

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Технология машиностроения»**

# **ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В САПР**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности  
1-53 01 01 «Автоматизация производственных  
процессов и производств (по направлениям)»  
дневной формы обучения**

**Гомель 2020**

УДК 004.925.84(075.8)  
ББК 30.2-5-05я73  
Г35

*Рекомендовано научно-методическим советом  
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 3 от 02.12.2019 г.)*

Составитель *Е. М. Акулова*

Рецензент: доц. каф. «Информационные технологии» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук *В. В. Комраков*

**Геометрическое** моделирование в САПР : учеб.-метод. пособие по одной дисциплине для студентов специальности 1-53 01 01 «Автоматизация производственных процессов и производств (по направлениям)» днев. формы обучения / сост. Е. М. Акулова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 51 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит краткую характеристику систем автоматизированного проектирования (CAD/CAE/CAPP/CAM/PDM); вопросы геометрического моделирования и его составляющих; функции твердотельного моделирования, методы параметризации и ряд других сведений, необходимых для первоначального ознакомления с курсом «Геометрическое моделирование в САПР».

Для студентов специальности 1-53 01 01 «Автоматизация производственных процессов и производств (по направлениям)» дневной формы обучения.

УДК 004.925.84(075.8)  
ББК 30.2-5-05я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2020

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Геометрическое моделирование изучает методы построения численных моделей геометрии реальных и воображаемых объектов, а также методы управления этими моделями. Геометрическая модель содержит описание формы моделируемого объекта и описание связей элементов модели. Элементы геометрической модели наделяют атрибутами, которые несут информацию о физических и других свойствах этих элементов.

Геометрические модели используются для решения задач визуализации, построения расчетных сеток, генерации управляющих программ ЧПУ и т.д., а также предназначены для хранения информации о форме объектов и их взаимном расположении и предоставления ее для обработки в удобном для компьютерной программы виде.

Геометрическое моделирование позволяет сократить время и материальные затраты на производство проектируемых объектов и повысить их качество. Геометрическое моделирование автоматизирует труд конструкторов и технологов, позволяет им уйти от рутинных работ.

Использование компьютерных технологий, когда информация создается и хранится в едином информационном пространстве в электронном виде, требует выполнения новых условий при подготовке специалистов для инновационного машиностроения, понимания ими принципов функционирования прикладных программ, их классификации и возможностей реализации в конкретных целях.

Владение методами геометрического моделирования не менее важно для инженера, чем знание теории прочности или механики, и применяется на всех стадиях проектирования.

# 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (САПР)

## 1.1. Классы САПР

За русским термином САПР (Система Автоматизации Проектных Работ) скрывается несколько классов программных систем, имеющих отношение к автоматизации труда инженеров, конструкторов и технологов. Каждый из классов имеет устоявшуюся трехбуквенную английскую аббревиатуру:

- двумерное черчение и трехмерное геометрическое проектирование (CAD);
- инженерный анализ (CAE);
- технологическая подготовка производства (CAPP);
- автоматизация производства (CAM);
- управление данными об изделии (PDM);
- управление жизненным циклом изделия (PLM).

Кроме того, к САПР относятся программы для автоматизации труда архитекторов и строителей, топографов и геологов, которые, однако, остаются за рамками данного курса. В фокусе нашего внимания будут «механические» САПР (MCAD), используемые машиностроительными предприятиями и конструкторскими бюро. Механические САПР являются одними из исторически первых программ для ЭВМ, занимая в настоящее время около 3% мирового рынка программного обеспечения. Без систем САПР невозможно представить себе ни одно современное производственное предприятие аэрокосмической, автомобильной, судостроительной, электронной и других отраслей промышленности, включая производство потребительских товаров.

## 1.2. Функциональность САД систем

Современные системы проектирования предлагают следующую базовую функциональность:

- проектирование деталей (part design);
- проектирование сборок деталей и механизмов (assembly design);
- специальное проектирование (пресс-формы для изделий из листового металла, формы для литья для изделий из пластмасс, прокладка трубопроводов, расчет электрических схем и пр.);

- генерация чертежей (drafting);
- создание трехмерной модели по чертежу;
- расчеты инженерных параметров и их оптимизация.

Разберем каждый из этих наборов функций подробнее. Детальное проектирование используется при разработке геометрических моделей трехмерных деталей. Основным концептуальным подходом к детальному проектированию в современных САД-системах является параметрическое моделирование на основе конструктивных элементов (parametric feature-based design). Этот метод позволяет максимально упростить как собственно процесс проектирования новой детали, так и внесение изменений в существующую.

Как правило, создание любого трехмерного конструктивного элемента (feature), такого как отверстие, полость, скругление, включает в себя рисование эскиза плоского профиля, поэтому подпрограмма двумерного эскизного черчения (называемая sketcher) является составной частью модуля детального проектирования. При создании эскиза конструктивного элемента важно правильно задать геометрические ограничения (constraints), чтобы изменение размеров приводило к предсказуемым изменениям геометрии (например, прямоугольник при изменении длины одной из сторон должен остаться прямоугольником, то есть длина противоположной стороны тоже должна автоматически измениться). Важной функцией систем эскизного черчения является помощь пользователю в наложении необходимых ограничений на геометрию, а также выделение разными цветами недо- и переопределенных частей эскиза. При создании конструктивного элемента по эскизу указываются размеры элемента: расстояние от плоскости эскиза, углы и т.п. Конфигурации (библиотеки) типовых деталей, возможность работы с которыми предоставляют современные САД-системы, значительно сокращают время проектирования.

Альтернативой параметрическому моделированию на основе конструктивных элементов является метод прямого, или динамического, моделирования. В рамках этого подхода объем создается и вычитается с помощью операции вытягивания (push-and-pull) замкнутого плоского профиля, а также ряда похожих операций. Ключевым моментом является отсутствие информации об истории построения формы, что подразумевает прямое управление ее граничными элементами (гранями, ребрами, вершинами) с помощью перемещения их в пространстве или задания геометрических ограничений между ними.

При таком походе становится возможной параметрическая модификация деталей без истории построения (обычно история построения – дерево конструктивных элементов – теряется при импорте модели из одного САПР-пакета в другой), но снижается уровень заложенных в модели знаний (намерений проектировщика). В последнее время на рынке стали появляться системы, в которых параметрическое моделирование на основе конструктивных элементов можно сочетать с прямым моделированием - даже в рамках работы с одной деталью. Соответствующая концепция называется синхронной технологией.

Говоря о проектировании сборок деталей и механизмов, различают два подхода – нисходящий и восходящий. Нисходящий подход подразумевает проектирование механизма с нуля. Когда в механизм необходимо добавить очередную деталь, вызывается модуль детального проектирования, причем размеры создаваемой детали согласуются с размерами уже созданных частей механизма. При восходящем проектировании механизм собирается из ранее спроектированных деталей, которые позиционируются по отношению друг к другу с помощью ограничений сборки (соосность, инцидентность и пр.). Важной функцией модуля проектирования сборок является возможность расчета степеней свободы деталей в механизме и их динамического перемещения в соответствии с наложенными ограничениями. Это позволяет оценить кинематику будущего изделия еще на этапе проектирования. Библиотеки стандартных деталей (крепёжи, трубы, шестерни, подшипники) позволяют пользоваться готовыми элементами при проектировании механизма. Важной характеристикой модуля проектирования сборок является его производительность при больших сборках (состоящих из десятков тысяч деталей).

Модули для специального проектирования предоставляют инструменты, характерные для конкретной предметной области. Например, при проектировании электрических схем инженер имеет дело с набором примитивов, моделирующих печатные платы, микросхемы и пр. Алгоритмы, которые используются для автоматизации подобного проектирования, тоже являются предметно-ориентированными. Типичными модулями специального проектирования являются средства для проектирования сварочных конструкций и моделирования разводки.

Генерация чертежей трехмерной детали по сей день остается востребованной функциональностью в САД-системах. Отметим, что данная функция выполняется в автоматическом режиме – система са-

ма определяет ключевые размеры детали, исходя из ее геометрической модели, и помещает их на чертеж. Файлы с чертежными данными являются ассоциативными по отношению к файлу трехмерной модели. Это значит, что при изменении модели (например, в модуле детального проектирования) и при последующей загрузке созданного ранее файла чертежа, последний автоматически обновится в соответствии с трехмерной моделью.

На машиностроительных предприятиях обычно имеется обширная база спроектированных ранее изделий. Если они проектировались на кульмане или с помощью систем автоматизации черчения, встает задача получения трехмерной геометрической модели изделия (например, для внесения в нее продиктованных временем изменений или интеграции с другими деталями в общий механизм). Соответствующий модуль современных САД-систем позволяет удобно ввести эти чертежи в систему (импортируя файлы чертежей или их отсканированные изображения), внести в них необходимые изменения и автоматически построить трехмерную геометрическую модель.

При проектировании изделия необходимо учитывать не только его геометрические параметры (форму и характерные размеры), но и физические характеристики (такие как площадь поверхности, объем, масса, центр тяжести). Кроме того, конструктивно похожие части одного или разных изделий удобно не проектировать каждый раз заново, а вставлять в модель, используя параметры. Все эти функции (создание параметров и связывание их друг с другом посредством различных отношений) выполняет инженерный модуль САД (knowledgeware). К нему же примыкает модуль оптимизации, позволяющий, например, минимизировать массу изделия, расход материалов, улучшить его динамические характеристики и т.п.

### **1.3. Современные САД системы и их классификация**

Современные МСАД-системы по набору предлагаемой функциональности и стоимости лицензий традиционно разделяются на три уровня. Верхний уровень образуют пакеты CATIA (производства Dassault Systemes), NX (Siemens PLM Software), Pro/ENGINEER (PTC). Все эти системы (или их идейные предшественники) появились еще в 1980-х годах и были ориентированы, прежде всего, на рабочие станции в среде UNIX (Sun Solaris, HP-UX, IBM AIX, Silicon Graphics IRIX). С появлением в конце 1990-х годов мощных персо-

нальных компьютеров были созданы Windows-версии САПР верхнего уровня. Каждый из больших САПРов представляет собой конфигурируемый программный пакет, в который входят сотни различных наборов инструментальных средств (не только САД, но и САЕ, САМ, PDM). Эти пакеты, как правило, ориентированы на совместную работу нескольких пользователей и требуют предварительного обучения персонала предприятия. Типичная цена лицензии на одно рабочее место составляет десять-двадцать тысяч долларов США, не считая стоимости оборудования. Внедрять большие САПР лучше всего в комплексе с другими программами управления жизненным циклом изделия от того же производителя.

Средний уровень САПР для машиностроения – это такие популярные системы, как SolidWorks (Dassault Systemes), Solid Edge (Siemens PLM Software), Autodesk Inventor. Менее известны такие системы как CoCreate (PTC), Keycreator (Kubotek), SpaceClaim. Российские разработки, такие как T-FLEX (Топ-системы), ADEM (ADEM Technologies), КОМПАС (АСКОН) вполне в состоянии конкурировать по своей функциональности с популярными системами среднего уровня. Все эти системы работают только под управлением Microsoft Windows, отличаются более скромной функциональностью (по сравнению с системами верхнего уровня), но являются значительно более доступными по цене (для типичной конфигурации три-пять тысяч долларов США за рабочее место). Тем не менее, САПР среднего уровня – вполне достойные программы, которые в некоторых аспектах реализации базовой функциональности порой даже превосходят САПР верхнего уровня. Объясняется это тем фактом, что САПР среднего уровня, как правило, строятся из готовых блоков – геометрических ядер, расчетных пакетов, средств визуализации – от третьих производителей. Производители таких блоков-полуфабрикатов накопили значительный опыт и обширную клиентскую базу, что объясняет достаточно высокое качество соответствующего программного обеспечения. Все это обуславливает высокую популярность САПР среднего уровня (по количеству проданных лицензий лидируют именно они). Основные потребители данных программ – небольшие производственные предприятия и опытно-конструкторские бюро. Нижний уровень САПР представляют системы AutoCAD (Autodesk), bCAD (разработка новосибирской компании Про-Про) и др. Как правило, это системы двумерного черчения (как AutoCAD) либо трехмерного моделирования с очень ограниченной функциональностью,

ориентированной скорее на графическую визуализацию, чем на реальное проектирование (как bCAD). Тем не менее, у этих классов систем есть свой немаленький рынок, который, впрочем, уступает рынку систем верхнего и среднего уровня.

