

**Князьков Владимир Вячеславович,**

*кандидат технических наук, заведующий кафедрой инженерной графики ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», г. Нижний Новгород*

[graphics@nntu.nnov.ru](mailto:graphics@nntu.nnov.ru)

## Технологии CAD-систем в инженерном графическом образовании

**Аннотация.** В статье дана общая характеристика технологий автоматизированного проектирования. На примере диска колеса легкового автомобиля рассмотрены особенности твердотельного моделирования с применением системы SolidWorks.

**Ключевые слова:** автоматизированное проектирование, геометрическое моделирование, параметрические системы, дерево конструирования.

На современном этапе развития России образование, в его неразрывной, органичной связи с наукой, становится мощной движущейся силой экономического роста, повышения эффективности и конкурентоспособности народного хозяйства. Графические дисциплины («Начертательная геометрия», «Инженерная графика» и «Компьютерная графика») неслучайно считаются одними из основополагающих дисциплин в инженерном образовании. Знания, полученные студентами при их изучении, используются ими в курсовом и дипломном проектировании, а также в дальнейшей работе по специальности. Требования к содержанию и качеству графической подготовки в настоящее время вызывают необходимость совершенствования форм и методов обучения.

Современное развитие техники и технологий характеризуется широкомасштабным внедрением систем автоматизированного проектирования (САПР) изделий, автоматизацией и компьютеризацией производства. Масштабы изменений, вызванные этими тенденциями таковы, что требуют адекватного ответа со стороны технических вузов, ответственных за подготовку инженерных кадров. Выпускники ряда направлений подготовки бакалавров и специалистов в соответствии с целями основных образовательных программ и задачами профессиональной деятельности, указанными в ФГОС ВПО должны владеть навыками работы с современными системами компьютерного проектирования (CAD-системами) и инжиниринга (CAE-системами). Однако применение информационных технологий в учебном процессе предполагает соблюдение следующих принципов:

– целесообразности (применение компьютерных технологий в каждом конкретном случае должно быть оправдано соображениями методической и практической необходимости);

– динамичности (предполагается постепенное внедрение графических и других пакетов на протяжении всего срока обучения).

Автоматизированное проектирование (АП), или проектирование с помощью компьютера (англ. *Computer Aided Design, CAD*), – термин, используемый для обозначения широкого спектра компьютерных инструментов, которые помогают инженерам и другим профессионалам создавать, изменять, анализировать и оптимизировать концептуальные проекты. Являясь ключевым инструментом в рамках концепции

управления жизненным циклом изделия (PLM), системы CAD включают в себя многие программные и аппаратные средства – от систем двумерного черчения до трехмерного параметрического моделирования поверхностей и объемных тел.

Технологии АП обычно применяются совместно с автоматизированным конструированием (инженерным анализом, англ. *Computer Aided Engineering, CAE*) и автоматизированным производством (англ. *Computer Aided Manufacturing, CAM*). Это позволяет решать задачи и выполнять операции, возникающие как в процессе разработки и производства продукта, так и на других этапах его жизненного цикла. В основе современных CAD-систем лежат технологии *геометрического моделирования* и *параметрического проектирования*.

**Системы геометрического моделирования** создают среду, подобную той, в которой создаются и изменяются физические модели. В системе геометрического моделирования проектант изменяет форму модели. Визуальная модель может выглядеть точно так же, как физическая, но она нематериальна. Однако трехмерная визуальная модель хранится в компьютере вместе со своим математическим описанием.

Различают следующие системы геометрического моделирования:

- каркасные;
- поверхностные;
- твердотельные.

В *системах каркасного моделирования (wire frame modeling systems)* форма представляется в виде набора характеризующих ее линий и конечных точек (рис. 1). Линии и точки используются для представления трехмерных объектов на экране, а изменение формы осуществляется путем изменения положения и размеров отрезков и точек.

