

681.5  
M14

**РОСЖЕЛДОР**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Ростовский государственный университет путей сообщения»  
(ФГБОУ ВПО РГУПС)**

И.А. Майба, Р.М. Мургазаалиев, И.И. Майба

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

**Часть 1**

**«Компьютерное моделирование несущих элементов  
подъемно-транспортных средств»**

Учебно-методическое пособие

**ФГБОУ ВПО  
«Ростовский государственный  
университет путей сообщения»  
Научно-техническая библиотека**

Ростов-на-Дону  
2013

Бр./51418 - НБО - 17.45 р.  
681.5  
M14  
Майба, И.А.  
Системы автоматизиро-  
ванного проектирования  
транспортных средств  
[Текст] : учеб.-метод. посо-  
бие, Ч. 1. Компьютерное мо-  
делирование несущих эле-  
ментов подъемно-

Бр./51418

Бр./51418

УДК 656.2 : 517.9 : 681.3.06(07) + 06

Рецензент – доктор технических наук, профессор А.Н. Чукарин

Майба, И.А.

Системы автоматизированного проектирования транспортных средств и оборудования. В 2 ч. Ч. 1. Компьютерное моделирование несущих элементов подъемно-транспортных средств: учебно-методическое пособие / И.А. Майба, Р.М. Муртазаалиев, И.И. Майба; ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов н/Д, 2013. – 56 с. – Библиогр.: с. 52.

Содержатся теоретические сведения, пример решения практической задачи компьютерного моделирования несущих элементов транспортных средств. Приведены основные понятия и определения систем автоматизированного проектирования (САПР) транспортных средств и оборудования. Рассмотрены особенности компьютерного проектирования несущих элементов подъемно-транспортных средств. Описаны примеры решения проектных задач с использованием современных программ трехмерного твердотельного моделирования.

Предназначено для студентов, обучающихся по образовательным программам подготовки: специалистов по направлению подготовки (специальности) 190109 – «Наземные транспортно-технологические средства»; бакалавров и магистров по направлению подготовки 151600 – «Прикладная механика», а также аспирантов и инженерно-технических работников транспортных и строительных предприятий.

Одобрено к изданию кафедрой «Основы проектирования машин».

*Учебное издание*

Майба Игорь Альбертович  
Муртазаалиев Руслан Муртазаалиевич  
Майба Илья Игоревич

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

### Часть 1

«Компьютерное моделирование несущих элементов  
подъемно-транспортных средств»

Редактор Т.И. Исаева  
Техническое редактирование и корректура Т.И. Исаевой

Подписано в печать 11.07.13. Формат 60×84/16.  
Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л. 3,23.  
Тираж 125 экз. Изд. № 45. Заказ 7002.

Ризография ФГБОУ ВПО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. им. Ростовского Стрелкового Полка  
Народного Ополчения, д. 2

© Майба И.А., Муртазаалиев Р.М.,  
Майба И.И., 2013  
© ФГБОУ ВПО РГУПС, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1 Теоретические сведения о САПР.....	5
1.1 Основные понятия и определения САПР.....	5
1.2 Виды обеспечения САПР.....	10
1.3 Оптимизация проектных решений в САПР.....	23
1.4 Перспективы развития САПР.....	27
2 Практические задачи проектирования элементов транспортных средств с использованием САПР.....	32
2.1 Моделирование работы несущих элементов подъемно-транспортных средств.....	32
2.2 Компьютерное проектирование напряженно-деформированного состояния на примере грузового крюка.....	37
3 Лабораторный практикум.....	44
3.1 Содержание и структура лабораторных работ .....	44
3.2 Перечень и краткое руководство к выполнению лабораторных работ ...	44
Библиографический список.....	52
Приложение А.....	53

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование технического объекта – создание, преобразование и представление в принятой форме образа этого еще не существующего объекта. Образ объекта или его составных частей может создаваться в воображении человека в результате творческого процесса или генерироваться в соответствии с некоторыми алгоритмами в процессе взаимодействия человека и ЭВМ. Современные подходы к проектированию базируются на использовании компьютерных технологий автоматизации проектирования и систем автоматизированного проектирования (САПР) при создании сложных технических объектов. Как правило, проектирование сложных технических систем осуществляется большим коллективом различных специалистов с использованием многочисленных расчетных, экспериментальных, эвристических методов и приемов. Это процесс многоэтапный, творческий, итерационный, динамический и достаточно трудоемкий. Переход на применение автоматизированных систем разработки и проектирования конструкций, узлов и деталей транспортных средств и особенно их несущих элементов позволяет существенно повысить качество и скорость создания новых современных образцов техники, снизить экономические издержки, так как компьютерные системы могут смоделировать практически любой процесс испытания изделия и с достаточной точностью рассчитать результат.

