



SolidWorks

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИНЖЕНЕРНОЙ ПРАКТИКЕ

Прочность, устойчивость,
колебания
COSMOSWorks,
COSMOSDesignSTAR

Аэрогидродинамика
и теплопередача
COSMOSFloWorks, EFD.Lab

Кинематика и динамика
механических систем
COSMOSMotion

Оптимизация конструкций
COSMOSWorks Optimization

Разработка изделий
из листового металла
SolidWorks, BlankWorks

Проектирование типовых
элементов механических систем
SolidWorks Toolbox, GearTrax

Светотехнический анализ
и проектирование
TracePro, ReflectorCAD



SolidWorks

**КОМПЬЮТЕРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ИНЖЕНЕРНОЙ ПРАКТИКЕ**

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2005

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-018.2
А60

Алямовский А. А. и др.

А60 SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике /
Авторы: Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В.,
Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. —
800 с.: ил.

ISBN 5-94157-558-0

Рассматриваются программы для инженерного анализа в совокупности с системой графического моделирования пакета SolidWorks. Описываются методики расчетов на прочность, устойчивость и колебания в приложениях COSMOSWorks, COSMOSDesignSTAR, аэродинамики, гидродинамики и теплопередачи на основе программ COSMOSFloWorks, EFD.Lab, кинематики и динамики механических систем посредством COSMOSMotion. Показана оптимизация конструкций с помощью COSMOSWorks Optimization. Дана методика разработки изделий из листового металла с использованием приложений SolidWorks, BlankWorks. Уделено внимание проектированию типовых элементов механических систем в программах SolidWorks Toolbox, GearTrax, светотехническому анализу и проектированию в приложениях TracePro, ReflectorCAD. Все методики проиллюстрированы реальными инженерными расчетами. На компакт-диске содержатся полноцветные версии иллюстраций и готовые примеры расчетов.

Для инженеров, студентов, аспирантов и преподавателей вузов

УДК 681.3.06
ББК 32.973.26-018.2

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Игорь Рыбинский</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Татьяна Лапина</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Игоря Цырульниковца</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 25.02.05.

Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 64,5.

Тираж 3000 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 194354, Санкт-Петербург, ул. Есенина, 5Б.

Санитарно-эпидемиологическое заключение на продукцию
№ 77.99.02.953.Д.006421.11.04 от 11.11.2004 г. выдано Федеральной службой
по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ГУП "Типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ISBN 5-94157-558-0

© Алямовский А. А. и др., 2005
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2005

Оглавление

Об авторах	8
Введение	9
Аудитория	10
Предназначение	11
Соглашения	12
Благодарности	13
Контактная информация	13
Глава 1. SolidWorks как база для инженерных приложений	14
1.1. Интегрированные CAD/CAE-системы	14
1.2. Твердотельное моделирование	16
1.3. Поверхностное и гибридное моделирование	17
1.4. Работа в сборке	18
1.5. Работа в режиме чертежа	20
1.6. Обмен графической информацией	20
Глава 2. Методы решения уравнений физики в механических САПР	22
2.1. Основы метода конечных элементов	22
2.1.1. Понятие конечного элемента	23
2.1.2. Построение программы МКЭ	26
2.1.3. Учет нелинейности в процедурах МКЭ	28
2.2. Метод конечных объемов	32
2.3. Методы оптимизации в инженерном анализе	38
2.3.1. Параметрические системы проектирования как элемент систем оптимизации	39
2.3.2. Базовые понятия нелинейного программирования	40
2.3.3. Алгоритм метода комплексов	45
2.3.4. Использование процедур оптимизации в САПР	49
2.4. Методы построения оптических моделей и расчета изображений	52
Глава 3. Структурная механика — линейная задача (COSMOSWorks)	57
3.1. Назначение	58
3.2. Теоретическая база	59
3.3. Интерфейс	60
3.4. Функциональные возможности	69
3.4.1. Базовые возможности анализа	69
3.4.2. Последовательность расчета	70
3.4.3. Свойства материалов	71
3.4.4. Граничные условия	71
3.4.5. Генерация сетки	72

3.4.6. Контактная задача	72
3.4.7. Решатели	72
3.4.8. Постпроцессор	72
3.4.9. Интерфейсы	73
3.4.10. Возможности версии 2005 года	73
3.5. Проектирование и расчет емкости	76
3.5.1. Постановка задачи	76
3.5.2. Подготовка геометрической твердотельной модели	77
3.5.3. Построение поверхностной модели	78
3.5.4. Анализ	79
3.5.5. Решение	80
3.6. Моделирование резьбового соединения	88
3.6.1. Постановка задачи	88
3.6.2. Анализ	88
3.6.3. Решение	89
3.6.4. Упрощенная модель резьбового соединения	94
3.6.5. Имитация затяжки болта	97
3.7. Проектирование фланца	104
3.7.1. Постановка задачи	104
3.7.2. Анализ	105
3.7.3. Решение	106
3.7.4. Модификация конструкции	115
3.8. Расчет трубопроводных конструкций	118
3.8.1. Постановка задачи	118
3.8.2. Подготовка геометрической твердотельной модели	120
3.8.3. Построение поверхностной модели	122
3.8.4. Анализ	123
3.8.5. Решение	124
3.9. Выводы	129

Глава 4. Структурная механика — нелинейная задача (COSMOSDesignSTAR, COSMOSWorks)

4.1. Назначение	132
4.2. Теоретическая база	133
4.3. Интерфейс	134
4.4. Функциональные возможности	134
4.4.1. Базовые возможности анализа	135
4.4.2. Последовательность расчета	135
4.4.3. Свойства материалов	136
4.4.4. Генерация сетки	137
4.4.5. Граничные условия	137
4.4.6. Контактная задача	137
4.4.7. Постпроцессор	137
4.4.8. Решатели	138
4.4.9. Интерфейсы	138
4.5. Восстановление геометрии трубных заготовок	139
4.5.1. Постановка задачи	139
4.5.2. Анализ	141
4.5.3. Решение	142

4.5.4. Анализ технологического процесса	153
4.5.5. Оценка влияния модификации на характеристики и прогноз функциональности.....	156
4.6. Выводы	162
Глава 5. Аэрогидродинамика и теплопередача	163
5.1. COSMOSFloWorks, EFD.Lab, EFD.V5	163
5.2. Кому и зачем нужны эти расчеты?	165
5.3. Возможности COSMOSFloWorks.....	169
5.3.1. Математическое моделирование физических процессов.....	170
5.3.2. Решение поставленной математической задачи	184
5.4. Взаимодействие с SolidWorks.....	191
5.4.1. Твердое тело и область, занятая текучей средой.....	193
5.4.2. Проект и конфигурация	205
5.4.3. Визуализация результатов в среде SolidWorks	207
5.4.4. Интерфейс COSMOSFloWorks.....	214
5.5. Решение задачи	222
5.5.1. Возможность решения задачи	222
5.5.2. Модификация модели SolidWorks.....	223
5.5.3. Создание проекта COSMOSFloWorks.....	225
5.5.4. Физические особенности	254
5.5.5. Задание граничных и начальных условий	261
5.5.6. Постановка целей проекта	296
5.5.7. Регулирование расчетной сетки	297
5.5.8. Управление процессом расчета	310
5.5.9. Просмотр результатов	327
5.5.10. Инструменты COSMOSFloWorks	357
5.5.11. Определение точности полученного решения	360
5.6. Стратегия решения задачи	366
5.6.1. Рекомендации по просмотру результатов	368
5.6.2. Основные ошибки пользователей	370
5.7. Вместо заключения	373
Глава 6. Проектирование элементов механических систем.....	377
6.1. Кулачки	377
6.1.1. Функциональные возможности и ограничения.....	378
6.1.2. Интерфейс	379
6.1.3. Практика использования.....	379
6.2. Проектирование и расчет балок	398
6.2.1. Функциональные возможности и ограничения.....	398
6.2.2. Интерфейс	399
6.2.3. Практика использования.....	399
6.3. Расчет подшипника.....	411
6.4. Toolbox Browser.....	413
6.5. GearTrax.....	416
Функциональные возможности и ограничения.....	417
Интерфейс	420
Практика использования.....	430
6.6. Выводы	453