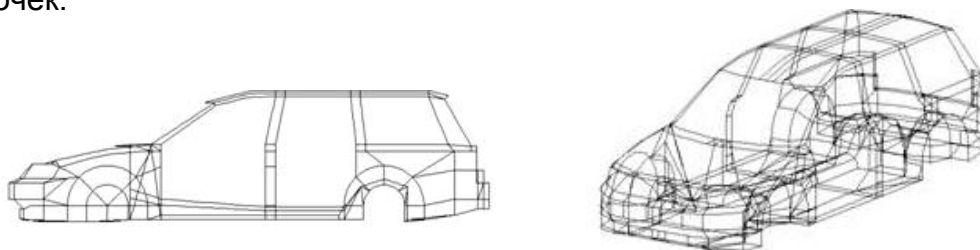


Рис. 1. Каркасная модель кузова автомобиля: точек – 428; кривых – 842

В *системах поверхностного моделирования (surface modeling systems)* математическое описание визуальной модели включает в себя не только сведения о характеристических линиях и их конечных точках, как в каркасном моделировании, но и данные о поверхностях (рис. 2). При работе с поверхностной моделью изменяются уравнения поверхностей, уравнения кривых и координаты конечных точек.

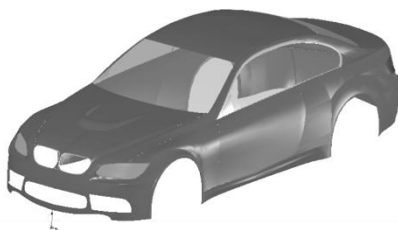


Рис. 2. Поверхностная модель кузова автомобиля

Существует три стандартных метода создания поверхностей в системах поверхностного моделирования.

1. Интерполяция входных точек.
2. Интерполяция криволинейных сеток.
3. Трансляция или вращение заданной кривой.

Способы ввода для каждого метода могут зависеть от конкретной системы поверхностного моделирования. Однако базовый метод ввода для каждой системы легко определить по представлению кривых и плоскостей.

Системы поверхностного моделирования используются для создания моделей со сложными поверхностями (например, корабль, самолет, автомобиль и т. п.), так как визуальная модель позволяет, прежде всего, оценить эстетичность проекта.

*Системы твердотельного моделирования (solid modeling systems)* предназначены для работы с объектами, состоящими из замкнутого объема, или *монолита (solid)*. В системах твердотельного моделирования, в отличие от систем каркасного и поверхностного моделирования, не допускается создание наборов поверхностей или характеристических линий, если они не образуют замкнутого объема.

В системах твердотельного моделирования применяются следующие группы функций моделирования.

1. *Функции создания примитивов (primitive creation functions)* – создание простых форм на основе объемных заготовок, имеющих в программе. Примеры примитивов приведены на рис. 3.

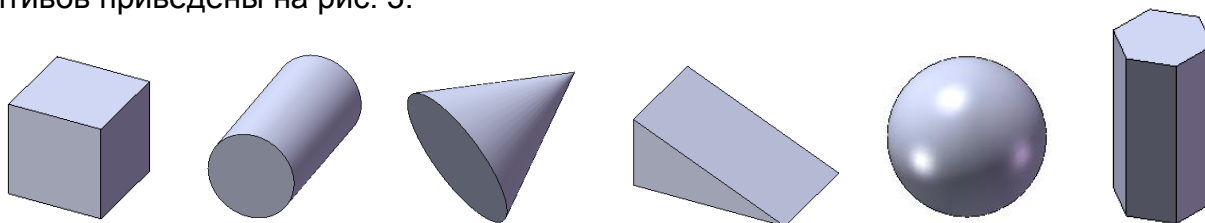


Рис. 3. Примеры примитивов

Размеры этих базовых элементов могут варьироваться, элементы можно сочетать по правилам *булевых операций (Boolean operations)*. Булева операция предназначена для создания нового тела на основе уже существующих тел. В результате выполнения операции создается тело, являющееся комбинацией исходных тел. Существуют три способа комбинирования исходных тел: сложение, вычитание и пересечение (рис. 4).

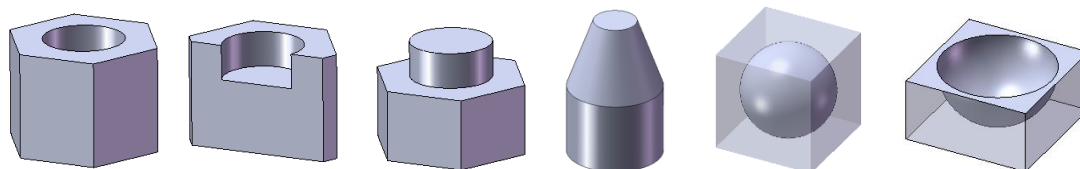


Рис. 4. Примеры булевых операций

2. Функции создания объемных тел путем перемещения поверхности. Объемное тело может быть создано *трансляцией (extrusion – выталкивание, выдавливание)* или *вращением (sweeping – заметание)* замкнутой плоской фигуры (рис. 5).