Сложность освоения процессов автоматизации проектирования (АП) заключается в том, что системы автоматизированного проектирования базируются на разнообразных средствах реализации технологии АП, которые находятся в постоянной динамике развития. При этом фундаментом САПР являются разнообразные технические, математические, программные среды, обеспечивающие их функционирование, отличающиеся богатством и разнообразием используемых сетевых методов передачи данных, методов вычислительной математики, статистики, математического программирования, дискретной математики, искусственного интеллекта. Программные комплексы САПР относятся к числу наиболее сложных современных программных систем, основанных на самых современных операционных системах Unix, Windows, языках программирования C, C++, Java, современных CALS-технологиях.

Цель настоящего учебно-методического пособия – ориентация студентов инженерных специальностей на базовую подготовку в области автоматизированного проектирования, овладение ими базовыми знаниями и практическими навыками трехмерного твердотельного моделирования конструкций, узлов, несущих элементов транспортных средств.

## 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О САПР

### 1.1 Основные понятия и определения САПР

Основные термины и определения в области автоматизированного проектирования и систем автоматизированного проектирования были установлены ГОСТом 22487-77 и вышедшим взамен его ГОСТом 34.003-90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения». Рассмотрим те из них, которые сейчас наиболее часто используются в специальной литературе.

**Проектирование** – это процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующего объекта, на основе первичного описания этого объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса путем преобразования (в ряде случаев неоднократного) первичного описания, оптимизации заданных характеристик объекта и алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, устранения некорректности первичного описания и последовательного представления (при необходимости) описаний на различных языках. Процесс проектирования может быть неавтоматизированным и автоматизированным.

**Неавтоматизированное проектирование** – это проектирование, при котором все преобразования описаний объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, а также представление описаний на различных языках осуществляются человеком.

**Автоматизированное проектирование** – это проектирование, при котором отдельные преобразования описаний объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, а также представления описаний на различных языках осуществляются при взаимодействии человека и ЭВМ.

Под **автоматизацией проектирования** понимается широкий круг проблем, решаемых с использованием средств вычислительной техники при выполнении многочисленных этапов и процессов проектирования объекта (машины, комплекса машин, системы и др.).

Результатом проектирования является проектное решение (совокупность проектных решений), удовлетворяющее заданным требованиям и необходимое для создания объекта проектирования. **Проектное решение** – это промежуточное или конечное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования.

Степень автоматизации проектирования оценивается долей  $d$  проектных работ, выполняемых на ЭВМ без участия человека, в общем объеме проектных работ. При  $d = 0$  проектирование неавтоматизированное, а при  $d = 1$  – автоматическое.

В представлениях инженера о сложных технических объектах принято выделять аспекты и иерархические уровни. Аспекты характеризуют ту или иную группу родственных свойств объекта. Типичными аспектами в описаниях

технических объектов являются функциональный, конструкторский и технологический. Функциональный аспект отражает физические и информационные процессы, протекающие в объекте при его функционировании. Конструкторский аспект характеризует структуру, расположение в пространстве и форму составных частей объекта. Технологический аспект определяет технологичность, возможности и способы изготовления объекта в заданных условиях.

В современных САПР используют различные подходы и методы проектирования. На практике, особенно при проектировании техногенных объектов, редко встречаются случаи, когда существует возможность полного описания объекта в рамках одной программы. Обычно задачи проектирования настолько сложны, что это невозможно.

Проектирование сложных объектов основано на применении идей и принципов, изложенных в ряде теорий и подходов. Наиболее общим подходом является системный подход, идеями которого пронизаны различные методики проектирования сложных систем.

Основной общий принцип системного подхода заключается в рассмотрении частей явления или сложной системы с учетом их взаимодействия. Системный подход включает в себя выявление структуры системы, типизацию связей, определение атрибутов, анализ влияния внешней среды.

Системный подход получил развитие в ряде известных подходов с другими названиями – структурном, блочно-иерархическом, объектно-ориентированном подходах.

При *структурном подходе* как разновидности системного требуется синтезировать варианты системы из компонентов (блоков) и оценивать варианты при их частичном переборе с предварительным прогнозированием характеристик компонентов.

*Блочно-иерархический подход* к проектированию использует идеи декомпозиции сложных описаний объектов и, соответственно, средств их создания на иерархические уровни и аспекты, вводит понятие стиля проектирования (восходящее и нисходящее), устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней. *Принцип иерархичности* означает структурирование представлений об объектах проектирования по степени детальности описания, а *принцип декомпозиции (блочности)* – разбиение представлений каждого уровня на ряд составных частей (блоков) с возможностями отдельного (поблочного) проектирования объектов на каждом из уровней.

Примером математического описания конструктивных элементов, базирующегося на блочно-иерархическом подходе к процессу конструирования, являются характерные иерархические уровни при рассмотрении транспортных средств (рис. 1.1) [3]: машина – агрегат – узел – деталь. Уровень IV (низший уровень) составляют детали машин, уровень III – совокупность деталей (узел – сборочная единица), уровень II – агрегат (совокупность узлов), уровень I – машина (совокупность агрегатов). Для более точного представления иерархии системы машин могут быть предусмотрены дополнительные подуровни, например, узлы машины могут быть разбиты на подузлы и т. д.

