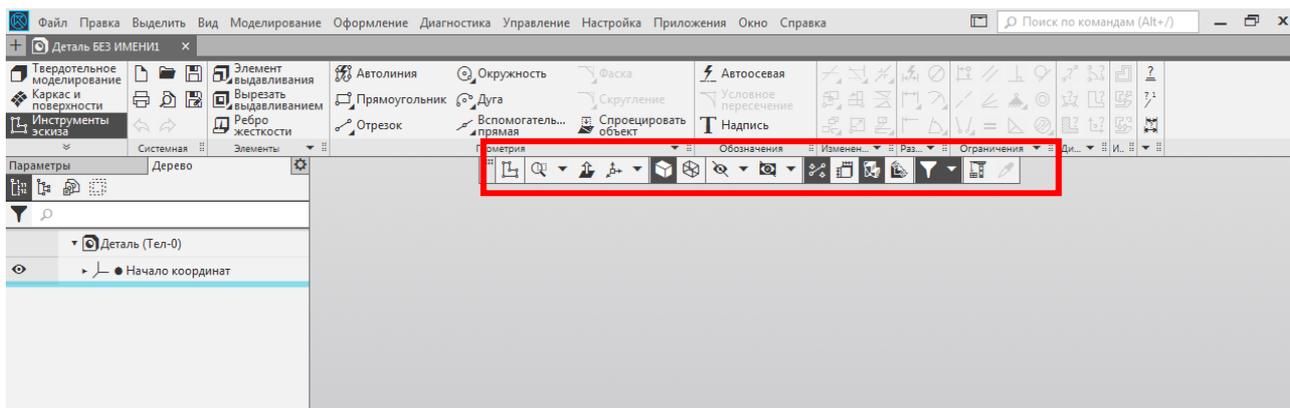


Рис. 3.7. Панель быстрого доступа

Здесь можно быстро начать создание эскиза, изменить масштаб, направление вида к модели, ориентация модели, изменение каркаса, скрыть или отобразить вспомогательные компоненты, размеры

выбранного элемента, сечение, упрощенное отображение и так далее. Для того чтобы начать создание эскиза, нужно выбрать необходимую плоскость нажатием на нее (рис. 3.8).

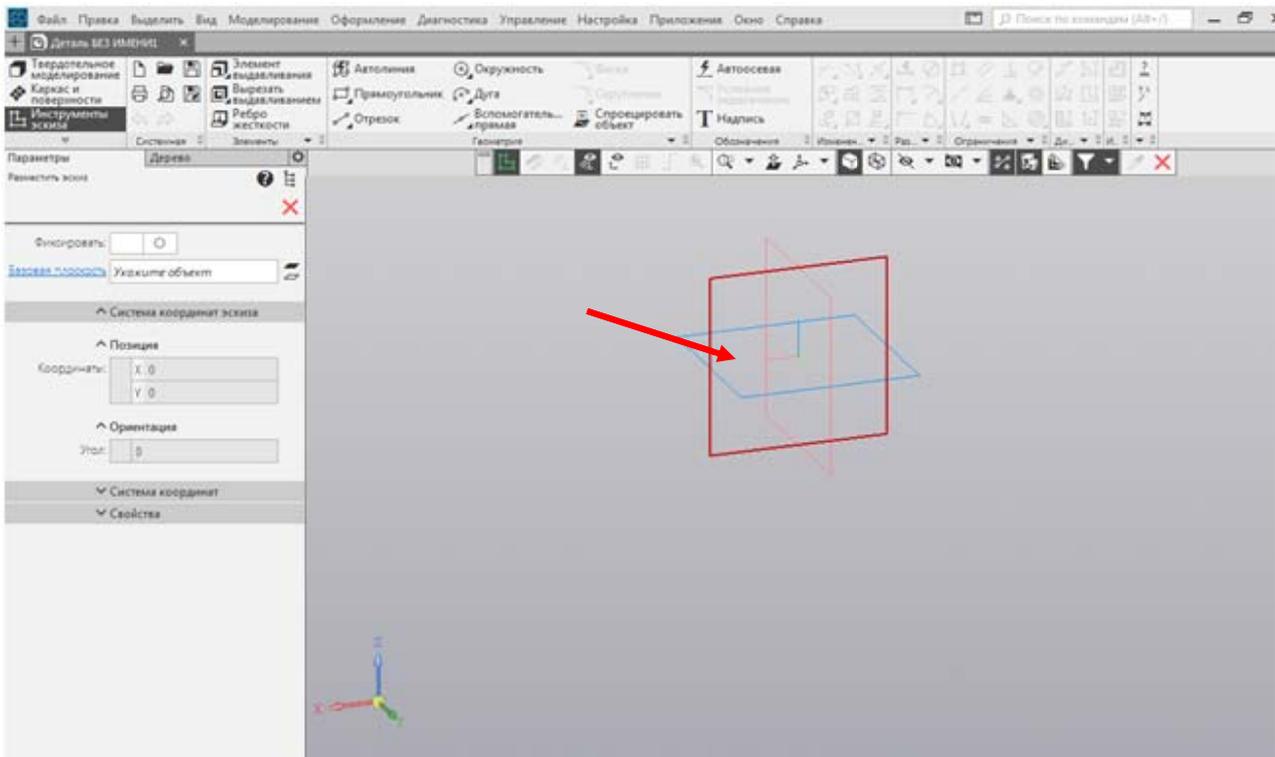


Рис. 3.8. Выбор области создания эскиза

Рассмотрим работу с новой деталью. На начальном экране левой клавишей мыши указываем элемент «*Деталь*». На экране откроется новый проект с системой координат (рис. 3.9).

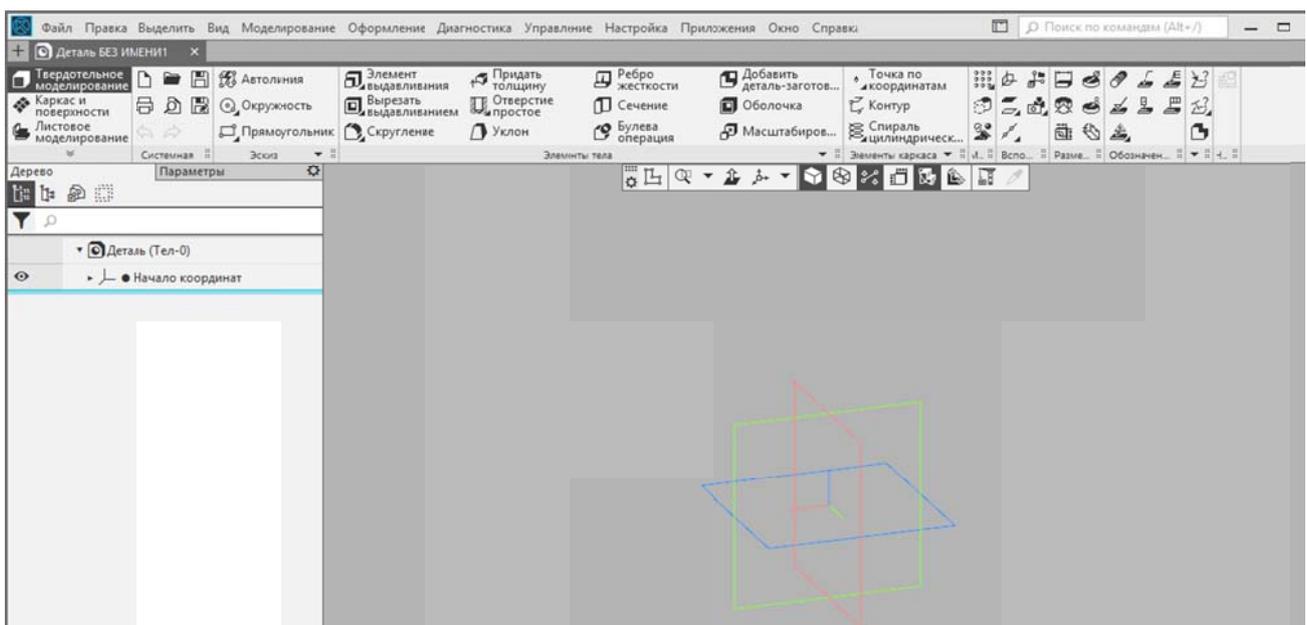


Рис. 3.9. Открытие нового проекта

Создание детали «Ступенчатый вал».

1. Мышью выделить плоскость координат, на которой начнется построение. Выбирать на панели инструмента «Окружность» (рис. 3.10).

2. Установить курсор по центру координат и растянуть будущую окружность до нужного размера. Снова сделать левый клик «мыши». Можно воспользоваться элементом «Диаметр» и вручную ввести требуемые значения (рис. 3.11).

3. Теперь нужно придать плоскому кругу объем. Указать «Элемент выдавливания», затем контур круга (рис. 3.12).

4. Заготовка получила объем. Размер детали указан на схеме (рис. 3.13).

5. Для изменения размера детали следует поменять числовое значение в элементе «Расстояние» и нажать *Enter* (рис. 3.14).

6. Для построения следующей ступени вала отцентрировать заготовку по оси координат (рис. 3.15).

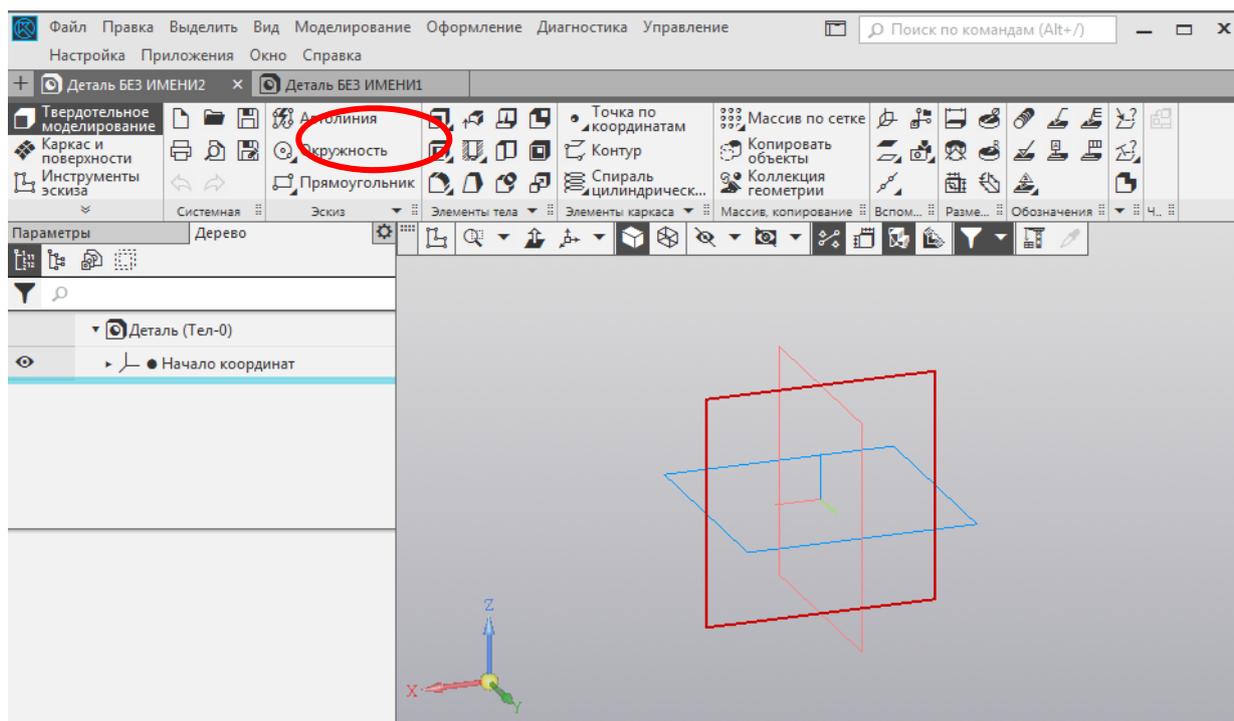


Рис. 3.10. Выбор инструмента «Окружность»