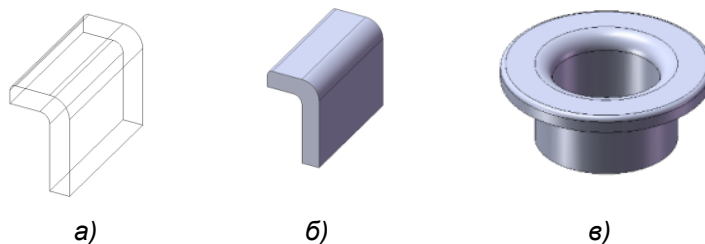


Рис. 5. Перемещение поверхности: а – исходное сечение и каркасная модель; б – твердотельная модель в результате выдавливания; в – результат вращения

Траектория вытягивания может быть криволинейной (рис. 6, а). При этом возможны следующие варианты ориентации плоскости профиля относительно траектории или направляющих кривых:

- по направлению. Сохраняется угол между плоскостью эскиза профиля и траекторией в процессе формообразования (рис. 6, б);
- скручивание вдоль маршрута. В этом случае можно управлять скручиванием в направлении, перпендикулярном направлению (рис. 6, в);
- по направлению и направляющей кривой (рис. 7).

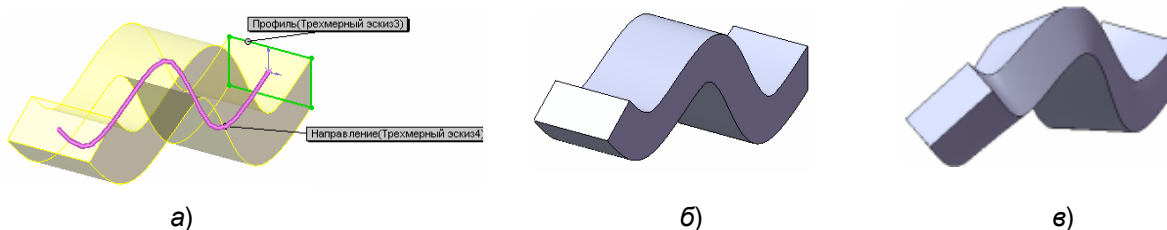


Рис. 6. Вытягивание по направлению: а – динамическое изображение; б – результат вытягивания; в – скручивание вдоль маршрута



Рис. 7. Формообразование вытягиванием: а – вытягивание по направлению и направляющей кривой; б, в – скручивание вдоль маршрута

3. Функция *скиннинга* (*skinning*) формирует замкнутый объем в результате натягивания поверхности на заданные плоские поперечные сечения (рис. 8).

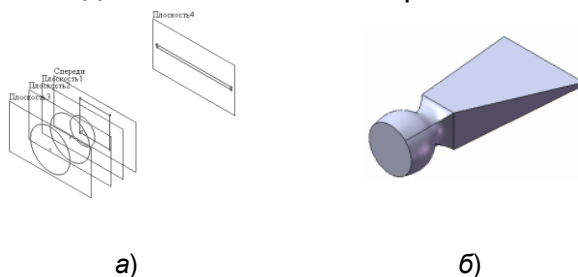


Рис. 8. Создание объемного тела методом скиннинга: а – эскизы профилей; б – итоговая деталь

4. Функции моделирования, предназначенные главным образом для изменения существующей формы. Это функции *скругления* или *плавного сопряжения* (*rounding, blending*) (рис. 9) и *поднятия* (*lifting*) (рис. 10).

5. Функции *объектно-ориентированного моделирования* (*feature-based modeling*) позволяют моделировать твердое тело, используя привычные *элементы форм* (*features*). Большинство систем объектно-ориентированного моделирования поддерживают такие элементы, которые используются при изготовлении деталей: фаски, отверстия, скругления, пазы, выемки и т. д. (рис. 11).

