Ушаков Д.М.

САПР от а до я

Введение в математические основы САПР

2-е издание,
переработанное и дополненное



Autodesk

ДМК Пресс издательство

isicad

УДК 32.973.26-018.2
ББК 004.438
У93

Ушаков Д. М.
У93 Введение в математические основы САПР: курс лекций.– М.: ДМК Пресс. – 208 с. : ил.

ISBN 978-5-97060-278-2

Книга представляет собой краткое изложение курса лекций «Введение в математические основы САПР», организованного Новосибирским государственным университетом при поддержке компании ЛЕДАС. Лекции рассчитаны на студентов старших курсов, специализирующихся в области прикладной математики, информатики и информационных технологий. Излагаемый материал может быть полезен разработчикам САПР, ученым, инженерам, а также всем интересующимся современными тенденциями в области автоматизации промышленных процессов.

УДК 32.973.26-018.2
ББК 004.438

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-5-97060-278-2

© Ушаков Д. М.
© Оформление, ДМК Пресс

Содержание

Введение 10

Организатор курса 10
Целевая группа 10
Цели курса 11
Организация занятий 11
Структура курса 11
Благодарности 12

Лекций 1. Введение в САПР 13

Классы САПР 14
Автоматизация современного машиностроительного предприятия 14
Исторический обзор развития систем автоматизации проектирования 16
Функциональность CAD-систем 22
Современные CAD-системы и их классификация 25
Системы инженерного анализа (CAE) 26
Системы технологической подготовки производства (CAPP) 27
Системы автоматизации производства (CAM) 28
Системы управления данными об изделии (PDM) 28
Интегрированные пакеты управления жизненным циклом изделия 30
Вопросы для самоконтроля 31
Дополнительная литература 31

Лекция 2. Геометрическое моделирование 33

Автоматизация черчения и геометрическое моделирование ... 34
Виды геометрического моделирования 35
Функции твердотельного моделирования 37
Декомпозиционные модели 38
Конструктивные модели 39
Граничные модели 40
Корректность граничных моделей 42

Пакеты геометрического моделирования
и их функциональность 43
Вопросы для самоконтроля 44
Дополнительная литература 44

Лекция 3. Базовые геометрические объекты 45

Аффинное пространство и соглашение о нотации 46
Способы задания аналитических кривых и поверхностей 46
Изометрии аффинного пространства 48
Матричное представление трансформации в аффинном
пространстве 49
Однородные координаты 50
Углы Эйлера 51
Экспоненциальное представление трансформации 52
Вопросы для самоконтроля 53
Дополнительная литература 54

Лекция 4. Инженерные кривые и поверхности ... 55

Кусочные кривые и их гладкость 56
Билинейный лоскут 56
Поверхности сдвига и вращения 56
Линейчатая поверхность 57
Лоскут Кунса 57
Эрмитова кривая, бикубическая поверхность и лоскут
Фергюсона 58
Кривые и поверхности Безье 61
Алгоритм де Кастельжо 62
B-сплайны и B-сплайновые поверхности 63
Рациональные кривые и поверхности 64
Интерполяционные кривые и поверхности 65
Вопросы для самоконтроля 65
Дополнительная литература 66

Лекция 5. Обмен геометрическими данными 67

Стандарты обмена геометрическими данными 68
Формат IGES 68
Формат DXF 70

Формат STEP 70
Мозаичные модели 71
Формат STL 72
Формат VRML 73
Поверхности подразделения 73
Вопросы для самоконтроля 79
Дополнительная литература 79

Лекция 6. Вариационное моделирование: алгебраический подход 81

Параметры, ограничения и вариационные модели 82
Создание эскизов и проектирование сборок 82
Задача размещения геометрических объектов и ее характеристики 83
Вариационный геометрический решатель 84
Способы алгебраического моделирования геометрической задачи 85
Метрический тензор геометрической задачи 86
Методы символьного упрощения систем алгебраических уравнений 87
Декомпозиция Далмеджа–Мендельсона 88
Метод Ньютона–Рафсона 89
Решение систем линейных уравнений 91
Методы координатного и градиентного спуска 92
Вопросы для самоконтроля 93
Дополнительная литература 93