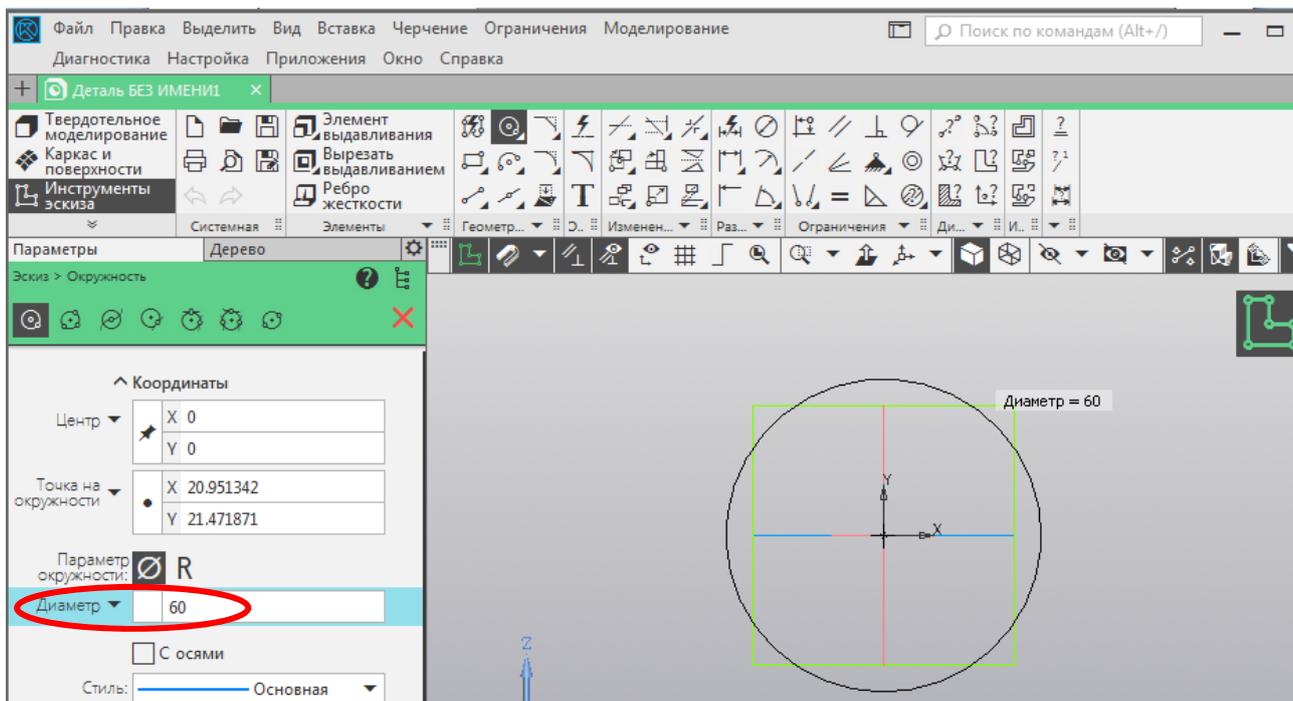


Рис. 3.11. Построение окружности

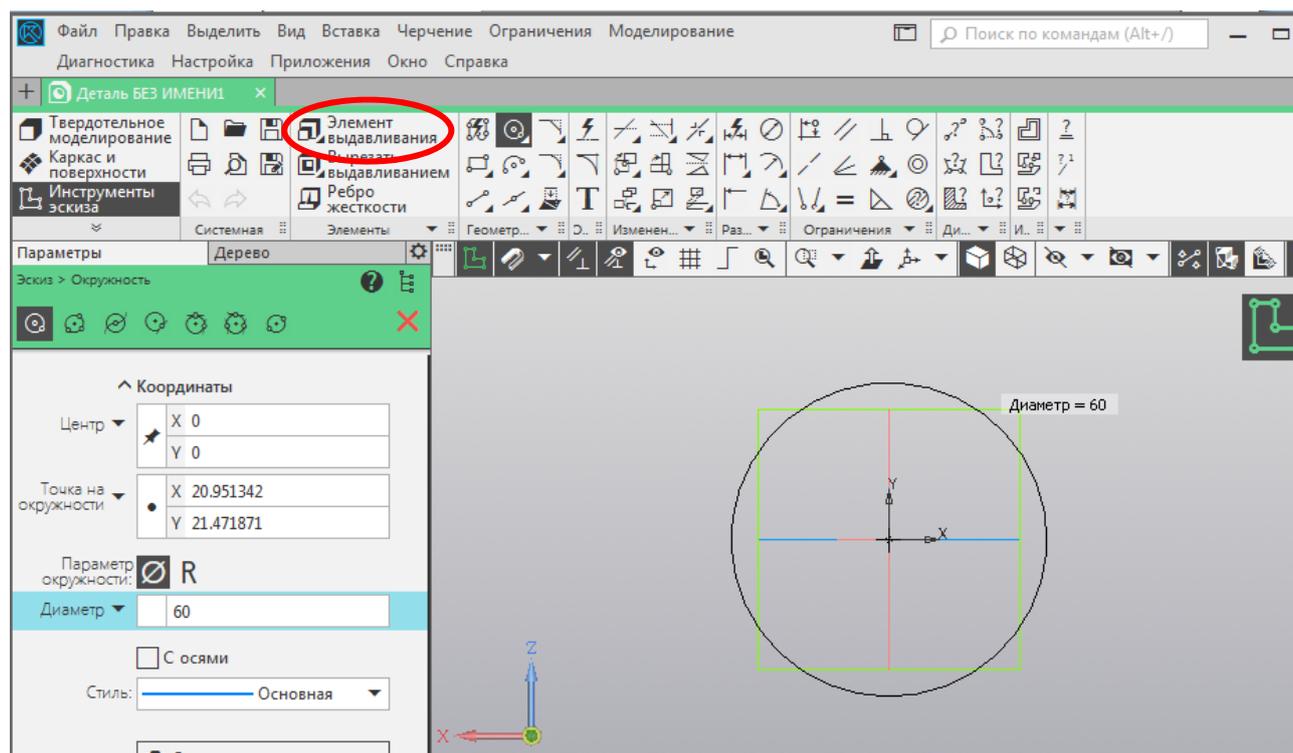


Рис. 3.12. Построение цилиндра

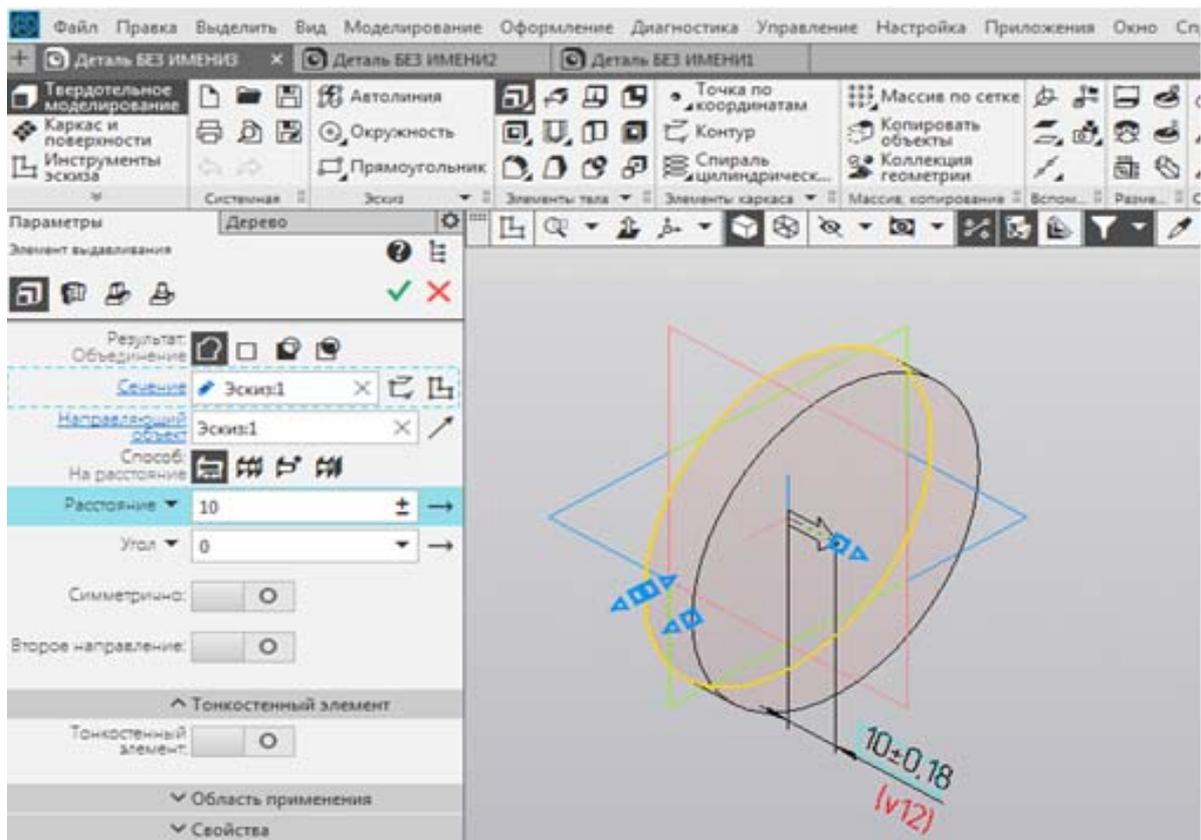


Рис. 3.13. Построение цилиндра

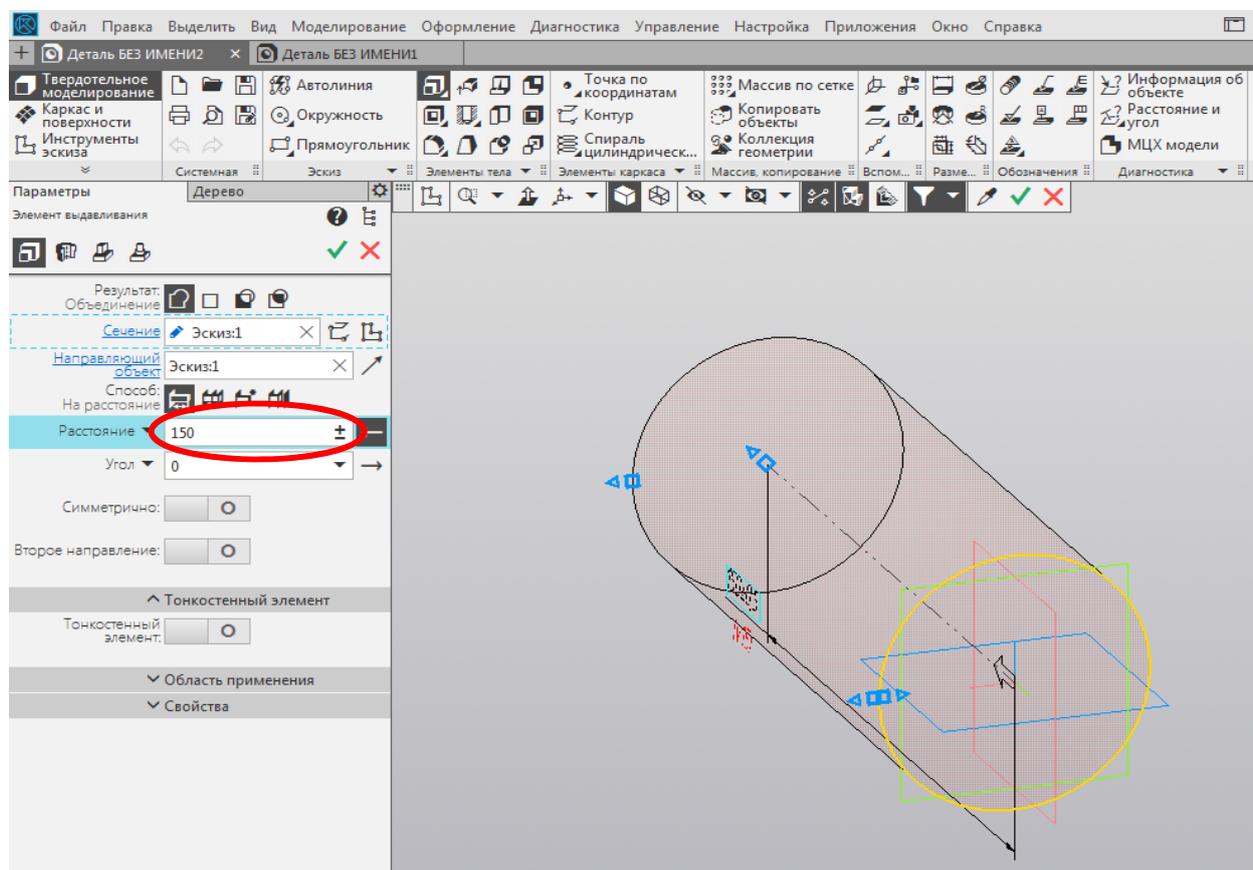


Рис. 3.14. Построение цилиндра

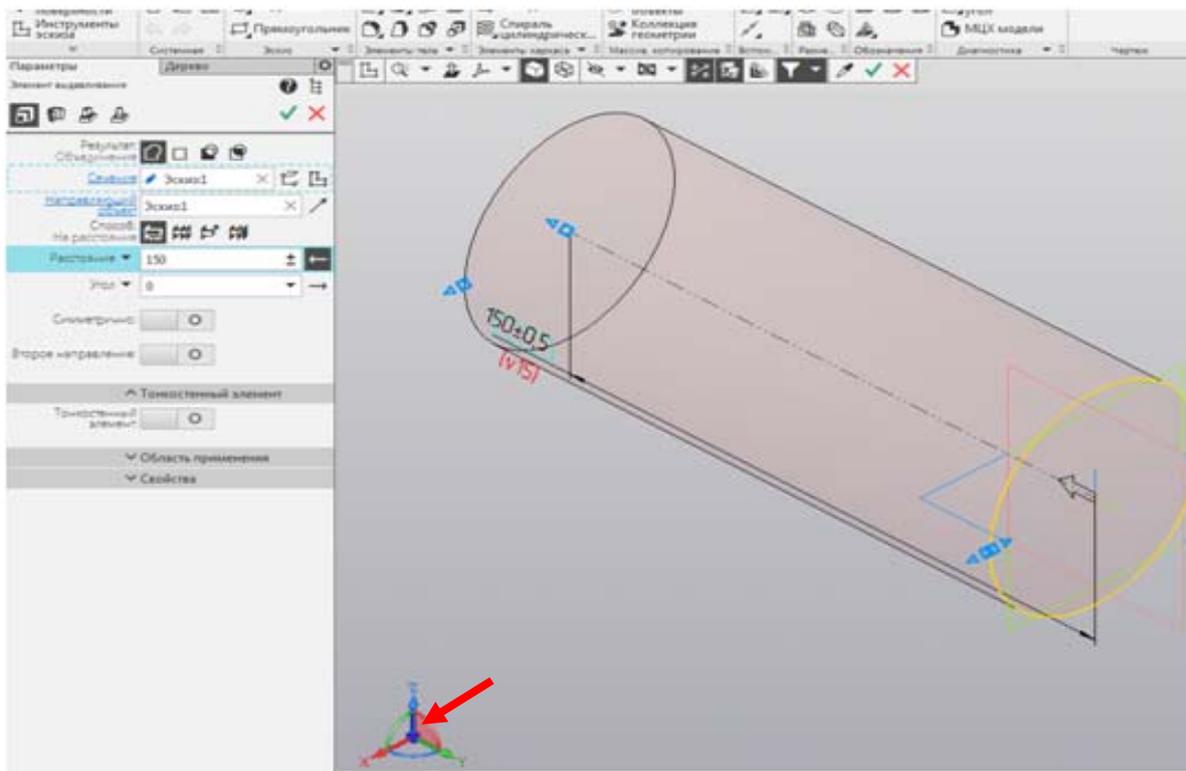


Рис. 3.15. Построение следующей ступени вала

7. Выбрав инструмент «Окружность» указать мышью на торец вала (рис. 3.16).

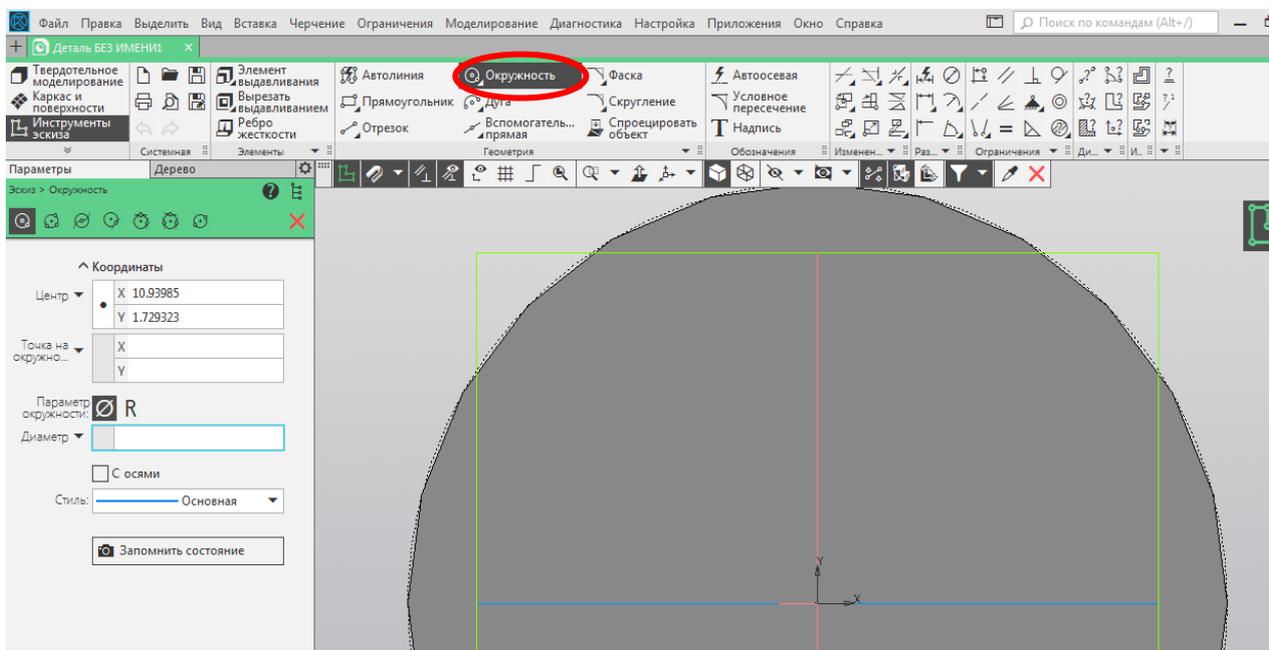


Рис. 3.16. Построение следующей ступени вала

8. Выделить центр фигуры и вытянуть окружность до нужного размера. Размер можно задать элементом «Диаметр» (рис. 3.17).

9. Точно так же, как это делали с первым, второй вал нужно растянуть. Указать «Инструмент выдавливания», отметить поверхность и задать размер. Для завершения операции нажать зеленую «галочку» (рис. 3.18).

В результате этих действий получим следующую фигуру (рис. 3.19).

Для создания чертежа из модели перейти во вкладку *Управление - Создать чертеж по модели* на панели инструментов в верхней части экрана (рис. 3.20).

Программа создаст лист стандартного формата. Из панели параметров указать *Ориентацию модели* и ее *Масштаб*. Определить расположение вида на листе (рис. 3.21).