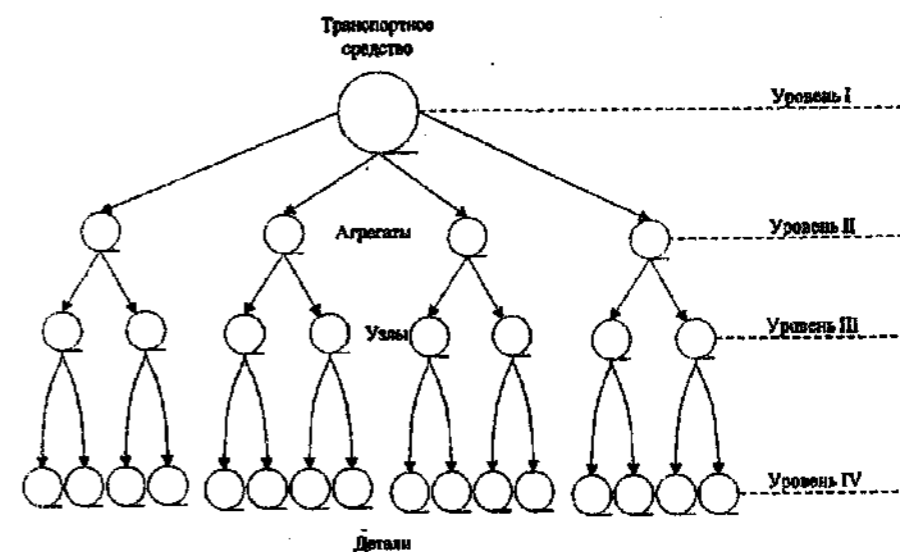


Рис. 1.1. Пример иерархического представления транспортного средства

Соответственно иерархии объектов проектирования можно построить иерархию их математических моделей и разделить процесс проектирования на группы *проектных процедур*, связанных с получением и преобразованием описаний выделенных иерархических уровней.

В результате появляется возможность свести решение малого числа чрезмерно сложных задач к решению большого числа задач, но приемлемой сложности.

Если решение задач высоких иерархических уровней предшествует решению задач более низких иерархических уровней, проектирование называют *нисходящим*. Если раньше выполняются этапы, связанные с низшими иерархическими уровнями, проектирование называют *восходящим*. У каждого из этих двух видов проектирования имеются преимущества и недостатки.

В разных источниках можно встретить различные определения систем автоматизированного проектирования. Приведем некоторые из них.

**САПР** – это комплекс средств автоматизации проектирования, взаимосвязанных с необходимыми подразделениями проектной организации или коллективом специалистов (пользователем системы), выполняющий автоматизированное проектирование.

**САПР** – комплекс технических средств и программного обеспечения, предназначенный для автоматизированного проектирования технических объектов с участием человека.

**САПР** – организационно-техническая система, входящая в структуру проектной организации и осуществляющая проектирование с помощью комплекса средств автоматизированного проектирования (ГОСТ 23501.101-87).

**Комплекс средств автоматизации проектирования (КСАП)** – это совокупность различных видов обеспечения автоматизированного (автоматического) проектирования, необходимых для выполнения автоматизированного (автоматического) проектирования.

Основная функция САПР состоит в выполнении автоматизированного проектирования на всех или отдельных стадиях проектирования объектов и их составных частей.

Взаимодействие подразделений проектной организации с КСАП регламентируется организационным обеспечением.

В ГОСТ 23501.101-87 изложены организационные основы создания САПР.

В настоящее время интенсивно создаются интегрированные системы автоматизированного (автоматического) проектирования.

**Интегрированная система автоматизированного (автоматического) проектирования** – это система автоматизированного (автоматического) проектирования, имеющая альтернативное программное обеспечение и операционную систему автоматизированного (автоматического) проектирования, позволяющую выбирать совокупность машинных программ применительно к заданному объекту проектирования или классу объектов проектирования.

**Операционная система автоматизированного (автоматического) проектирования** – это часть программного автоматизированного (автоматического) проектирования, предназначенная для управления проектированием.

Использование САПР превращает инженера-проектировщика в пользователя САПР, использующего ЭВМ с набором периферийных устройств. Содержание работы специалистов радикально меняется, хотя и может иметь различный характер. В развитых диалоговых системах, где проектные решения принимаются человеком, а промежуточная обработка данных выполняется машиной, ритм работы радикально меняется. Здесь проектировщик нередко испытывает значительные перегрузки, так как темп работы задается ЭВМ.

Формирование и использование моделей объектов проектирования в прикладных задачах осуществляются комплексом средств автоматизации проектирования системы или подсистемы. Структурную схему САПР можно представить в виде двух основных блоков – функционального и обеспечивающего. **Функциональный блок** представлен набором подсистем, удовлетворяющих поставленным целям проектирования: технологической подготовки производства, моделирования, информационного поиска, инженерных расчетов, управления САПР, испытаний, изготовления, машинной графики.

**Обеспечивающий блок** представлен компонентами программного, информационного, методического, математического, лингвистического и технического обеспечения (рис. 1.2).