Глава 7. Кинематика и динамика (COSMOSMotion)	455
7.1. Назначение	456
7.2. Теоретическая база	456
7.3. Интерфейс	457
7.4. Функциональные возможности	461
7.4.1. Возможности версии 2005 года	462
7.4.2. Команды программы	462
7.4.3. Интерфейс с COSMOSWorks	471
7.5. Моделирование кулачкового механизма	474
7.5.1. Постановка задачи	474
7.5.2. Анализ	475
7.5.3. Решение	476
7.5.4. Рассмотрение результатов	496
7.5.5. Модифицирование конструкции	501
7.6. Выводы	508
Глава 8. Листовой металл — развертки и заготовки (SolidWorks, BlankWorks)	510
8.1. Назначение	511
8.2. Теоретическая база	512
8.2.1. Развертки в SolidWorks	512
8.2.2. Развертки в BlankWorks	518
8.3. Функциональные возможности и ограничения	519
8.3.1. Листовой металл в SolidWorks	519
8.3.2. BlankWorks	528
8.4. Получение заготовки рычага	532
8.4.1. Постановка задачи	532
8.4.2. Анализ	533
8.4.3. Подготовка поверхностной модели	534
8.4.4. Решение	538
8.4.5. Выводы	540
8.5. Выводы	540
Глава 9. Светотехнический анализ и проектирование (TracePro, ReflectorCAD)	542
9.1. Назначение	542
9.2. Теоретическая база	544
9.3. Интерфейс	549
9.3.1. Дерево проекта	549
9.3.2. Меню	551
9.3.3. Панели инструментов	551
9.4. Функциональные возможности	557
9.4.1. Меню <i>File</i>	557
9.4.2. Меню <i>Edit</i>	560
9.4.3. Меню <i>View</i>	564
9.4.4. Меню <i>Insert</i>	572
9.4.5. Меню <i>Define</i>	588

9.4.6. Меню <i>Analysis</i>	632
9.4.7. Меню <i>Reports</i>	655
9.4.8. Меню <i>Tools</i>	657
9.4.9. Меню <i>Macros</i>	660
9.4.10. Меню <i>Window</i>	660
9.4.11. Меню <i>Help</i>	661
9.5. Последовательность анализа	662
9.5.1. Подготовка геометрической модели	662
9.5.2. Назначение оптических характеристик	668
9.5.3. Назначение источников света	669
9.5.4. Параметры вычислительного процесса	669
9.5.5. Представление результатов	671
9.6. Практика использования	683
9.6.1. Проектирование осветительных приборов	683
9.6.2. Оптимизация освещенности плоской поверхности	697
9.6.3. Модификация конструкции с учетом светотехнических параметров	710
9.6.4. Автоматизация проектирования и расстановки осветительных устройств ...	733
9.7. Выводы	771
Глава 10. Оптимизация работы механических САПР	772
10.1. Рекомендации по повышению производительности CAD-систем	772
10.1.1. Аппаратное обеспечение	772
10.1.2. Настройки операционной системы	776
10.1.3. Настройки SolidWorks	777
10.1.4. Специальные манипуляции	782
10.1.5. Использование сетевых дисков	782
10.2. Рекомендации по повышению производительности CAE-систем	782
10.2.1. Аппаратное обеспечение	783
10.2.2. Настройки операционной системы	783
10.2.3. Настройки расчетных программ	783
10.2.4. Использование сетевых дисков	784
10.3. Оптимальный выбор аппаратного обеспечения	784
10.3.1. Процессор и материнская плата	784
10.3.2. Оперативная память	786
10.3.3. Видеокарта	787
10.3.4. Жесткий диск	790
10.3.5. Монитор	790
10.4. Выводы	791
Приложение. Описание компакт-диска	792
Список литературы	793
Предметный указатель	795

Об авторах



Алямовский Андрей Александрович

Кандидат технических наук, доцент. Работал в Московском авиационном технологическом институте им. К. Э. Циолковского, специалист в области численных методов в механике композитов и конструкций.

В настоящее время руководитель направления CAD/CAE ЗАО "Системы комплексных решений".



Одинцов Евгений Владимирович

Руководитель отдела разработки программных продуктов ООО "НИКА Софтвр". Руководитель группы разработки генератора сеток.



Пономарев Николай Борисович

Кандидат технических наук по специальности "Механика жидкости, газа и плазмы". Специалист в области прикладной математики, газовой динамики и теплообмена.

Начальник сектора в ФГУП "Исследовательский Центр им. М. В. Келдыша" Федерального Космического Агентства.



Собачкин Александр Александрович

Кандидат физико-математических наук по специальности "Механика жидкости, газа и плазмы". Руководитель разработки программных продуктов фирмы ООО "НИКА Софтвр".



Харитонович Алексей Игоревич

Руководитель отдела технической документации в ООО "НИКА Софтвр".

Введение

Сейчас нет необходимости убеждать кого-либо в том, что компьютерное моделирование является необходимым инструментом создания современных технических объектов. Все более широкий круг предметов и явлений становятся объектами компьютерной симуляции. Она внедрилась практически во все сферы инженерной деятельности. Другая тенденция — расширение круга пользователей CAE (Computer Aided Engineering)-продуктов. Практически до конца 1990-х годов их эксплуатация была уделом узкого круга профессионалов, своего рода "гуру" в соответствующих вопросах. Но расширение области применения высокотехнологичных инструментов (бытовая техника, электроника, индустрия автомобильных компонентов, товары для спорта и отдыха, бытовая светотехника и т. д.) потребовало создания таких программ, которые были бы доступны квалифицированному инженеру и стали атрибутом стандартного рабочего места.

Несколько иная ситуация характерна для отечественной промышленности. Несмотря на солидный "объем производства" инженеров, квалифицированный персонал весьма непросто сначала подобрать, а потом обеспечить работой, требующей специальных навыков и способствующей их развитию. Технологический уровень российской промышленности, а также система организации производства таковы, что почва для процветания продуктов high-end не слишком подходящая. В то же время, налицо некоторое развитие (а точнее, восстановление) интереса к CAE-программам. База для этого — массовое распространение геометрических CAD (Computer Aided Design)-систем. Значительная доля предприятий использует технологию пространственного моделирования, для некоторых она является основным инструментом разработки конструкторской документации и — нередко — технологических процессов (характерный пример — создание программ для УЧПУ). Естественным является переход на следующий уровень — компьютерный анализ и проектирование. Здесь существуют два источника развития: потребности производства и нормальный человеческий интерес. Надо сказать, что второе может быть доминирующим. Наиболее логичный путь — освоение интегрированных приложений, сопровождаемое (нередко) овладением соответствующей теоретической базой.

Все программы, о которых пойдет речь в книге, являются так называемыми партнерскими приложениями к системе SolidWorks. Подробнее об этом речь пойдет ниже. Здесь же отметим, что это никоим образом не ограничивает круг объектов, которые исследуются программами, и, соответственно, контингент возможных читателей. Для наиболее популярных геометрических САПР разработаны соответствующие модификации расчетных модулей.