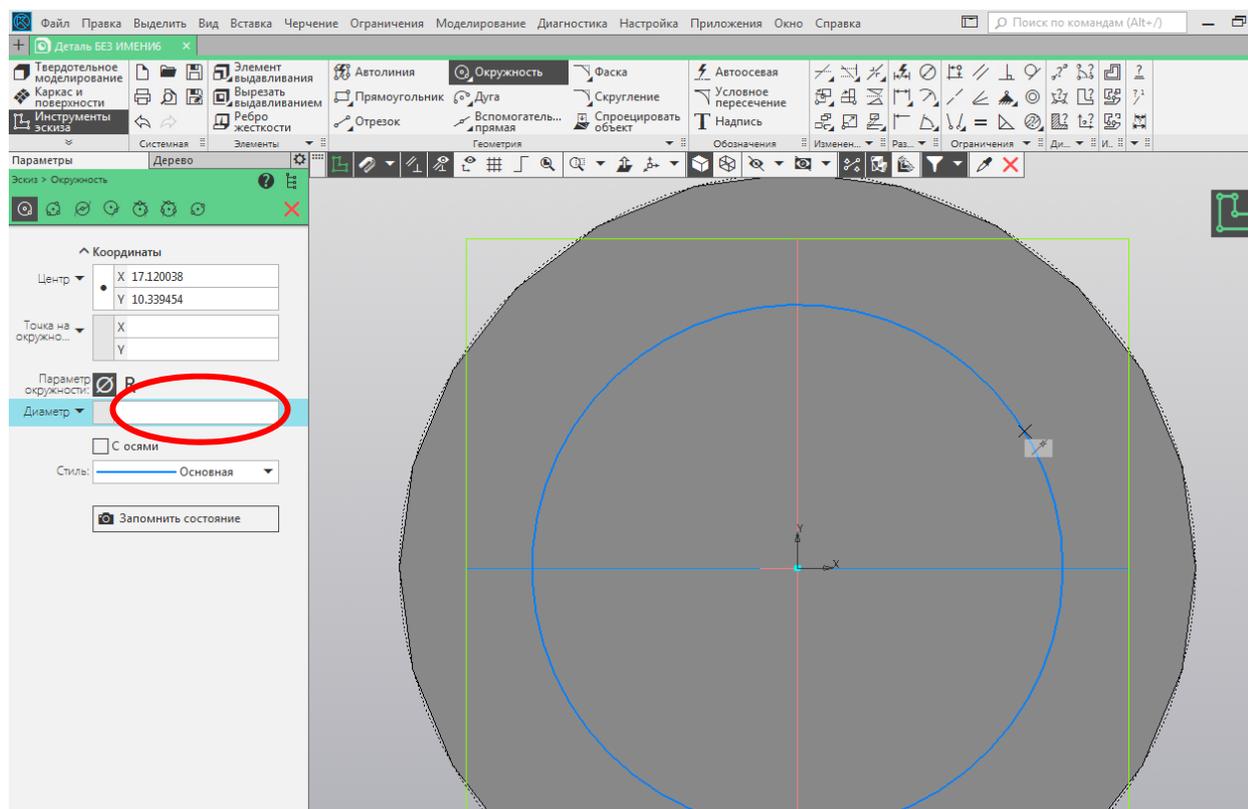


Рис. 3.17. Построение следующей ступени вала

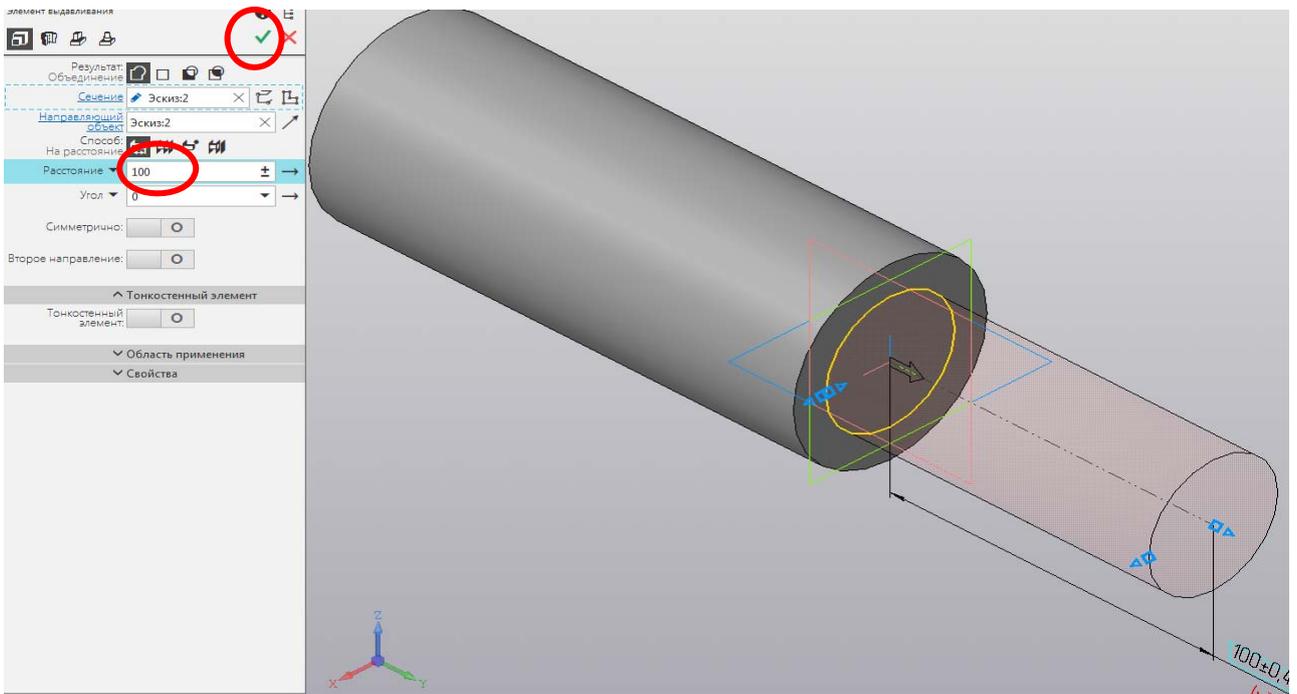


Рис. 3.18. Построение следующей ступени вала

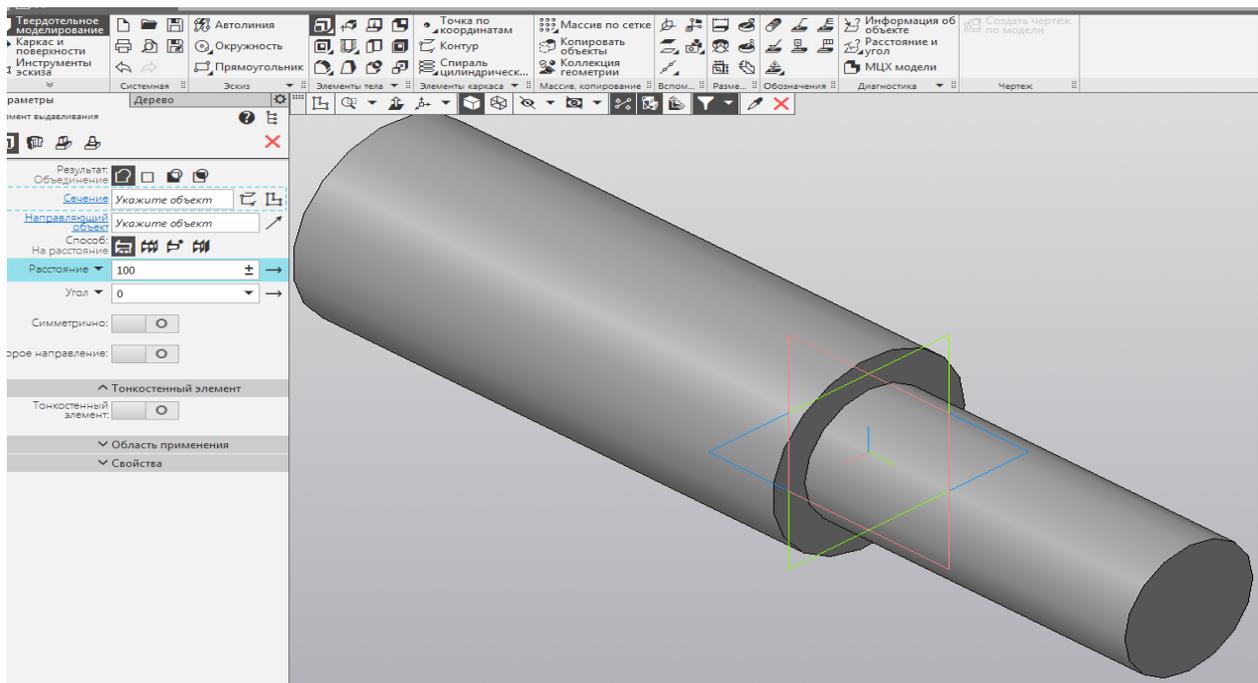


Рис. 3.19. Построение следующей ступени вала

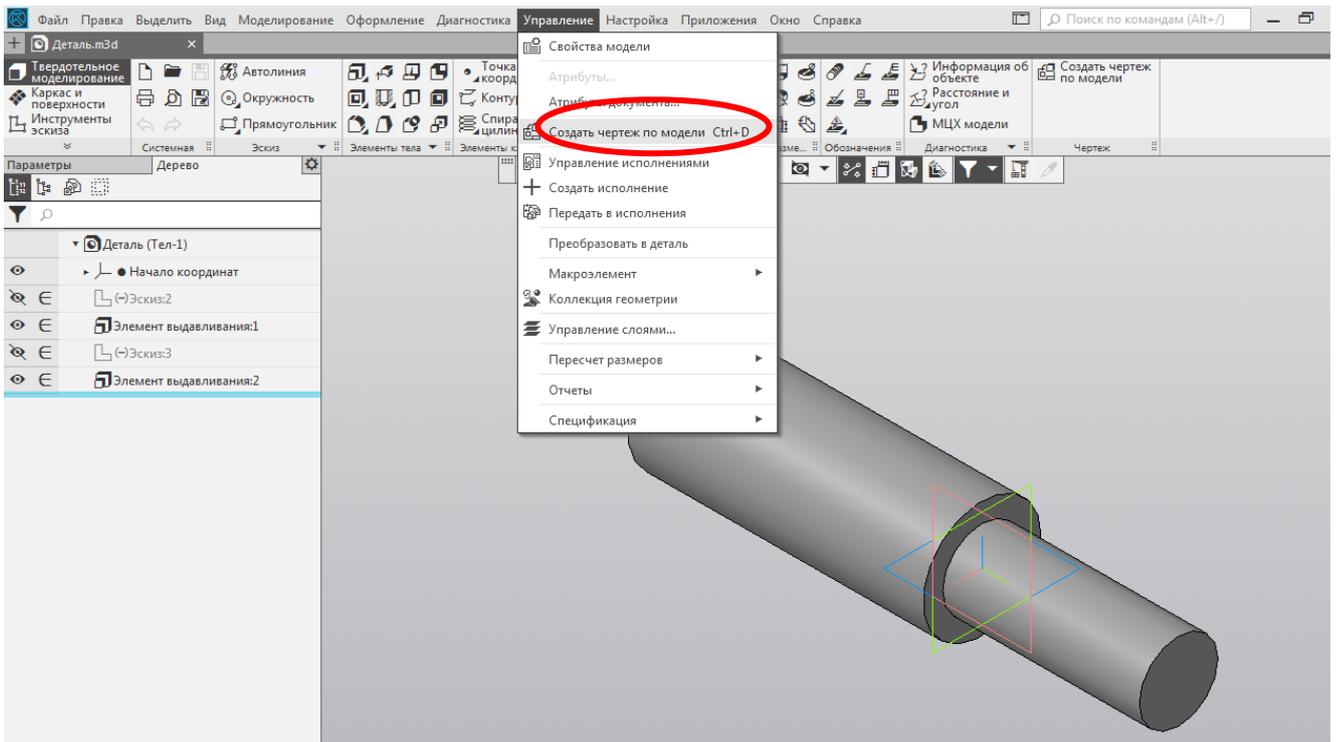


Рис. 3.20. Создание чертежа из модели

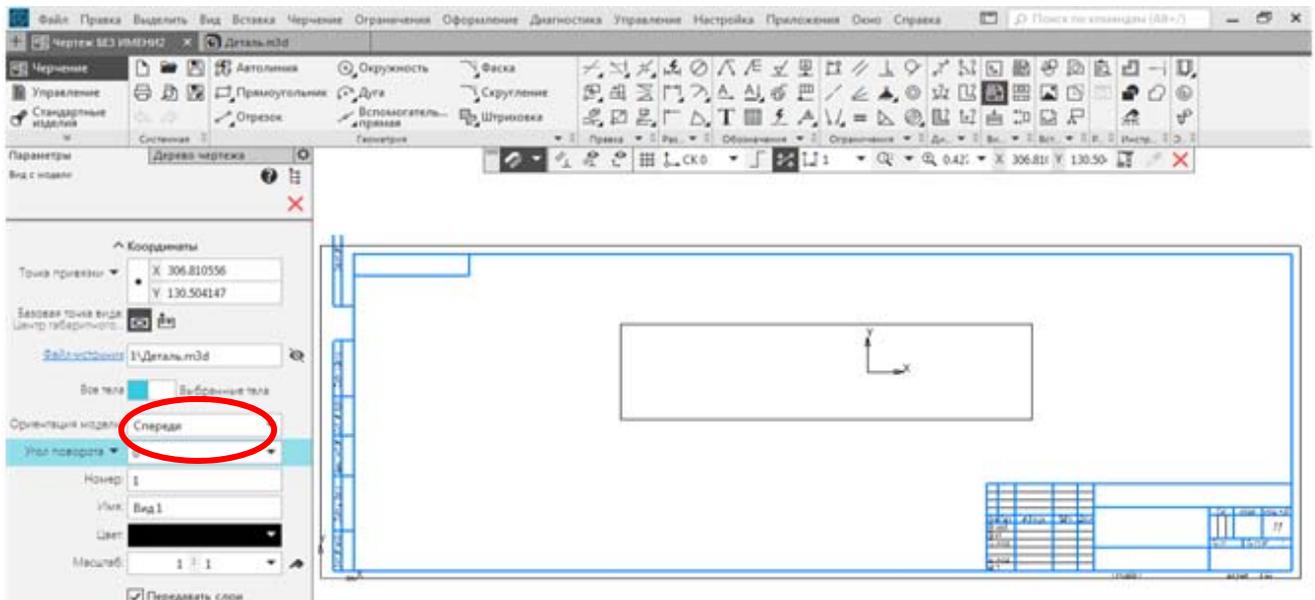


Рис. 3.21. Определение расположения вида на листе

Нажать клавишу Enter и получить эскиз главного вида детали (рис. 3.22).

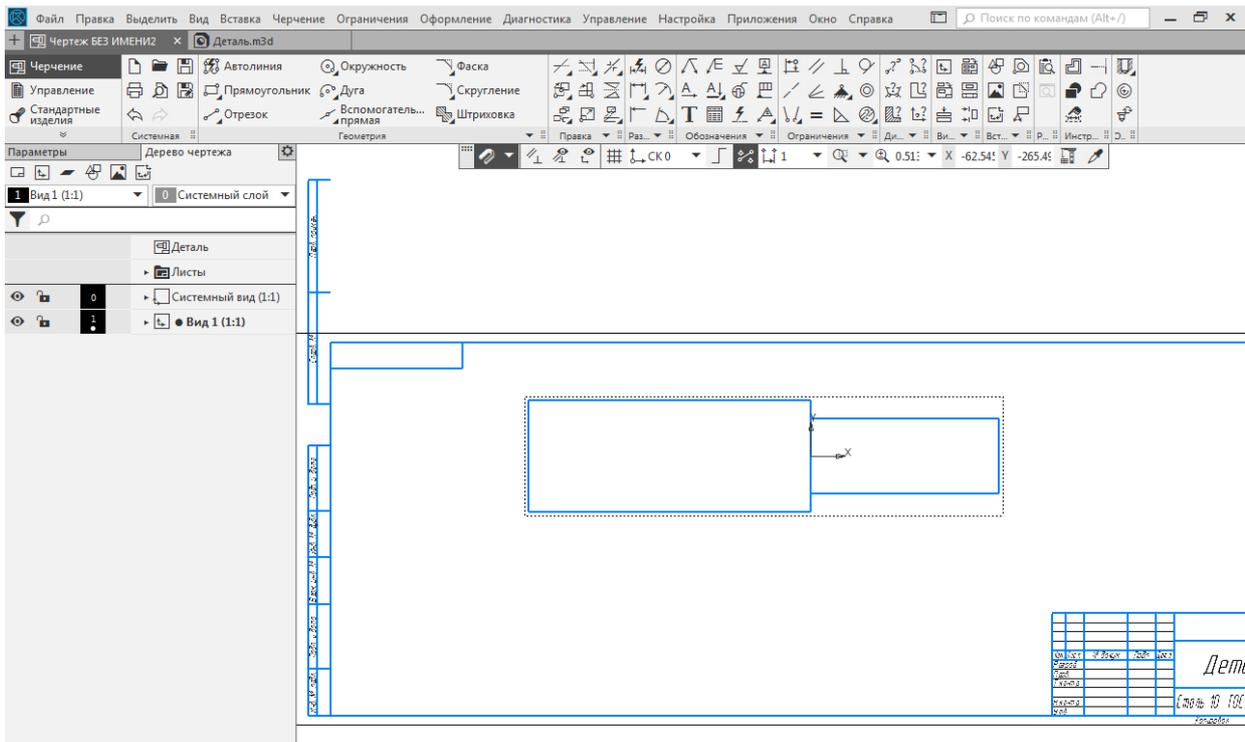


Рис. 3.22. Эскиз главного вида

Указываем главный вид и положение вида справа из вкладки *Виды* нажатием на значок *Проекционный вид*. Для установки осевых линий нажать на *Окружность* и поставить галочку *С осями* (рис. 3.23).

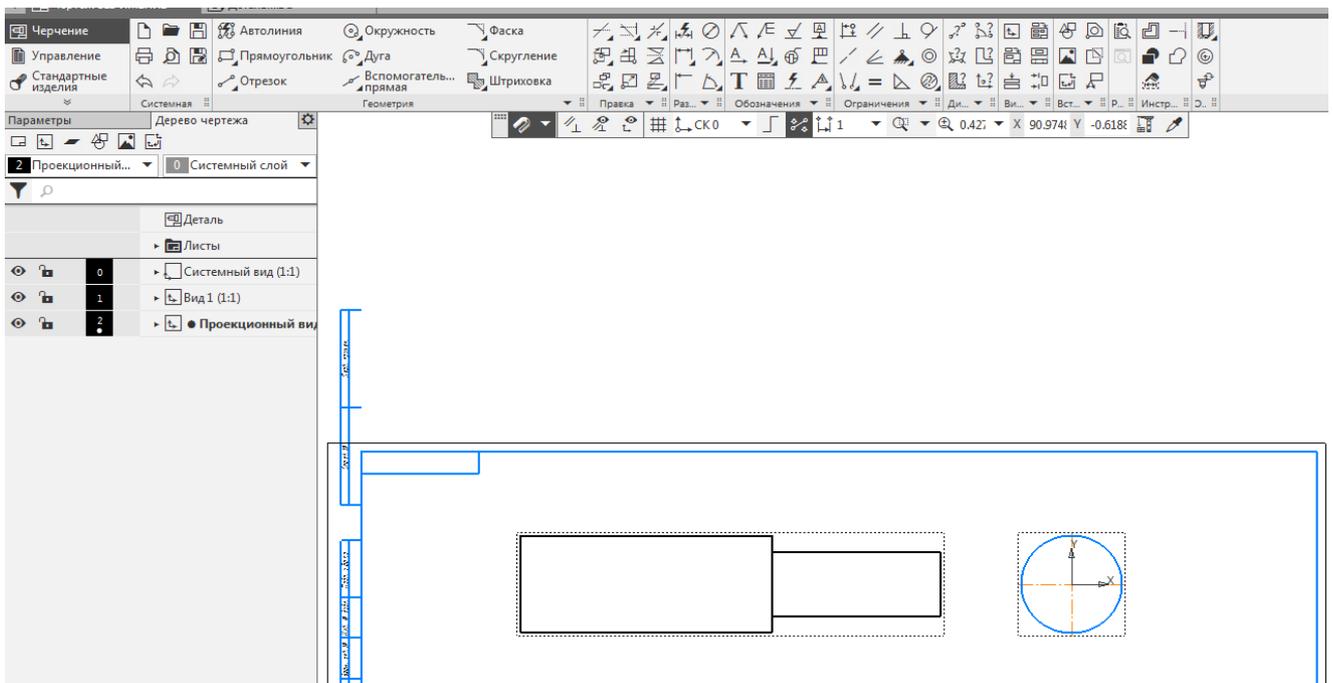


Рис. 3.23. Эскиз главного вида

Через вкладку *Размеры* показываем размеры на чертеже (рис. 3.24).

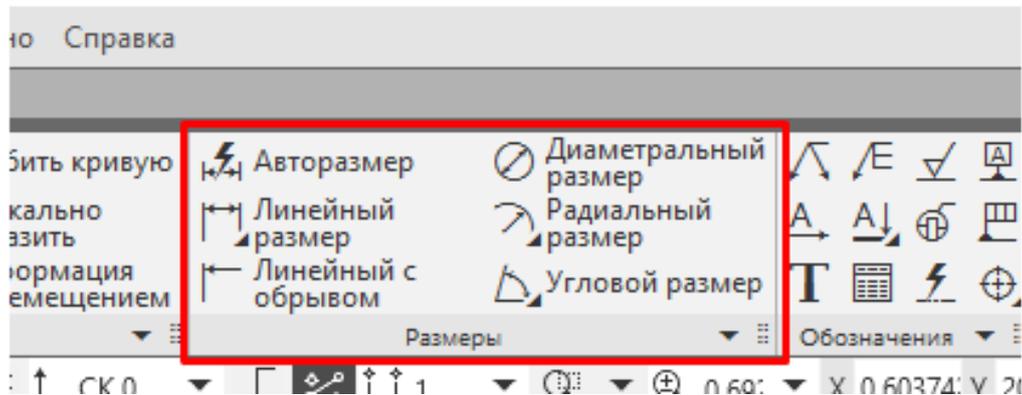


Рис. 3.24. Вкладка размеры

В итоге получается чертеж с размерами (рис. 3.25).

Сохранить документ можно нажатием кнопки *Файл > Сохранить как...*. Можно сохранить чертеж в графических форматах и формате *.pdf.