Подсистемы являются основными структурными звеньями САПР и различаются по назначению и по отношению к объекту проектирования.

Классифицировать САПР можно по степени формализации решаемых задач, функциональному назначению, технической организации, характеру базовой подсистемы, целевому назначению.

**По степени формализации решаемых задач** САПР могут быть построены на решении полностью, частично и неформализуемых задач.

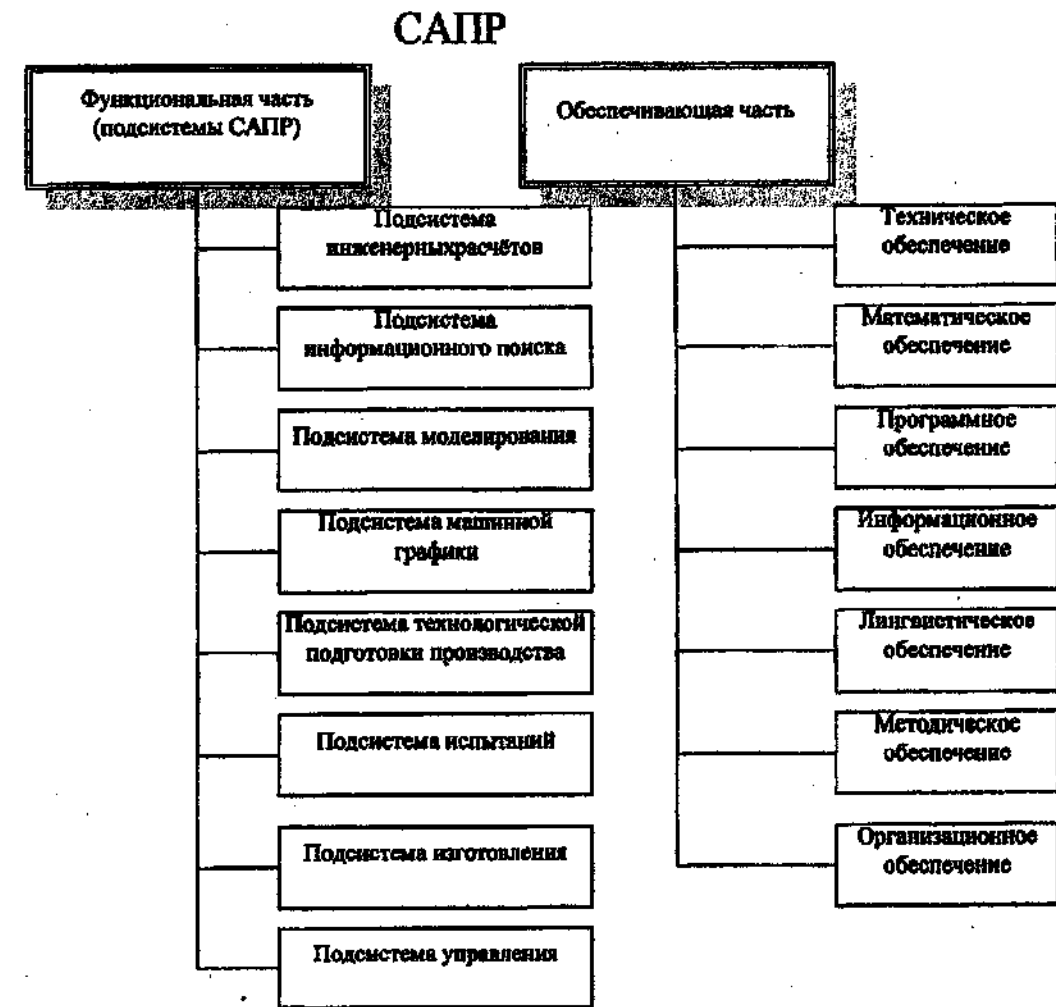


Рис. 1.2. Структурная система САПР

Системы, построенные на решении полностью формализуемых задач, для проектирования элементов транспортных машин обычно не пригодны, поскольку составить их математическое описание не представляется возможным из-за сложности математических моделей.

Системы, построенные на решении неформализуемых задач, – системы «искусственного интеллекта», в целях проектирования не применяются, так как находятся в стадии разработки. Для решения задач в области транспортных машин пригодны системы, построенные на решении частично формализуемых задач.

В настоящее время при решении задач компьютерного проектирования узлов и элементов транспортных машин применяются комплексные САПР, состоящие из совокупности функциональных подсистем. Характерными примерами комплексных САПР являются CAE/CAD/CAM/PDM-системы, включающие в себя расчетные, конструкторские, технологические приложения САПР и управляющие базами данных автоматизированные системы.

CAD/CAE/CAM/PDM – системы предназначены для комплексной автоматизации проектирования, конструирования и изготовления продукции. В них

фактически объединены четыре системы разного назначения, разработанные на единой базе, аббревиатуры которых расшифровываются следующим образом:

- CAD – Computer Aided Design – компьютерная поддержка конструирования;
- CAE – Computer Aided Engineering – компьютерная поддержка инженерного анализа;
- CAM – Computer Aided Manufacturing – компьютерная поддержка изготовления;
- PDM – Product Data Management – системы управления проектными данными.