К пакетам САПР примыкают также коммерческие программы для геометрического моделирования и обмена геометрическими данными.

#### **1.4. Системы инженерного анализа (CAE)**

Системы инженерного анализа (другое название – системы автоматического конструирования) предназначены для изучения поведения продукта с использованием его виртуального (хранящегося только в памяти компьютера, но не воплощенного ни в каком материале) макета. Именно благодаря развитым CAE-системам, первый же собранный в реальном цехе самолет не только взлетает и демонстрирует все заложенные его проектировщиками характеристики, но является настолько безупречным, что тут же поставляется заказчику. Типичными видами инженерного анализа являются:

- анализ кинематики изделия – расчет траекторий движущихся частей и их визуализация на компьютере;
- анализ динамики изделия – расчет поведения изделия в реальном времени с учетом действующих на него физических сил, взаимодействия механизмов и пр.;
- расчет статических напряжений, магнитного поля, температур;
- определение критических нагрузок;
- имитация работы электронных цепей.

Для статического анализа, а также для анализа динамики, связанного с деформацией изделия, широко используется метод конечных элементов. Системы CAE не могут работать без геометрической модели изделия – как правило, такая модель создается в системе CAD, а затем импортируется в CAE. Следует также отметить, что многие CAD-системы верхнего уровня (такие как CATIA) уже содержат в себе базовые средства инженерного анализа, поэтому использование специализированной CAE-системы для пользователей таких CAD-систем необязательно.

Для моделирования кинематических и динамических аспектов изделия, не требующих расчетов деформаций и напряжений, могут использоваться такие коммерческие пакеты, как ADAMS

(MSC.Software) и DADS (LMS). Для расчетов методом конечных элементов широко применяются системы ANSYS (ANSYS, Inc.), NASTRAN (MSC.Software) и ABAQUS (приобретя эту компанию, Dassault Systemes объявила о создании нового CAE-бренда SIMULIA). Примером автономной CAE-системы отечественного производства служит АРМ WinMachine (НТЦ АПМ).

### **1.5. Системы технологической подготовки производства (CAPP)**

Системы технологической подготовки производства в традиционном понимании – это, прежде всего программы для работы с базой данных технологических планов предприятия. Каждый такой план связывает с определенным изделием цепочку технологических процессов, применяемых при производстве на данном предприятии (например, последовательность обработки детали на разных станках, сборка механизма на конвейере и т.п.). При необходимости организации на предприятии производства нового изделия, прежде всего с помощью CAPP-системы осуществляется поиск технологического плана подобного изделия, выпускавшегося на предприятии раньше. Затем этот план корректируется для нужд конкретного нового изделия и сохраняется в базе данных как новый план. Всю эту функциональность и обеспечивают CAPP-системы, основанные на модифицированном подходе. Генеративный подход к технологической подготовке производства заключается в автоматическом распознавании в геометрической модели детали типовых конструкторско-технологических элементов и ассоциированием с ними типовых техпроцессов.

В ряду современных коммерческих CAPP-систем прежде всего стоит отметить САМ-I CAPP, MIPLAN, MetCAPP, ICEM-PART. Из отечественных разработок заслуживают внимания системы ТехноПро и TechnologiCS.

### **1.6. Системы автоматизации производства (CAM)**

Системы САМ предназначены для создания программ обработки деталей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), а также программ управления роботизированными сборочными линиями. Конечно, создание управляющих программ происходит в таких системах по большей части автоматически – с использованием

информации о геометрической модели детали и о положении деталей в сборке. Важной особенностью САМ-систем являются встроенные средства проверки корректности сгенерированных программ, для чего используются два основных подхода. Первый подход состоит в визуализации процесса работы станка на экране компьютера (пользователь может видеть работу металлорежущего инструмента или сборочных роботов и оценить корректность траекторий их движения). Второй способ – это моделирование процесса получения детали из заготовки и сравнение геометрии полученных в результате обработки поверхностей с данными, хранящимися в геометрической модели.

Как правило, соответствующая функциональность существует во многих интегрированных САД/САМ пакетах, включая САТІА, SolidWorks, T-FLEX и др. Из независимых решений третьих производителей (не поставляющих собственно САД программы) отметим Mastercam (CNC Software), SURFCAM (Surfware), EdgeCAM (Pathtrace), CimatronE (Cimatron) и продукты компании Delcam. Среди отечественных разработок заслуживает упоминания ГеММа-3D (НТЦ ГеММа).

### **1.7. Системы управления данными об изделии (PDM)**

Данный подкласс САПР образуют системы, интегрирующие в себе доступ к самым разноплановым данным, необходимым для работы с изделием на всех этапах его жизненного цикла: во время маркетинговых исследований, планирования, проектирования, производства, контроля качества, упаковки, доставки, послепродажного обслуживания и утилизации. Как правило, все эти действия выполняются на предприятии сотрудниками разных отделов с помощью различных систем автоматизации. Поэтому системы PDM в первую очередь упрощают передачу данных между отделами и доступ к информации, необходимой для работы в разных системах. Их использование на предприятии:

- улучшает взаимодействие;
- уменьшает бумажный документооборот;
- повышает эффективность управления.

Как правило, одна PDM-система поддерживает работу с моделями, созданными в разных системах проектирования. Стандартом де-факто для таких систем стало наличие у них web-интерфейса, что делает их аппаратно независимыми. Еще одним важным моментом

PDM-систем является наличие у них программных интерфейсов для подключения к системам ERP, SCM и CRM, что позволяет выполнять полный спектр операций планирования и доступа к различным данным предприятия непосредственно из системы PDM.

Из коммерческих PDM-пакетов отметим, прежде всего три системы, объединенные под брендом ENOVIA (VPLM, SmarTeam и MatrixOne).

Эти системы производятся Dassault Systemes, но позиционируются на рынке по-разному. SmarTeam – это универсальная PDM-система, которая может использоваться на предприятии совместно с CAD-системами CATIA или SolidWorks, а также любыми решениями сторонних производителей. Система имеет web-интерфейс и может быть интегрирована с произвольным пакетом ERP. ENOVIA VPLM позиционируется как глубоко интегрированная с CATIA система PDM, предназначенная для управления данными об изделиях, состоящих из большого количества деталей (таких как самолеты или автомобили). Пользовательский интерфейс ENOVIA выполнен в том же графическом стиле, что и у систем CATIA и DELMIA, что облегчает обучение работе с системой пользователям, уже знакомым с другими продуктами Dassault Systemes. Наконец, ENOVIA MatrixOne ориентирована на совместную работу огромного числа пользователей по всему миру. В настоящее время Dassault Systemes занимается интеграцией этих систем на основе одной платформы. Из PDM-решений других производителей отметим Teamcenter (Siemens PLM Software) и Winchill (PTC).

### **1.8. Интегрированные пакеты управления жизненным циклом изделия**

Автоматизация различных областей деятельности производственного предприятия, осуществленная с помощью CAD/CAE/CAPP/CAM-систем, а также необходимость организации хранения проектных данных в общей базе (осуществленная с помощью PDM-систем) привели ведущих разработчиков САПР к мысли, что все эти системы могут быть связаны в единый комплекс программных решений от одного поставщика. В принципе, работать с системами от одного производителя, которые имеют одинаковый пользовательский интерфейс, покупаются и обслуживаются в одном месте, выгодно и предприятиям-потребителям. Поэтому неудивительно, что в начале 2000-х годов

появилась PLM (Product Lifecycle Management) – концепция управления жизненным циклом изделия, которая тут же была воплощена в линейке продуктов ведущих поставщиков CAD/CAE/CAPP/CAM/PDM-решений, прежде всего – Dassault Systemes, Siemens PLM Software и PTC. Тесная интеграция программных решений в рамках PLM-линейки вынуждает компании, работающие на этом рынке, проводить агрессивную политику по покупке более мелких специализированных компаний. Например, французская компания Dassault Systemes за последние десять лет произвела ряд громких поглощений таких известных компаний, как SolidWorks, Deneb Robotics, Smart Solutions, Spatial, ABAQUS, MatrixOne и др.

Говоря о современных системах управления жизненным циклом изделия, прежде всего, стоит упомянуть интегрированные пакеты от ведущих производителей. Альянс Dassault Systemes/IBM продвигает программный комплекс V5 PLM Solutions (недавно было объявлено о выходе версии V6), состоящий из систем CATIA, DELMIA, ENOVIA, SIMULIA. Недавно было продекларировано расширение этого набора новой системой 3DVIA для массового использования трехмерных данных в среде Интернет. Компания Siemens PLM Software строит свою PLM-линейку продуктов вокруг PDM-системы Teamcenter, с которой взаимодействуют решения для разработки семейства NX. PLM-решения от Parametric Technology Corp. конфигурируются с помощью системы Product Development System (PDS) и включают в себя продукты семейств Pro/ENGINEER Wildfire и Windchill.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Опишите программное обеспечение, относящееся к классу САПР. Какова его доля на современном рынке ПО?
2. Опишите типичную схему автоматизации современного машиностроительного предприятия.
3. Укажите ключевые этапы в истории развития САПР.
4. Какова базовая функциональность систем механического проектирования?
5. Опишите концепцию параметрического проектирования на основе конструктивных элементов.
6. В чем отличия восходящего и нисходящего методов проектирования механизмов?
7. Как классифицируются современные САД-системы? Назовите примеры в каждом классе.

8. Опишите функциональность систем инженерного анализа и приведите примеры таких систем.

9. Из чего складывается функциональность систем технологической подготовки производства? Приведите примеры систем CAPP.

10. Для чего предназначены системы автоматизации производства? Приведите примеры САМ-систем.

11. Какие задачи решают системы управления данными об изделии? Приведите примеры коммерческих систем PDM.

## **2. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

### **2.1. Автоматизация черчения и геометрическое моделирование**

Инженеры и конструкторы имеют дело с математической (прежде всего – геометрической) моделью разрабатываемого изделия. Исторически первым и главным языком их общения (то есть языком описания инженерных моделей) был язык чертежей. Чертеж (и другие подобные графические схемы) широко использовался (и используется до сих пор) не только для описания механического изделия и его частей, но также и для описания электрических схем, архитектурных конструкций, карт местности и т. п. Четкие стандарты (как национальные, так и международные) гарантируют однозначное понимание языка чертежей всеми «читателями» – от инженера-конструктора до токаря, слесаря и фрезеровщика.

Однако создание чертежей вручную – чрезвычайно дорогостоящая процедура, доступная только подготовленным специалистам и требующая использования специальной чертежной доски с линейкой – кульмана, а также разных вспомогательных средств (например, лекал для рисования кривых). Неудивительно, что первые системы автоматизации в этой области были предназначены именно для упрощения и ускорения создания чертежей (подобно другой эпохальной концепции автоматизации с помощью компьютера – текстовым процессорам, предназначенным для упрощения создания текстовых документов и легкого внесения изменений в них). Системы класса computer-aided drafting существуют и поныне, самый известный их представитель – AutoCAD. Типичная функциональность таких систем включает в себя средства, необходимые для создания и редактирования чертежей, а процесс работы концептуально не отличается от работы в графическом редакторе.