Лекция 7. Вариационное моделирование: диагностика и декомпозиция задачи 95

Диагностика геометрических задач 96
Методы упрощения геометрических задач 96
Определение и классификация методов декомпозиции 97
Граф ограничений 97
Методы рекурсивного деления 98
Методы рекурсивной сборки 99
Формирование кластеров с помощью анализа графа ограничений 100

Формирование кластеров на основе шаблонов 102
Эвристическое формирование псевдокластеров 103
Распространение степеней свободы 103
Вопросы для самоконтроля 103
Дополнительная литература 104

Лекция 8. Инженерия знаний в САПР 105

Параметрическое проектирование на основе конструктивных элементов 106
Инженерные параметры 108
Отношения базы знаний 109
Параметрическая оптимизация 110
Экспертные знания и продукционные системы 112
Вопросы для самоконтроля 113
Дополнительная литература 114

Лекция 9. Методы поиска и оптимизации решения 115

Задачи удовлетворения ограничениям и оптимизации в ограничениях в общей постановке, их связь 116
Классификация методов поиска и оптимизации решения 117
Метод координатного спуска 118
Метод градиентного спуска 118
Жадный алгоритм 119
Метод Ньютона 119
Методы перебора 120
Методы редукции областей 121
Метод ветвей и границ 123
Алгоритм модельной закалки 124
Генетические алгоритмы 125
Вопросы для самоконтроля 126
Дополнительная литература 126

Лекция 10. Инженерный анализ кинематики 127

Прямая и обратная задачи кинематики механизмов 128
Виды кинематических пар 128

Моделирование механизмов 131
Геометрические измерения 131
Моделирование задачи кинематики 132
Дифференциальное уравнение движения 133
Натуральный градиент уравнения 134
Алгоритмы численного решения дифференциальных уравнений 135
Планирование движения 136
Вопросы для самоконтроля 137
Дополнительная литература 138

Лекция 11. Инженерный анализ динамики 139

Задача анализа динамики механизмов 140
Движение абсолютно твердого тела в трехмерном пространстве 140
Моделирование контакта тел 142
Альтернативный подход: уравнения Лагранжа 143
Методы определения столкновений 145
Алгоритмы широкой фазы 145
Алгоритмы фазы сужения 147
Коммерческое программное обеспечение для симуляции движения 148
Вопросы для самоконтроля 148
Дополнительная литература 149

Лекция 12. Инженерный анализ методом конечных элементов 151

Конечно-элементный анализ 152
Введение в метод конечных элементов 152
Анализ упругости тела 152
Тензор деформаций 153
Тензор напряжений 154
Обобщенный закон Гука, матрицы жесткости и упругости 155
Уравнение равновесия тела под нагрузкой 157
Применение МКЭ для расчета малых напряжений тела под нагрузкой 157
Другие приложения МКЭ 159
Типы конечных элементов 159

Разбиения для МКЭ 160
Общая схема конечно-элементного анализа в CAE-системах 161
Коммерческие пакеты конечно-элементного анализа 162
Вопросы для самоконтроля 162
Дополнительная литература 164

Лекция 13. Автоматизация производства 165

Архитектура станков с ЧПУ 166
Принципы программирования для станков с ЧПУ 167
Языки программирования высокого уровня для станков с ЧПУ .. 168
Генерация программ для станков с ЧПУ по CAD-моделям 170
Быстрое прототипирование и изготовление 171
Виртуальная инженерия 173
Вопросы для самоконтроля 173
Дополнительная литература 174