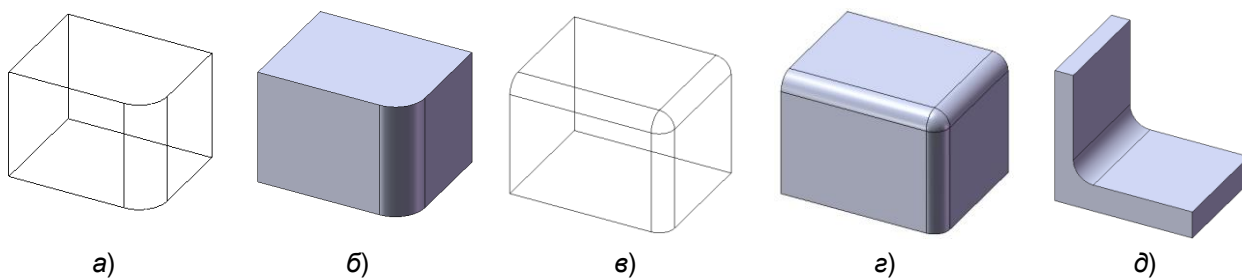


Рис. 9. Функции скругления: а, б – скругление ребер; в, г – скругление вершин; д – скругление с добавлением материала (выкружка – *filleting*)

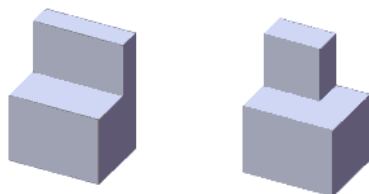


Рис. 10. Поднятие части грани

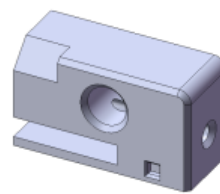


Рис. 11. Примеры функций объектно-ориентированного моделирования

**Процесс параметрического моделирования (проектирования)** (часто используют термин *параметризация*) – моделирование (проектирование) с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметрическое моделирование существенно отличается от обычного двухмерного черчения или трехмерного моделирования. Конструктор, в случае параметрического моделирования, создает математическую модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т. п. Параметризация позволяет за короткое время «проиграть» (с помощью изменения параметров или геометрических отношений) различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок.

Исторически первыми были *параметрические системы с деревом построения или конструирования* (семантика детали и сборки), например, Pro/ENGINEER, SolidWorks, Inventor, Solid Edge и многие другие.

Второй вариант – системы без дерева построения, или *системы прямого моделирования*, такие как CoCreate, IronCad или Space Claim. Основные операции прямого моделирования – создание замкнутого плоского профиля, его вытягивание для добавления или вычитания объема, а также непосредственное перемещение граней, ребер и вершин с сохранением топологии (связности смежных элементов).

Дальнейшим развитием технологии прямого моделирования является *синхронная технология* (Solid Edge, NX). В синхронной технологии сохраняются заданные размеры модели (3D-управляющие размеры, которые проставляются прямо на мо-



дель в любой момент времени для соблюдения габаритов и особенностей конструкции), геометрические взаимосвязи и конструктивные (процедурные) элементы. История создания модели ведется, но созданные элементы не зависят друг от друга. Управляющие 3D размеры могут быть фиксированными, динамическими, вычисляться по формулам, браться из таблиц, что позволяет редактировать деталь самыми различными способами. При необходимости изменения исходного замысла требуется перетащить размер из одной части модели в другую.

НГТУ им. Р. Е. Алексеева владеет лицензиями учебного программного комплекса SolidWorks Education Edition и является участником программы SWR-Академия, направленной на поддержку процесса обучения с использованием систем автоматизированного трехмерного проектирования и систем управления инженерными данными в государственных технических ВУЗах. На кафедре «Инженерная графика» данный программный комплекс используется в рамках дисциплины «Основы автоматизированного проектирования» [1].