С изобретением трехмерной компьютерной графики (возможности реалистического изображения трехмерной сцены на двумерном дисплее компьютера и ее вращения с помощью манипуляторов «мышь» или «спейсбол» в воображаемом трехмерном пространстве) у инженеров появилась возможность работать напрямую с трехмерной геометрической моделью проектируемого изделия, а не с его двумерными чертежами. Геометрическое моделирование оказалось настоящим прорывом в конструировании и производстве изделий. Оно не только значительно упрощает процесс проектирования (теперь инженер-конструктор не обязан обладать развитым пространственным мышлением или использовать подручные материалы типа пластилина – он видит проектируемое изделие непосредственно на экране), но и снимает многие коммуникативные проблемы – язык чертежей на наших глазах становится мертвым.

За последние сорок лет было разработано множество способов геометрического моделирования.

Хронологически различают следующие подходы к геометрическому моделированию:

- каркасное моделирование;
- поверхностное моделирование;
- твердотельное моделирование;
- немногобразное моделирование.

**Каркасное моделирование** представляет собой прямой перенос векторного подхода к двумерной геометрии на трехмерный случай. При таком моделировании геометрическая модель строится из ограниченного набора графических примитивов – отрезки, дуги, конические кривые. Однако каркасная модель содержит лишь скелет (каркас) изделия, по которому в общем случае невозможно восстановить само изделие, так как могут существовать несколько топологически неэквивалентных трехмерных тел с одинаковым каркасом.

Каркасное моделирование – это исторически первая технология представления объемной геометрии. Она естественным образом развилась из систем 2D-черчения. Это самый простой способ представления трехмерных моделей – так называемые проволочные каркасы, или просто каркасы, которые дают неоспоримые преимущества по сравнению с моделированием на плоскости. Они помогают более ясно представлять модель и надежно контролировать взаимное расположение составляющих ее элементов. Кроме того, каркасы можно использовать и для создания проекционных видов. Достаточно простые

структуры данных и алгоритмы работы с каркасами позволили реализовать их на маломощном оборудовании конца 70-х годов XX века.

В системах каркасного моделирования (wireframe modeling systems) форма представляется в виде набора характеризующих ее линий и конечных точек. Линии и точки используются для представления трехмерных объектов на экране, а изменение формы осуществляется путем изменения положения и размеров отрезков и точек. Другими словами, визуальная модель представляет собой каркасный чертеж формы, а соответствующее математическое описание представляет собой набор уравнений кривых, координат точек и сведений о связности кривых и точек. Сведения о связности описывают принадлежность точек к конкретным кривым, а также пересечение кривых друг с другом. Системы каркасного моделирования были популярны в ту пору, когда геометрическое моделирование только начало зарождаться. Их популярность объяснялась тем, что в системах каркасного моделирования создание форм выполнялось через последовательность простых действий, так что пользователям было достаточно легко создавать формы самостоятельно.

Недостаток каркасного представления моделей состоит в том, что программы не могут отобразить всех особенностей поверхностей, определяемых каркасами, и это делает невозможным построение, например, точных сечений. Визуальное представление достаточно аскетичное и в ряде случаев не дает возможности однозначно интерпретировать увиденное (рис. 2.1).

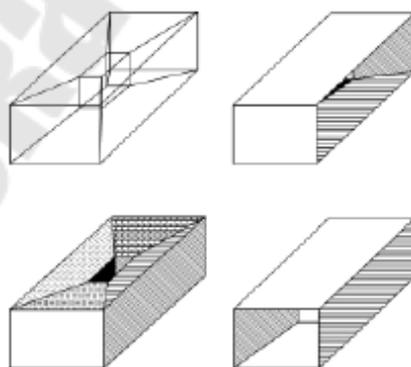


Рис. 2.1. Неоднозначные каркасные модели

Тем не менее, даже такая, имеющая множество ограничений технология позволила существенно расширить функциональные возможности САПР по сравнению с 2D-системами.

Более того, соответствующее математическое описание не содержит сведений о внутренних и внешних поверхностях моделируемого объекта. Без этих сведений невозможно рассчитать массу объекта, определить траектории перемещения инструмента при обработке объекта или создать сетку для конечно-элементного анализа, несмотря на то, что объект кажется трехмерным. Поскольку эти операции являются неотъемлемой частью процесса проектирования, системы каркасного моделирования были постепенно вытеснены системами поверхностного и твердотельного моделирования.

В настоящее время построение каркасов также используется в геометрическом моделировании САПР, но лишь как вспомогательная система промежуточных построений.

**Поверхностное моделирование** является развитием каркасного – с его помощью можно точно описывать поверхности геометрического тела, формирующие его оболочку. Поверхностное моделирование играет важную роль при проектировании изделий из листового металла (sheet metal parts), таких как капоты и крылья автомобилей, где форма поверхности важна как для дизайна, так и для аэродинамики изделия.

В отличие от каркасного представления, моделирование при помощи поверхностей имеет существенно меньше ограничений, так как позволяет определить своеобразную «оболочку» трехмерного объекта.

Геометрические модели на основе поверхностного представления обеспечивают качественную визуализацию, более простой переход к построению расчетных сеток для численного моделирования, обеспечивают ряд полезных функций, таких как построение пространственных сопряжений, сечений, определения линии пересечения оболочек, генерацию чертежных проекций.

Поверхностные модели различаются по способу аппроксимации поверхности. Более простой в части структуры данных и используемых для работы с ними алгоритмов является полигональная аппроксимация, когда поверхность представляется набором взаимосвязанных плоских граней, на практике чаще всего треугольных. Такая аппроксимация легко строится, для нее разработаны эффективные алгоритмы реалистичной визуализации, она не требует значительных вычислительных ресурсов, хотя может быть и затратной по памяти.

Главным ограничением подобной аппроксимации является то, что она имеет фиксированную точность, то есть отклонение положения модельной поверхности от «идеальной» моделируемой. Для достижения высокой точности требуется создание сеток с малым шагом,

что ведет к росту требований к вычислительным возможностям системы. Поэтому использование полигональной аппроксимации в САПР на текущий момент ограничено подсистемами визуализации и простейшего 3D-эскизирования.

Этих недостатков лишена технология NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline, неоднородный B-сплайн), сегодня наиболее часто используемая в практике САПР.

Такое описание поверхности обеспечивает определение координат любой ее точки, радиуса кривизны в ней, направления нормали к поверхности с высокой, в общем случае (без учета вычислительных затрат) с любой наперед заданной точностью.

Определенным недостатком такого подхода является сложность алгоритмов работы с NURBS, однако это обстоятельство исторически преодолено исследователями и разработчиками.

В определенной степени NURBS-представление является развитием полигонального, но в отличие от него позволяет описывать не только плоские, но и криволинейные грани и ребра (кромки). Совокупность таких граней с общими ребрами по традиции называют сеткой.

Технология NURBS обеспечивает реализацию ряда функциональных возможностей, недоступных или существенно ограниченных при использовании каркасного либо полигонального представления: вычисление радиуса кривизны поверхностей, их гладкое сопряжение, построение траекторий на поверхности, что важно для подготовки ЧПУ-программ, получение точных изображений, спроецированных на плоскость, например, для получения чертежных видов и т. д. и т. п.

Поверхностное моделирование играет важную роль при проектировании изделий из листового металла (sheet metal parts), таких как капоты и крылья автомобилей, где форма поверхности важна как для дизайна, так и для аэродинамики изделия.

Традиционно используются несколько типовых контекстов создания поверхностей:

- плоская поверхность – получается заполнением плоского контура (2D-эскиз или набор замкнутых кромок, лежащих в одной плоскости);

- поверхность вытяжки – образуется в результате плоскопараллельного вытягивания замкнутого или разомкнутого 2D/3D-эскиза в направлении, перпендикулярном плоскости эскиза, или под произвольным углом;

– поверхность вращения – получается вращением произвольного профиля (2D-эскиз) относительно оси;

– поверхность по траектории – создается движением 2D/3D эскиза вдоль криволинейной образующей (2D/3D-эскиз, 3D-кривая) и произвольного числа направляющих кривых (2D/3D-эскиз, 3D-кривая), деформирующих исходный контур;

– поверхность по сечениям – аналог поверхности по траектории; отличается тем, что строится не по одному, а по нескольким поперечным сечениям с направляющими кривыми;

– граничная поверхность – аналог поверхности по сечениям; отличается тем, что строится по нескольким произвольно сориентированным в пространстве 3D-кромкам других поверхностей с сохранением касательности к ним и с соблюдением непрерывности по второй производной (гладкая стыковка); при построении могут использоваться направляющие кривые;

– поверхность свободной формы – строится разбиением сетки с управляющими точками на поверхности грани 3D-модели; изменение формы поверхности достигается перетаскиванием контрольных точек;

– эквидистантная поверхность – получается смещением на определенное расстояние от существующих граней или поверхностей;

– поверхность разъема – используется при проектировании литейных форм, а также в качестве вспомогательной геометрии для разделения матрицы и пуансона;

– срединная поверхность – создается на середине (или заданном проценте) толщины тонкостенной детали;

– линейчатая поверхность – строится под углом к выбранной кромке и предназначена для построения граней с уклоном.

В том случае, если установлена программная связь между вспомогательным каркасом и результирующей поверхностью, моделирование становится ассоциативным, при этом изменение каркасных элементов ведет к автоматическому изменению геометрии поверхностей, построенных с использованием этого контекста.

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.

При работе с отображаемой на экране моделью изменяются уравнения поверхностей, уравнения кривых и координаты конечных точек. Если поверхности не окрашены и не затушеваны, визуальная

модель в системе поверхностного моделирования может выглядеть точно так же, как в системе каркасного моделирования.

Математическое описание может включать сведения о связности поверхностей, то есть о том, как поверхности соединяются друг с другом и по каким кривым. В некоторых приложениях эти сведения оказываются очень полезными. Например, программа для формирования траектории перемещения фрезы с ЧПУ может воспользоваться этой информацией для проверки, не задевает ли фреза поверхности, примыкающие к обрабатываемой.

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, потому что визуальная модель позволяет оценить эстетичность проекта, а математическое описание позволяет построить программу для обработки поверхностей детали на станке с ЧПУ.

Несмотря на достаточно широкие возможности, которые предоставляет поверхностное моделирование, оно имеет ряд существенных ограничений с точки зрения использования в САПР, в частности невозможность вычисления объемов, масс и моментов инерции объектов, ограниченность применения к ним булевых операций (вычитания, объединения, пересечения).

**Твердотельное (объемное) моделирование** – логическое развитие каркасного и поверхностного. Основной объект моделирования – трехмерное объемное тело, которое может описываться разными способами: декомпозиционным, конструктивным или граничным. Главным преимуществом твердотельного моделирования перед каркасным и поверхностным является свойство физической корректности – все твердотельные модели имеют аналоги в реальном мире (чего не скажешь о каркасных и поверхностных моделях).

При использовании твердотельного моделирования, ставшего на сегодня стандартом де-факто в 3D CAD/CAM/CAE-системах снимаются ограничения поверхностного моделирования.

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. Математическое описание объекта, созданного в системе твердотельного моделирования, содержит сведения, по которым система может определить, где находится какая-либо точка: внутри объема, снаружи него или на его границе. По этим сведениям можно получить любую информацию об объеме тела, а значит, могут быть написаны приложения, работающие с объектом на уровне объема, а не на уровне поверхности.