Среди авторов присутствуют разработчики программного обеспечения на базе SolidWorks, а также реселлеры упомянутых в книге продуктов. Ни та ни другая сфера деятельности не существуют в отрыве от инженерной практики, задач производства. Поэтому, декларируя определенную заинтересованность в продвижении упомянутых систем, мы постараемся на примере конкретных проблем показать их достоинства, не утаивая ограничений.

Аудитория

Прежде всего, авторы рассчитывают, что издание будет полезно инженерам-практикам, которые, имея дело с геометрическими САПР, сталкиваются с необходимостью выполнения анализа. В книге они найдут описание апробированных инструментов, информацию о соответствующих расчетных методиках.

Изрядная доля задач, иллюстрирующих программы, содержит элементы поиска. Эти аспекты могут заинтересовать аспирантов, специализирующихся в инженерных дисциплинах. Как сами по себе программы (в тех рамках, в которых они будут описаны), так и процесс их эксплуатации, строго говоря, не могут быть объектом исследования. Однако уровень их функциональности более чем достаточен для проверки гипотез, сопровождающих научные изыскания в технике. Более того, для рассмотрения выбраны продукты, ставшие в некотором смысле стандартами в соответствующих сферах применения. Соответственно, их изучение может стать своеобразным стимулом для собственных разработок.

Авторы надеются, что, попав в руки студента, книга окажется источником познавательной информации и средством расширить эрудицию. Тем более что компания SolidWorks-Russia в рамках программы содействия вузам SWR-Академия на специальных льготных условиях поставляет программное обеспечение (SolidWorks, COSMOSWorks, COSMOSFloWorks, COSMOSMotion и ряд других приложений SolidWorks) с целью поддержки процесса профессиональной подготовки студентов с использованием САПР и PDM. Данная программа охватывает учебные заведения России, стран СНГ, Средней Азии и Прибалтики. На момент сдачи рукописи в печать к программе SWR-Академия присоединилось уже более 20 организаций. Среди них: МГТУ им. Н. Э. Баумана, Московский государственный авиационный институт, Московский государственный энергетический институт, Омский ГТУ, Ханты-Мансийский институт дизайна и технологий, Каунасский технический университет, Донецкая государственная машиностроительная академия и многие другие.

Издание не претендует на роль источника фундаментальных знаний, ограничиваясь прикладными целями. В то же время большинство описанных методик вполне доступно студентам старших курсов и могут быть применены для выполнения дипломных работ. Польза возрастет многократно, если чтение данного текста будет сопровождаться изучением литературы, содержащей полноценную теоретическую базу.

Предназначение

Если непредвзято посмотреть на ситуацию с отечественной литературой в области компьютерного моделирования и анализа, можно сделать несколько выводов. Один из них связан с тем, что широкий пласт проблем в большей или меньшей степени исключен из рассмотрения. Это, в частности, задачи вычислительной аэрогидродинамики и теплопередачи, имитации технологических процессов, проектирования светотехники и оптических устройств. Данная тенденция в значительной степени противоречит тому, что происходит в продвинутых сообществах — использование соответствующих программных продуктов стало одной из составляющих технического прогресса.

В более же популярных сферах — геометрическом моделировании, структурной механике, расчете механических систем публикации группируются возле двух полюсов: с одной стороны — фундаментальные теоретические руководства, с другой — альтернатива в виде не слишком критических описаний с выраженным рекламным подтекстом. Последним грешит периодика. Более популярные журналы, имея бюджет, основанный на рекламе, не слишком заинтересованы в аналитических материалах. Круг же читателей специализированных изданий, по большей части ведомственных, вполне соответствует их тиражу. Есть и другие источники информации. Документация, сопровождающая программы, нередко содержит весьма показательные примеры. Но, по очевидным причинам, они стопроцентно успешны. Редкий разработчик адекватно опишет проблемы и ограничения. Кроме того, примеры нечасто выходят за рамки канонических задач, что, в общем-то, и неплохо. Именно они есть база для изучения явлений, не допускающих строгого решения. В последнее время многие фирмы — как производители, так и реселлеры — организовали соответствующие интернет-ресурсы, где помещена информация о конкретных задачах. Несмотря на ясную цель — рекламу и поиск заказчика, там можно найти заслуживающие внимания образцы исследований. Не менее очевидно и то, что все, находящееся между двумя моментами: формулировкой задачи и описанием решения удостаивается, в лучшем случае, только краткого упоминания.

В данной книге авторы постарались сопроводить описание программ примерами, иллюстрирующими вполне реальные инженерные задачи или этапы этих задач. Помимо этого процесс решения сопровождается более или менее подробным описанием методической стороны вопроса, что, надеемся, найдет понимание заинтересованного читателя. Эти рассуждения могут показаться тривиальными, однако моменты, очевидные при использовании аналитических методов, не всегда так однозначны, применительно к алгоритмам вычислительного анализа.

Описанные программы решают различные задачи, однако их рассмотрение в одном издании (помимо того, что почти все они, как упоминалось, обладают статусом партнерского приложения SolidWorks) оправдано рядом аргументов. Большинство из них базируется на методах вычислительной математики. Это порождает схожесть методик подготовки геометрических моделей, назначения исходных данных и интерпретации результатов. Многие программы имеют интерфейс между собой (минуя SolidWorks или другие конструкторские пакеты), а

множества типов задач для некоторых — пересекаются. Это, например, расчет на прочность на базе аналитических и численных методов, решение тепловой задачи посредством различных численных аппроксимаций. Одним из принципов отбора программ был принцип ориентированности на их использование конструктором. Инструменты технолога не рассматривались. Несомненно, в реальном производстве имеют место различные схемы организации труда, но вопросы сугубо технологического характера — они касаются процессов обработки материала — можно вычлениить и отделить вполне уверенно.

Поскольку книга претендует на определенную системность описания программ и методик их использования, несомненно, что степень подробности в освещении функциональности продуктов не может быть равноценна. Здесь авторы придерживались ориентации на тщательное изложение наиболее актуальных аспектов, а менее популярные вопросы только формулируются и не сопровождаются примерами. Например, среди задач аэрогидродинамики и теплопередачи жизненность вопроса расчета тепловых режимов электротехнических устройств относительно проблемы сверхзвукового течения несопоставима (по крайней мере, для отечественной промышленности). Между тем, обе они решаются одной и той же программой. Похожий пример — проектирование светотехники и моделирование процессов волновой оптики. Первая — предмет повседневной деятельности многих инженеров, вторая — возникает только эпизодически. Инструмент же для них тождественен.

На отбор рассматриваемых вопросов наложили отпечаток личные пристрастия авторов, наличие подходящих примеров, а также, не скроем, желание посредством данной книги сформировать спрос на описанные программы. В то же время, абсолютное большинство сведений являются вполне инвариантными относительно сопоставимых программных решений.

Еще одно замечание касается объема и степени детализации теоретической базы рассматриваемых методов. Руководствуясь названием книги и здравым смыслом, изложение теории ограничивается основами, которые необходимы для эксплуатации программ: формализации задачи, обеспечения эффективного вычислительного процесса, интерпретации результатов. Фундаментальные знания следует получать из специальных источников.

В книге также затронуты вопросы подбора компьютерной техники для эксплуатации CAD/CAE-продуктов. Мы надеемся, что приведенные рекомендации будут полезны в профессиональной деятельности читателей.

Соглашения

Для SolidWorks имеется русскоязычная версия. Поскольку именно ее традиционно используют в России, то за редким исключением команды и меню SolidWorks приводятся на русском языке.

Для COSMOSWorks также есть русскоязычная версия. Однако она содержит ряд некорректно переведенных терминов. По этой причине в России используется

также англоязычная версия программы. Поэтому практически всегда мы будем сопровождать русские термины их оригинальным вариантом, который дается в скобках. Кроме того, некоторые серьезные неточности перевода будут исправлены в замечаниях, расположенных в тексте.