Процесс моделирования в SolidWorks начинается с построения эскиза, а построение эскиза – с выбора конструктивной плоскости, в которой затем строится этот эскиз. Большинство элементов SolidWorks основываются на двухмерных эскизах. Для создания конструктивных элементов нужно, чтобы элементы эскиза образовывали замкнутые области. Впоследствии этот эскиз можно тем или иным способом легко преобразовать в твердое тело. С помощью SolidWorks можно также создавать трехмерные эскизы. В трехмерном эскизе объекты существуют в трехмерном пространстве; они не должны быть связаны с определенными плоскостями эскизов. При создании эскиза доступен полный набор геометрических построений и операций редактирования. Нет никакой необходимости сразу точно выдерживать требуемые размеры, достаточно примерно соблюдать конфигурацию эскиза. Позже, если потребуется, можно изменить любой размер и наложить связи, ограничивающие взаимное расположение отрезков, дуг, окружностей и т. п. Эскиз конструктивного элемента может быть легко отредактирован в любой момент работы над моделью.

**Создание объемной модели** – следующий этап твердотельного моделирования. Имеется несколько различных средств создания объемных моделей. Основными формообразующими операциями в SolidWorks являются команды добавления и снятия материала. Система позволяет выдавливать контур с различными конечными условиями, в том числе на заданное расстояние или до указанной поверхности, а также вращать контур вокруг заданной оси. Возможно создание тела по заданным контурам и использованием нескольких образующих кривых и выдавливанием контура вдоль заданной траектории. Система позволяет в любой момент времени редактировать построенный элемент твердотельной модели (редактировать эскиз, редактировать определение). Достаточно легко строятся литейные уклоны на выбранных гранях модели, полости в твердых телах с заданием различных толщин, фаски, скругления переменного и постоянного радиуса, отверстия сложной формы. Значительно упрощается работа с использованием линейных или круговых массивов, позволяющих копирование выбранных конструктивных элементов, зеркального отображения указанных примитивов или модели. Важной характеристикой системы является возможность построения деталей из листового материала и проектирование деталей изготавливаемых литьем.

**Дерево конструирования** SolidWorks представляет собой своеобразную графическую карту модели, последовательно отражающую все геометрические примитивы, использованные при создании детали, конструктивные оси и вспомогательные плос-

кости, на которых создавались двухмерные эскизы. *Дерево конструирования* по умолчанию располагается в левой части окна SolidWorks, хотя его положение в любой момент времени можно изменить. Оно позволяет переопределять порядок следования отдельных конструктивных элементов либо целых деталей. Нажатием правой кнопки мыши на команды *Дерева конструирования* можно вызвать контекстные меню, обеспечивающие удобный доступ к инструментам и командам. Работа с контекстными меню предоставляет наиболее удобный способ работы, особенно при движении по *Дереву конструирования*: редактирование эскиза, редактирование определения и т. д. По умолчанию контекстное меню отображается в коротком варианте.

Под **сборкой** в SolidWorks принято понимать трехмерную модель изделия или сборочной единицы. Структурными единицами сборки являются *компоненты*. Компоненты сборки могут включать в себя как отдельные детали, так и другие сборки, называемые *узлами сборки*. В SolidWorks можно создавать сборки двух типов: сборки «снизу вверх» и сборки «сверху вниз».

Сборка «снизу вверх» является традиционным методом проектирования и представляет собой сборку из готовых (заранее спроектированных) деталей. Конструкция или узел собираются из этих деталей аналогично реальной сборке с указанием условий сопряжения их друг с другом. Сопряжения создают геометрические взаимосвязи между компонентами сборки. При добавлении сопряжений следует определить допустимые направления линейного или вращательного движения компонентов. Можно перемещать компонент в пределах его степеней свободы, наблюдая за поведением сборки.

При проектировании сборки «сверху вниз» все компоненты создаются в одном документе – компоновочном эскизе сборки, на основе которого строятся отдельные детали. Можно построить один или несколько эскизов, показывающих, где находится каждый компонент сборки. Затем можно создать и изменить проект перед созданием деталей. Кроме этого, можно в любое время использовать компоновочный эскиз для внесения изменений в сборку. Основным преимуществом проектирования сборки с помощью компоновочного эскиза является то, что при изменении компоновочного эскиза сборка и детали, находящиеся в ней, обновляются автоматически. Изменения можно осуществить быстро и в одном месте.

Система SolidWorks достаточно просто позволяет **генерировать чертежи** созданных в ней деталей, узлов и изделий, включающие все основные виды, разрезы, сечения с проставленными размерами, параметрами шероховатости и т. д. Чертежи поддерживают двустороннюю ассоциативную связь с 3D-моделями. При внесении изменений в модель ее чертеж автоматически модифицируется в соответствии с ними. И наоборот, если изменяется какой-либо управляющий размер на чертеже, это сразу же отражается в 3D-модели.