Если бы система твердотельного моделирования требовала ввода всех данных для полного математического описания, она была бы слишком сложной для пользователей, и они отказались бы от нее. Процесс детализации формы не был бы похож на интуитивный процесс физического моделирования, и в результате получилось бы совсем не то, на что рассчитывали создатели систем геометрического моделирования. Поэтому разработчики систем твердотельного моделирования стараются предоставить простые и естественные функции, чтобы пользователи могли работать с объемными формами точно так же, как они работают с физическими моделями, не вдаваясь в подробности математического описания. Функции моделирования, подобные созданию примитивов, булевым операциям, вытягиванию, построению фигуры вращения, повороту и скруглению, требуют от пользователя совсем немного. Обо всех деталях математического описания системы заботятся сами.

Существуют различные алгоритмические методы представления твердотельных моделей:

- декомпозиционные модели;
- конструктивные модели;
- граничные модели.

**Немногообразное** (non-manifold) моделирование снимает ограничения, присущие классическому твердотельному моделированию – с его помощью можно описывать геометрические модели, которые локально могут быть не только многообразиями размерности три (объемными телами), но и размерности два (поверхностями), один (кривыми), нуль (точками), а также участками сопряжения многообразий разной размерности.

## 2.2. Функции твердотельного моделирования

Функции твердотельного моделирования подразделяются на следующие группы:

- функции создания примитивов;
- перенос и поворот тела;
- булевы операции;
- функции заметания и скиннинга;
- конструктивные элементы;
- расчет объемных параметров тела (объема, массы, моментов инерции).

Все эти базовые функции, как правило, напрямую доступны пользователям программ, построенных на основе твердотельного моделирования.

Типичные твердотельные примитивы – брус (прямоугольный параллелепипед), цилиндр, конус, шар, клин, тор. При создании примитива пользователь должен определить его размеры и положение в пространстве.

Булевы операции включают в себя операции объединения, пересечения и разности двух тел.

Функции заметания создают объемное тело поступательным или вращательным движением замкнутого двумерного контура в трехмерном пространстве. Функция скиннинга «натягивает» трехмерное тело на его плоские срезы, заданные в виде замкнутых двумерных контуров.

Типичные конструктивные элементы включают в себя скругление, поднятие, проделывание отверстия. При создании конструктивного элемента задаются его размеры.

Важным свойством систем твердотельного моделирования является возможность расчета объемных параметров тела – объема, центра масс, тензора инерции и пр. Все такие параметры выражаются объемным интегралом по телу.

В большинстве современных САД-систем пользователь может создать свой набор конструктивных элементов. Отметим, что в одной конкретной системе геометрического моделирования могут поддерживаться не все функции твердотельного моделирования, а только их часть.

### 2.3. Декомпозиционные модели

Декомпозиционные модели являются простейшим подходом к твердотельному моделированию, представляя трехмерное тело композицией некоторых простых элементов. Различают следующие декомпозиционные модели:

- воксельное (voxel) представление;
- октантное дерево;
- ячеечное представление.

**Воксельное представление** – полный трехмерный аналог растрового одноцветного изображения. Тело представляется трехмерным булевым массивом, каждый элемент которого является пространственным кубиком одинакового размера со своими уникальными координатами. Такой кубик называется вокселем (voxel – от Volume riXEL). Воксели равномерно покрывают всю область (прямоугольный параллелепипед), в которой содержится моделируемое тело. Соответственно, те воксели, которые имеют непустое пересечение с моделируемым телом, представляются в массиве значением ИСТИНА, прочие – значение ЛОЖЬ. Отметим удобство воксельного представления для реализации на его основе булевых операций твердотельного моделирования. Для этого необходимо построить согласованные воксельные представления двух тел и применить соответствующую операцию к булевым значениям ячеек массива. Отметим, что сложность такого алгоритма будет прямо зависеть от числа вокселей. На воксельном представлении несложно вычислять объемные параметры тела – достаточно лишь вычислить их аналитически для каждого вокселя и просуммировать (рис. 2.2).

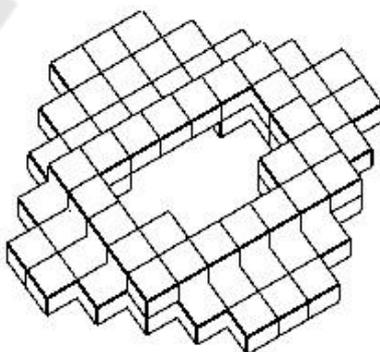


Рис. 2.2. Воксельная модель тела

**Октантное дерево** является развитием воксельного представления. Каждый узел октантного дерева соответствует некоторому кубу в трехмерном пространстве, который является либо:

- полностью (с заданной точностью) принадлежащим описываемому телу;
- полностью не принадлежащим описываемому телу;
- частично пересекающимся с описываемым телом.

Октантные деревья представляют собой рекурсивное разбиение пространства на восемь октант (рис. 2.3, а), которое представляется деревом. Обычно октантное дерево располагается вокруг начала его локальной системы координат, так что октанты первого уровня совпадают с октантами системы координат.

Каждая ветвь дерева состоит из кода и восьми указателей на восемь потомков, пронумерованных от 0 до 7. Если код = "черный", часть пространства, представляемая этой ветвью является заполненной и все указатели нулевые, т.е. это лист. Аналогично, если код = "белый", часть пространства пустая и это опять лист. Код = "серый" соответствует случаю, когда область пространства частично пуста и частично заполнена. В этом случае 8 ссылок указывают на подразбиение данной области. Например, на рисунке объект (рис. 2.3, б) представляется деревом (рис. 2.3, в)

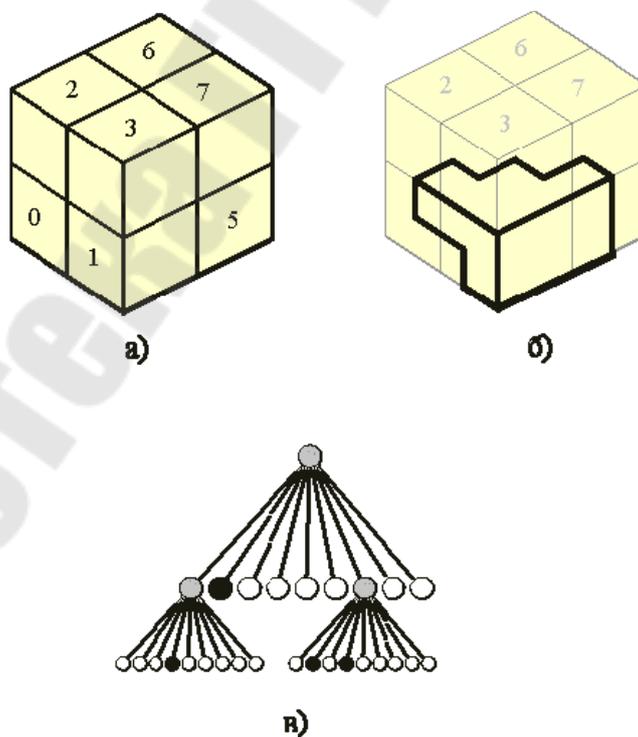


Рис. 2.3. Октантное дерево

Очень важным достоинством октантных деревьев является то, что они хранят информацию в упорядоченном виде. Это дает возможность разработать простые алгоритмы рендеринга объектов, представляемых в таком виде.

*Ячеечное представление* соответствует разбиению моделируемого тела на произвольные непересекающиеся выпуклые многогранники, полностью (в соответствии с заданной погрешностью) заполняющие его объем.

## 2.4. Конструктивные модели

Конструктивные модели основаны на журнале применения операций твердотельного моделирования. Для создания копии модели необходимо просто заново выполнить все операции из журнала, то есть заново сконструировать изделие, поэтому подобный подход к моделированию называется конструктивным.

Конструктивные модели основаны на применении операций твердотельного моделирования. Для создания конструктивной модели, модели CSG (constructive solid geometry) реализуют конструктивный подход в терминах булевых операций над параметрическими твердотельными примитивами (прямоугольный параллелепипед, цилиндр и пр.).

В рамках CSG представления для описания составных твердых тел определены следующие операции над исходными элементарными телами:

- вычитание;
- объединение;
- пересечение.

Таким образом, любое составное тело может быть описано в виде традиционного уравнения из булевых функций, в котором аргументами являются либо элементарные тела, либо другие составные тела. Это представление называют деревом построений.

Такое представление, кроме удобства модификации геометрии результирующего тела, позволяет существенно снизить требования к вычислительным ресурсам за счет применения оптимизирующих процедур к дереву построений.

Представление твердых тел в виде дерева построений удобно также и с точки зрения организации пользовательского интерфейса, обеспечивающего наглядный и быстрый доступ к любому элементу,

входящему в описание геометрии тела, его модификацию и получение отчетной информации.

## 2.5. Граничные модели

**Твердое тело** (рис. 2.4) образуется в пространстве одной или несколькими поверхностями, образующими замкнутый объем.

Оно включает в себя грани, ребра (или кромки) и вершины. Грань – часть граничной поверхности, образующей тело, граница которой состоит из криволинейных сегментов, при пересечении которых происходит существенное изменение вектора нормали к поверхности, т.е. нарушается непрерывность изменения кривизны поверхности (рис. 2.5). Криволинейные сегменты, ограничивающие грань, называются ребрами. Точки, в которых встречаются соседние ребра, называются вершинами.

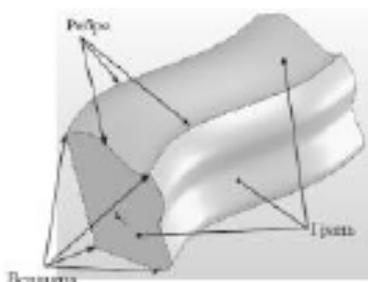


Рис. 2.4. Твердое тело



Рис. 2.5. Грани, ребра и нормали к поверхности

Граничные модели хранят информацию о границах тела (гранях, ребрах и вершинах). Для простоты манипулирования эта информация подразделяется на геометрические и топологические данные. Геометрические данные для каждой граничной сущности свои:

- для вершины – ее координаты;
- для ребра – параметрическое уравнение кривой (прямой);
- для грани – параметрическое уравнение поверхности либо тип и набор параметров в случае канонической поверхности (плоскости, сферы, цилиндра, конуса, тора).

Топологические данные – это информация о смежности вершин и ребер, ребер и граней, а также о внутренних и внешних границах грани. Для удобного манипулирования топологической информацией было предложено несколько структур данных, называемых В-Рер (от

англ. «Boundary Representation», – граничное представление) в двух режимах:

- многогранные (фасетные) модели;
- вершинные модели;
- полуреберные модели;
- крыльевые реберные модели.

## 2.6. Корректность граничных моделей

Важным свойством при работе с граничными моделями является обеспечение их корректности. В отличие от декомпозиционных и конструктивных моделей граничная может не соответствовать никакому твердому телу. Для автоматического обеспечения корректности граничных моделей используют операторы Эйлера.

В практике САПР наиболее широкое применение имеет технология, базирующаяся на граничном представлении элементарных односвязных тел (B-Rep) в совокупности с конструктивной геометрией (CSG, Constructive solid geometry), описывающей операции над телами. Граничное представление определяет сплошное тело неявно путем описания ограничивающей его поверхности. Суть B-Rep представления заключается в том, что твердое тело описывает замкнутая пространственная область, ограниченная набором элементарных тонких поверхностей (граней) с общими образующими контурами (ребрами) на границе поверхностей и признаком внешней или внутренней стороны поверхности, а также обеспечивающим следующий ряд операций, определенных над телами:

– проверка правильности задания, для односвязных тел осуществляется по формуле Эйлера, в наиболее общем виде записываемой как:

$$V - E + F = 2, \quad (2.1)$$

где  $V$  – количество вершин;  $E$  – количество ребер;  $F$  – количество граней;

- вычисление габаритного объема;
- вычисление нормали в точке;
- вычисление кривизны поверхности;

– нахождение точки пересечения с контуром или другой поверхностью; - определение положения точки относительно поверхности.