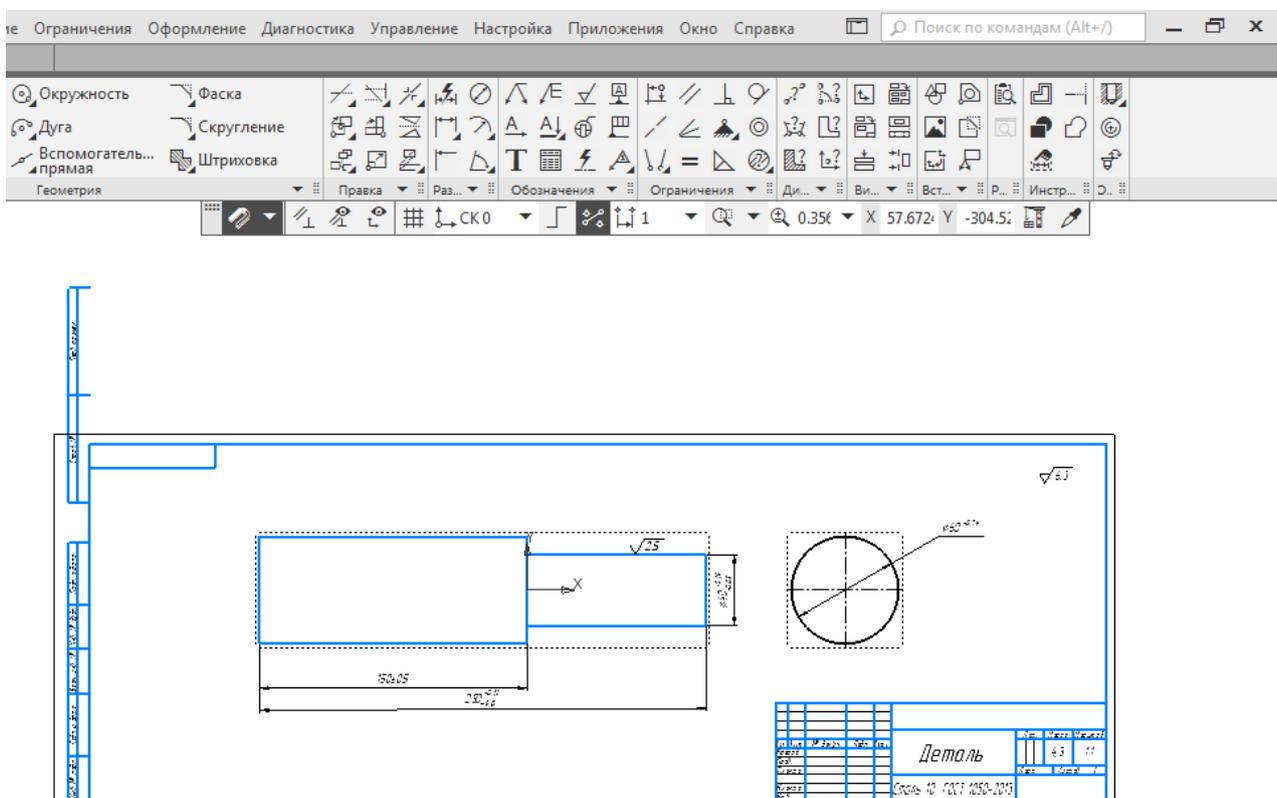


Рис. 3.25. Чертеж детали

Контрольные вопросы

1. Как запустить программу КОМПАС-3D?
2. Основные панели интерфейса КОМПАС-3D.
3. Какие типы документов можно создавать в КОМПАС-3D?
4. Какие элементы относятся к геометрическим примитивам?
5. Как указать размеры на чертеже?

Список литературы

1. Черепашков Н. В. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении / Н. В. Черепашков, Н. В. Носов. Волгоград: ИН-ФОЛИО, 2009. 591 с.

ГЛАВА 4. ПОСТРОЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

4.1. Математическое и компьютерное моделирование. Метод конечных элементов

Программный комплекс Ansys

Программный комплекс Ansys содержит множество вычислительных модулей, которые могут как запускаться по отдельности, так и взаимодействовать друг с другом в специальной среде Ansys Workbench.

Компания Ansys основана в 1970 г. в США и ее деятельность с самого начала была посвящена разработке программного комплекса конечно-элементного моделирования. Первые версии имели исключительно интерфейс в виде командной строки (или входных текстовых файлов), позже добавился графический режим отображения. Полноценный графический интерфейс был добавлен в Ansys в 1993 г. (версии 5–6). Основные принципы построения интерфейса с тех пор оставались неизменными, что объясняет несколько архаичный вид главного окна приложения Ansys Mechanical APDL. Модуль решателя и система текстовых команд еще старше, но за время развития данного программного продукта было внесено огромное количество исправлений и усовершенствований, что делает данный программный комплекс одним из неоспоримых лидеров в конечно-элементном моделировании для прочностных и тепловых расчетов.

С 2000-х гг. компания Ansys Inc. покупает множество других компаний со своими расчетными модулями и инструментами и для интеграции разных модулей в единое целое развивается ANSYS Workbench. Таким образом, в частности, был приобретен инструмент построения сетки ICEM CFD, пакеты гидродинамического анализа CFX и Fluent, а в 2019 г. присоединена компания LSTC – разработчик пакета для расчетов высокоскоростных процессов LS-Dyna. Кроме того, в программном комплексе Ansys к настоящему времени присутствуют отдельные модули для оптимизационных расчетов, детального усталостной прочности и построения моделей из композитных материалов, расчетов процессов охлаждения плат,

течения полимерных сред, обледенения конструкций, модули оптических и электромагнитных расчетов и т.д.

В данном пособии рассматриваются расчеты напряженно-деформированного состояния в модулях семейства Ansys Mechanical и тепловых процессов (Ansys Thermal). Для таких задач интерактивно создаваемая пользователем в Ansys Workbench модель преобразуется в текстовое представление (набор команд языка APDL, текстовый файл с расширением .dat) и отправляется на расчет решателю Ansys Mechanical APDL. Текстовый вывод решателя сохраняется в файлах .out и отображается в разделе *Solver Output*.

При необходимости, конечно-элементная модель и результаты могут быть открыты и в классическом варианте интерфейса.

Математические и компьютерные модели

Математическая модель процесса (например, теплопереноса) включает, в частности

- решаемые уравнения;
- граничные условия;
- начальные условия.

Вычислительные пакеты автоматизируют использование алгоритмов численного решения задачи (например, метода конечных элементов для составления уравнений и методов решения систем линейных алгебраических уравнений) таким образом, чтобы пользователю не приходилось задумываться о деталях построения системы уравнений, дискретизации задачи и формулах для граничных условий, но понимание этого процесса позволяет более осмысленно пользоваться данным программным обеспечением и избегать множества ошибок.

Готовая компьютерная модель в пакете включает

- геометрическую (CAD) модель;
- настройки типа элементов и материалов;
- расчетную сетку (узлы, из которых формируются элементы);
- настройки начальных и граничных условий;
- настройки взаимосвязей частей моделей (контакты, шарниры);
- настройки шагов по времени, различных параметров алгоритма.

Любая модель всегда имеет свои ограничения и область применимости. При нарушении таких ограничений программа может как выдать ошибку или предупреждение, так и получить заведомо неверный результат (например, при отключенном учете больших деформаций или пластического поведения материала). Также расчет не гарантирует единственности получаемого решения и его независимости от неучтенных моделью неровностей или возмущений (например, для статически неопределимых задач). Задание модели поведения материала также может вызывать сложности для обеспечения корректного расчета, особенно это касается процессов, в которых происходят интенсивные пластические деформации среды с зависимостью от скорости и температуры. Кроме того, вычислительная сложность задачи (и, соответственно, время расчета) в первую очередь определяются типом используемых элементов и количеством узлов расчетной сетки. Построение подходящей сетки для описания конкретного процесса также может оказаться достаточно трудоемким процессом.

Пример математической модели: теплоперенос

Как правило, модели физических процессов записываются исходя из законов сохранения энергии или базовых уравнений движения (таких, как второй закон Ньютона). Для сплошной среды исходная форма таких уравнений содержит интегралы по некоторому произвольному объему и по его площади. Например, для процесса переноса тепла

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V c\rho T dV = \int_S \lambda \nabla T \cdot \vec{n} dS$$

для удобства исследования математическими методами, переходят к дифференциальным уравнениям, которые могут содержать различные слагаемые:

– производные по времени от температуры описывают скорость накопления энергии во времени

– производные по координатам являются компонентами вектора градиента температуры $\nabla T = \left\{ \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right\}$ и после умножения на коэффициент теплопроводности образуют тепловой поток $\vec{q} = -\lambda \nabla T$.

- векторная операция дивергенции соответствует накоплению величины в окрестности некоторой точки
- произвольные слагаемые без зависимости от T определяются внешними объемными источниками тепла

Стандартная форма уравнения теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} (\lambda \nabla T) + Q.$$

Граничные условия для тепловых задач включают как сами температуры, так и тепловые потоки на границе тела, задаваемые производной по направлению нормали $\frac{\partial T}{\partial n} = \nabla T \cdot \mathbf{n}$.

Стационарным называется уравнение без зависимости от времени. Такие уравнения решаются, когда надо найти установившееся распределение тепла после завершения всех переходных процессов в системе.

$$\operatorname{div} (\lambda \nabla T) + Q = 0.$$

Для постоянного коэффициента теплопроводности получается форма уравнения

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q.$$

Обратим внимание, что несмотря на наличие вторых производных в дифференциальных уравнениях, опора на интегральные их формулировки позволяет получать физически корректные решения при наличии разрывов в функции теплового потока $\vec{q} = -\lambda \nabla T$ или коэффициентах уравнения c, ρ, λ (например, в местах соединения разных материалов),

Основные понятия метода конечных элементов

Степени свободы являются температуры и/или перемещения в некоторых узлах сетки. Поиск именно этих величин необходим для решения задачи, все остальные неизвестные (тепловые потоки, напряжения, относительные деформации) могут быть выражены через них в процессе расчета.

Расчетная область разбивается на сетку – набор соединенных друг с другом конечных элементов. Внутри каждого конечного элемента предполагается определенная заранее заданная форма зависимости основных переменных от координат. Чаще всего это

линейная или квадратичная зависимость. Например, для решения уравнения теплопроводности на плоскости с использованием сетки из треугольных элементов внутри каждого треугольника можно предположить линейную зависимость

$$T(x, y) = Ax + By + C.$$

Коэффициенты A, B, C можно однозначно определить по значениям температур T_1, T_2, T_3 в узлах и их координатам, но удобнее использовать дополнительное понятие *функций формы* N_i , записывая

$$T = T_1 N_1(x, y) + T_2 N_2(x, y) + T_3 N_3(x, y)$$

Линейные функция $N_i(x, y)$ строится таким образом, чтобы $N_i(x_i, y_i) = 1$ и $N_i(x_j, y_j) = 0, j \neq i$ (в «своем» узле функции равны 1, а в остальных двух обращаются в 0).

Для элементов второго порядка на ребрах треугольника добавляется еще 3 узла и строится шесть квадратичных функций формы.

Для построения уравнений метода конечных элементов используется одна из интегральных формулировок задачи. Например, традиционной для стационарного уравнения теплопроводности является вариационная постановка задачи: функция $T(x, y)$ соответствует минимальному значению интеграла

$$\chi = \frac{1}{2} \int_V \nabla T \cdot \nabla T dV \rightarrow \min.$$

Запись интеграла в виде суммы по треугольным элементам и знание общего вида функций формы для элемента позволяет аналитически вычислить интегралы по каждому элементу сетки от $T, vT, \nabla T \cdot \nabla v, \nabla T \cdot \nabla T$ и всех необходимых величин. Например, для данной задачи система составляется из уравнений $\frac{\partial \chi}{\partial T_i} = 0$.

После вычисления всех интегралов в общем виде с произвольными значениями для степеней свободы T_i и известными координатами узлов, получается линейная система для определения значений всех степеней свободы, в простейшем случае имеющая вид

$$[K]\{T\} = \{Q\}.$$

В документации Ansys традиционно используются квадратные скобки для обозначения матриц и фигурные – для векторов, подробное описание базовых форм уравнений и процесса построения матриц приведено в [6].

Часто при записи формул переходят в локальную систему координат, связанную с центром элемента и определенным образом ориентированную. В локальных координатах формулы получаются проще, а переход к абсолютным координатам описывается стандартным для алгебры и аналитической геометрии образом.

Итоговое количество уравнений равно числу степеней свободы задачи. В уравнении для переменной в i -м узле могут присутствовать только неизвестные, связанные с узлами смежных элементов. За счет этого получаемые матрицы являются разреженными (содержат значительно меньше N^2 ненулевых элементов для системы с N степенями свободы) и система может быть успешно решена на современных вычислительных машинах для многих миллионов степеней свободы.

Типы и параметры элементов в Ansys Mechanical APDL

Во всех пакетах конечно-элементного моделирования есть понятие *типа элемента*. В случае Ansys тип элемента включает или подразумевает следующую информацию, которая детально описана в справке [7]:

- Кодовое название (например, SOLID226);
- Количество и расположение узлов, 2D/3D;
- Степени свободы (**DOF**) (перемещения узлов, температуры, углы поворотов, положение шарнира);
- Правила построения уравнений для каждого узла (зависят от моделируемого процесса, каждый элемент поддерживает один или несколько типов физических взаимодействий);
- Правила интерполяции величин (вычисления значений между узлами), например, линейная или квадратичная, эквивалентные заданию функций формы элемента;
- Возможные поверхностные и объемные нагрузки, граничные условия (Surface Loads, Body Loads);
- Вычисляемые по результатам расчета величины (Element Output): тепловые потоки TF , градиенты, напряжения, относительные деформации. Их можно анализировать в постпроцессоре;
- Используемые наборы постоянных (Real Constants, например, толщина оболочки) и параметры материала (Material Properties);

– Поддержка дополнительных типов анализа и возможностей: Большие повороты или перемещения, адаптация сетки, стабилизация расчета и др.;

– Набор опций (KEYOPT), может влиять на предыдущие пункты. Выбираются в зависимости от задачи, есть наборы рекомендаций и функции автонастройки (например, для гиперупругих или анизотропных материалов, слабо сжимаемых материалов и др.)

В классическом Ansys есть старый (Legacy) и новый (Current technology) наборы типов элементов, часть ранее написанных пособий и примеров ссылается на старые типы элементов. В случае Ansys Mechanical в Workbench тип элементов выбирается автоматически и в редких случаях требуется его дополнительная настройка. Для специализированных типов элементов и их параметров существуют надстройки (ACT), добавляющие в графический интерфейс дополнительные возможности, например, для работы с пьезоэлектрическими материалами или акустическими расчетами.

Для некоторых элементов переключаются формулировки уравнений. Например, для анализа напряженно-деформированного состояния сплошных сред, близких к несжимаемым, рекомендуют использовать модель *Mixed и P*, в которой к перемещениям узлов добавляется дополнительная степень свободы – давление. В пакете есть варианты автоматического выбора подходящих настроек, что особенно характерно для нового графического интерфейса Ansys Mechanical в Workbench.

При построении уравнений для конкретного элемента могут учитываться следующие настройки и параметры:

- номера узлов и их координаты при расчете дают конкретны функции формы и производные от них, т.е. возможность вычислять значения величин в любой точке элемента, а также интегрировать их по элементу или его границе;
- параметры конкретного материала;
- набор постоянных (*Real constants*, толщина оболочек и др.);
- параметры выбранного сечения *Section* (информация о параметрах балки, троса, оболочки, шарнира *MPC184*);
- условия на поверхности (*Surface loads*), например, тепловой поток *HFLUX*, конвекция *CONV*, излучение *RAD*, внешнее

- давление *PRES*. Они задаются в Ansys Mechanical APDL командами *SF* (nodes), *SFE* (elements). Аналогичные команды *SFL* (line), *SFA* (area) задают нагрузки на элементы геометрической модели, которые будут перенесены на узлы или грани сетки перед расчетом;
- объемные нагрузки задаются командами APDL *BF* (nodes), *BFE* (elements), *BFK*, *BFL*, *BFA*, *BFV* (keypoint/line/area/volume). Примеры – внутренние источники тепла (*HGEN*) или заданная температура (*TEMP*) для прочностных задач с тепловым расширением;
 - задание нагрузок в узлах (приводит к изменению только вектора правой части системы уравнений). Например, с помощью команды *F*, можно задать силы *FX*, *FY*, *FZ* или вращающие моменты *MX*, *MY*, *MZ*.;
 - фиксация степеней свободы (команды *D*, *DL/DA*), чаще всего перемещений *UX*, *UY*, *UZ* или температур *TEMP* уменьшает число неизвестных в расчете;
 - также различные связи степеней свободы друг с другом могут быть заданы с помощью элементов *MPC* – *multipoint constraint*, они также уменьшают число переменных (периодичность, шарниры, контакты с абсолютно твердыми телами). При наличии большого количества ограничений могут возникнуть противоречия (Over-constraint model).

4.2. Расчет напряженно-деформированного состояния: теоретические сведения и модели

В данном разделе приводятся сведения из теории упругости и пластичности, имеющие прямое отношения к настройкам модели или получаемым результатам.

Нормальные и касательные напряжения, их максимальные значения

Рассмотрим внутри деформированной среды поверхностный элемент с нормалью $n = (n_1, n_2, n_3)$ площадью dA .

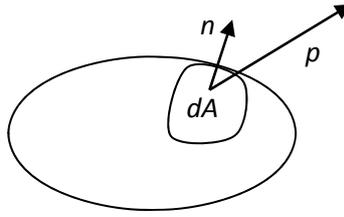


Рис. 4.1. Элемент поверхности и действующая на него сила

Действующая на него сила пропорциональна площади: $F = p dA$, где p – вектор напряжения с координатами $p_i = \sigma_{ji} n_j$, где σ_{ji} – тензор напряжений (*Stress tensor*).

За счет симметрии σ_{ij} всегда можно выбрать направление осей координат так, что в ней тензор будет иметь нулевые внедиагональные компоненты σ_1, σ_2 и σ_3 называемые *главными напряжениями (Principal Stress)*. Соответствующие направления называются *главными осями* тензора напряжений σ и могут быть найдены как собственные векторы матрицы σ_{ji} (в текущих координатах). Величины σ_1, σ_2 и σ_3 являются инвариантами тензора σ , то есть не зависят от выбора системы координат.

Длина проекции вектора p на нормаль n – *нормальное напряжение* на площадке, его величина равна

$$\sigma = p_i n_i = \sigma_{ji} n_i n_j.$$

Для площадок, перпендикулярных осям координат, нормальные напряжения равны диагональным элементам матрицы $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$, обозначаются в пакете *Normal Stress (X,Y,Z)*, их не нужно путать с главными напряжениями.

Нетрудно показать, что экстремальные значения нормального напряжения равны главным напряжениям и достигаются при выборе вектора n , направленного вдоль главных осей.