Другие программы пока не имеют русскоязычного интерфейса и фирменного перевода технической документации. Поэтому команды, пункты меню и термины, встречающиеся в них, приведены на английском языке, а русский перевод дается в скобках при первом упоминании той или иной команды, а впоследствии — в случаях, когда это облегчает понимание описываемых процессов. При решении прикладных задач перевод иногда не приводится. Некоторые технические термины, имеющие установившиеся аналоги в русском языке, после перевода используются только в русскоязычном варианте.

Расчеты выполняются для геометрических моделей, построенных посредством SolidWorks. Предполагая, что читатель, по крайней мере, в общих чертах, знаком с этой программой (надо сказать, что для чтения вполне хватит первичных познаний), мы не будем рассматривать элементарные построения. Однако в ситуациях, когда геометрия "управляет" расчетом, является результатом расчета или же получена посредством специфических приемов, процесс ее формирования будет приведен достаточно подробно.

При описании работы с мышью слова "щелчок" ("щелкнуть") и "двойной щелчок" ("дважды щелкнуть") подразумевают нажатие левой кнопки мыши.

Благодарности

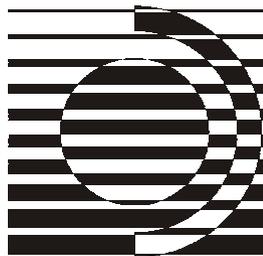
Авторы благодарны своим коллегам — сотрудникам фирм ЗАО "СИКОР" (Москва) и ООО "NIKA Software" (Москва) — за помощь в реализации проекта. Отдельное спасибо персоналу фирмы SolidWorks-Russia за консультации по вопросам, связанным с SolidWorks.

Некоторые геометрические модели изделий, а также их расчеты, рассматриваемые в книге, выполнены в процессе взаимодействия с фирмами и предприятиями. Авторы выражают признательность сотрудникам этих организаций за помощь. Если используется информация, представляющая существенный интерес, мы упоминаем эти случаи.

Контактная информация

Авторы будут благодарны читателям за пожелания и замечания по данной книге и по теме CAD/CAE. Направляйте ваши письма в адрес редакции (mail@bhv.ru) и по рабочим адресам авторов (sikor@sikor.ru, alex@nika.sokol.ru). Для менее формальных комментариев и общения можно использовать личные почтовые ящики авторов (А. А. Алямовский — a_a_a@rbcmail.ru, Н. Б. Пономарев, А. И. Харитонович — alharit@nika.sokol.ru). Информация об обновлениях программных продуктов, примеры решения задач, другие вопросы, связанные с темой CAD/CAE, доступны на Web-сайтах <http://www.sikor.ru>, <http://www.nika.biz>.

ГЛАВА 1



SolidWorks как база для инженерных приложений

В этой главе мы кратко рассмотрим особенности использования системы SolidWorks как основы построения интегрированной среды моделирования и анализа.

1.1. Интегрированные CAD/CAE-системы

В последнее время четко обозначилась тенденция группирования инструментов геометрического моделирования и расчетных программ в интегрированные системы. Одной из фирм, положивших начало этому процессу, была PTC (Parametric Technology Corporation), внедрившая в продукт Pro/Engineer модули расчета на прочность методом конечных элементов, процедуры кинематического и динамического анализа. Однако поскольку PTC помещала "внешние" продукты в базовую систему под своей торговой маркой (покупая авторские права или же на основе партнерских соглашений), ограничивая при этом доступ к интерфейсу разработки приложений (API) для "свободных" разработчиков, то номенклатура приложений практически не расширялась. Фирма Dassault Systems также внедрила в Catia V4 модуль расчета на прочность методом конечных элементов, причем его функциональность позволяла решать широкий круг задач и была на момент начала девяностых годов сравнима с той, которую имели универсальные пакеты конечно-элементного анализа. Однако сторонние разработчики не могли получить доступ к процедурам программирования без согласия владельца базового пакета, требовалось также приобретение лицензий на работу с процедурами API. Кроме того, развитие прикладных приложений сдерживалось дороговизной как самой CAD-системы, так и аппаратных средств — графических рабочих станций на базе RISC-процессоров.

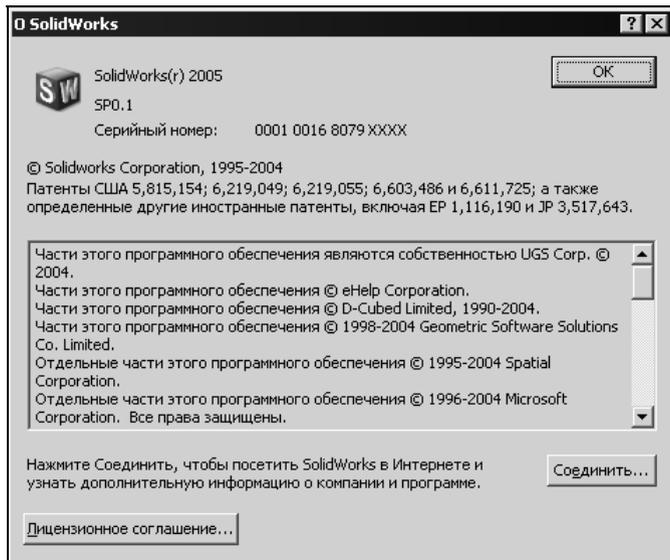


Рис. 1.1. Информационная панель SolidWorks

Ситуация изменилась с появлением системы SolidWorks (информационная панель программы показана на рис. 1.1), которая практически с момента рождения имела открытый API. На первом этапе это стимулировало разработчиков, которые создавали новые продукты или развивали уже существующие, но имеющие примитивный интерфейс пользователя. Функциональная графическая среда и доступ к математическому аппарату для обработки геометрии радикально ускоряли создание коммерческих программ. При этом разработчики не были обязаны, по крайней мере до этапа коммерческой реализации, вступать в какие-либо официальные отношения с фирмой SolidWorks (за исключением, разумеется, приобретения лицензии на программу). С начала нового тысячелетия развитие интегрированных систем пошло в режиме самовозбуждения. SolidWorks стал крайне популярен, вовлекая в свою орбиту тысячи новых пользователей. В то же время, "самостоятельные" САЕ-системы подошли к некоему "порогу насыщения" рынка, когда практически все профессиональные расчетчики уже обзавелись какой-либо программой. Поэтому фирмы-производители стали рекрутировать новых потребителей из среды инженеров-проектировщиков, внедряясь в массовые системы проектирования через создание "сопутствующих" инструментов. Сейчас остались считанные единицы расчетных программ, которые не имели бы в большей или меньшей степени усеченного (или, если более корректно, адаптированного) варианта, функционирующего как приложение SolidWorks или какой-либо другой САД-системы. Последняя, очевидно, должна иметь достойную внимания пользовательскую базу. Процесс зашел настолько глубоко, что

сначала в SolidWorks 2003 появились "бесплатные" модуль COSMOSXPress, являющийся инструментом расчета на прочность начального уровня, и модуль Физическая динамика, предназначенный для "оживления" сборок. Версия 2005 года обогатилась процедурой MoldflowXpress, выполняющей элементарную оценку проливаемости форм при изготовлении тонкостенных деталей из термопластов. Можно, конечно, дискутировать о степени адекватности результатов, получаемых подобными фрагментами "больших" систем, однако маркетинговая эффективность несомненна и взаимна: SolidWorks приобретает имидж всеохватывающего орудия, а пользователь ненавязчиво втягивается в сферу влияния производителей инженерных программ.