Об операторах Эйлера справедливы следующие утверждения:

– любая топологически корректная граничная структура данных может быть как создана, так и полностью удалена применением конечного числа операторов Эйлера;

– операторы Эйлера не могут создать топологически некорректную граничную структуру данных.

Одним из достоинств граничной модели является удобный способ расчета ее объемных параметров. Напомним, что объемные параметры выражаются объемным интегралом по телу. Для B-Rep-модели объемный интеграл преобразуется в поверхностный (в соответствии с теоремой Остроградского-Гаусса), который в свою очередь расписывается на сумму поверхностных интегралов для каждой грани. Поверхностный интеграл по грани вычисляется либо как двойной интеграл (если грань отображается на прямоугольную область в пространстве параметров), либо расписывается по теореме Грина как криволинейный интеграл, который вычисляется аналитически или численно по каждому ребру грани, а затем суммируется.

## **2.7. Пакеты геометрического моделирования и их функциональность**

Пакет геометрического моделирования (называемый также геометрическим ядром) – набор библиотек с программным интерфейсом (API), с помощью которого можно пользоваться функциями геометрического (например, твердотельного) моделирования. Многие ведущие САД-системы (такие как CATIA, Pro/Engineer, NX) построены на основе собственных геометрических ядер (CGM, GRANITE и Parasolid соответственно), тогда как другие (SolidWorks, T-FLEX, ADEM и пр.) построены на основе лицензированных геометрических ядер. Самыми популярными ядрами (используемыми в наибольшем количестве САПР) являются Parasolid (от компании Siemens PLM Software), ACIS (выпускаемый Spatial Corp – дочерней компании Dassault Systemes) и GRANITE (PTC). Отметим также свободно распространяемый в открытом коде пакет Open CASCADE (выпускаемый одноименной компанией).

Типичной функциональностью пакета геометрического моделирования является предоставление набора программных интерфейсов (структур данных, функций и классов) для создания приложения каркасного, поверхностного, твердотельного или немногобразного моделирования. Обычно родственные интерфейсы группируются в модули, среди которых выделяют:

- базовые типы и операции;
- моделирование топологии;
- геометрические объекты и операции над ними;
- булевы операции и операции редактирования поверхностей;
- удаление невидимых линий и рендеринг;
- модули для чтения и записи геометрических файлов популярных форматов.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Опишите разницу между автоматизацией черчения и геометрическим моделированием.
2. Назовите и опишите виды геометрического моделирования.
3. Каковы основные функции твердотельного (объемного) моделирования?
4. Опишите три вида декомпозиционных моделей.
5. Что такое CSG-дерево? Опишите алгоритм перевода CSG-дерева в октантное дерево.
6. В чем разница между геометрией и топологией граничной модели? Опишите структуры данных B-Rep.
7. Что такое объемные параметры и как они рассчитываются по граничной модели?
8. Какова базовая функциональность пакетов геометрического моделирования? Приведите примеры таких пакетов.

## **3. ФУНКЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. КРИВЫЕ ЛИНИИ**

### **3.1. Функции твердотельного моделирования**

*Функции моделирования*, поддерживаемые большинством систем твердотельного моделирования, могут быть разделены на пять основных групп.

В первую группу входят функции, используемые для создания простых форм на основе объемных заготовок, имеющихся в программе, – так называемые *функции создания примитивов (primitive creation functions)*. К этой же группе относятся функции добавления и вычитания объема – *булевы операторы (Boolean operations)*. Функции моделирования из первой группы позволяют проектировщику быстро создать форму, близкую к окончательной форме детали, подобно тому, как ребенок сминает пластилин и создает из него приблизительную физическую модель.

Ко второй группе относятся функции создания объемных тел путем перемещения поверхности. *Функция заметания (sweeping)* позволяет создавать объемное тело трансляцией или вращением области, заданной на плоскости. Построение тела вращения из плоской кривой называется также *качанием* или *вращательным заметанием (swinging)*. Задавая замкнутую плоскую область, пользователь может указывать геометрические ограничения или вводить данные о размерах, а не рисовать форму вручную. Здесь под геометрическими ограничениями понимаются соотношения между элементами рисунка (перпендикулярность отрезков, касание дуги окружности отрезком и т. д.). В этом случае система построит точную форму, удовлетворяющую ограничениям, самостоятельно. Изменение геометрических ограничений или размеров даст другую плоскую область и другое объемное тело. Такой подход называется *параметрическим моделированием*, поскольку изменение параметров позволяет получить разные объекты. Параметрами могут быть постоянные, входящие в геометрические ограничения, а также размеры. *Функция скиннинга (skinning)* создает объемное тело, натягивая поверхность на заданные поперечные сечения. Функции второй группы позволяют проектировщику начать моделирование с формы, весьма близкой к конечному результату, поскольку одних поперечных сечений вполне достаточно для точного описания конечного объемного тела.

В третью группу входят функции моделирования, предназначенные главным образом для изменения существующей формы. Типичными примерами являются функции *скругления* или *плавного сопряжения (rounding, blending)* и *поднятия (lifting)*.

К четвертой группе относятся функции, позволяющие непосредственно манипулировать составляющими объемных тел, то есть вершинами, ребрами и гранями. Работа с этими функциями (аналогичными функциям систем поверхностного моделирования) называется *моделированием границ (boundary modeling)*.

В пятую группу входят функции, используя которые проектировщик может моделировать твердое тело при помощи свободных форм. Например, он может давать системе команды типа «сделать отверстие такого-то размера в таком-то месте» или «сделать фаску такого-то размера в таком-то месте». Работа с такими функциями называется *объектно-ориентированным моделированием (feature-based modeling)*. В последнее время функциям пятой группы уделяется особое внимание, поскольку модель, построенная с их помощью, содержит информацию о процессе создания, без которой невозможно автоматическое формирование плана технологического процесса для детали. Однако, модель, созданная другими средствами, содержит только элементарные геометрические сведения о вершинах, ребрах и гранях.

**I. Функции создания примитивов** позволяют выбирать и создавать простейшие объекты, заранее определенные авторами системы моделирования. Размер примитива задается пользователем. Примитивы, поддерживаемые большинством систем твердотельного моделирования, показаны на рис. 3.1. Размеры, указанные на этом рисунке, могут устанавливаться пользователем. Примитивы сохраняются в базе данных процедурой, осуществляющей их создание, а параметры примитивов передаются этой процедуре в качестве аргументов.

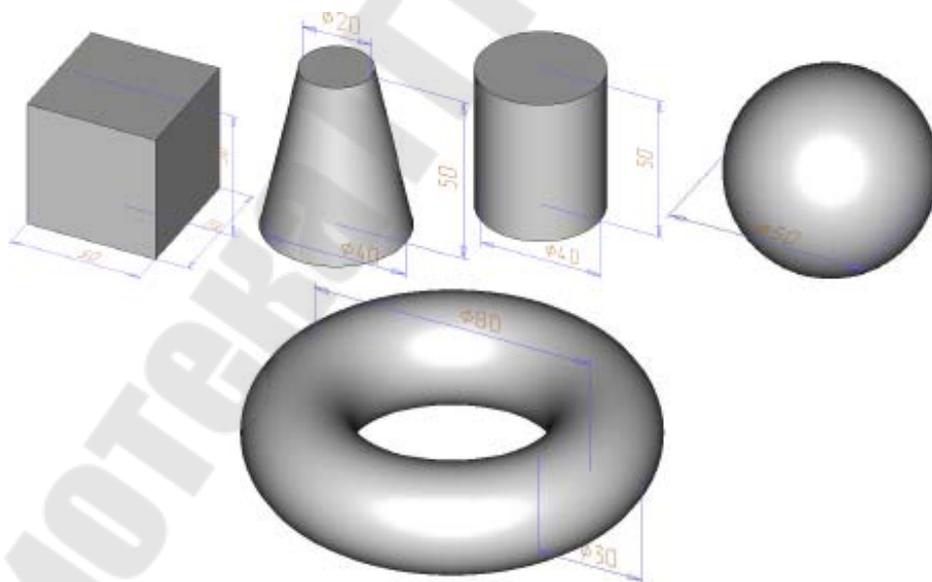


Рис. 3.1. Типичные примитивы

**Булевы операции.** Если бы в списке примитивов можно было найти любое объемное тело, это было бы замечательно. Однако из-за разнообразия возможных применений систем геометрического моде-

лирования сохранить заранее все мыслимые формы невозможно. Гораздо проще приблизиться к решению, предоставив пользователю средства для комбинирования примитивов. В качестве метода комбинирования в твердотельном моделировании применяются булевы операции теории множеств. Другими словами, каждое примитивное объемное тело считается множеством точек, к множествам применяются булевы операции, а в результате получается объемное тело, состоящее из точек, полученных после преобразований.

Большинством систем твердотельного моделирования поддерживаются следующие булевы операции: объединение, пересечение и разность. До применения булевых операций необходимо определить относительное положение и ориентацию примитивов. Булевы операции могут применяться не только к примитивам, хотя на рисунках в качестве примеров изображены именно примитивы.

Еще одна функция моделирования реализуется подобно булевым операциям, это функция разрезания объемного тела плоскостью, после применения которой, получается тело из двух частей. Того же результата можно достичь, применив операцию вычитания к объемному телу, которое должно быть разрезано, и кубу, одной из граней которого является секущая плоскость. По этой причине функция разрезания также может быть отнесена к булевым операциям.

При использовании булевых операций следует быть внимательным, чтобы не получить в результате тело, не являющееся объемным. Некоторые системы выдают предупреждение о возможности получения некорректного результата, другие могут просто завершить работу с сообщением об ошибке. Системы гибридного (немногообразного) моделирования способны обрабатывать и такие специфические ситуации, поскольку они работают не только с объемными телами, но и с поверхностями и каркасами.

**II. Заметание.** Функция *заметания* (*sweeping*) формирует объемное тело трансляцией или вращением замкнутой плоской фигуры. В первом случае процесс формирования называется *заметанием при трансляции* (*translational sweeping*), во втором случае – *построением фигуры вращения* (*swinging, rotational sweeping*). Если плоская фигура будет незамкнутой, в результате заметания получится не объемное тело, а поверхность. Такой вариант заметания поддерживается системами поверхностного моделирования.

Заметание при трансляции и вращении представлено на рис. 3.2. Хотя рис. 3.2, в демонстрирует вращение на  $360^\circ$ , большинство сис-

тем твердотельного моделирования позволяют поворачивать фигуру на произвольный угол.