Вторая составляющая вектора p – *касательное напряжение σ_τ* ,

$$\tau = \sqrt{|p|^2 - \sigma^2}.$$

После перехода к системе координат вдоль главных осей имеем

$$\sigma_{11} = \sigma_1, \sigma_{22} = \sigma_2, \sigma_{33} = \sigma_3, \sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$$

$$p = (\sigma_1 n_1, \sigma_2 n_2, \sigma_3 n_3)$$

$$\sigma = \sigma_1 n_1^2 + \sigma_2 n_2^2 + \sigma_3 n_3^2$$

$$\sigma^2 + \tau^2 = \sigma_1^2 n_1^2 + \sigma_2^2 n_2^2 + \sigma_3^2 n_3^2$$

$$n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 = 1$$

Из последних трех уравнений путем попарного исключения n_1^2, n_2^2, n_3^2 могут быть получены соотношения

$$\begin{aligned} n_1^2(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_3) &= \tau^2 + (\sigma - \sigma_2)(\sigma - \sigma_3), \\ n_2^2(\sigma_2 - \sigma_3)(\sigma_2 - \sigma_1) &= \tau^2 + (\sigma - \sigma_3)(\sigma - \sigma_1), \\ n_3^2(\sigma_3 - \sigma_1)(\sigma_3 - \sigma_2) &= \tau^2 + (\sigma - \sigma_1)(\sigma - \sigma_2). \end{aligned} \quad (4.1)$$

Примем для определенности $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. Тогда условиями существования вектора n являются неравенства

$$\begin{aligned} \tau^2 + (\sigma - \sigma_2)(\sigma - \sigma_3) &\geq 0, \\ \tau^2 + (\sigma - \sigma_3)(\sigma - \sigma_1) &\leq 0, \\ \tau^2 + (\sigma - \sigma_1)(\sigma - \sigma_2) &\geq 0. \end{aligned}$$

Допустимые комбинации τ, σ могут быть наглядно представлены графически в виде так называемых *кругов Мора* (рис. 4.2).

Наибольшее касательное напряжение соответствует точке А:

$$\tau_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}.$$

Вычисление координат нормали по формулам (4.1) дает

$$n_1 = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad n_2 = 0, \quad n_3 = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Таким образом, площадка с максимальным касательным напряжением расположена под углом 45° к двум главным осям.

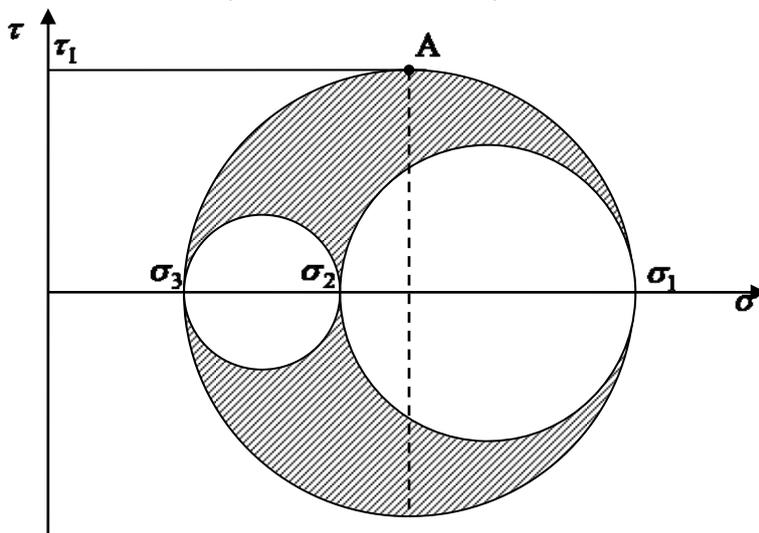


Рис. 4.2. Возможные сочетания нормального и касательного напряжения в заштрихованной области (круги Мора)

Верхним точкам других двух окружностей соответствуют локальные максимумы касательных напряжений на двух аналогичных площадках.

$$\tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \tau_3 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}.$$

В пакете касательные напряжения называются *Shear Stress*, и доступны для просмотра только в исходной системе координат (например, *Shear Stress YZ* это σ_{23}).

В тензоре напряжений σ всегда можно выделить шаровой тензор, соответствующий всестороннему сжатию или растяжению и оставшуюся часть – *девиатор напряжений* σ'_{ij} :

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \frac{1}{3} \sum_k \sigma_{kk} \delta_{ij}$$

или $\sigma = \sigma' + \sigma_m I$, где величина

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = \frac{1}{3} Tr(\sigma).$$

определяет среднее или гидродинамическое напряжение. Заметим, что σ_m – инвариант тензора, то есть не зависит от системы координат.

Основные уравнения движения

Неизвестными в задаче определения напряженно-деформированного состояния сплошной среды являются перемещения каждой точки по трем координатным осям $u_i(t, x_1, x_2, x_3)$ (в пакете традиционно обозначаются *UX, UY, UZ*). Основные уравнения движения для случая малых перемещений имеют вид [1]

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + F_i,$$

где F_i – проекции внешние объемные силы на каждую из трех осей. Напряжения полностью определяются *относительными деформациями* ε (*Strain*), которые для малых перемещений имеют вид

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

Упругие напряжения связаны с относительными деформациями обобщенным законом Гука. В случае линейного изотропного материала это соотношение имеет вид

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})\delta_{ij}.$$

Постоянные Ламе μ, λ выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν :

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

(при ν близком к $1/2$, что соответствует несжимаемому материалу, используется более сложная модель, для металлов это не актуально).

Обратим внимание, что задание плотности ρ необходимо только при расчете нестационарных явлений либо учете гравитации или инерционных сил.

Пример настроек плоских элементов

Плоские элементы могут представлять собой как тонкие оболочки в трехмерном пространстве (*SHELL*), так и части двумерной задачи (*PLANE*). Но даже в чисто двумерной задаче элементы могут подразумевать разные правила составления уравнений. Варианты настроек плоских элементов для детализации двумерной модели упругого или пластического деформирования (одна из настроек *KEYOPT* для элементов *PLANE*):

- *Plane* – $Z=0$ у всех узлов, ничего не зависит от Z , нагрузки и перемещения не содержат Z -компоненты, все величины нагрузок задаются на 1 ед. длины по Z ;
- *Plane with thickness* – то же самое, но все величины в расчете на заданную толщину (*в Real Constant* для данного типа элементов);
- *Axisymmetric* – осевая симметрия, моделируется одно сечение тела вращения (проходящее через ось вращения OY), позволяет моделировать трубы, муфты, пробки, приближенно – резьбовые соединения;
- *Plane Stress* – плосконапряженное состояние, $\sigma_z = 0, \sigma_{xz} = 0, \sigma_{yz} = 0$, данную модель используют, когда толщина по Z мала и все силы действуют в плоскости XY (потеря устойчивости с выходом из плоскости XY не предполагается);
- *Plane Strain* – плоско-деформированное состояние используют для сильно вытянутых вдоль Z тел.

Основы теории пластичности. Критерии пластичности

Для понимания заложенных в пакет нелинейных моделей материала и эффектов можно ознакомиться с [2], [3] и теоретическим описанием от разработчиков [6].

Пластичность – это способность твердых тел получать постоянные или временные *остаточные (пластические) деформации* после снятия деформирующих нагрузок.

Пластическое поведение связано с тем, что касательные напряжения в материале могут вызывать смещение слоев кристаллической решетки друг относительно друга, образование и перемещение дислокаций, движение зерен металла. Моделирование микропластичности для поликристаллических материалов стало возможным только в недавнее время за счет прогресса вычислительных технологий, но для инженерных приложений оно не применяется в силу огромного числа элементов в реальных объектах.

Модели пластичности строятся для масштабов, значительно превышающих размер зерна и, в результате чего поведение отдельных кристаллических решеток усредняется. Это позволяет формулировать модель движения среды на основании эмпирических или усредненных физических соотношений, относящихся к данному материалу.

Рассмотрим основные явления пластичности на простейшем примере растяжения-сжатия образца (одноосные напряжения). Напряжение обозначим σ ($\sigma = \sigma_{11}$, единственный ненулевой элемент тензора напряжений), относительное удлинение – ε .

Для большинства материалов зависимость $\sigma(\varepsilon)$ при растяжении образца имеет прямолинейный начальный участок, пока напряжение не превышает предел пропорциональности $\sigma_{пц}$. В этой области справедлив закон Гука. Затем до предела текучести σ_T следует криволинейный участок без достижения пластичности и, наконец, пластический участок с площадкой текучести или без нее (рис. 4.3). Практически всегда при моделировании пластичности металлов упругие деформации считаются линейными, т.е. $\sigma_T = \sigma_{пц}$.

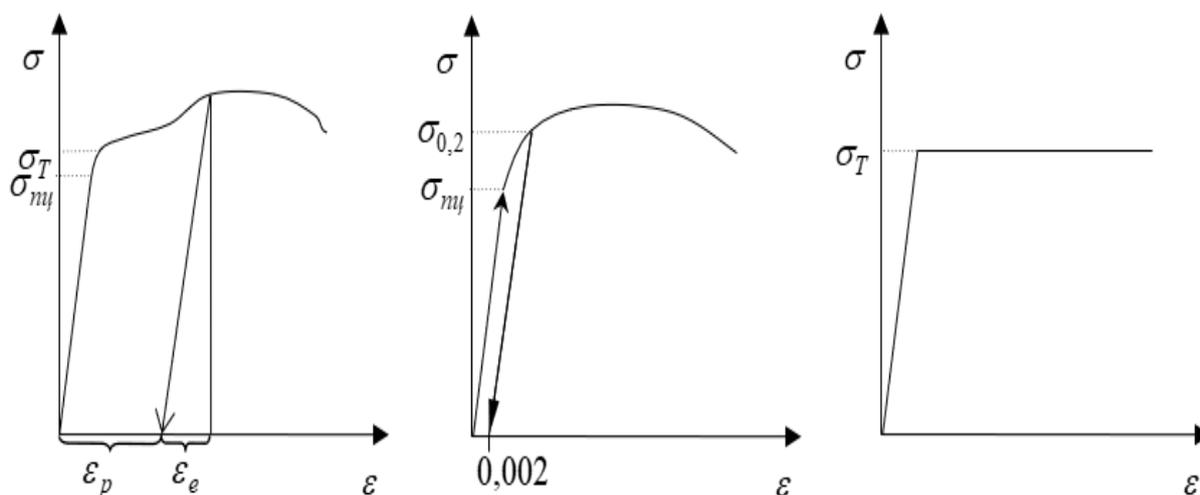


Рис. 4.3. Характерные диаграммы растяжения

При отсутствии четко выраженной площадки текучести предел текучести считают условным – берется $\sigma_T \approx \sigma_{0,2}$, при достижении которого остаточная деформация после снятия нагрузки составляет 0,2 %. Наиболее простой является показанная на рис. 4.3 справа диаграмма Прандтля для идеально пластического материала. Такого приближения часто бывает достаточно для мягких сталей и титановых сплавов.

При пластическом поведении не существует взаимно однозначной зависимости между напряжениями и деформациями, возникающими в теле.

Отметим, что при уменьшении напряжения (разгрузке) пластическое деформирование прекращается, причем зависимость $\sigma(\epsilon)$ является линейной с тем же коэффициентом наклона (модулем Юнга E). В каждой точке кривой полную деформацию можно разделить на упругую деформацию ϵ_e и пластическую ϵ_p . После разгрузки упругая деформация исчезает, а пластическая остается без изменения.

Из типовых графиков видно, что для продолжения пластической деформации, в том числе после снятия нагрузки, как правило придется приложить большее напряжение $\sigma = \sigma'_T > \sigma_T$, т.е. происходит *упрочнение* материала. Для горизонтальных участков кривой растяжения упрочнение отсутствует.

Если повторное нагружение осуществлять напряжением противоположного знака (сжатием), то пластические деформации начнутся при величине напряжения $\sigma''_T < \sigma_T$. Это явление называется

эффектом Баушингера. Если при этом выполнено равенство $\sigma_T'' + \sigma_T' = 2\sigma_T$, то материал называют *циклически идеальным*.

Экспериментально показано, что на кривую деформирования образца может оказывать существенное влияние скорость деформации, что связано с инерцией механизма пластического деформирования. В обычных испытательных стендах скорость деформирования находится в пределах $\dot{\epsilon} = 10^{-5}..10^{-2} \text{с}^{-1}$, что можно считать статическим режимом. Материал с зависимостью напряжений от скорости деформации называется *вязкопластическим*.

Эксперименты показывают, что при увеличении скорости деформации модуль упругости практически не изменяется, предел текучести увеличивается, а предельное пластическое удлинение (до разрушения) уменьшается – происходит *охрупчивание* материала.

В случае многоосного нагружения одного значения предела текучести недостаточно для определения области пластического поведения материала. На начальном (упругом) этапе нагружения деформации однозначно определяются действующими напряжениями. Следовательно, *условие пластичности* можно записать в виде некоторой функции тензора напряжений: $f(\sigma) = 0$. В шестимерном пространстве компонент тензора σ_{ij} это уравнение описывает поверхность, называемую *поверхностью текучести (пластичности)*.

Для изотропного материала условие появления пластических деформаций не может зависеть от выбора системы координат. Поэтому функция может зависеть от трех любых инвариантов тензора напряжений, например, от трех главных напряжений:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0.$$

В пространстве главных напряжений поверхность текучести уже поддается изображению.

Другой важной особенностью пластических деформаций является их независимость от всестороннего сжатия или растяжения – при таких деформациях, как показывают многочисленные эксперименты, изотропный материал деформируется упруго (кроме случаев пористого пластического материала).

Движущей силой пластических деформаций в металлах являются касательные напряжения, которые (как показано выше) принимают максимальные значения на площадках, расположенных

под углом 45 градусов к главным осям. Средняя величина таких напряжений –

эквивалентное напряжение (фон Мизеса) σ_e : $\sigma_e^2 = \tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2$, $\tau_1 = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ и т.д. Оно выражается через главные напряжения в виде

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2}.$$

Можно также представить σ_e через компоненты самого тензора σ :

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2} ((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6\sigma_{12}^2 + 6\sigma_{13}^2 + 6\sigma_{23}^2),$$

либо через девиатор напряжений σ' :

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma' : \sigma'},$$

где «:» обозначает двойное скалярное произведение тензоров

$$A : B = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} B_{ij}.$$

Соотношение $\sigma_e - \sigma_T = 0$ или

$$\sqrt{\frac{3}{2} \sigma' : \sigma'} - \sigma_T = 0$$

называется *критерием пластичности фон Мизеса* (Хубера-Мизеса, Хубера-Мизеса-Генки, Максвелла-Хубера в различных источниках).

Поверхность текучести для критерия Мизеса в пространстве главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ представляет собой цилиндрическую поверхность с направлением оси (1,1,1). В плоскости σ_1, σ_2 соответственно имеем эллипс $\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_T^2$ изображенный на рис. 4.4.

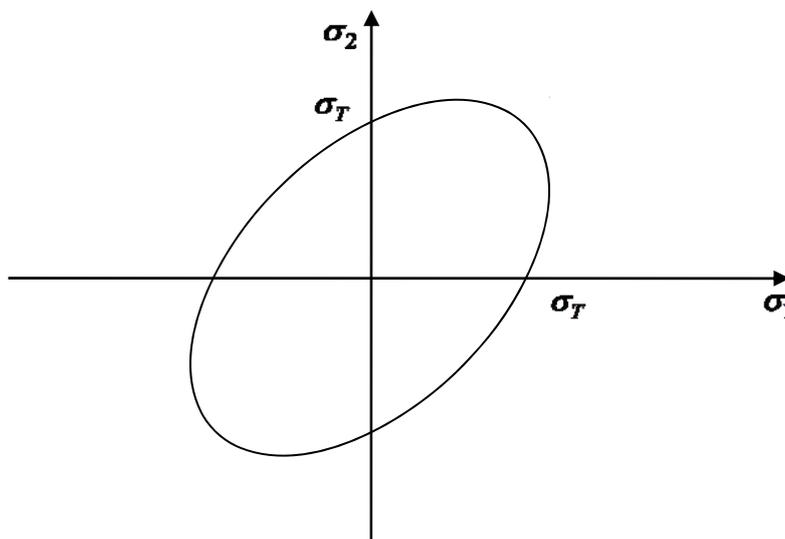


Рис. 4.4. Области пластичности в пространстве главных напряжений σ_1, σ_2

Заметим, что в случае одноосного напряжения критерий сводятся к $\sigma_1 = \pm\sigma_T$.

Для анизотропных материалов фон Мизесом предложен обобщенный квадратичный критерий, который в тензорной записи имеет вид

$$A_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} = 1$$

и в силу симметрии тензоров зависит от 21 постоянной. Если считать, что при всестороннем сжатии пластические деформации отсутствуют, число постоянных можно уменьшить до 6 (определяемых из 3 экспериментов на растяжение и 3 на сдвиг), получив также доступный в Ansys критерий Хилла:

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + F(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1.$$

Моделирование пластического течения. Основные гипотезы, модели и уравнения.

При пластическом течении материала связь однозначная связь между напряжениями и деформациями отсутствует, однако предполагается, что при заданном процессе деформирования тензор напряжений в каждый момент времени определяется однозначно. Изменение значений σ_{ij} определяет *путь нагружения*.

Предполагается также, что в каждый момент для каждой точки тела в пространстве напряжений существует поверхность $f(\sigma, \eta) = 0$, определяемая условием пластичности, внутри которой деформации чисто упругие. При увеличении напряжения деформации остаются упругими до достижения σ поверхности $f = 0$, а затем начинается пластика. Параметр η называется *параметром упрочнения* материала и не обязательно является скалярной величиной. Им определяется изменение поверхности текучести в результате прошедшего процесса. При переходе σ_{ij} внутрь поверхности текучести (разгрузке) тело вновь возвращается к исключительно упругим деформациям.

Таким, образом, в тензоре деформаций всегда можно выделить упругую часть ε^e и пластическую часть:

$$\varepsilon^p = \varepsilon - \varepsilon^e.$$

При этом для упругих деформаций всегда выполнен закон Гука в тензорной форме:

$$\sigma = C\varepsilon^e = 2\mu\varepsilon^e + \lambda Tr(\varepsilon^e)I,$$

при необходимости, модифицированный с учетом температурных эффектов. Здесь C – тензор жесткости 4-го порядка, в рассматриваемом случае зависящий от двух констант Ламе μ, λ .

Можно записать это соотношение в дифференциальной форме:

$$\dot{\sigma} = C \dot{\varepsilon}^e$$

При использовании метода конечных элементов C соответствует матрице касательной жесткости.

Часто предполагается, что $\varepsilon^p \approx \varepsilon$, т.е., упругие деформации малы по сравнению с пластическими. Гипотезы и уравнения теории пластичности предназначены в итоге для определения ε^p .

Гипотеза несжимаемости утверждает, что в пластическом состоянии материал несжимаем. Удобно записывать ее через скорость объемного пластического деформирования:

$$\dot{\varepsilon}_{11}^p + \dot{\varepsilon}_{22}^p + \dot{\varepsilon}_{33}^p = 0.$$

Гипотеза градиентальности формулируется из энергетических соображений и утверждает, что вектор приращения деформаций всегда направлен вдоль нормали к поверхности текучести в данной точке с координатами σ_{ij} .