Особенностью CAD/CAE/CAM/PDM-систем является возможность организации параллельного проектирования – коллективного режима работы над проектом, что дает возможность перехода на виртуальную технологию компьютерного проектирования.

Для современных CAD/CAE/CAM/PDM-систем характерен модульный принцип построения. Так, например, в CAD-системы входят модули создания объемной модели детали и узлов, проектирования поверхностей любой сложности, параметризации размеров деталей, оформления сборочных чертежей по объемным моделям в соответствии со стандартами, фотореалистического отображения изделия с учетом текстуры материала, цвета и шероховатости поверхности; импорта-экспорта модели между различными CAD через интерфейсы.

## 1.2 Виды обеспечения САПР

В САПР принято выделять семь видов обеспечения (рис. 1.3).

Структура программного обеспечения САПР включает в себя подсистемы проектирующие и обслуживающие [4]. Проектирующие подсистемы непосредственно выполняют проектные процедуры. Примерами проектирующих подсистем могут служить подсистемы геометрического трехмерного моделирования механических объектов, изготовления конструкторской документации, схемотехнического анализа, трассировки соединений в печатных платах.

Обслуживающие подсистемы обеспечивают функционирование проектирующих подсистем, их совокупность часто называют системной средой (или оболочкой) САПР. Типичными обслуживающими подсистемами являются подсистемы управления проектными данными (PDM – Product Data Management), управления процессом проектирования (DesPM – Design Process Management), пользовательского интерфейса для связи разработчиков с ЭВМ, CASE (Computer Aided Software Engineering) для разработки и сопровождения программного обеспечения САПР, обучающие подсистемы для освоения пользователями технологий, реализованных в САПР.