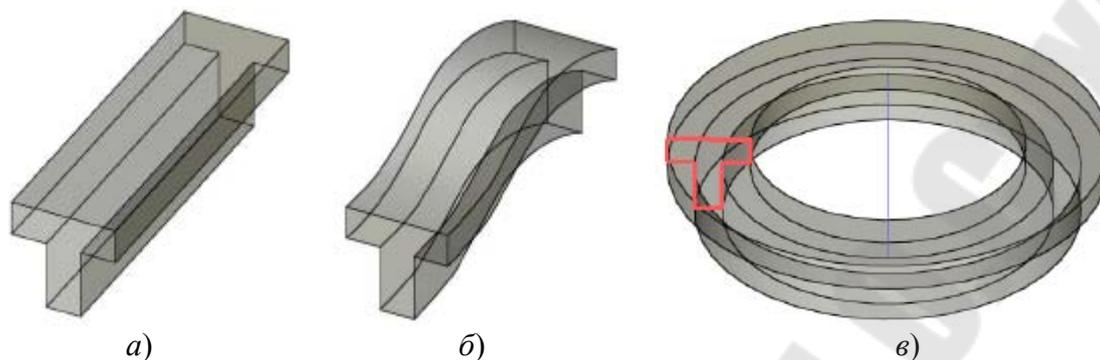


Рис. 3.2. Заметание при трансляции и вращении

**Скининг.** Функция *скиннинга* (*skinning*) формирует замкнутый объем, натягивая поверхность на заданные плоские поперечные сечения тела (рис. 3.3). Можно представить себе, что на каркас фигуры, образованный границами поперечных сечений, натягивается ткань или винил. Если к натянутой поверхности не добавить конечные грани (два крайних сечения), в результате получится поверхность, а не замкнутый объем. В таком варианте функция скиннинга представлена в системах поверхностного моделирования.

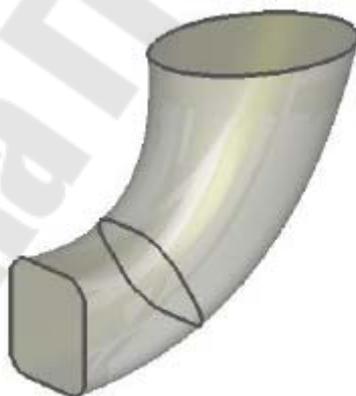


Рис. 3.3. Создание объемного тела методом скиннинга

**III. Скругление или плавное сопряжение.** Скругление (*rounding*), или плавное сопряжение (*blending*), используется для модифицирования существующей модели, состоящего в замене острого ребра или вершины гладкой криволинейной поверхностью, векторы нормали к которой непрерывно продолжают векторы нормали по-

верхностей, сошедшихся у исходного ребра или вершины. Замену острого прямого ребра цилиндрической поверхностью демонстрирует рис. 3.4, а. Векторы нормали к цилиндрической поверхности продолжаются векторами соседних плоских граней. Замена острой вершины сферической поверхностью показана на рис. 3.4, в. Здесь также обеспечивается непрерывность векторов нормали. Частный случай скругления с добавлением, а не удалением материала показан на рис. 3.4, б. Такая процедура называется выкружкой (filleting).

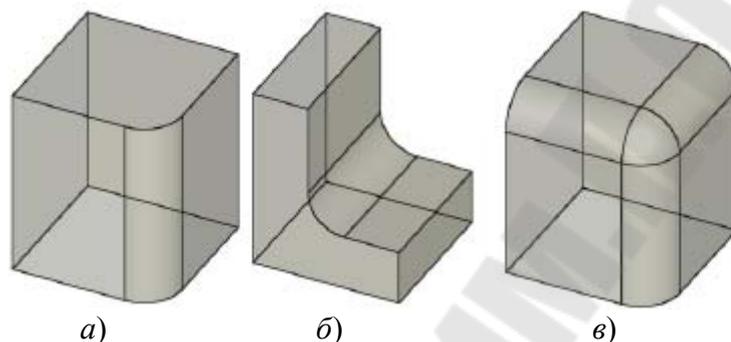


Рис. 3.4. Скругление ребер и вершин

**Поднятие.** Поднятием (lifting) называется перемещение всей грани объемного тела или ее части в заданном направлении с одновременным удлинением тела в этом направлении (рис. 3.5, а). Если нужно поднять только часть грани (рис. 3.5, б), эту грань необходимо заранее разделить.

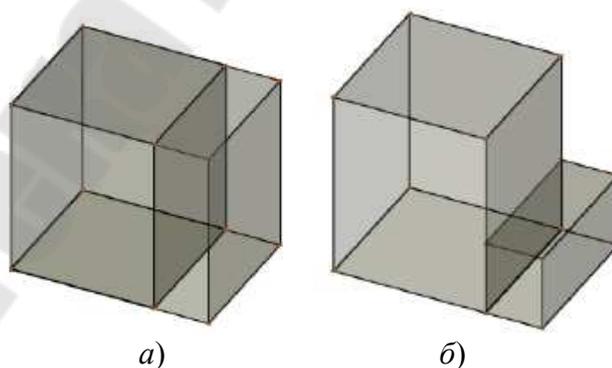


Рис. 3.5. Поднятие грани и ее части

**IV. Моделирование границ.** Функции моделирования границ используются для добавления, удаления и изменения элементов объемного тела – его вершин, ребер и граней. Следовательно, процедура, использующая функции моделирования границ, будет выглядеть точ-

но так же, как в системах поверхностного моделирования. Другими словами, вначале создаются точки, затем создаются ребра, соединяющие эти точки, и наконец, граничные ребра определяют поверхность. Однако в системах твердотельного моделирования, в отличие от систем поверхностного моделирования, нужно определить все поверхности таким образом, чтобы образовался замкнутый объем.

Создавать объемное тело исключительно при помощи функций моделирования границ очень утомительно. Эти функции используются главным образом для создания плоских фигур, которые затем служат сечениями объемным телам, образуемым *заметанием* или *скиннингом*. Однако функции моделирования границ удобно применять для изменения формы уже существующего тела. Вершину можно передвинуть в новое положение, изменив соответствующим образом соседние ребра и грани. Прямое ребро можно заменить криволинейным, в результате чего изменятся связанные грани и вершины. Плоскую поверхность можно заменить на криволинейную с модификацией ребер и вершин. Иногда плоскую поверхность можно заменять криволинейной, импортированной из системы поверхностного моделирования. Перечисленные функции моделирования называются функциями тонкого редактирования (*tweaking functions*). Они используются для моделирования тел, ограниченных криволинейными поверхностями, поскольку такие поверхности легко получать из плоских граней многогранника.

***V. Объектно-ориентированное моделирование.*** *Объектно-ориентированное моделирование (feature-based modeling)* позволяет конструктору создавать объемные тела, используя привычные *элементы форм (features)*. Созданное тело несет в себе информацию об этих элементах в дополнение к информации об обычных геометрических элементах (вершинах, ребрах, гранях и др.). Например, конструктор может давать команды типа «сделать отверстие такого-то размера в таком-то месте» или «сделать фаску такого-то размера в таком-то месте», и получившаяся фигура будет содержать сведения о наличии в конкретном месте отверстия (или фаски) конкретного размера. Набор доступных в конкретной программе элементов формы зависит от спектра применения этой программы.

Большинством систем объектно-ориентированного моделирования поддерживаются такие элементы, которые используются при изготовлении деталей: фаски, отверстия, скругления, пазы, выемки и т. д. Такие элементы называются производственными, поскольку каждый

из них может быть получен в результате конкретного процесса производства.

### 3.2 Моделирование кривых линий и поверхностей

Все не прямые и не ломаные линии называются *кривыми*. Кривые линии разделяются на два вида:

– плоские кривые, т.е. такие, все точки которых располагаются в одной плоскости;

– пространственные кривые (линии двойкой кривизны), т. е. такие, точки которых не принадлежат одной плоскости.

Если закон перемещения точки может быть выражен аналитически в виде уравнения, то образующая при этом линия называется закономерной, в противном случае – не закономерной, или графической. Закономерные кривые линии делятся на алгебраические, определяемые алгебраическими уравнениями (эллипс, парабола, гиперболла и др.), и трансцендентные, определяемые трансцендентными уравнениями (синусоида, циклоида, спираль Архимеда и др.). Важной характеристикой алгебраической кривой является ее порядок (трансцендентные кривые порядка не имеют). С алгебраической точки зрения порядок кривой линии равен степени ее уравнения, с геометрической – наибольшему числу точек пересечения кривой с прямой линией для плоских кривых и с произвольной плоскостью для пространственных. В число точек пересечения включаются как действительные точки, так и совпавшие и мнимые. Например, прямую линию, имеющую уравнение первой степени  $ax + by + c = 0$  (с произвольной прямой пересекается в одной точке), можно рассматривать как линию первого порядка, эллипс – кривая второго порядка, имеет уравнение  $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$  второй степени, пересекается с прямой максимум в двух точках. Кривыми второго порядка являются также окружность, парабола, гипербола. Примерами кривых третьего порядка могут служить строфоида, Декартов лист, циссоида; четвертого – лемниската Бернулли, кардиоида, улитка Паскаля.

В большинстве случаев с помощью тел и поверхностей, называемых аналитическими, нельзя описать реальные геометрические объекты. На протяжении долгого времени выход из этого положения заключался в представлении объекта с помощью произвольно проведенных линий, взаимное сопряжение которых осуществлялось специалистами очень высокой квалификации: модельщиками, литейщи-

ками, изготовителями штампов. Решение этой задачи в разных областях техники характеризовалось общим свойством – отсутствием какого бы то ни было предварительного математического определения, даже частичного, в результате чего решение задачи начиналось с выполнения последовательных шагов аппроксимации и заканчивалось вручную. Каждый шаг подгонки основывался на результатах экспериментов или просто на указаниях дизайнера. Из-за недостатка информации такие зависимости часто назывались экспериментальными.

В инженерной геометрии существует большое количество обработанных графических способов построения плавных кривых – обводов. Они традиционно применялись при проектировании таких объектов, как корпус корабля, кузов автомобиля, фюзеляж и крыло самолета и многих других.

В результате форма тела задается при помощи набора очень точно изготовленных сечений – плазов. Кроме перечисленных примеров сложную форму поверхности имеют лопасти гидравлических и паровых турбин, гребные винты, лопасти авиационных двигателей, крыльчатки и др., т. е. объекты, функциональные требования к которым связаны с омыванием какой-либо средой. Кроме функциональных требований к изделиям предъявляются и эстетические. В этом случае также решаются задачи проектирования кривых линий и поверхностей произвольной формы.

Появление ЭВМ позволило перейти от «ручных» графических способов моделирования к более эффективному способу задания кривых и поверхностей. Процесс проектирования происходит следующим образом: задают координаты сравнительно небольшого числа опорных точек (например, расчетных или полученных в результате эксперимента), лежащих на искомой линии или поверхности, и через эти точки проводят плавные кривые линии. Такое конструирование носит итерационный характер.

Модель (аналитическое описание), полученную на некотором шаге итерации, модифицируют и улучшают до тех пор, пока не будет достигнута желаемая форма кривой или поверхности. Проблема состоит в математически точном воспроизведении формы изделия, исходя из координат точек, расположенных на его поверхности.

При моделировании кривых линий и поверхностей, их машинного представления возникают задачи аппроксимации, интерполяции и сглаживания исходных данных (рис. 3.6).

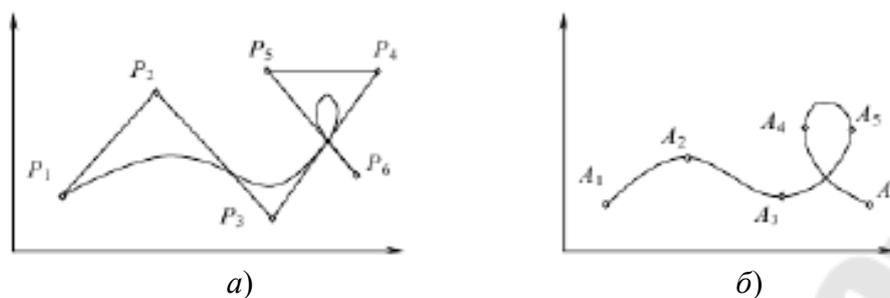


Рис. 3.6. Аппроксимация (а) и интерполяция (б) кривых

Задачи аппроксимации (приближенного представления) возникают при замене кривой или поверхности, описываемых сложными функциями, другими функциями, описываемыми более простыми уравнениями, без потери необходимой точности.