Модуль конечно-элементного расчета COSMOSWorks, интегрированный в SolidWorks, является инструментом инженерного анализа. COSMOSWorks – приложение, которое полностью функционирует с SolidWorks. Как следствие, совокупность этих двух продуктов является, по сути, единым пакетом. Это значит, что не происходит никакой конвертации при переходе информации. Данная особенность повышает работоспособность совместного функционирования программ и, главное, качество выполняемых расчетов. При выполнении лабораторных работ в рамках дисциплины «Основы автоматизированного проектирования» студенты, работая в среде SolidWorks/COSMOSWorks, получают сведения, например, о возможностях моделирования и статического прочностного анализа данной программы, используемого для оп-

ределения перемещений, напряжений и усилий, возникающих в конструкциях или ее составных частях в результате приложения механических сил [2].

Для демонстрации возможностей SolidWorks при моделировании тел сложной конфигурации в качестве примера рассмотрим содержание и порядок выполнения лабораторной работы «Моделирование диска колеса легкового автомобиля». Заданными размерами являются диаметр и ширина диска колеса. Остальные размеры студенты назначают самостоятельно при условии соблюдения пропорций геометрии диска.

1) Выбор плоскости (рис. 12, а) и рисование контура сечения диска (рис. 12, б).

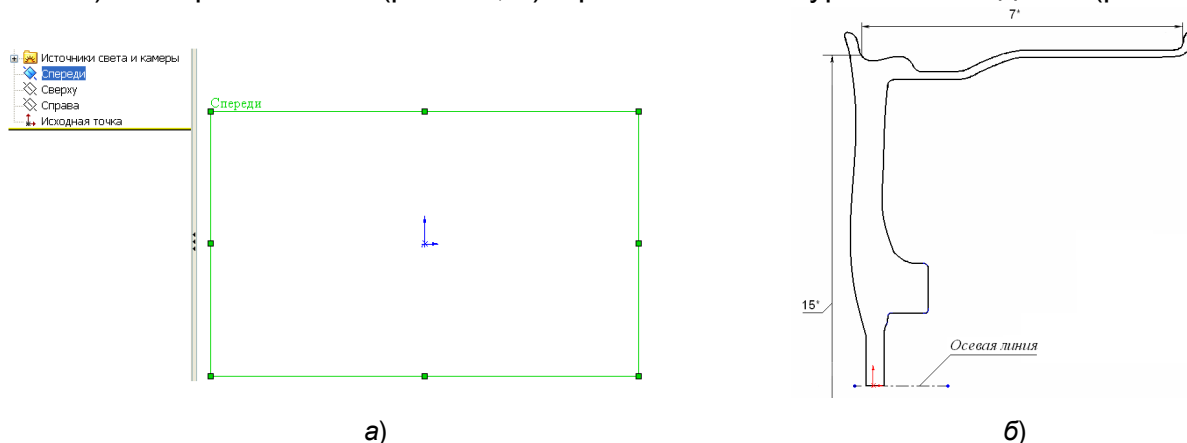


Рис. 12. Построение контура сечения

2) Вращение вокруг оси (рис. 13).

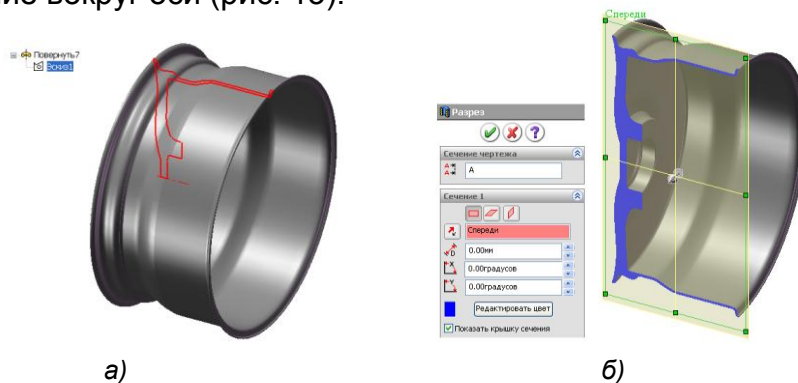


Рис. 13. Результат а – вращения и б – разрез диска

3) Построение выреза (рис. 14).