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \text{ или } d\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma}. \quad (4.8)$$

Скалярная величина λ называется пластическим множителем.

При модулировании пластической деформации без учета вязкопластичности и ползучести, напряжения при активной пластике все время находятся на поверхности текучести. Может изменяться сама поверхность (происходить упрочнение).

Соответствующее условие совместности записывается в виде

$$f(\sigma + d\sigma, \eta + d\eta) = 0. \quad (4.9)$$

Существует несколько общеупотребительных моделей упрочнения материала, описывающих разные типы зависимости f от η . Рассмотрим их в сочетании с критерием пластичности фон Мизеса.

Изотропное упрочнение (Isotropic hardening) соответствует равномерному расширению поверхности текучести при пластических деформациях (рис. 4.5) и задается уравнением

$$f(\sigma, \eta) = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma' : \sigma'} - \sigma_T - r(p) = 0.$$

При этом от σ зависит σ' , а параметром упрочнения является эквивалентная пластическая деформация

$$p = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon^p : \varepsilon^p}.$$

Вид кривой упрочнения $r(p)$ задается таблично из эксперимента или на основе какой-либо аппроксимации – модели пластичности в узком смысле ($p = \varepsilon_{11}$ в одноосном случае). Реально пределом пластичности деформированного материал является $\sigma_T + r(p)$.

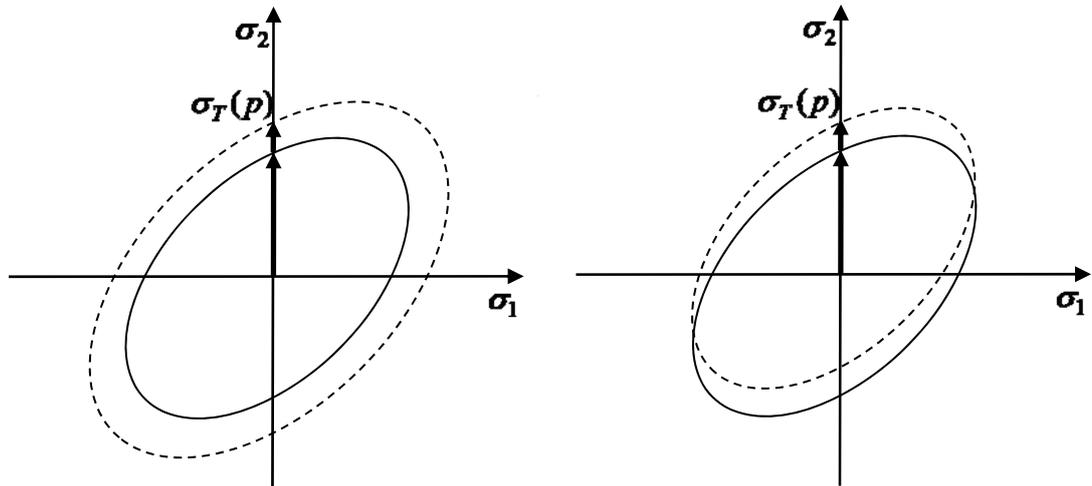


Рис. 4.5. Изотропное упрочнение (слева) и кинематическое упрочнение

При многоцикловом нагружении, когда растяжение периодически сменяется сжатием, модель изотропного упрочнения, как правило, приводит к излишнему увеличению зоны упругости. В реальности же наблюдается эффект Баушингера и пределы текучести при одноосном сжатии и растяжении не совпадают после пластического деформирования.

Подобные эффекты лучше моделируются при использовании модели *кинематического (трансляционного) упрочнения (Kinematic hardening)*. При таком упрочнении вся поверхность текучести в пространстве $[\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}]$ при пластической деформации сдвигается без изменения формы. Параметром упрочнения теперь является тензор s с девиатором s' , а поверхность пластичности имеет вид

$$\sqrt{\frac{3}{2} (\sigma' - s') : (\sigma' - s')} - \sigma_T = 0, \text{ или } J(\sigma' - s') - \sigma_T = 0,$$

что при одноосном напряжении эквивалентно

$$|\sigma - s| - \sigma_T = 0.$$

Также рассматриваются комбинированные модели упрочнения.

При учете эффектов *вязкопластичности* (зависимости пластического поведения от скорости деформаций) отказываются от предположения, что σ находится непосредственно на поверхности текучести, то есть от уравнения (4.9) и его следствий. В уравнениях начинает присутствовать скорость пластического деформирования, которая взаимосвязана с текущими напряжениями. Традиционно в пакете отдельно задаются модели *ползучести* (медленного деформирования тела даже при постоянной приложенной нагрузке).

Несколько типовых моделей таких зависимостей доступны в Ansys в разделе свойств материала *Structural – Nonlinear – Inelastic – Rate Dependent (Visco-Plasticity и Creep)*

При задании формы кривых в пакете Ansys доступен выбор между билинейным приближением *Bilinear* и табличным заданием набора отрезков графика *Multilinear*. Например, выбранная модель может обозначаться как *Multilinear kinematic hardening*.

4.3. Этапы построения конечно-элементной модели и основные возможности программного комплекса Ansys

Обзор интерфейса и возможностей Ansys Mechanical APDL

Внешний вид основного окна *Ansys Mechanical APDL* показан на рис. 4.6. Интерфейс достаточно консервативен, но его преимуществом является возможность полной автоматизации постановки задачи и обработки результатов с помощью скриптов APDL. Данный интерфейс хорошо подходит для понимания базовых возможностей пакетов конечно-элементного моделирования, запуска тестовых задач с простой модельной геометрией и т.д. Также в нем можно подобрать набор команд для включения в текстовом виде в модули Ansys Workbench, если нужные действия не вынесены в их графический интерфейс.

Справа от основного графического окна расположена панель управления видом, в ней происходит настройка масштаба и проекции.

Раздел *File* главного меню содержит команды чтения-записи файлов в двоичном формате DB, позволяет выполнить произвольные команды языка APDL из текстового файла (*File – Read Input From*) и

сохранения таких команд, приводящих к текущему состоянию (*File – Write DB Log File*), просмотреть текущую историю команд (*File – List – Log File*), импортировать CAD-геометрию (поддерживается импорт форматов *IGES, CATIA, Creo Parametric, NX, ACIS, Parasolid*, экспорт только в *IGES*).

Раздел *Select* главного меню содержит команды управления текущим набором выделением. Именно выделенные элементы отображаются в графическом окне, анализируются командами постпроцессинга, только они включаются в расчет при выполнении команды *SOLVE*. Можно выделить части геометрической (CAD) модели – ключевые точки *Keypoints*, линии *Lines*, плоские или трехмерные поверхности *Areas* и объемы *Volumes* в произвольных сочетаниях по их номерам, координатам, отношению к друг другу. Также можно выделить узлы (*Nodes*) и элементы (*Elements*) текущей расчетной сетки.

Как и любые действия в Ansys Mechanical APDL, вместо выбора в окнах и меню всегда можно выполнить соответствующую команду языка APDL, например *KSEL, LSEL, ASEL, VSEL, NSEL, ESEL* (строка ниже главного меню позволяет их вводить вручную) с нужными параметрами. Например, команда «*ESEL,S,,1,10*» выделит конечные элементы с номерами с 1 до 10, а «*NSEL,S,LOC,X,0.01,0.05*» выделит все узлы с координатой X от 0.01 до 0.05. Вернуться к работе с полной моделью можно с помощью действия *Select – Everything*.

Просмотреть подробные списки частей и настроек текущей модели можно с помощью пунктов меню *List* или соответствующих команд. Кроме частей геометрической модели, узлов и элементов, можно просматривать в текстовом виде типы элементов, наборы констант, настроенные сечения для балочных моделей, наборы табличных данных, перечни ограничений степеней свободы и нагрузок, и даже числовые значения результата расчета для узлов и элементов.

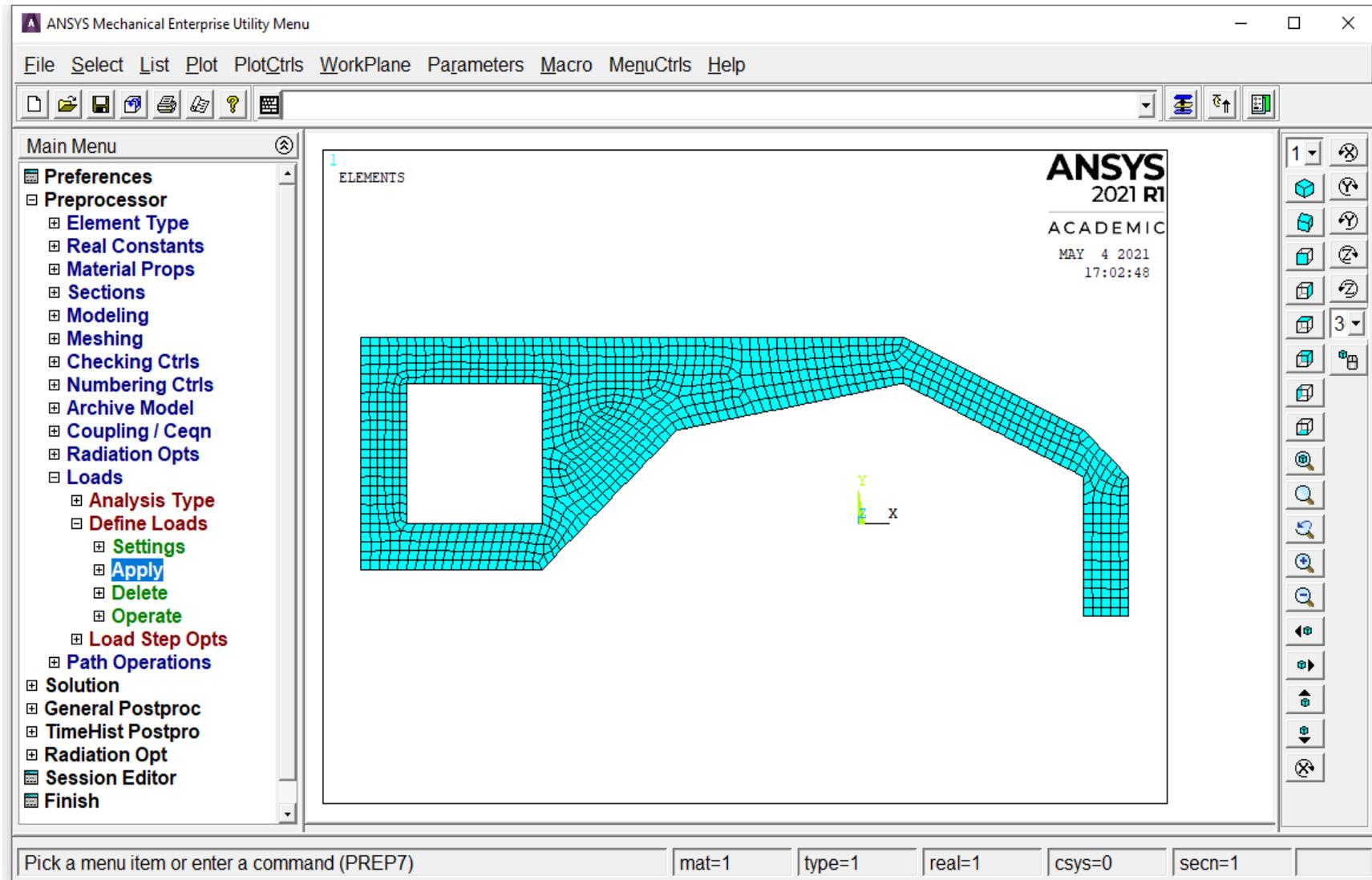


Рис. 4.6. Графический интерфейс *Ansys Mechanical APDL*

Меню *Plot* содержит команды построения рисунков и графиков для модели и результатов расчета, детальная настройка вида рисунков производится с помощью пунктов меню *PlotCtrls*. Например, для смены цвета фона с черного можно использовать *PlotCtrls – Style – Colors – Reverse Video*, для показа номеров частей модели – настройки в окне *PlotCtrls – Numbering*, для схематичного отображения нагрузок и сил реакции опоры – *PlotCtrls – Symbols*.

Меню *Workplane* предназначено для работы с дополнительными локальными системами координат (поддерживаются декартовы, цилиндрические, сферические и тороидальные координаты).

Меню *Parameters* предназначено для быстрого доступа к числовым параметрам, массивам и функциям, которые могут быть использованы при задании нагрузок и при создании APDL-программ.

Меню *Macro* позволяет управлять макросами и аббревиатурами – наборами команд APDL, доступными для выполнения через командную строку или дополнительные кнопки на панели инструментов (чтобы создать новый макрос, достаточно разместить в текущей папке задачи текстовый файл с командами и расширением .mac).

Основное меню модели представлено в виде дерева слева на рис. 4.6. Его основные разделы – *Preprocessor* (построение геометрии, сетки и подготовка модели к расчету, модуль APDL PREP7), *Solution* (настройка параметров решателя, запуск шагов расчета, модуль SOLUTION), *General Postproc* (постпроцессинг, покадровый просмотр результатов расчета, POST1) и *TimeHist Postpro* (постпроцессинг с просмотром истории изменения величин во времени). Типовой расчет включает следующие действия в древовидном меню:

- *Preprocessor – Element Type – Add/Edit/Delete – Add, Options*: выбор и настройка типа элементов;

- *Preprocessor – Real Constants – Add/Edit/Delete – Add*: задание набора постоянных (их может быть несколько для каждого типа элементов), например, толщины пластин, числовых характеристик контакта или шарнира (если не использовались специализированные инструменты);

- *Preprocessor – Sections* – чаще всего *Beam – Common Sections*: задание сечений, отвечающих за геометрические, инерционные и другие характеристики одномерных и двумерных элементов. Типовой пример – форма балки для элементов *BEAM*;

- *Preprocessor – Material Props – Material Models*:

– выбор модели материала, учитывающей все необходимые в задаче эффекты (теплоперенос, упругие характеристики, пластическое поведение, тепловое расширение, гиперупругость, затухание колебаний, анизотропное поведение и др.). Чаще всего используются свойства *Structural-Linear-Elastic-Isotropic*, *Structural-Density*, *Thermal-Conductivity-Isotropic*, *Thermal-Specific Heat*;

– *Preprocessor – Meshing*: различные инструменты для тонкой настройки параметров сетки и ее построения для существующей геометрической модели. Можно использовать интерактивный инструмент *MeshTool* либо отдельно выбирать *Mesh Attributes* (тип элемента, номер материала, при необходимости - секции и набора констант уже должны быть заданы), *Size Cntrls* (размеры ячеек или количество делений отрезка), *Mesh* (создать сетку на линии, поверхности или объеме);

– *Preprocessor – Modeling – Create – Contact Pair* – создание контактных пар для взаимодействующих поверхностей модели. Элементы типов CONTACT и TARGET прикрепляются к поверхностям автоматически, в их характеристиках учитываются все необходимые настройки контакта (разрешено ли проскальзывание и размыкание, каков коэффициент трения, какой алгоритм используется при расчете и т.д.);

– *Solution – Analysis Type – New Analysis*: выбор типа расчета для данного шага нагружения (*Static*, *Transient*, *Modal*, *Harmonic* и др.). От данного выбора зависит наличие в уравнениях производных по времени, будет ли искаться решение в виде гармонических колебаний и т.д.;

– *Solution – Analysis Type – Sol'n Controls – Analysis Options* учет больших отклонений при необходимости (делает задачу нелинейной);

– *Solution – Analysis Type – Sol'n Controls – Time, Automatic Time Stepping*: настройка подшагов по времени (substep) для плавного перемещения или приложения нагрузки;

– *Solution – Analysis Type – Sol'n Controls – Write Items To Result File*: настройка частоты сохранения результатов в файл при расчете, по умолчанию сохранится только последний результат, что приемлемо лишь для линейных задач;

– *Solution – Define Loads – Apply – Structural или Thermal*: задание граничных условий и нагрузок. Все задается на достаточно низком уровне по сравнению с Workbench.

Разрешено:

– фиксировать некоторые перемещения либо температуры узлов (при необходимости используя таблицы), *Structural-Displacement* или *Thermal-Temperature*. При этом число степеней свободы уменьшается;

– задавать нагрузки, равномерно распределяемые по узлам (*Force/Moment on Nodes*) или по поверхности (давление *Pressure*);

– задавать тепловые граничные условия *Thermal: Heat Flow* (суммарный тепловой поток), *Heat Flux* (тепловой поток на единицу длины или площади), *Convection* (конвективный теплообмен с окружающей средой), *Radiation* (теплообмен излучением);

– задавать объемные нагрузки типа гравитации, центробежных сил или объемных тепловых источников;

– *Solution – Define Loads – Apply – Initial Condit'n*: задание начальных условий для нестационарных расчетов (значения для степеней свободы и скоростей их изменения);

– *Solution – Load Step Opts – Write LS Files*: в случае многошагового расчета требуется сохранение всей информации для текущего шага нагружения (повторяется несколько раз);

– *Solution – Solve – Current LS* или *From LS Files*: запуск задачи на расчет. В консольном окне отображается информация о ходе решения, а на экране – график изменения невязок.

После окончания расчета результаты анализируются с использованием модулей постпроцессора. Как правило, просматривают поля температур либо эквивалентных напряжений в виде контуров, сравнивая результаты с предельно допустимыми для данного процесса значениями. Удобно использовать *General Postproc – Results Viewer*. Также строить эпюры напряжений и графики изменения любых переменных во времени и вдоль некоторой линии. При необходимости возможно, например, детально изучить напряженно-деформированное состояние в интересующих точках, построив векторное представление главных напряжений *General Postproc – Plot Results – Vector Plot – Predefined – Stress*. При необходимости рисунок

дополнительно настраивается с использованием меню *PlotCtrls*, например, настраивается цветовая шкала, отображение граничных условий и сил реакции, выбирается масштаб увеличения деформаций (для наглядности, изначально выбирается автоматически).

Если значения в важной для расчета зоне изменяются очень резко (имеют большие градиенты), то для получения более корректных числовых значений требуется уменьшение размера ячеек сетки в данной зоне.