Задачи интерполяции (приближенного восстановления) связаны с поиском гладких кривых или поверхностей, проходящих через множество заданных точек.

Задачи сглаживания возникают, когда необходимо, чтобы искомая кривая или поверхность описывались функцией, обеспечивающей, например, необходимую степень дифференцирования.

Таким образом, при моделировании кривых линий и поверхностей решается следующая задача: по заданному массиву точек на плоскости или в пространстве строится кривая, проходящая через все эти точки (задача интерполяции) либо проходящая вблизи от этих точек (задача сглаживания).

Задачи аппроксимации и интерполяции (интерполяция является частным случаем аппроксимации) при конструировании кривых линий и поверхностей могут быть решены с использованием различных вычислительных методов. При этом сегменты пространственных кривых аппроксимируются отрезками, дугами окружности, параболоми и кривыми более высоких порядков.

Методы конструирования кривых линий и поверхностей: метод Эрмита, метод Безье, метод аппроксимации с помощью кубических В-сплайнов, метод Кунса и др. используют одинаковый подход: разбиение пространственной кривой на отдельные сегменты – элементарные куски. Описание этих сегментов полигонами третьей степени, определенные условия соединения элементарных кусков в составные кривые. Такие кривые в литературе обобщенно называют *сплайновыми кривыми*.

### 3.3. Сравнение форм Эрмита, Безье и В-сплайнов

Каждое из этих представлений оказывается полезным в разных ситуациях. Форма Эрмита пригодна для аппроксимации уже имеющихся поверхностей, когда необходимо добиться как соответствия точек, так и соответствия касательных векторов, в то время как представление в виде В-сплайнов удобно для аппроксимации точек.

Формы Безье и В-сплайнов пригодны для работы в интерактивном режиме, так как их геометрические векторы состоят из одних только точек. Обе эти формы обладают свойством выпуклой оболочки, которое оказывается полезным при изображении кривых. Отметим, что кривую, первоначально заданную в одной форме, можно преобразовать в другую форму.

На рис. 3.7 и рис. 3.8 показано различие в поведении кривых, построенных разными методами на основе одного и того же точечного базиса.

Одними из самых популярных сплайнов, применяемых в компьютерном моделировании, являются «кривые Безье» и NURBS-кривые (Non-Uniform Rational B-Spline – неоднородный рациональный фундаментальный сплайн). Эти сплайны обладают высокой степенью гладкости, легко вычисляются и управляются.

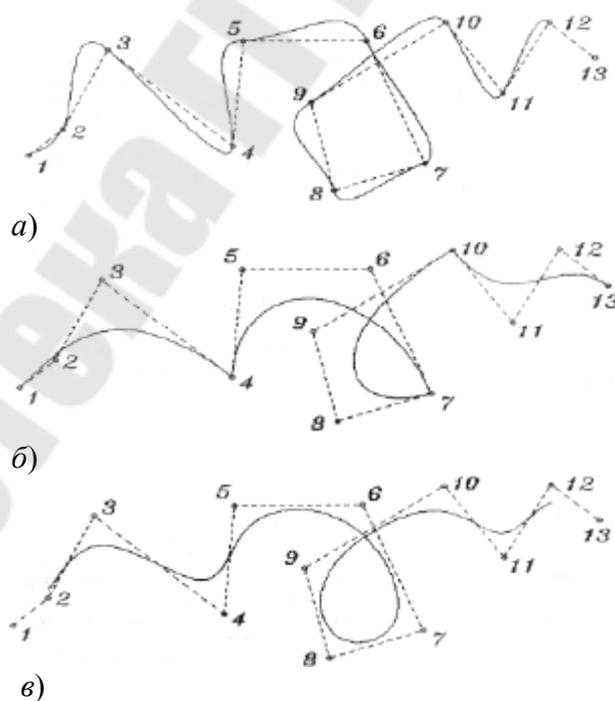


Рис. 3.7. Три формы построения кривых:  
а – форма Эрмита; б – форма Безье; в – форма В-сплайна

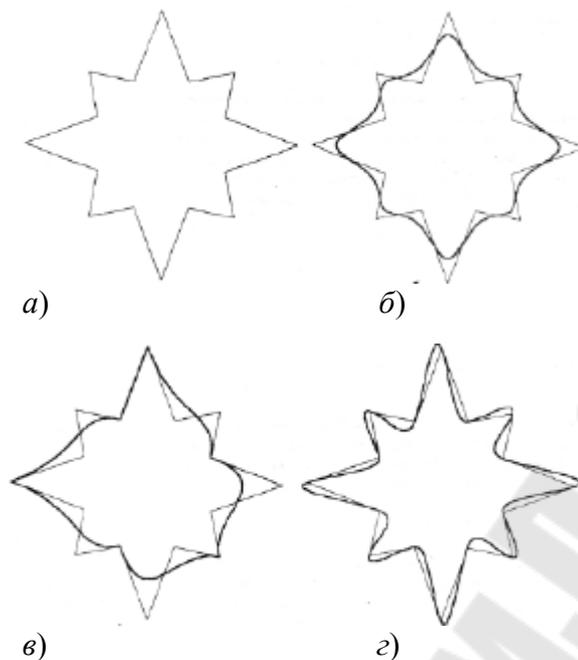


Рис. 3.8. Сглаживание фигуры  
*a* – исходная фигура; *б* – форма В-сплайна; *в* – форма Безье; *г* – форма Эрмита

Неоднородный рациональный В-сплайн или NURBS подобен обычному кубическому В-сплайну.

NURBS-кривые не проходят через базовые точки, а усредняют – аппроксимируют их, причем узловые точки могут быть расставлены неравномерно. Такие линии называются неоднородными, а каждый такой узел, имеющий свой вес (коэффициент, определяющий влияние данной точки на кривизну линии), – рациональным. Перемещая узловые точки, можно управлять формой кривой (рис. 3.9).

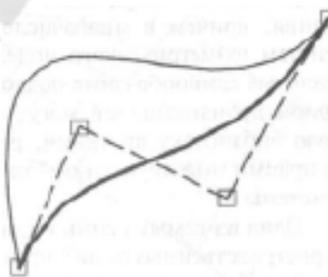


Рис. 3.9. Интерактивное управление формой гладких NURBS-кривых

NURBS позволяет точно воспроизвести все конические сечения – окружность, эллипс, параболу и гиперболу. В NURBS – представлении можно работать не только с коническими сечениями, но с кривыми Безье, рациональными кривыми Безье и В-сплайнами. Преобра-

зование всех этих кривых к NURBS может значительно сократить объем программирования.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Перечислите основные группы функций (5) моделирования твердого тела.
2. В чем суть функций создания примитивов и булевых операторов?
3. В чем суть функций заметания, качания (вращения) и скиннинга?
4. В чем суть функций скругления (плавного сопряжения) и поднятия?
5. В чем суть функций моделирования границ?
6. В чем суть функций объектно-ориентированного моделирования?
7. Какие линии называют кривыми?
8. В чем состоят методы интерполяции и аппроксимации кривых? Чем они отличаются?
9. Перечислите методы конструирования кривых линий и поверхностей. Какой подход при этом используют?
10. Сравните формы построения кривых (Эрмита, Безье, B-сплайна). Приведите графические примеры.
11. В чем преимущества и суть построения сплайнов и поверхностей Безье (в том числе составных)?
12. В чем отличие NURBS от B-сплайнов? Перечислите преимущества NURBS.

## **4. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Процесс проектирования и конструирования, как правило, итеративный и предполагает перебор нескольких вариантов, поэтому упрощение и автоматизация построения модели будущего изделия являются одной из важнейших задач САПР.

Одним из широко распространенных методов решения этой задачи является параметрическое проектирование (или просто параметризация), основанное на моделировании деталей и изделий с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время перебрать с помощью изменения параметров или геометрических отношений

различные конструктивные схемы, выбрать оптимальные решения и избежать принципиальных ошибок.

Определить цель конструирования достаточно просто, однако процесс поиска рационального решения сложен и требует гармоничного сочетания различных методов автоматизированного конструирования изделий. Параметрическое конструирование как методология автоматизированной разработки является основой для параллельного ведения проектно-конструкторских работ и позволяет уточнить конечную цель конструирования уже на ранних стадиях реализации проекта, что и определяет эффективность совмещения процессов конструирования, инженерного анализа и производства на едином временном интервале и их взаимной интеграции. Параметризация подразумевает использование различных видов взаимосвязей между компонентами модели и приложениями, которые используют данную модель.

Использование технологии параметрического конструирования позволяет, при необходимости, легко изменять форму модели, в результате чего пользователь имеет возможность быстро и эффективно получать альтернативные конструкции или пересмотреть концепцию изделия в целом. При отсутствии средств обеспечения параметрического конструирования модель определена однозначно только своей геометрией, поэтому внесение даже малейших изменений требует значительных трудовых затрат. Изменения же параметрической модели выполняются так же легко, как и изменения значения размеров на чертежах.

Параметризация – концепция, которая охватывает все методы для решения задач конструирования. Важной особенностью современной концепции параметрического конструирования является, прежде всего, возможность создания геометрической модели с использованием связей и правил, которые могут переопределяться и дополняться на любом этапе ее создания. Связи представляются в виде размерных, геометрических и алгебраических соотношений. Правила же определяются как условия выполнения базовой операции (например, сквозное или «глухое» отверстие).

Параметрическое проектирование существенно отличается от обычного двумерного черчения или трехмерного моделирования. В случае параметрического проектирования создается по сути математическая модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации и размеров деталей, их взаимного расположения в сборках и т. п.

На практике применяется достаточно много различных методов параметризации, на сегодняшний день нет однозначно преобладающего решения. Рассмотрим наиболее часто применяемые на практике методы.

#### **4.1. Табличная параметризация**

Табличная параметризация заключается в создании таблицы параметров типовых деталей. Создание нового экземпляра детали производится путем выбора из таблицы типоразмеров. Возможности табличной параметризации весьма ограничены, поскольку задание произвольных новых значений параметров и геометрических отношений обычно невозможно.

Однако табличная параметризация находит широкое применение во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых деталей, а также их применение в процессе конструкторского проектирования.

#### **4.2. Иерархическая параметризация**

Иерархическая параметризация (параметризация на основе истории построений) заключается в том, что в ходе построения модели вся последовательность построения отображается в отдельном окне в виде «дерева построения». В нем перечислены все существующие в модели вспомогательные элементы, эскизы и выполненные операции в порядке их создания.

Помимо «дерева построения» модели, система запоминает не только порядок ее формирования, но и иерархию ее элементов (отношения между элементами). (Например: сборки => под сборки => детали). Параметризация на основе истории построений присутствует практически во всех САПР, использующих трехмерное твердотельное параметрическое моделирование. Обычно такой тип параметрического моделирования сочетается с вариационной и/или геометрической параметризацией.

#### **4.3. Вариационная (размерная) параметризация**

Вариационная, или размерная, параметризация основана на построении эскизов (с наложением на объекты эскиза различных пара-

метрических связей) и наложении пользователем ограничений в виде системы уравнений, определяющих зависимости между параметрами.

Процесс создания параметрической модели с использованием вариационной параметризации выглядит следующим образом:

1. На первом этапе создается эскиз (профиль) для трехмерной операции. На эскиз накладываются необходимые параметрические связи.