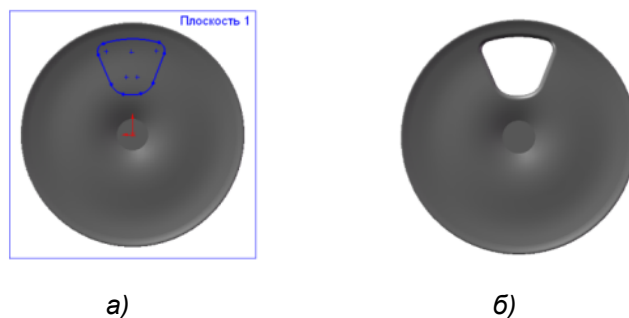


Рис. 14. Построение выреза



4) Построение группы вырезов и отверстий под болты с помощью кругового массива (рис. 15).



Рис. 15. Этапы моделирования диска колеса

5) «Косметические» построения. *Дерево конструирования*, отражающее все этапы моделирования, и полученный диск приведены на рис. 16.

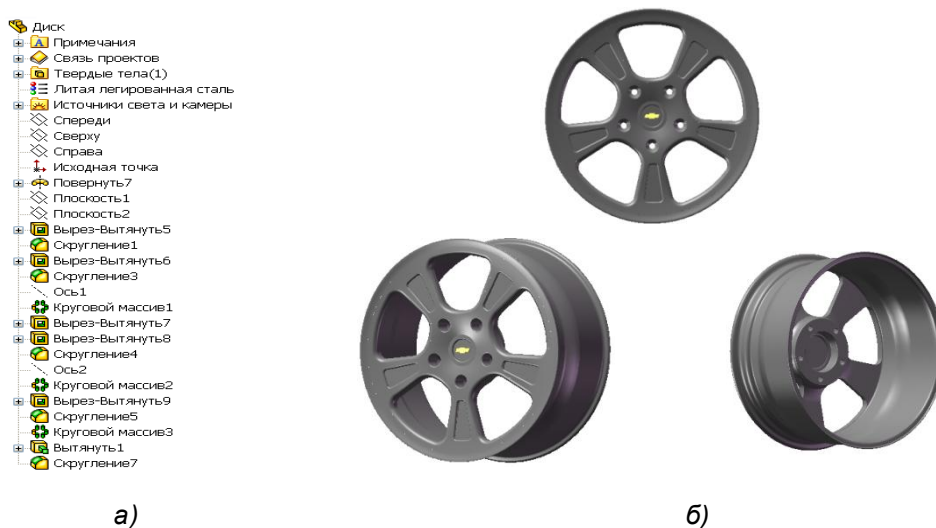


Рис. 16. Дерево конструирования (а) и диск колеса (б)













В качестве объекта моделирования диск колеса легкового автомобиля выбран в силу ряда причин:

- актуальность проблемы;
- сложная геометрия;
- широкое разнообразие конструктивного исполнения;
- многовариантные режимы нагружения.

Отчет по лабораторной работе содержит задание, основные этапы моделирования диска с фрагментами дерева конструирования. Примеры заданий приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Примеры заданий для выполнения лабораторной работы  
«Моделирование диска колеса легкового автомобиля»**

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
			
Вариант 5	Вариант 6	Вариант 7	Вариант 8
			
Вариант 9	Вариант 10	Вариант 11	Вариант 12
			

## Ссылки на источники

1. Князьков В. В. SolidWorks/COSMOSWorks Компьютерное моделирование и инженерный анализ методом конечных элементов: учеб. пособие. – Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2010. – 216 с.
2. Князьков В. В., Тумасов А. В. Применение систем конечно-элементного анализа в учебном процессе // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 9. – С. 38–41.

**Knyazkov Vladimir,**

Ph.D., Head Department of Engineering Graphics Nizhny Novgorod State Technical University in the name of R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod  
[graphics@nntu.nnov.ru](mailto:graphics@nntu.nnov.ru)

## Technology CAD-systems in engineering graphics education

**Abstract.** The article provides a general description of computer aided design technology. On the example of the disk the car discusses the features of solid-state simulation with the use of SolidWorks.

**Key words:** computer aided design, geometrical simulation, parametrical systems, feature manager.