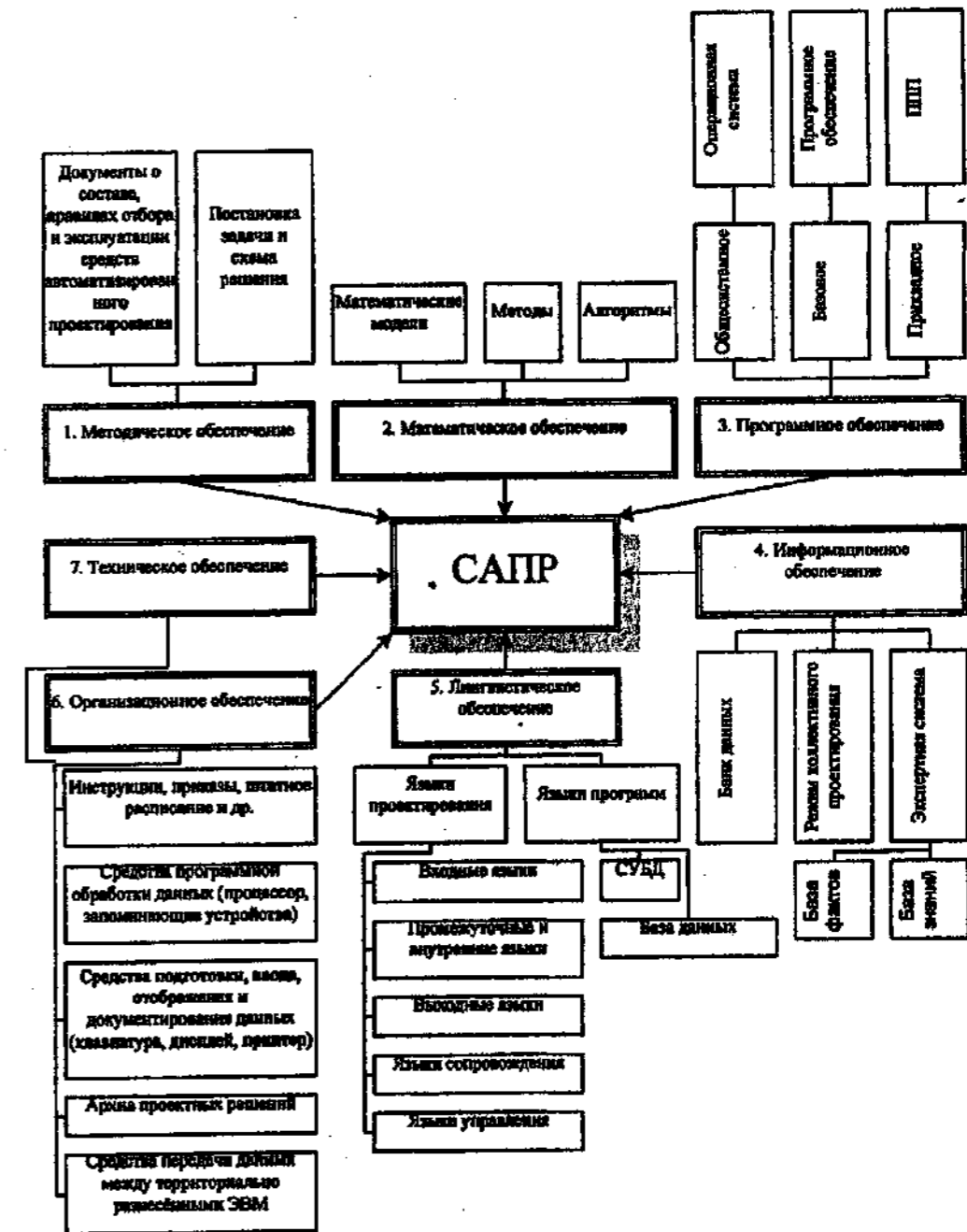


Рис. 1.3. Виды обеспечения САПР

Техническое обеспечение (ТО), или комплекс технических средств (КТС), САПР представляет собой материальную основу автоматизированного проектирования. Технические средства и общее системное программное обеспечение являются инструментальной базой САПР. Они образуют физическую среду, в которой реализуются другие виды обеспечения САПР (математическое, лингвистическое, информационное, проектирование и пр.). Инженер, взаимодействуя с этой средой и решая различные задачи проектирования, осуществляет автоматизированное проектирование технических объектов.



Общая структура технического обеспечения САПР представляет собой сеть узлов, связанных между собой средой передачи данных (рис. 1.4) [4].

Узлами (станциями данных) являются рабочие места проектировщиков, часто называемые автоматизированными рабочими местами (АРМ), или рабочими станциями (WS – Workstation), ими могут быть также большие ЭВМ (мейнфреймы), отдельные периферийные и измерительные устройства. Именно в АРМ должны быть средства для интерфейса проектировщика с ЭВМ. Что касается вычислительной мощности, то она может быть распределена между различными узлами вычислительной сети.

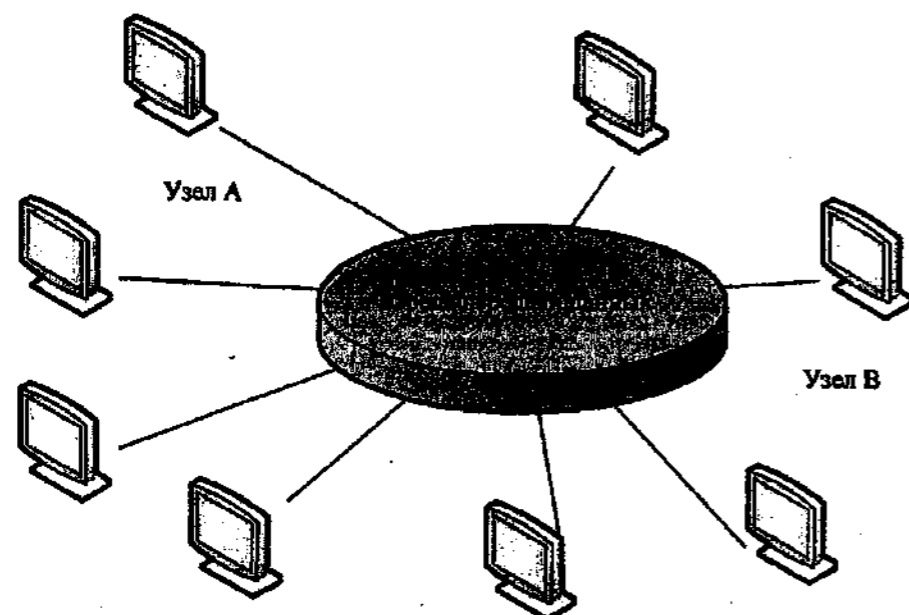


Рис. 1.4. Структура технического обеспечения САПР

Среда передачи данных представлена каналами передачи данных, состоящими из линий связи и коммутационного оборудования.

Основой КТС САПР являются средства программной обработки данных, включающие ЭВМ различных классов и совместимое с ними оборудование из других групп технических средств.

Группа технических средств подготовки и ввода данных САПР предназначена для автоматизации подготовки редактирования и ввода в ЭВМ различных видов информации. Для этого используются штатные и специальные средства подготовки и ввода данных. В состав устройств могут входить всевозможные клавиатуры, джойстики, планшеты, манипуляторы (мышь), световое перо.

Основными средствами отображения и документирования данных являются дисплеи (мониторы) и печатающие устройства (принтеры, плоттеры). Дисплей является основным устройством отображения данных при их вводе и при выводе результатов. Это неотъемлемая часть компьютерной системы, входящая в ее минимальную конфигурацию. Печатающие устройства – основные средства документирования данных, которые используются в составе ЭВМ всех типов.

Группа технических средств архива проектных решений в современных САПР представлена внешними запоминающими устройствами. В настоящее время наибольшее распространение получили Flash-накопители и устройства чтения-записи оптических дисков CD-ROM, DVD-ROM, Blu-Ray, HD.

Группа технических средств передачи данных предназначена для обеспечения дистанционной связи проектировщиков в САПР и связи с технологическим оборудованием и смежными системами. Передача данных, как правило, осуществляется по телефонным, телеграфным и специальным каналам связи.