2. Затем эскиз «образмеривается». Уточняются отдельные размеры профиля. На этом этапе отдельные размеры можно обозначить как переменные (например, присвоить имя Length) и задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул (например, Length/2).

3. Затем производится трехмерная операция (например, смещение), значение атрибутов операции тоже служит параметром (например, величина смещения).

4. В случае необходимости создания сборки взаимное положение компонентов сборки задается путем указания сопряжений между ними (совпадение, параллельность или перпендикулярность граней и ребер, расположение объектов на расстоянии или под углом друг к другу и т. п.).

Вариационная параметризация позволяет легко изменять форму эскиза или величину параметров операций, что позволяет удобно модифицировать трехмерную модель.

Частным случаем размерной параметризации является так называемая «эвристическая» параметризация, когда последовательно выполняется эскиз, который «образмеривается»; операцией смещения получают геометрическую модель. Затем производят редактирование значений размеров и выполняют операцию «эвристическая параметризация», в результате которой происходит автоматическое изменение геометрии профиля. Результат получают после регенерации объемной модели.

#### **4.4. Геометрическая параметризация**

Геометрической параметризацией называется параметрическое моделирование, при котором геометрия каждого параметрического объекта пересчитывается в зависимости от положения родительских объектов, его параметров и переменных.

Параметрическая модель в случае геометрической параметризации состоит из элементов построения и элементов изображения. Элементы построения (конструкторские или вспомогательные линии) задают параметрические связи. К элементам изображения относятся линии изображения (которыми обводятся конструкторские линии), а также элементы оформления (размеры, надписи, штриховки и т. п.). Одни элементы построения могут зависеть от других элементов построения.

Элементы построения могут содержать и параметры (например, радиус окружности или угол наклона прямой). При изменении одного из элементов модели все зависящие от него элементы перестраиваются в соответствии со своими параметрами и способами их задания.

Процесс создания параметрической модели методом геометрической параметризации выглядит следующим образом:

1. На первом этапе конструктор задает геометрию профиля конструкторскими линиями, отмечает ключевые точки.

2. Затем проставляет размеры между конструкторскими линиями. На этом этапе можно задать зависимость размеров друг от друга.

3. Затем обводит конструкторские линии линиями изображения - получается профиль, с которым можно осуществлять различные трехмерные операции.

Последующие этапы в целом аналогичны процессу моделирования с использованием метода вариационной параметризации.

Геометрическая параметризация обеспечивает возможность более гибкого редактирования модели. В случае необходимости внесения незапланированного изменения в геометрию модели необязательно удалять исходные линии построения (это может привести к потере ассоциативных взаимосвязей между элементами модели), можно провести новую линию построения и перенести на нее линию изображения.

#### **4.5. Ассоциативное конструирование**

Ассоциативное конструирование (Associative Design) – это обобщающее название технологии параметрического конструирования, обеспечивающей единую, в том числе и двустороннюю, информационную взаимосвязь между геометрической моделью, расчетными моделями, программами для изготовления изделия на станках с ЧПУ, конструкторской документацией, базой данных проекта.

Использование технологии ассоциативного конструирования позволяет, при необходимости, изменять форму модели и получать автоматически перестроенные чертежи или траектории инструмента для обработки на станках с ЧПУ.

Частным случаем ассоциативного конструирования является технология ассоциативной геометрии, иногда именуемая как направленная ассоциативность (idirected associativity), – это технология ассоциативного конструирования, которая базируется на непосредственных взаимосвязях между объектами. Простейший пример – определение параллельности двух отрезков. Отрезок *A* может быть определен как параллельный отрезку *B*. В результате при перемещении отрезка *B* отрезок *A* также изменит свое положение с сохранением ориентации по отношению к отрезку *B*. Собственное же положение отрезка *A* не может быть непосредственно изменено. Можно определить отрезки *A* и *B* как параллельные и другим способом, так что можно будет изменять положение любого из этих отрезков, удовлетворяя условиям других наложенных связей, – это случай так называемой «мягкой» ассоциативности. Преимущество использования ассоциативной геометрии – скорость.

Недостаток же заключается в том, что пользователь должен полностью определить размеры и ориентацию элемента, прежде чем приступить к созданию следующего элемента.

#### **4.6. Объектно-ориентированное конструирование**

Объектно-ориентированное конструирование (Feature-Based Modeling) основано на том, что конструктивные элементы геометрии «фьючерсы» (features) представляют собой объекты с предопределенным поведением и структурой данных. Это один из подходов ассоциативного конструирования, с помощью которого определяется поведение геометрической формы при дальнейших изменениях.

Этот подход реализован на основе определенного набора правил и атрибутов, задаваемых при выполнении базовой операции, в дополнение к уже заданным связям и ассоциативной геометрии. Базовые операции являются высокоэффективным инструментом для создания геометрической модели конструкции, инженерного анализа или изготовления. Объектно-ориентированное моделирование предоставляет в распоряжение пользователя макрофункции, ранее определенные как последовательность действий, использующих булевы операции. На-

пример, сквозное отверстие – может быть представлено как булева операция вычитания и цилиндр достаточной длины, большей, чем текущая толщина детали.

Но если модель станет толще, то цилиндр уже не будет обладать достаточной длиной и отверстие превратится в «глухое». Однако под сквозным отверстием понимается дополнительное правило, которое определяет сквозной проход в указанном месте через тело модели, независимо от того, изменилась форма модели или нет. Базовые операции также могут иметь и дополнительные атрибуты, которые используются в других приложениях, таких как анализ и изготовление.

Обязательные требования к базовым операциям при объектно-ориентированном моделировании:

1) используемая базовая операция должна быть полностью определена. После выполнения базовой операции ее топология должна сохраняться и распознаваться как базовая операция (отверстие, паз и т. д.), а также предоставлять возможность изменения определяющих ее геометрических параметров (диаметр, глубина, и т. д.);

2) определение базовой операции должно включать в себя правила, определяющие поведение геометрической формы, а также средства контроля за соблюдением этих правил после выполнения базовой операции. Например, сквозное отверстие должно оставаться таковым, в то время как форма модели подвергается изменению;

3) для повышения эффективности процесса параллельной разработки приложения для инженерного анализа и изготовления должны иметь доступ к описанию объекта, не требуя при этом от пользователя информации об объекте, использованной ранее при выполнении базовой операции.

Уже существующие типы конструктивных элементов могут быть использованы для создания новых типов путем наследования всех свойств исходных объектов и добавления новых атрибутов и поведения. Обязательным компонентом объектно-ориентированного конструирования являются механизмы создания конструктивного элемента и его обновления путем изменения данных каждого элемента. Запуск механизма обновления при изменении данных автоматически инициирует операцию его создания, а так как эти механизмы наследуются всеми конструктивными элементами от базового типа, обеспечивается совместимость структур данных для всего набора элементов. Конструктивные элементы включены в общий цикл обновления, таким образом, любое изменение данных приводит к автоматическо-

му обновлению модели в соответствии с правилами построения и данными для каждого элемента.

#### **4.7. Конструирование на основе использования параметрической модели комплексного представителя типовой детали**

В этом случае геометрические параметры модели могут быть связаны как переменные и можно задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул. Реализация геометрической модели осуществляется в среде САД модуля путем последовательного использования языка высокого уровня (например, VBA или Си++) и табличного процессора Excel.

Каждая группа деталей имеет свои особенности конструкции, определяющие выбор метода создания объемной модели. Несмотря на это, можно перечислить основные этапы работы, общие во всех вариантах:

- анализ конструкции деталей группы;
- формирование комплексного представителя группы деталей;
- построение исходных контуров для создания объемной модели;
- простановка размеров (координация поверхностей);
- преобразование размеров в параметрические;
- построение объемной модели с помощью выполнения операций над контурами;
- создание электронной табличной формы для внесения информации из конструкторского чертежа детали;
- написание алгоритма расчета параметрических размеров с использованием данных с чертежа, оформление таблицы расчета;
- подключение таблицы значений параметрических размеров к параметрической модели, запись параметрического фрагмента.

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. В чем суть параметризации?
2. Перечислите виды параметризации.
3. В чем заключается табличная параметризация?
4. Перечислите особенности иерархической параметризации.
5. Поясните процесс создания параметрической модели с использованием вариационной (размерной) параметризации.

6. Поясните алгоритм создания параметрической модели методом "эвристической" параметризации.
7. В чем суть геометрической параметризации? Порядок создания параметрической модели.
8. Поясните различия между иерархической параметризацией и вариационной (размерной) параметризацией.
9. Поясните различия между размерной и геометрической параметризацией.
10. Для чего используется ассоциативная параметризация?
11. Приведите пример конструирования на основе использования технологии ассоциативной геометрии.
12. В чем преимущества и недостатки использования ассоциативной геометрии?
13. В чем суть метода объектно-ориентированного конструирования?
14. Перечислите обязательные требования к базовым операциям при объектно-ориентированном моделировании.
15. Какими механизмами осуществляется изменение модели при изменении данных входящего в нее конструктивного элемента?
16. Поясните суть конструирования на основе параметризации комплексного представителя.
17. Перечислите основные этапы создания параметрической модели комплексного представителя группы деталей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голованов, Н. Н. Геометрическое моделирование : учеб. пособие / Н. Н. Голованов. – М. : КУРС: ИНФРА-М, 2016. – 400 с.
2. Малюх, В. Н. Введение в современные САПР : курс лекций / В. Н. Малюх. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 192 с.
3. Потемкин А. Трехмерное твердотельное моделирование / А. Потемкин. – М. : Компьютер-Пресс, 2002. – 296 с.
4. Чемпинский, Л. А. Основы геометрического моделирования в машиностроении : конспект лекций / Л. А. Чемпинский. – Самара : СГУ, 2017. – 160 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	3
1. Краткая характеристика систем автоматизированного проектирования (САПР) .....	4
1.1. Классы САПР .....	4
1.2. Функциональность САД систем .....	4
1.3. Современные САД системы и их классификация .....	7
1.4. Системы инженерного анализа (CAE) .....	7
1.5. Системы технологической подготовки производства (CAPP) .....	10
1.6. Системы автоматизации производства (CAM) .....	10
1.7. Системы управления данными об изделии (PDM) .....	11
1.8. Интегрированные пакеты управления жизненным циклом изделия .....	12
2. Геометрическое моделирование .....	14
2.1. Автоматизация черчения и геометрическое моделирование .....	14
2.2. Функции твердотельного моделирования .....	22
2.3. Декомпозиционные модели .....	23
2.4. Конструктивные модели .....	25
2.5. Граничные модели .....	26
2.6. Корректность граничных моделей .....	27
2.7. Пакеты геометрического моделирования и их функциональность .....	28
3. Функции твердотельного моделирования. Кривые линии .....	29
3.1. Функции твердотельного моделирования .....	29
3.2. Моделирование кривых линий и поверхностей .....	36
3.3. Сравнение форм Эрмита, Безье и В-сплайнов .....	39
4. Параметрическое моделирование .....	41
4.1. Табличная параметризация .....	43
4.2. Иерархическая параметризация .....	43
4.3. Вариационная (размерная) параметризация .....	43
4.4. Геометрическая параметризация .....	44
4.5. Ассоциативное конструирование .....	45
4.6. Объектно-ориентированное конструирование .....	46
4.7. Конструирование на основе использования параметрической модели комплексного представителя типовой детали .....	48
Литература .....	50

# **ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В САПР**

**Учебно-методическое пособие  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальности  
1-53 01 01 «Автоматизация производственных  
процессов и производств (по направлениям)»  
дневной формы обучения**

**Составитель Акулова Елена Михайловна**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 28.12.20.

Per. № 101E.  
<http://www.gstu.by>