Тем не менее работа в интегрированной среде проектирования и расчета, помимо потенциального улучшения результата, является весьма увлекательным занятием. Это требует новых навыков, связанных с организацией рационального взаимодействия нескольких инструментов. Рассмотрим некоторые возможности SolidWorks, обеспечивающие эффективное использование расчетных приложений.

1.2. Твердотельное моделирование

SolidWorks изначально создавалась как система твердотельного параметрического моделирования. Программа содержит всю необходимую номенклатуру инструментов, причем некоторые возможности крайне эффективны для разработки объектов, ориентированных на последующее использование программ расчета. Это проектирование изделий из листового материала, сварные детали. Они позволяют получить модели, весьма близкие к требованиям данных инструментов. Подмножество функций, ориентированных на работу с криволинейными объектами: инструменты сплайнов, команды создания тел, имеющих криволинейные поверхности, процедуры обеспечения гладкости, построения сопряжений, позволяют — в абсолютном большинстве случаев — с приемлемой точностью готовить модели для аэрогидродинамического анализа или светотехники (в задачах расчета на прочность качество представления поверхности несколько менее принципиальный фактор).

Начиная с версии 2003 года, в SolidWorks появился многотельный режим. Он существенно расширил возможности пользователя при создании геометрических моделей. Однако далеко не все расчетные системы поддерживают эту функциональность. Например, COSMOSMotion обрабатывает многотельные детали, начиная с версии 2005 года. COSMOSWorks 2005 не в состоянии рассчитывать такие объекты ни в режиме детали, ни при анализе сборок.

SolidWorks позволяет создавать конфигурации объектов. Интегрированные модули в абсолютном большинстве адекватно обрабатывают эту функциональность, позволяя рассчитывать разнообразные исполнения расчетных мо-

делей, а, например, COSMOSWorks 2005 способен одновременно отображать результаты нескольких расчетов. Кроме того, параметрическое представление геометрии в CAD-системе позволило органично включить в COSMOSWorks модуль параметрической оптимизации, а также инструмент сценариев проектирования. Последние предназначены для изучения того, как влияет изменение формы, граничных условий, типов материалов и т. д. на свойства конструкции. Упомянув о материалах, отметим, что одно из направлений развития SolidWorks, связанное с более полным учетом "визуальных" свойств материалов, нашло логическое продолжение в интегральной базе данных, включающей как информацию о цвете, прозрачности, текстуре, так и плотности, характеристиках упругости и прочности (в версии продуктов 2005 года общим является подмножество характеристик, описывающих упругие свойства).

Даже перечислить все возможности SolidWorks, которые могут быть полезны при создании расчетных моделей, очень трудно. Мы рекомендуем обратиться к документации программы, поскольку квалифицированная работа с приложениями требует уверенного владения базовой функциональностью.

1.3. Поверхностное и гибридное моделирование

По сравнению с системами аналогичного уровня SolidWorks имеет наиболее развитые возможности для создания и редактирования поверхностей, а также совместной обработки поверхностей и твердых тел. Поверхностное представление геометрии активно используется в COSMOSWorks для создания на этой базе оболочечных расчетных моделей. Также присутствуют функции для автоматизированного вычленения срединной поверхности для твердотельных объектов, которые целесообразно рассчитывать по оболочечной модели. SolidWorks обладает всеми необходимыми инструментами для доводки получившихся результатов согласно условиям расчетных программ. Кроме того, сам COSMOSWorks в состоянии генерировать сетку оболочечных элементов на базе срединных поверхностей. Эта функция — плод совместной деятельности фирм SRAC и SolidWorks. Разумеется, при создании исходного проекта должны соблюдаться определенные условия для ее эффективного функционирования. Также интеграция программ подразумевает передачу части работы, связанной с подготовительными операциями при создании сетки конечных элементов, на SolidWorks. Именно его функции следует задействовать для модификации поверхностей с целью создания корректных сеток из оболочечных элементов.

В детали SolidWorks может присутствовать как твердотельная, так и поверхностная информация. Интегрированные расчетные модули естественным об-

разом учитывают это обстоятельство. Некоторые, например, COSMOSWorks могут обрабатывать в одной расчетной модели только один тип геометрии, однако то, что для построения, например поверхности, использовались твердые тела, для программы абсолютно безразлично.

То же можно сказать про приложение BlankWorks, где источником информации может быть как совокупность поверхностей, так и грани тел. Весьма простой интерфейс данной программы подразумевает активное использование функциональности SolidWorks для подготовки подходящей исходной информации. Если, например, в COSMOSWorks и COSMOSFloWorks для создания сеток присутствует функциональность, позволяющая в той или иной степени управлять этим процессом, то BlankWorks полностью "полагается" на результат работы SolidWorks.

Гибридные геометрические модели активно используются в задачах светотехнического анализа и проектирования. Здесь разделение функций следующее. Если объект является отражателем, причем имеет при этом сложную форму, как, например, сегментная фара, то как для оператора при ее проектировании (с точки зрения светотехнических характеристик), так и для программы расчета более рационально иметь поверхностное представление. После удовлетворения функциональных требований на его базе можно построить объемную модель, которая будет использоваться для компоновки, разработки оснастки и т. д. При сохранении ассоциативной связи между разными представлениями одного и того же изделия процесс модификации не вызывает затруднений. Нередко возникает обратная задача: расчет готового изделия с целью дальнейшего использования результатов (например, если создается осветительная система с несколькими одинаковыми источниками света). Тогда для упрощения анализа можно вычленить рабочие поверхности и именно их передавать в расчетную программу. Нередки случаи, когда вся сборка светотехнического устройства формируется в файле единственной детали, а затем транслируется в программу светотехнического расчета. Не всегда это оправданно, но возможности программ такой образ действий не отвергают.

1.4. Работа в сборке

SolidWorks обладает самыми разнообразными возможностями для создания и модификации сборок. Расчетные приложения, соответственно, эту функциональность учитывают. Как и для моделей твердотельных и поверхностных деталей, ответственность за корректную подготовку исходных данных для сборок в подавляющей части возлагается на CAD-систему. Это значит, что взаимное положение деталей как в смысле геометрии, так и в том, что касается назначения параметров их взаимодействия в физической модели, должно

определяться посредством сопряжений. В явном виде они ни в одну программу, за исключением COSMOSMotion, не транслируются. Расчетные модули имеют дело исключительно с геометрией, но не с семантикой. COSMOSMotion в данном ряду является исключением. Его математический аппарат допускает отсутствие в модели сборки связи между деталями, но при этом операции, по сути идентичные тем, которые выполняются в SolidWorks, придется производить в процессе формирования механизма.

Визуализацию кинематики сборки можно получить в SolidWorks, не прибегая к дополнительным инструментам. Приводить ее в движение можно мышью или же посредством функции Физическая динамика. Доступны команды для проверки интерференции как в статическом, так и в динамическом состоянии, а также возможность визуализации движения, сопровождаемого входом деталей в контакт и выходом из контакта. Поэтому рекомендуется подвергнуть сборку проверке инструментами SolidWorks, а уже затем использовать расчетные процедуры. Все они весьма чувствительны к присутствию интерференции деталей.

Последние версии SolidWorks обладают развитым набором команд для преобразования детали в сборку. Оно может осуществляться в режиме автоматизированного расчленения одного тела, а также базироваться на многотельном представлении. Такая схема построения исходных данных позволяет строить расчетную модель сборки, ассоциативно связанную с единственной деталью. Это весьма удобно, когда расчетная механическая модель предполагает контактное взаимодействие деталей с одинаковыми или различными физическими свойствами или же выполняется тепловой расчет с различными теплофизическими характеристиками материалов. Разумеется, можно изначально строить и рассчитывать сборку из "самостоятельных" деталей, однако, например, сварные конструкции иногда проектируются в режиме детали с последующей трансформацией в сборку.