Лекция 14. Технологическая подготовка производства 175

Интеграция CAD и CAM 176
Задачи инженера-технолога 176
Модифицированный подход к технологической подготовке 177
Групповая технология 178
Классификация и кодирование деталей 178
Генеративный подход к технологической подготовке 180
Конструкторско-технологические элементы 181
Методы автоматического распознавания конструктивных элементов 182
Пример автоматического распознавания КТЭ 185
Вопросы для самоконтроля 185
Дополнительная литература 186

Лекция 15. Управление данными на протяжении жизненного цикла изделия 187

Системы управления данными об изделии 188
Цифровой макет изделия (DMU) и спецификация материалов (BOM) 188

Примеры PDM-систем 189
Программное обеспечение для организации бизнес-процессов 189
Из чего состоит PLM? 191
Интеграция PLM с системами управления отношениями с заказчиками 193
Интеграция PLM с системами управления цепочками поставок 194
Интеграция PLM с системами управления ресурсами предприятия 195
Практические подходы к интеграции систем PLM с CRM, SCM и ERP 197
Преимущества внедрения систем PLM 199
Вопросы для самоконтроля 200
Дополнительная литература 201

Краткий англо-русский словарь аббревиатур в области автоматизации проектирования и производства 202

Список литературы 205

Лекция 2

Геометрическое моделирование

Автоматизация черчения
и геометрическое моделирование ... 34
Виды геометрического
моделирования 35
Функции твердотельного
моделирования 37
Декомпозиционные модели 38
Конструктивные модели 39
Граничные модели 40
Корректность граничных моделей 42
Пакеты геометрического
моделирования
и их функциональность 43
Вопросы для самоконтроля 44
Дополнительная литература 44

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 известных 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. (Основными понятиями графических моделей таких систем являются графические *примитивы с атрибутами*, отображаемые *уровни*, а также различные *способы конструирования*.) В нашем курсе мы не будем рассматривать системы этого класса, так как в настоящее время они стремительно уступают свои позиции системам трехмерного моделирования (даже Autodesk делает основную ставку не на AutoCAD, а на Inventor Series).

Дело в том, что 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 напря-

мую 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, которые мы разберем детально ниже.

Виды геометрического моделирования

Хронологически различают следующие подходы к геометрическому моделированию:

- каркасное моделирование;
- поверхностное моделирование;
- твердотельное моделирование;
- немногообразное 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, как это видно на приведенном рис. 2.

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. Более подробно средства поверхностного моделирования (различные виды задания кривых и поверхностей) рассматриваются в материале следующих лекций.

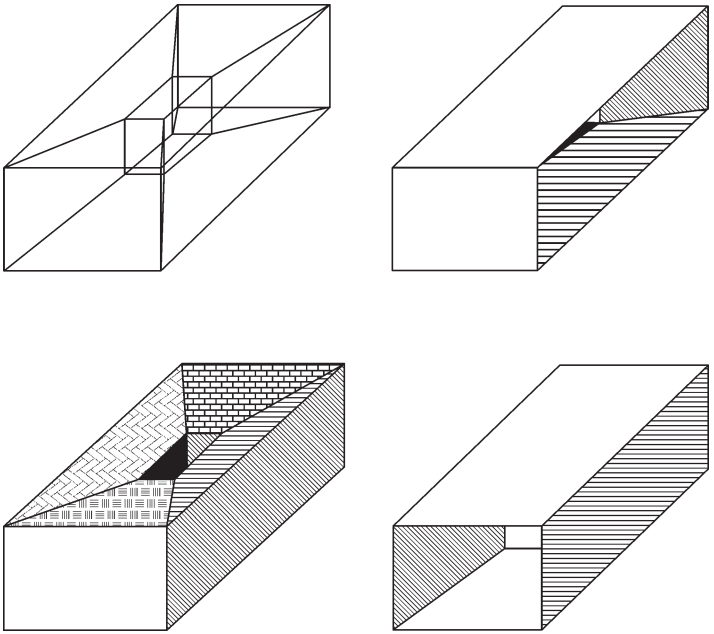


Рис. 2

Твердотельное (объемное) моделирование – логическое развитие каркасного и поверхностного. Основной объект моделирования – трехмерное объемное тело, которое может описываться разными способами: декомпозиционным, конструктивным или граничным. Мы разберем их подробнее ниже. 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).