Современные КТС САПР характеризуются наличием территориально рассредоточенных систем сбора, передачи, хранения и обработки информации объединенных в единую информационную среду АРМ-пользователей. Реализация такой системы выполняется в виде вычислительных сетей.

Вычислительная сеть – информационная сеть, в состав которой входит вычислительное оборудование. Компонентами вычислительной сети могут быть ЭВМ и периферийные устройства, являющиеся источниками и приемниками данных, передаваемых по сети.

В зависимости от расстояний между связываемыми узлами различают вычислительные сети:

– *локальные (ЛВС)* – охватывающие ограниченную территорию (обычно в пределах удаленности станций не более чем на несколько десятков или сотен метров друг от друга, реже на 1–2 км); локальные сети обозначают LAN (Local Area Network);

– *корпоративные* (масштаба предприятия) – совокупность связанных между собой ЛВС, охватывающих территорию, на которой размещено одно предприятие или учреждение в одном или нескольких близко расположенных зданиях. Локальные и корпоративные вычислительные сети – основной вид вычислительных сетей, используемых в системах автоматизированного проектирования (САПР);

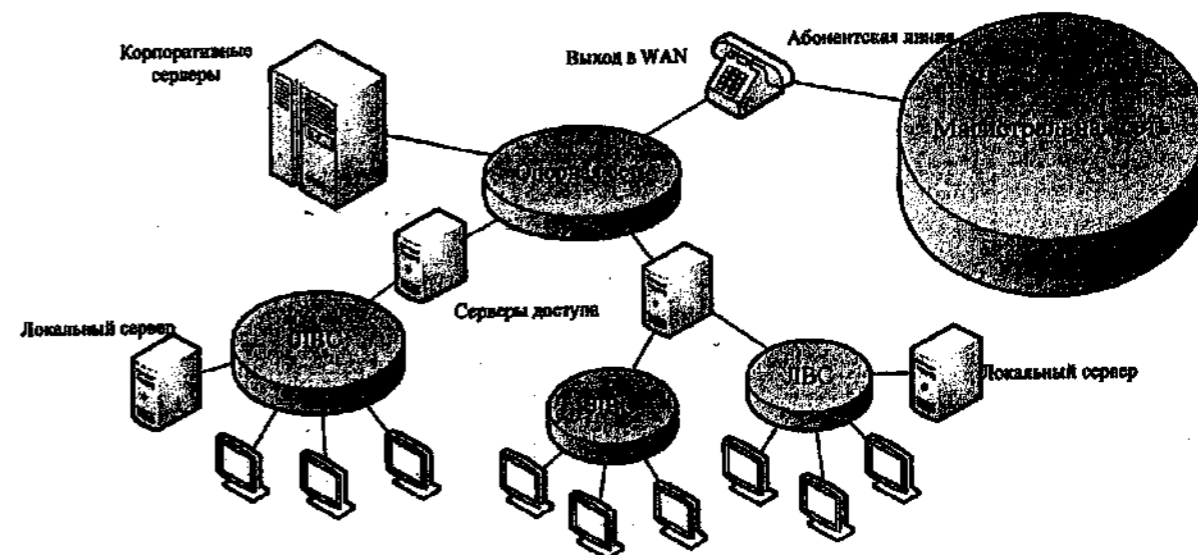


Рис. 1.5. Структура корпоративной сети САПР

– *территориальные* – охватывающие значительное географическое пространство; среди территориальных сетей можно выделить сети региональные и глобальные, имеющие соответственно региональные или глобальные масштабы. Особо выделяют единственную в своем роде глобальную сеть Internet (реализованная в ней информационная служба World Wide Web (WWW)).

Лингвистическое обеспечение САПР понимается как совокупность языков, используемых в процессе разработки и эксплуатации САПР. Согласно ГОСТ 22487-77 лингвистическое обеспечение САПР – совокупность языков проектирования, включая термины и определения, правила формализации естественного языка, методы сжатия и развертывания текстов, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования.

Лингвистическое обеспечение образуется языками программирования и проектирования. Общая классификация языков САПР представлена на рисунке 1.6.