COSMOSWorks и COSMOSFloWorks имеют набор опций для визуализации сборки в состоянии расчленения или в частично прозрачном состоянии с одновременным наложением диаграмм результатов. Эти команды также реализованы на базе возможностей SolidWorks.

Актуальным является вопрос о моделировании сборок, содержащих большое число деталей. Здесь следует выделить два аспекта. Первый связан с базовой функциональностью SolidWorks для построения геометрической модели. Здесь возможности программы непрерывно наращиваются, и в настоящее время большинство проблем в сборках с несколькими тысячами несложных деталей вполне решаемы при наличии адекватного аппаратного обеспечения. Кроме того, можно редактировать модели в режиме сокращенной сборки. Второй аспект связан с расчетом конструкций, состоящих из большого числа деталей. Здесь могут пригодиться возможности SolidWorks, позволяющие

создавать специальные расчетные конфигурации сборок, в которых "нефункциональные" объекты отсутствуют (погашены), а оставшиеся специальным образом модифицированы с целью упрощения их геометрии. Более подробные рекомендации по увеличению производительности при использовании CAD/CAE-систем приведены в *главе 10*.

1.5. Работа в режиме чертежа

Ни одна из рассматриваемых программ не работает с чертежами. Однако некоторые технологические приложения, например, программы оптимального раскроя, создания программ УЧПУ для резки листового металла, в качестве исходной информации могут использовать как данные о развертке детали из листа, так и непосредственно чертежи. Кстати говоря, одной из новых возможностей SolidWorks 2005 является наличие прямого редактора DWGEditor для обработки DXF/DWG-файлов. Подчеркнем, что SolidWorks обладает всеми возможностями для оформления чертежей во многих системах стандартов, включая ЕСКД.

1.6. Обмен графической информацией

Один из источников быстрого распространения SolidWorks среди пользователей состоял в том, что программа имела широкий выбор трансляторов из популярных CAD-систем, а также универсальных графических форматов. Затем их число расширялось за счет новых интерфейсов, а для имеющихся инструментов выполнялась актуализация. Полная номенклатура входных форматов показана на рис. 1.2. Здесь обратим внимание, что возможность считывания файлов, созданных прикладными программами, зависит от их версии. Кроме того, файлы, созданные Catia V5 (они имеют расширение sgr), несут исключительно иллюстративную информацию и непригодны для их модификации или использования в составе сборки (трансляторы, которые осуществляют подобный перенос информации, существуют, однако в данной книге не рассматриваются). Для Mechanical Desktop и Pro/Engineer возможно полное или частичное (в зависимости от того, какие инструменты базовой системы были использованы) воссоздание дерева построения модели. Отметим, что импорт с семантикой реализован, как правило, для не слишком свежих версий программ-источников. В то же время аппарат обработки нейтральных форматов построен на последних релизах соответствующих продуктов, причем обновления версий графических файлов отслеживаются в пакетах обновлений (Service Packs) SolidWorks.

Побочным, но, как оказалось, очень важным следствием наличия развитых возможностей обмена графическими файлами, явилась простота (разумеется,

относительная) организации интерфейса между прикладными программами и SolidWorks. Те из разработчиков программ, которые имеют достаточно ресурсов или же не имеют собственной графической оболочки, идут по пути интеграции своего математического аппарата и SolidWorks, используя, разумеется, процедуры API. Другой вариант, когда организуется скрытый от пользователя конвертор, позволяющий преобразовывать пространственную модель из Parasolid в формат прикладной программы напрямую или же через промежуточную модель, имеющую, например, формат STEP. В подавляющем числе случаев эти преобразования осуществляются посредством математики, имеющейся в SolidWorks.

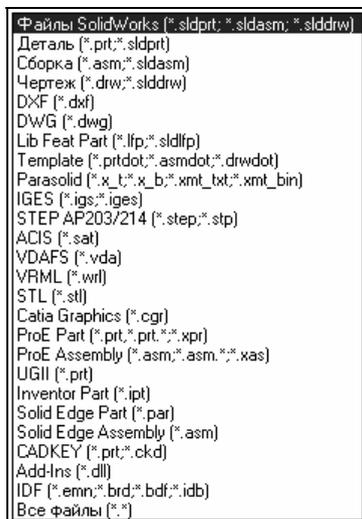
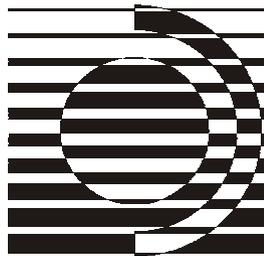


Рис. 1.2. Форматы графических файлов, доступные для импортирования

Несколько уже круг возможностей для передачи результатов геометрии или результатов расчета из прикладной программы в SolidWorks. В числе рассмотренных в данной книге продуктов этой функциональностью обладает TracePro, которая имеет собственный графический редактор, позволяющий создать геометрическую модель "с нуля" или же модифицировать объект, импортированный в эту программу. Также — и это более интересный случай — можно восстанавливать в SolidWorks траектории лучей, рассчитанных в TracePro и записанных в одном из нейтральных форматов. Описанная в книге программа ReflectorCAD имеет целью создание поверхностной модели сегментного отражателя с последующей передачей ее в геометрический редактор или программу расчета. SolidWorks с его возможностями обмена графикой, а также инструментами редактирования, используется как "посредник" между программами.

ГЛАВА 2



Методы решения уравнений физики в механических САПР

Физические процессы, характеризующие напряженно-деформированное состояние твердых тел, движение и теплообмен текучей среды, моделируются рассмотренными в данной книге программами с помощью уравнений, описанных соответственно в *главах 3, 4 и 5*. В данной главе, с общетеоретической точки зрения, т. е. без описания конкретного применения для решения этих уравнений, рассмотрены используемые методы решения этих уравнений: метод конечных элементов (*см. разд. 2.1*) и метод конечных объемов (*см. разд. 2.2*). Эти методы используются достаточно широко для решения различных уравнений при математическом моделировании различных физических процессов. В рассматриваемых в данной книге программах эти методы, после необходимой конкретизации, используются соответственно для решения уравнений напряженно-деформированного состояния твердых тел — в *COSMOSWorks (см. главы 3, 4)* и для решения уравнений движения и теплообмена текучей среды — в *COSMOSFloWorks (см. главу 5)*.

Также будут приведены базовые сведения об алгоритмах параметрической оптимизации и обзор понятий, касающихся светотехнического анализа.

2.1. Основы метода конечных элементов

Метод конечных элементов (МКЭ) в настоящее время является стандартом при решении задач механики твердого тела посредством численных алгоритмов. Популярный в свое время метод конечных разностей, а также претендовавший на универсальность метод граничных элементов (граничных интегральных уравнений) сейчас занимают достаточно узкие ниши, ограниченные исследовательскими или специальными задачами. МКЭ занял лидирующее

положение благодаря возможности моделировать широкий круг объектов и явлений. Абсолютное большинство конструктивных элементов, узлов и конструкций, изготовленных из самых разнообразных материалов, имеющих различную природу, могут быть рассчитаны посредством МКЭ. При этом, разумеется, нужно учитывать неизбежные при любой численной аппроксимации условности и погрешности. Поэтому вопрос соответствия между расчетной моделью и реальностью является, пожалуй, основным при использовании программ анализа. Несмотря на то, что такие программы имеют более или менее подробную документацию, они все равно остаются в определенной степени черными ящиками. Это означает определенную непредсказуемость результатов, а также некоторый произвол в их интерпретации. Следовательно, качество заключений, принимаемых на основе результатов, всецело зависит от квалификации, а также, применительно к расчету на прочность, принципиального знакомства с основами МКЭ. На эту тему опубликовано немало книг, например [3], полезна также документация к программам [16, 18]. В данном разделе мы будем рассматривать этот метод применительно к задачам механики деформируемого твердого тела.