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.

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. Результаты применения булевых операций к двум твердым телам (куб и сфера) можно видеть на рис. 3.

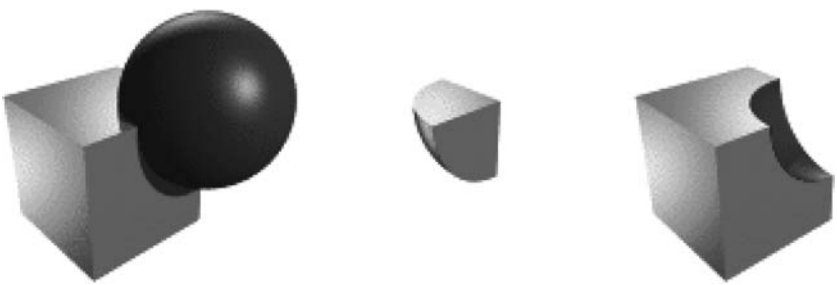


Рис. 3

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 CAD-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.

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 вокселом (voxel – от VOlume piXEL). Вокселы равномерно покрывают всю область (прямоугольный параллелепипед), в которой содержится моделируемое тело. Соответственно, те вокселы, 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 вокселов. На воксельном представлении несложно вычислять объемные параметры тела – достаточно лишь вычислить их аналитически для каждого воксела и просуммировать.

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 непринадлежащим описываемому телу;
- частично пересекающимся с описываемым телом.

Первые два типа узлов – терминальные (листья в октантном дереве), а каждый узел третьего типа обязательно имеет 8 дочерних узлов, соответствующих геометрическому разбиению его куба на 8 частей (октантов) – рис. 4.

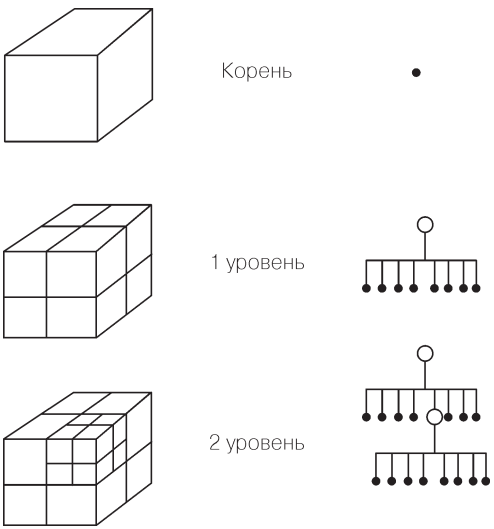


Рис. 4

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

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

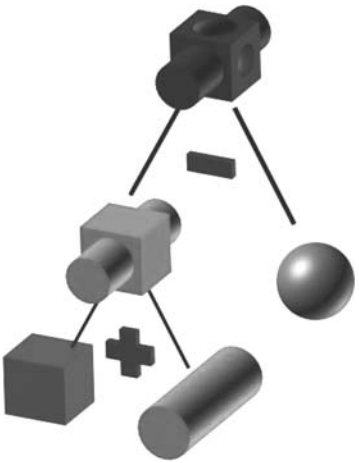


Рис. 5

заново сконструировать изделие, поэтому подобный подход к моделированию называется конструктивным.

CSG (constructive solid geometry)-модели реализуют конструктивный подход в терминах булевых операций над параметрическими твердотельными примитивами (прямоугольный параллелепипед, цилиндр и пр.). CSG-модели обычно представляются в виде дерева, у которого все листья являются примитивами с указанными размерами, а каждая нетерминальная вершина является либо аффинной трансформацией (переносом или вращением), либо булевым оператором. И трансформация, и оператор применяются к вершинам-потомкам. Пример CSG-дерева приведен на рис. 5.