Линейные и нелинейные задачи. Статический и нестационарный расчет. Шаги и внутренние итерации

Линейной является задача, решения которой можно умножать на любую постоянную вместе с нагрузками и граничными условиями, а сумме нагрузок соответствует сумма решений. Например, при увеличении силы в 2 раза, все перемещения также автоматически увеличатся в 2 раза. Не все задачи являются линейными. Например, если свойства материала в тепловой задаче зависят от температуры, расчеты при температуре на границе 100 и 300 градусов не будут просто отличаться в 3 раза (рис. 4.7).

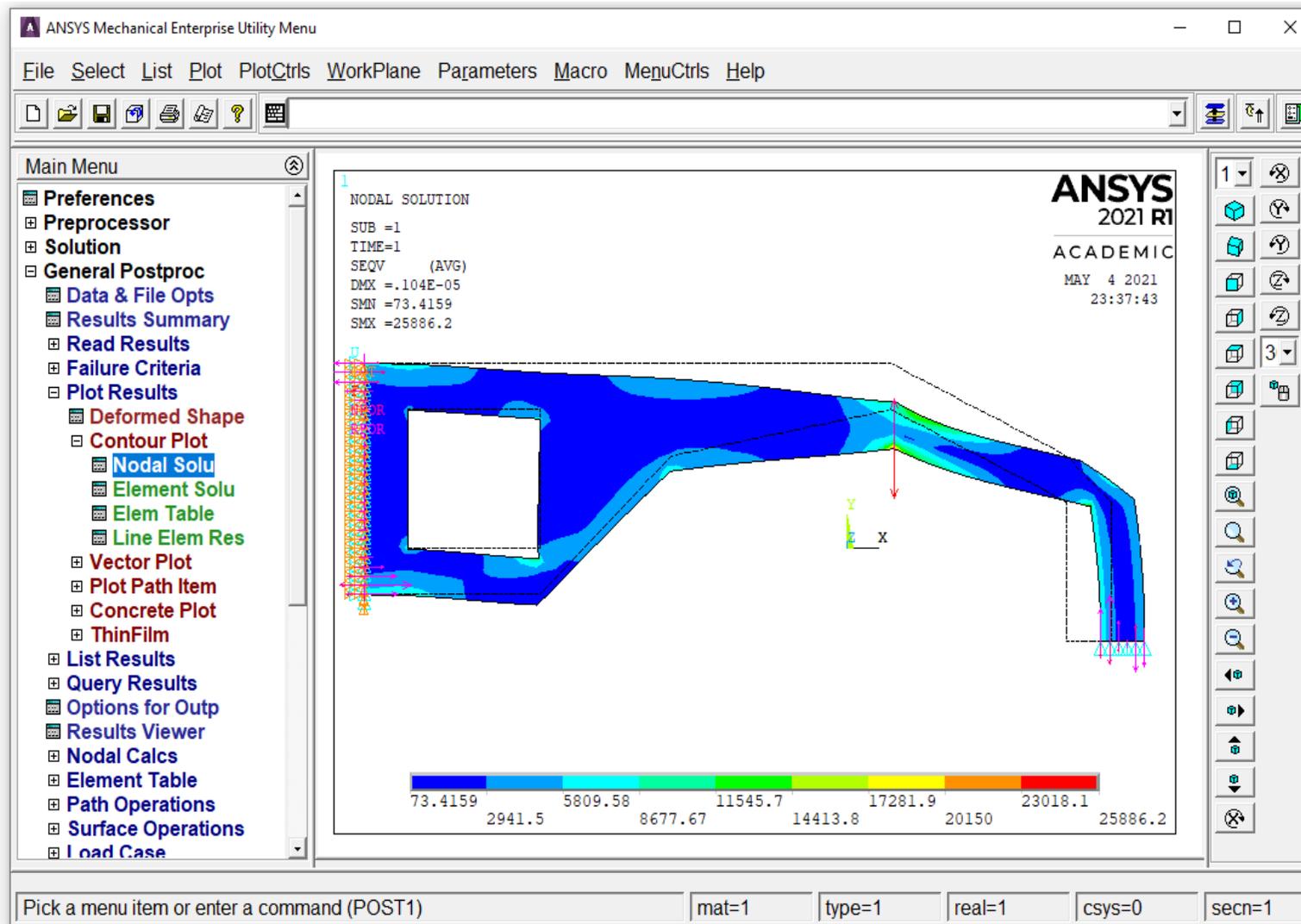


Рис. 4.7. Пример отображения результатов прочностного расчета в *Ansys Mechanical APDL*

Для нелинейных задач при поиске значений степеней свободы недостаточно решить линейную систему уравнений. Однако, численное решение нелинейной системы уравнений можно свести к многократному решению линейной системы (см., например, метод Ньютона-Рафсона [6]) с перестроением матрицы на каждом шаге.

Источником нелинейности в задаче могут являться

- Нелинейность материалов:
 - зависимость коэффициента теплопроводности, теплоемкости или плотности от температуры;
 - отклонение от закона Гука при упругих деформациях;
 - модель пластического поведения материалов;
- Геометрическая нелинейность (необходимость изменять матрицы из-за изменения формы и поворота элементов):
 - Большие повороты;
 - Большие относительные деформации;
- Наличие из-за несимметричных контактов или соединений:
 - Определение заранее неизвестного статуса контакта на каждом;
 - При изменении знака нагрузок некоторые типы контакта могут разомкнуться.

В линейных расчетах есть возможность изменять нагрузки, задавая шаги нагружения (Load Step), разделяемые на подшаги (substep). Каждый шаг нагружения может содержать новый набор граничных условий и внешних сил (либо температур, тепловых потоков), тогда как шаги substep нужны для плавного изменения значений нагрузки на каждом шаге (это актуально при сложном изменении нагрузок во времени и при моделировании быстрого движения типа колебаний или ударов). В нелинейной задаче каждый substep рассчитывается с многократным перестроением матрицы в ходе внутренних итераций (*Equilibrium iterations*). Если расчет не сходится (невязки уравнений не стремятся к нулю), решатель будет пробовать уменьшать величину шага по времени (происходит *bisection*).

Изменение времени не делает задачу нестационарной автоматически. Статический расчет может содержать нагрузки, зависящие от времени, при этом на каждом шаге (подшаге) решается задача определения положения равновесия (напряженно-деформированного состояния) или установившегося распределения

температур. Включение нестационарного расчета (Transient) позволяет лишь учесть производные по времени в уравнении (инерционные эффекты) и не вводит нелинейность в задачу. Задание сложной зависимости от времени или координат также не делает задачу нелинейной.

Работа с геометрией и сеткой в Ansys Workbench

Построение или адаптация геометрии для расчета может проводиться как в САД-пакете типа SolidWorks или Компас 3D, так и во встроенном модуле *Ansys DesignModeler* или *SpaceClaim* [8]. Как правило, в данных модулях производятся только вспомогательные действия по подготовке твердотельной модели к расчету. Поддерживаются, в частности, следующие стандартные возможности:

- Создание эскизов (*Sketch*) с размерами (*Dimension*) и ограничениями (*Constraints*) (параллельность, симметрия и т.д.);
- Задание дополнительных системы координат (плоскости *Plane*), их последовательные преобразования (*Transform*) перемещения и поворота;
- Преобразование эскизов в трехмерные тела выдавливанием (*Extrude*) и вращением (*Revolve*);
- Разрезание геометрической модели на более простые тела с плоскостями или поверхностями (*Slice*);
- Булевы операции над телами (*Boolean*, объединение, пересечение, вычитание);
- Построение фасок и скруглений (*Chamfer, Blend*);
- Исправление дефектов импортированной геометрии (*Repair*);
- Создание поверхностных и линейных объектов (меню *Concept*).

В отличие от классического Ansys, в Workbench можно в любой момент переключать единицы измерения на более удобные.

Построение сетки в *Workbench* происходит в модуле *Ansys Meshing*.

Он поддерживает множество возможностей, в частности:

- Различные типы генераторов сетки: *Tetrahedrons, Multizone, Hex Dominant, Sweep*;
- Настройки размеров *Sizing* и скорости роста ячеек *Growth Rate*;

- Пограничные призматические слои *Inflation* (более актуальны для гидродинамических расчетов);
- Объединение частей модели (*Form New Part* на уровне геометрии) для построения единой сетки;
- Построение сетки на частях модели в определенном порядке (*Start Recording, Worksheet*);
- Обеспечение совпадения сетки на гранях с учетом поворота или переноса (*Match*);
- Построение регулярной сетки на поверхностях и телах простой формы (*Mapped Face Meshing, Multizone, Sweep*) (рис. 4.8).

Подробное описание всех настроек приведено в справке [9] и различных пособиях, например, [4].

Предварительное разбиение геометрии на части с помощью *Slice* позволяет получить сетку с большей долей ровных гексагональных ячеек и меньшим общим количеством узлов (рис. 4.9), что положительно сказывается на точности и времени расчета.

Примеры моделей в Ansys Workbench

Решатель Ansys Mechanical APDL используется в большом количестве модулей Ansys Workbench, связанных с прочностными, тепловыми и электрическими расчетами:

- *Static Structural, Transient Structural*: стационарный и нестационарный расчет напряженно-деформированного состояния;
- *Steady-State Thermal, Transient Thermal*: тепловые расчеты;
- *Modal, Harmonic Response, Random Vibration, Response Spectrum*: расчеты малых колебаний и вибрации в различных постановках;
- *Electric, Magnetostatic*: расчет электрических и магнитных полей;
- *Coupled Field (Static, Transient, Modal, Harmonic), Thermal-Electric*: совместные расчеты с несколькими группами степеней свободы (например, нагрев при трении или протекании электрического тока).

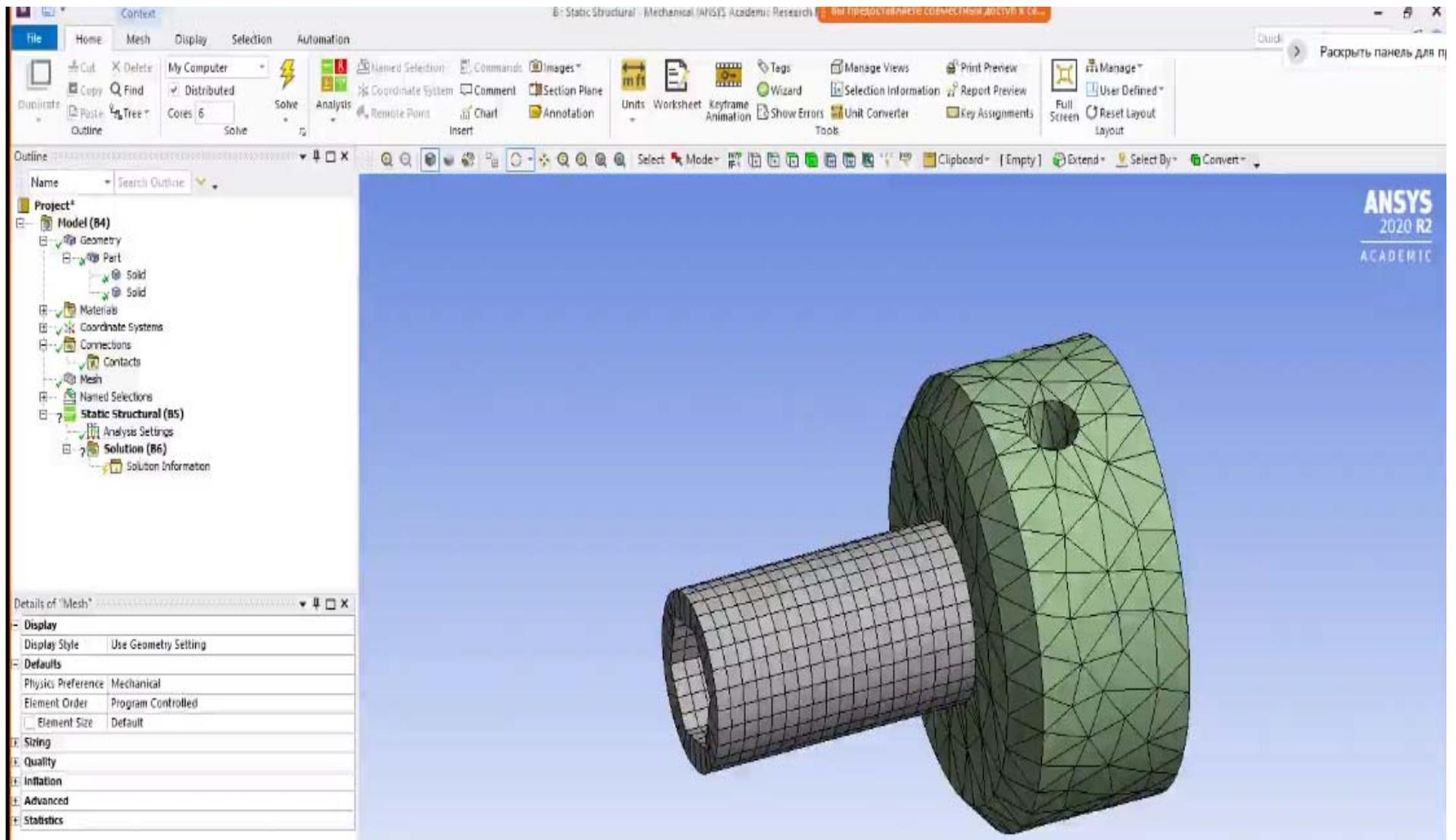


Рис. 4.8. Пример построения сетки в *Ansys Meshing*

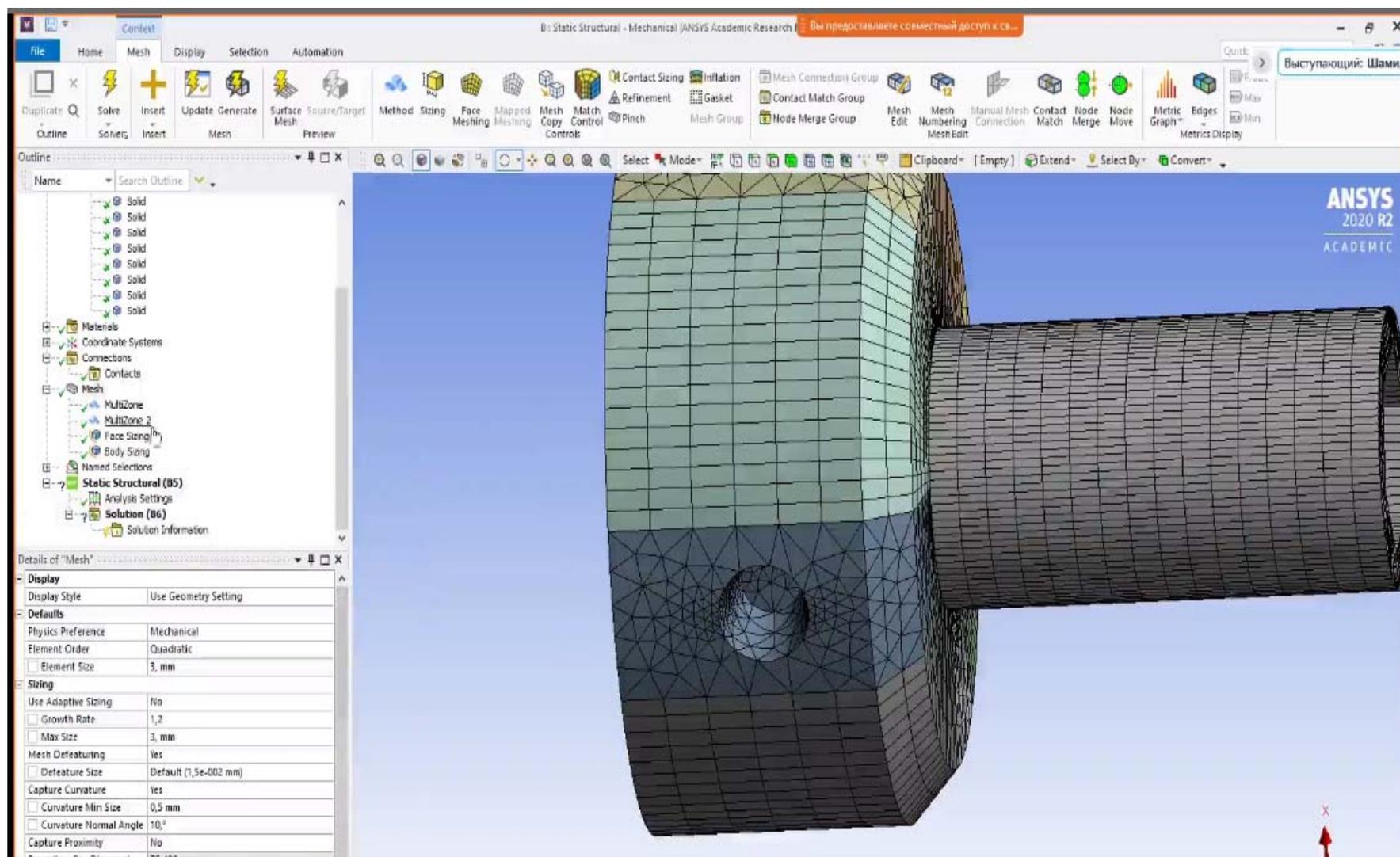


Рис. 4.9. Пример построения сетки в *Ansyes Meshing* с предварительным разделением геометрии на части

На рис. 4.10 приведен пример расчетной модели, в которой использованы следующие возможности [9]:

- Настройка параметров геометрии и их взаимосвязей (настраивается размер, число и положение полукруглых вырезов, имитирующих нагревательные элементы);
- Режимы добавления тела *Frozen*, *Add*, *Cut*, *Slice* в геометрии;
- Булевы операции;
- Выделение элементов и узлов сетки с помощью *Named Selection+Worksheet*;
- Переключение 2D и 3D – режима (по умолчанию вся геометрия трехмерная);
- Граничные условия для тепловых задач.

Мощная система параметризации является одним из достоинств среды Ansys Workbench. Параметры могут задаваться и использоваться в геометрической модели (например, размеры, углы и расстояния), в сетке (размеры ячеек), в задании нагрузок граничных условий. Параметры также могут передаваться в САД-пакеты для перестроения геометрии их встроенными средствами. Каждый набор *входных параметров* соответствует одной точке расчета (*Design Point*), для которой могут быть построены и сохранены результаты и вычислены значения *выходных параметров*. В Ansys Workbench также реализованы средства автоматического планирования численного эксперимента и модули оптимизации (раздел *Design Exploration*).