2.1.1. Понятие конечного элемента

В основе метода лежит дискретизация объекта с целью решения уравнений механики сплошной среды в предположении, что эти соотношения выполняются в пределах каждой из элементарных областей. Эти области называются конечными элементами. Они могут соответствовать реальной части пространства, как, например, пространственные элементы (рис. 2.1, 2.2), или же быть математической абстракцией, как элементы стержней, балок, пластин или оболочек (рис. 2.3). В пределах конечного элемента назначаются свойства ограничиваемого им участка объекта (это могут быть, например, характеристики жесткости и прочности материала, плотность и т. д.) и описываются поля интересующих величин (применительно к механике твердого тела это перемещения, деформации, напряжения и т. д.). Параметры из второй группы назначаются в узлах элемента, а затем вводятся интерполирующие функции, посредством которых соответствующие значения можно вычислить в любой точке внутри элемента или на его границе. Задача математического описания элемента сводится к тому, чтобы связать действующие в узлах факторы. В механике сплошной среды это, как правило, перемещения и усилия. Рассмотрим прямой метод построения уравнений, связывающих эти факторы в пределах конечного элемента, в предположении линейной постановки.

1. Поле перемещений Δ в пределах элемента (для пространственной задачи $\Delta = [u, v, w]^T$) посредством интерполяционных функций (в так называемых изопараметрических конечных элементах, используемых, в частности,

в COSMOSWorks, они идентичны функциям формы), собранных в матрицу $[N]$, выражается через узловые перемещения $\{A\}$. Смысл интерполяционных функций состоит в том, чтобы, зная величины, например, перемещений в узлах, получить их значения в любой точке элемента в зависимости от координат. В матричном виде соотношения имеют вид:

$$\Delta = N \cdot \{A\}.$$

Для пространственной задачи $\{A\} = [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, \dots, u_k, v_k, w_k]^T$, где k — число узлов конечного элемента.

2. Поле деформаций ε выражается через степени свободы $\{A\}$ посредством дифференцирования поля перемещений (а фактически интерполяционных функций) согласно соотношениям, собранным в матрицу $[D]$ и связывающим деформации с перемещениями:

$$\varepsilon = [D] \cdot \{A\}.$$

3. С учетом уравнений состояния, в основе которых лежит закон Гука и коэффициенты которых образуют матрицу $[E]$, устанавливается связь сначала между полем напряжений и полем деформаций:

$$\sigma = [E] \cdot \varepsilon,$$

а затем и между напряжениями и степенями свободы в узлах:

$$\sigma = [E] \cdot [D] \cdot \{A\}.$$

4. Формулируются выражения для сил $\{F\}$, действующих в вершинах элемента, в зависимости от поля напряжений σ , для чего используется матрица преобразования напряжений в узловые силы $[A]$:

$$\{F\} = [A] \cdot \{\sigma\}.$$

5. Связываются выражения для узловых сил и перемещений в узлах:

$$\{F\} = [k] \cdot \{A\},$$

где $[k] = [A] \cdot [E] \cdot [D]$ — матрица жесткости конечного элемента.

6. Для придания матрице $[k]$ свойства симметрии добиваемся замены матрицы преобразования жесткости матрицей, транспонированной к матрице преобразования перемещений в деформации $[D]$. Тогда:

$$[k] = [D]^T \cdot [E] \cdot [D].$$

Перечисленные зависимости позволяют, зная перемещения в узлах, получить величины сил, а также решить обратную задачу: по силам найти перемещения, затем деформации и напряжения в пределах конечного элемента.

Прямая формулировка, как правило, используется для получения матриц жесткости конечных элементов стержней, балок и пластин, а также для описания процесса теплопроводности.

Для получения матриц жесткости пространственных элементов наиболее часто используются вариационные принципы, например, принцип минимума потенциальной энергии. Полученная таким образом матрица жесткости из пункта 6 здесь будет вычисляться как:

$$[k] = \left[\int_V [D]^T [E][D] dx dy dz \right].$$

Проблема интегрирования по объему тела сложной формы или же, в случае оболочечных элементов, — по криволинейной поверхности решается за счет того, что выражения записываются в локальной системе координат, связанной с элементом ξ, ψ, η , причем координаты изменяются в интервале $[-1, +1]$.

При этом выражение для элементарного объема приобретает вид:

$$dx dy dz = |J| d\xi d\psi d\eta,$$

где $|J|$ — определитель *матрицы Якоби*, или *якобиан* преобразования. Тогда:

$$[k] = \left[\int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [D]^T [E][D] \det[J] d\xi d\psi d\eta \right].$$

Аналитический расчет интегралов в выражении для матрицы жесткости невозможен даже для треугольников с криволинейными сторонами. Поэтому прибегают к численному интегрированию. Оно заключается в замене интеграла суммой произведений подынтегральных выражений, вычисленных в точках Гаусса или в некоторой другой системе точек на соответствующие весовые коэффициенты. Этот процесс сопровождается расчетом величины определителя якобиана. Отрицательная величина является следствием вырожденности данного конечного элемента. Как правило, информация о данном обстоятельстве помещается в диагностические сообщения программ.

Примеры конечных элементов, присутствующих в COSMOS Works, приведены на иллюстрациях: объемный тетраэдральный с линейным полем перемещений в пределах ограничиваемой им области (и, соответственно, постоянной деформацией) — на рис. 2.1, объемный тетраэдральный с параболическим полем перемещений (линейным распределением деформаций) — на рис. 2.2, треугольный элемент оболочки с параболическим полем перемеще-

ний и углов поворота — на рис. 2.3. На рисунках также обозначены локальная система координат элемента ξ, ψ, η , глобальная система координат тела X, Y, Z , перемещения в локальной: u, v, w , для оболочечного также углы поворота относительно локальных осей в узле $\Theta_\xi, \Theta_\psi, \Theta_\eta$ и в глобальной: U, V, W системах координат.

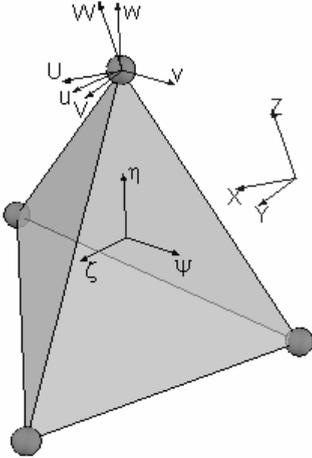


Рис. 2.1. Объемный линейный конечный элемент

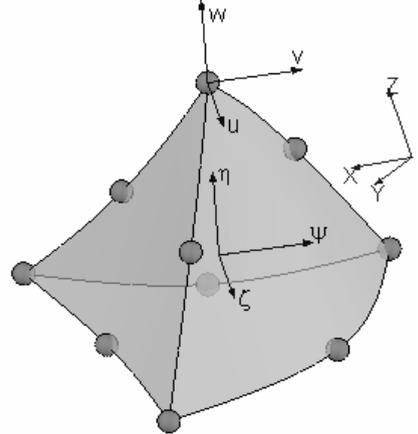


Рис. 2.2. Объемный параболический конечный элемент

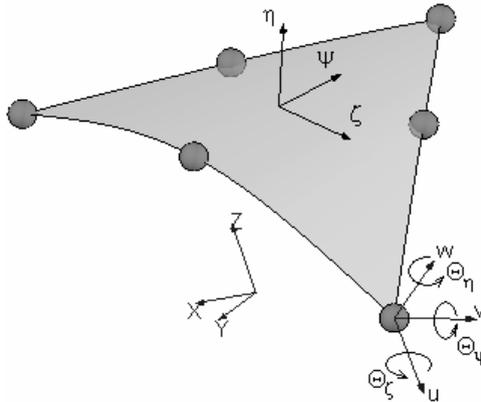


Рис. 2.3. Параболический конечный элемент поверхности

2.1.2. Построение программы МКЭ

Имея математический аппарат для получения матриц жесткости конечных элементов, приведения нагрузок, приложенных к поверхности или в объеме

элемента к усилиям в узлах, а также решения обратных задач: вычисления полей деформаций и напряжений в объеме элемента на базе перемещений в узлах, можно построить алгоритм МКЭ. Мы приведем один из его вариантов для решения задач в линейной постановке. Конкретные реализации могут существенно отличаться от данной схемы.