Реализация булевых операций для конструктивных моделей, основанных на дереве CSG, достаточно прямолинейна – ведь для этого всего лишь нужно соединить (сконкатенировать) два дерева в одно, используя новый узел, символизирующий конкретную операцию. Никаких вычислений такой алгоритм не подразумевает.

Нетрудно составить алгоритм перевода CSG-дерева в октантное дерево, алгоритм трассировки луча (для отрисовки CSG-дерева на дисплее), а также алгоритм упрощения дерева (устранения из него лишних узлов).

Расчет объемных параметров выполняется простым обходом дерева. Для терминальных узлов (представляющих собой примитивные тела) расчет объемных параметров выполняется аналитически, для нетерминальных (трансформаций и булевых операций) требуется лишь выполнить арифметические действия над вычисленными параметрами дочерних узлов.

Граничные модели

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 *BRep*:

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

Разберем одну из самых популярных структур – *полуреберную*, основанную на том простом факте, что каждое ребро границы твердого тела принадлежит ровно двум граням (рис. 6).

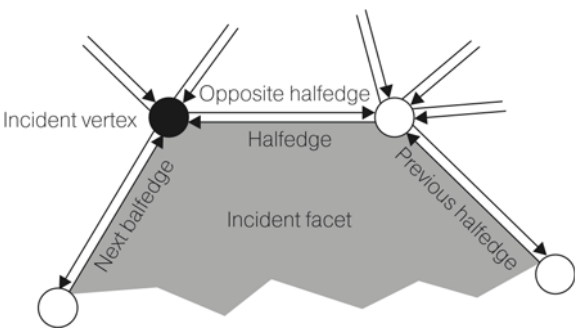


Рис. 6

Структуры данного представления таковы:

- список *тел* (solid), каждое тело состоит из списка его *граней* (faces), *ребер* (edges) и *вершин* (vertices);
- грань состоит из *колец* (loop), представляющих собой внешнюю границу грани, а также ее опциональные внутренние границы;
- кольцо состоит из списка *полуребер* (halfedges);
- полуребро указывает на начальную вершину и следующее полуребро, а также на свое ребро;
- ребро хранит указатели на два своих полуребра.

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, основанные на формуле Эйлера–Пуанкаре.

К топологическим элементам граничной модели применимо следующее равенство, называемое *формулой Эйлера–Пуанкаре*:

$v - e + f = 2(s - h) + r,$

где v – число вершин, e – число ребер, f – число граней, s – число тел, h – число сквозных отверстий в телах, r – количество внутренних границ (колец) в гранях.

При модификации топологии граничной модели используют операторы Эйлера, которые добавляют в модель (или удаляют из нее) топологические элементы, сохраняя в силе формулу Эйлера–Пуанкаре. Ниже приведен популярный набор операторов Эйлера (табл. 1).

Таблица 1

Оператор	V	e	f	h	s	r	Описание
mvfs	+1	0	+1	–	+1	0	создать вершину, грань, тело
mev	+1	+1	0	0	0	0	создать ребро, вершину
mef	0	+1	+1	0	0	0	создать ребро, грань
kemr	0	–1	0	0	0	+1	удалить ребро, создать кольцо
kfmrh	0	+1	–1	+1	0	0	удалить грань, создать кольцо, отверстие
kvfs	–1	0	–1	0	–1	0	удалить вершину, грань, тело
kev	–1	–1	0	0	0	0	удалить ребро, вершину
kef	0	–1	–1	0	0	0	удалить ребро, грань
mekr	0	+1	0	0	0	–1	создать ребро, удалить кольцо
mfkrh	0	–1	+1	–1	0	0	создать грань, удалить кольцо, отверстие

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 BRep-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.

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 CAD-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 Systémes) 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 немногообразного моделирования. Обычно родственные интерфейсы группируются в модули, среди которых выделяют:

- базовые типы и операции;
- моделирование топологии;
- геометрические объекты и операции над ними;