При постпроцессинге (раздел *Solution* в дереве) доступны, в частности, следующие возможности:

- Контурные и векторные рисунки. Выделение части модели.
- Построение анимаций, выбор интересующих моментов времени.
- Таблица и график зависимости величин от времени (шага).
- Аннотации (замер в точке, *Probe*).
- Графики вдоль пути (*Path*).
- Выходные параметры модели (числа будут вычислены автоматически при получении результатов и отображены в Workbench в соответствующей таблице *Design Points*).

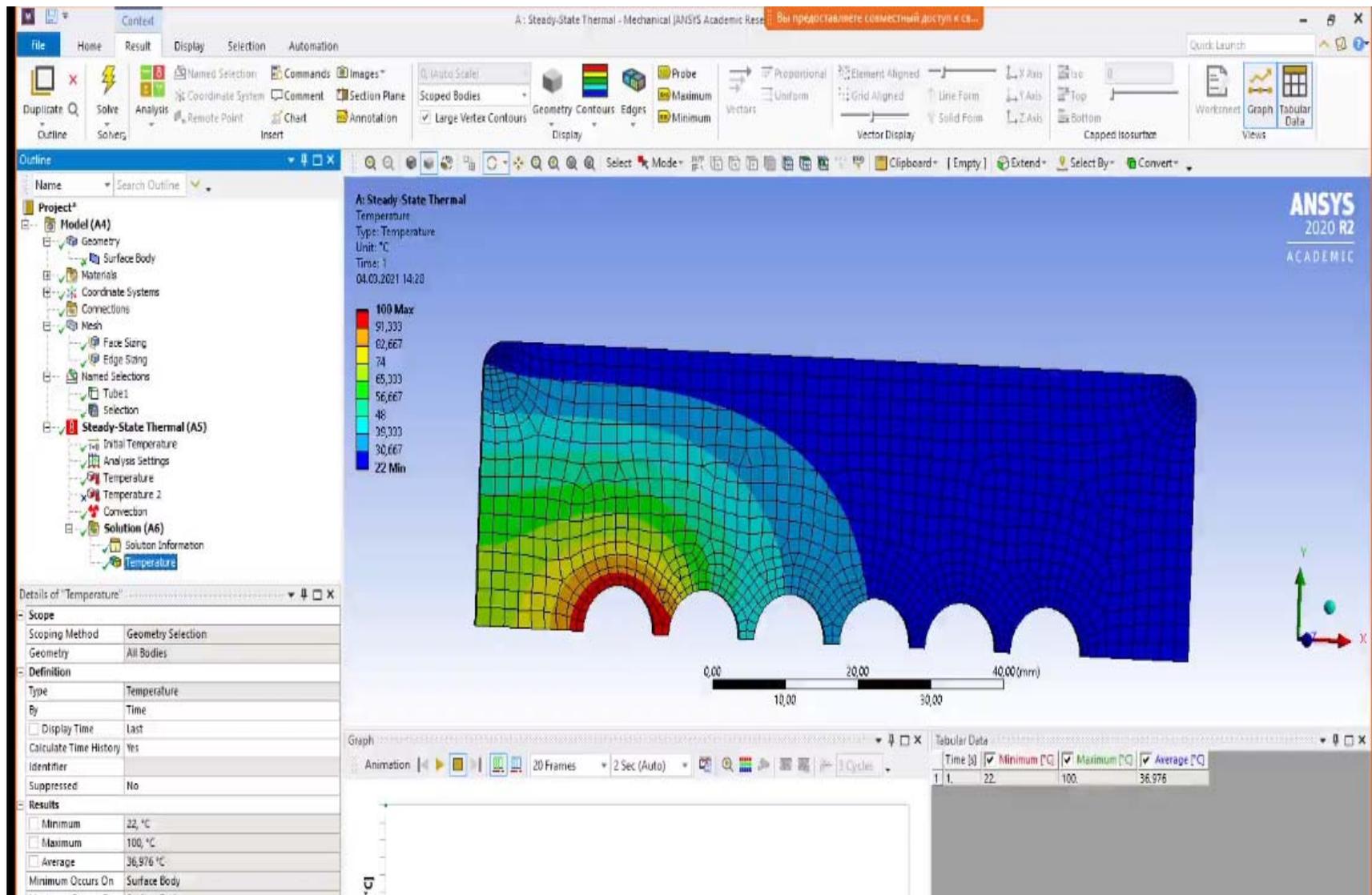


Рис. 4.10. Пример расчетной модели с параметрами

В следующем примере (рис. 4.11) построена балочная модель и активирован нестационарный расчет. При создании балочных моделей обязательным этапом является настройка сечений. Задаваемые граничные условия, закрепления и соединения существенно влияют на успешное завершение и корректность расчета. Например, если не соединить балки друг с другом или не ограничить движение модели в достаточном числе точек, расчет не будет завершен успешно. При корректной настройке получаем следующую картину колебаний с построением анимации и графика от времени.

Расчет малых колебаний в Ansys Workbench (модальный и гармонический анализ)

Не всегда есть необходимость полного расчета нестационарного процесса. Достаточно часто требуется определить поведение системы при малых колебаниях ее узлов (при расчете напряженно-деформированного состояния с моделью линейных деформаций). В окрестности любого устойчивого положения равновесия существуют такие колебания [6], [9].

Основное уравнение движения после перехода к линейной системе имеет вид

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = 0.$$

($[M]$ – матрица масс, $[D]$ – матрица демпфирования, $[K]$ – матрица жесткости, $\{u(t)\}$ – вектор перемещений)

При отсутствии внешнего возмущающего воздействия колебания могут существовать только на определенных частотах, называемых собственными (например, колебания натянутой струны). Подставив решение в виде

$$\{u\} = \{u_\nu\}e^{i\omega t} = a \sin \omega t + b i \cos \omega t,$$

получаем линейную однородную систему с параметром ω :

$$([K] + [D]i\omega - \omega^2[M])\{u_\nu\} = 0.$$

Данная система имеет решение только при нулевом определителе матрицы. В решателе Ansys реализован численный алгоритм поиска таких собственных частот ν ($\omega = 2\pi\nu$) в заданном диапазоне (блочный метод Ланцоша).

Соответствующие решения системы u_ν называются собственными векторами. Они определены с точностью до постоянного множителя и определяют форму колебания, возможного на заданной частоте.

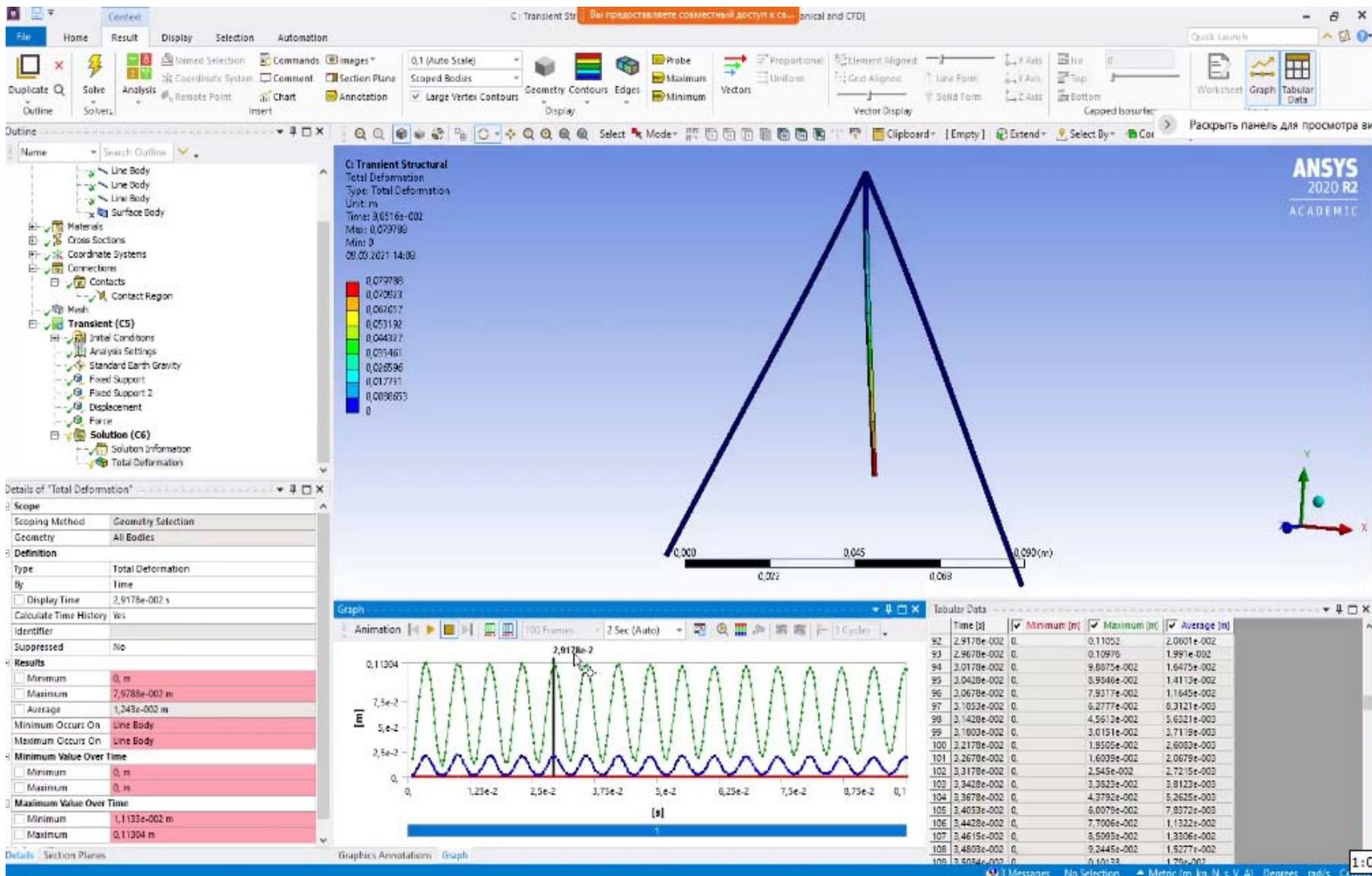


Рис. 4.11. Пример нестационарного расчета колебаний сварной балочной конструкции

Другим типом расчета малых колебаний является *гармонический анализ*. При воздействии внешних нагрузок, меняющихся по гармоническому закону с одинаковой частотой $\omega = 2\pi\nu$ уравнение движения примет вид

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\}e^{i\omega t}.$$

Для устойчивых систем при любых начальных условиях решение такого уравнения со временем станет гармоническим с той же частотой $\{u\} = \{u_v\}e^{i\omega t}$. Комплексная амплитуда решения может определена как решение линейной системы (с комплексными коэффициентами при учете затухания D):

$$([K] + [D]i\omega - \omega^2[M])\{u_v\} = \{f\}.$$

Гармонический анализ позволяет определять зависимость амплитуды и фазы колебаний любой точки тела от частоты внешних нагрузок (например, определяя положение и максимальные амплитуды колебаний при резонансе). Такие расчеты проводятся при расчете вибрационных процессов и ультразвуковых колебаний в среде.

Возможен расчет колебаний с предварительным нагружением конструкции (*Pre-stressed modal analysis*) (рис. 4.12).

Дополнительные типы граничных условий. Контакты и шарнирные соединения в Ansys Workbench

По сравнению с Ansys Mechanical APDL, в Ansys Workbench реализованы дополнительные типы граничных условий. Они создаются как обычные закрепления и нагрузки, но могут реализовываться на языке APDL с помощью комбинаций ограничения перемещений, дополнительных контактных элементов, многоточечных ограничений *MPC* и т.д. К таким условиям *Frictionless Support, Cylindrical support, Compression only support*. Также для имитации нагружения или закрепления без детализации способа доступны условия *Remote Force* и *Remote Displacement*.

Контактное взаимодействие тел расчетной модели должно быть настроено, иначе они свободно перемещаются друг сквозь друга. По умолчанию контакты создаются автоматически и имеют тип *Bonded* (жесткое соединение). Для разрешения скольжения и размыкания можно задать тип контакта *Frictional* или *Frictionless* (в зависимости от учета коэффициента трения).

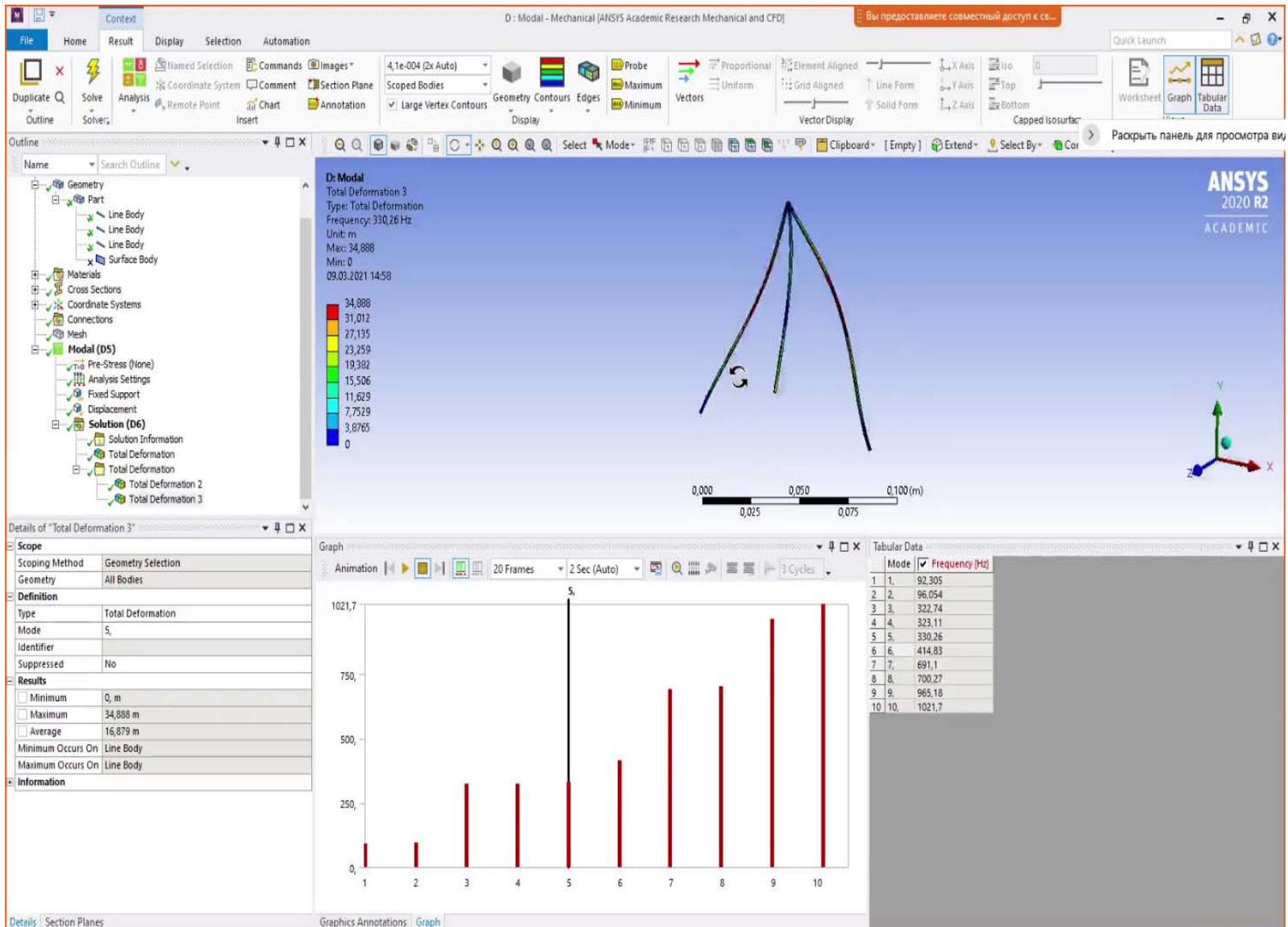


Рис. 4.12. Пример модального расчета

Если контакт не должен размыкаться, можно активировать *No separation* (при малых перемещениях он оставит задачу линейной, как и *Bonded*). Тип контакта *Rough* служит для моделирования сильно шершавых поверхностей и запрещает проскальзывание при любом усилии сжатия.

Также в Ansys Workbench реализованы *Joint* – соединения частей модели как ограничение движения одной системы координат относительно другой. Как правило, они применяются при соединении абсолютно твердых тел в сборке, но могут быть добавлены и к границам упругих тел. Тип *Body-Body* задает взаимодействие двух тел друг с другом, *Body-Ground* ограничивает перемещение участка поверхности (например, на оси не моделируемого подшипника). Доступные различные типы соединений, по-разному ограничивающие связи 6 степеней свободы (*Revolute, Spherical, Translational Joint*).

Контрольные вопросы

1. Как соотносятся модули Ansys Mechanical APDL и Ansys Mechanical - Static/Transient Structural, Static/Transient Thermal в Workbench?
2. Чем отличаются типы элементов PLANE и SHELL?
3. Как отобразить главные оси и главные напряжения в Ansys Mechanical? Что они из себя представляют?
4. Какие величины являются степенями свободы в тепловом и в прочностном расчете?
5. Чем отличаются основные типы контактов в прочностных расчетах: Bonded, No separation, Rough, Frictional?
6. Типы граничных условий: температура, задание теплового потока, конвекция, излучение.
7. Чем отличаются изотропное и кинематическое упрочнения в модели пластического поведения материала?
8. Чем отличаются модальный, гармонический и нестационарный расчеты для процесса малых колебаний?
9. Какие свойства материала и типы граничных условий можно использовать при расчете нестационарного процесса распространения тепла в зоне сварки?

Список литературы

1. Новацкий В. Теория упругости. М. : Мир, 1975. 872 с.
2. Горшков А. Г., Старовойтов Э. И., Тарлаковский Д. В. Теория упругости и пластичности. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 416 с. ISBN 5-9221-0229-X.
3. Fionn Dunne, Nik Petrinic. Introduction to Computational Plasticity. – Department of Engineering Science, Oxford University, UK – Oxford University Press, 2005
4. Бруяка В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench [Текст] : учебное пособие / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова, Н. А. Глазунова, И. Е. Адеянов. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2010. 271 с.
5. Скворцов Ю. В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твердого тела [Электронный ресурс] : интерактив. мультимед. пособие / Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков ; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). Самара, 2011.
6. Ansys Mechanical APDL Theory Reference [электронный ресурс]
7. Ansys Mechanical APDL Element Reference [электронный ресурс]
8. Ansys Meshing Users Guide [электронный ресурс]
9. Ansys Mechanical Users Guide [электронный ресурс]