1. Производится дискретизация объема, занимаемого деталью или сборкой на элементы, или, как говорят, строится сетка конечных элементов. Для объемного тела область разбивается (в рамках функциональности COSMOSWorks) на тетраэдры с гранями, аппроксимируемыми линейными (линейная зависимость от координат) или параболическими функциями координат. Для поверхностных моделей — на плоские (линейная) или криволинейные (параболическая зависимость) треугольники.
2. Для пространственных конечных элементов степенями свободы являются перемещения в направлении осей локальной системы координат элемента. Для конечных элементов оболочек к трем перемещениям в каждом узле добавляются по три угла поворота нормали к срединной поверхности области, аппроксимируемой элементом, относительно тех же осей.
3. Определяются зависимости для преобразования перемещений и углов поворота в узлах к глобальной системе координат.
4. Вычисляются матрицы жесткости конечных элементов. В формулы для расчета компонентов матриц жесткости конечных элементов помимо координат узлов входят модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов. То есть если анализируется сборка, то в зависимости от принадлежности элемента детали при расчете матриц жесткости элементов используются соответствующие характеристики жесткости материала.
5. Полученные матрицы жесткости с использованием зависимостей для перехода от локальных систем координат элемента в глобальные преобразуются в глобальную систему координат.
6. Матрицы жесткости, представленные в глобальных координатах, объединяются в глобальную матрицу жесткости $[K]$.
7. Назначенные пользователем граничные условия, статические и кинематические, приводятся к нагрузкам и перемещениям в узлах, выраженным в глобальной системе координат, и включаются в столбец усилий $[F]$.
8. Полученная линейная система уравнений вида $[K] \cdot [A] = [F]$ решается относительно столбца перемещений. Это наиболее трудоемкий этап расчета. Для решения используются итерационные или прямые методы. Матрица жесткости, как правило, хранится в компактной форме, структура которой определяется до этапа ее заполнения матрицами жесткости элементов.

9. Для каждого конечного элемента, имея перемещения (углы поворота) в узлах и аппроксимирующие функции, рассчитываются деформации. Если элементы линейные — деформации в пределах элементов постоянные, если элементы параболические — деформации изменяются линейно. На основе деформаций вычисляются напряжения в элементах. При необходимости (функция программы) напряжения в узлах смежных элементов осредняются (это также весьма ответственный этап, по-разному решаемый в различных программах) с последующим пересчетом напряжений в пределах каждого элемента.
10. На основе компонентов напряженно-деформированного состояния и параметров прочности материала (материалов) производится вычисление *эквивалентных напряжений* по какому-либо критерию прочности.

2.1.3. Учет нелинейности в процедурах МКЭ

Весьма часто модули нелинейного анализа в программах МКЭ являются надстройкой над базовой частью, отвечающей за упругий статический расчет. Рассмотрим некоторые аспекты реализации этих процедур в свете информации, изложенной в [6, 8, 17].

Нелинейные задачи характеризуются нелинейной зависимостью между действующими факторами и реакцией на них системы. Кроме того, нередко граничные условия (приложенные нагрузки и перемещения) изменяются во времени. Для учета этого явления вводится понятие *кривая времени* (в COSMOSWorks — Time curve). Смысл ее в том, что вводится параметр, имеющий размерность времени и, в зависимости от его величины, назначаются определяемые им условия. То есть фактически строятся графики, в которых абсцисса — это время, а ордината — сила, напряжение, перемещение и т. д. Если рассчитываемый объект содержит материал, характеристики которого могут зависеть от времени, то параметр соответствует физическому времени. В противном случае — это абстрактная величина, масштаб которой выбирается из соображений удобства представления кривых (реальное время фигурирует также в задачах динамики, однако функциональность COSMOSWorks не предусматривает их решения). Главным требованием в ходе описания внешних факторов является синхронность их действия. Например, если на объект, изготовленный из материала, который обладает свойством физической нелинейности, сначала действует одна сила, а затем, после того как ее действие прекращается, другая, то первый фактор размещается в одном интервале, а второй — в следующем. Длительность этих интервалов может быть различна. И наоборот, если силы в реальности прикладываются одновременно, то размещать их следует в одном и том же отрезке времени.

Следующая процедура, необходимая для модификации алгоритма МКЭ применительно к решению нелинейных задач, — управление сохранением сис-

темой состояния равновесия. В большинстве прикладных программ присутствуют три метода, используемых для различных классов задач.

- *Метод сил* (Force Control) (рис. 2.4), когда после увеличения нагрузок в соответствии с кривой времени на величину некоторого шага определяют перемещения, удовлетворяющие уравнениям равновесия. Как правило, метод сил применяется для задач с физической нелинейностью материалов. Алгоритм непригоден для моделирования разупрочняющихся систем (т. е. когда на некотором этапе увеличение перемещений происходит без прироста силовых факторов).

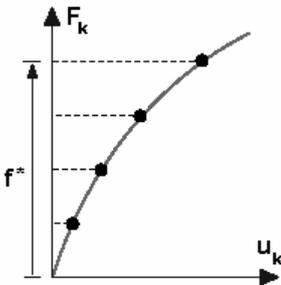


Рис. 2.4. Силовые факторы как управляющий параметр

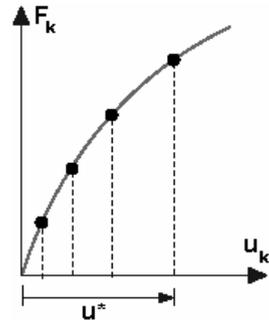


Рис. 2.5. Перемещения как управляющие параметры

- *Метод перемещений* (Displacement Control) (рис. 2.5), когда для назначенного приращения перемещений (для этого нужно в явном виде назначить контролируемые степени свободы в конкретных узлах) подбирается параметр времени, определяющий действующие в этот момент силовые факторы. Данный алгоритм следует использовать в ситуациях, когда возможна геометрическая нелинейность поведения конструкции. Алгоритм непригоден для расчетных схем, когда деформация конструкции под действием приложенных в виде граничных условий перемещений на некотором этапе сопровождается уменьшением порождаемых этими перемещениями сил. Один из вариантов этого явления — прощелкивание тонкостенных объектов в ходе потери устойчивости.
- *Метод длины дуги* (Arc Length Method) (рис. 2.6), известный в отечественной литературе как метод продолжения по наилучшему параметру. Программа автоматически вводит некоторый параметр, называемый параметром продолжения, который входит в дополнительное уравнение, включаемое в уравнения равновесия. Метод основан на идее продвижения вдоль множества возможных решений с учетом на каждом шаге информации о решениях, полученных на предыдущих шагах. Данный алгоритм следует