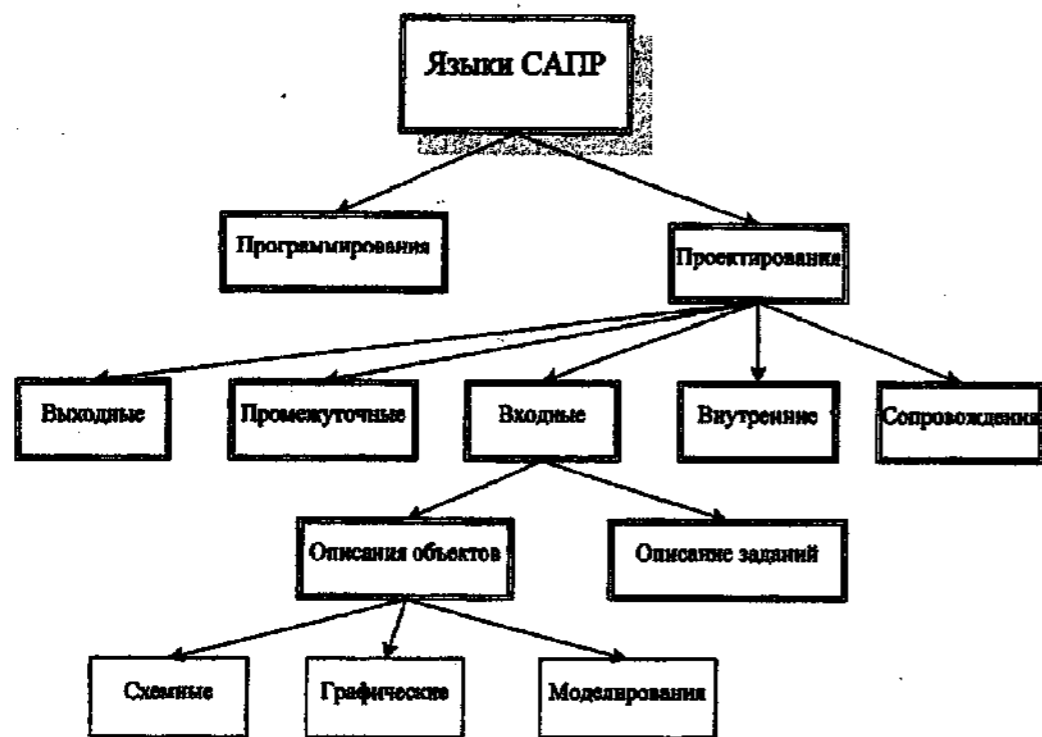


Рис. 1.6. Общая классификация языков САПР

**Языки программирования.** Для написания программного обеспечения предназначены языки программирования; они являются средством разработчика САПР.

К наиболее распространенным языкам программирования относятся Pascal, Fortran, Basic, Си (различных версий). В настоящее время на их базе разработаны и повсеместно используются среды программирования, такие как, соответственно, Delphi, Visual Fortran, Visual Basic, Visual Си (также различных версий).

К языкам программирования предъявляют требования удобства использования, универсальности и эффективности объектных программ (программ, полученных после трансляции на машинный язык). Удобство использования выражается в затратах времени программиста на освоение языка и главным образом на написание программ на этом языке.

Универсальность определяется возможностями языка для описания разнообразных алгоритмов, характерных для программного обеспечения САПР, а эффективность объектных программ – свойствами используемого транслятора, которые, в свою очередь, зависят от свойств языка. Эффективность оценивается затратами машинного времени и памяти на исполнение программ.

**Языки проектирования** – языки, предназначенные для описания информации об объекте и процессе проектирования. Описанию на языке подлежат задание на проектирование, проектные операции и процедуры, проектные решения, проектные документы.



Рис. 1.7. Языки проектирования

К языкам проектирования предъявляются следующие требования:

- **Эффективность** – точность передачи задания пользователя и лаконичность записи.
- **Полнота** – возможность описания всех объектов проектирования, а также всех действий, имеющих отношение к цели проектирования конкретной САПР.
- **Непротиворечивость** – каждое предложение, сформулированное в терминах данного языка с использованием правил (синтаксиса) данного языка должно иметь естественную семантическую интерпретацию (смысл).
- **Расширяемость** – обеспечение возможности дополнения языка в соответствии с развитием предметной области.
- **Выразительность и проблемная ориентация** – обеспечение простоты изучения и использования языков проектировщиками-непрограммистами. Языки должны быть близки к естественному.



Языки проектирования ориентированы на пользователей-проектировщиков и предназначены для эксплуатации САПР. Эта группа языков делится на входные, внутренние, выходные.

Входные языки являются средством взаимодействия конечного пользователя с САПР, например, в ходе подготовки и ввода исходных данных или формирования проблемы.

Входные языки служат для задания исходной информации об объектах и задачах проектирования и включают в себя *языки описания объектов и языки описания заданий*. Первые предназначены для описания свойств проектируемых объектов, вторые – для описания заданий на выполнение проектных операций и процедур.

Языки описания объектов делятся в свою очередь на *языки схемные, графические и моделирования*. Они используются для описания исходной информации, представленной в виде некоторой схемы, конструкторского чертежа или алгоритма функционирования. Схемные языки широко применяют при описании принципиальных электрических схем в подсистемах проектирования электронных устройств и функциональных схем – в подсистемах функционально-логического проектирования ЭВМ. Графические языки являются основой лингвистического обеспечения в подсистемах геометрического моделирования и машинной графики. Языки моделирования широко используются в подсистемах имитационного моделирования систем массового обслуживания.

Внутренние языки обычно скрыты от рядового пользователя и служат для представления информации, передаваемой между различными подсистемами САПР и ЭВМ.

Выходные языки обеспечивают оформление результатов проектирования в текстовом или графическом виде.

Такое деление языков проектирования можно назвать классическим.

Под *информационным обеспечением САПР* понимаются документы, содержащие описания стандартных проектных процедур, типовых проектных решений, типовых элементов, комплектующих изделий, материалов и другие данные, а также файлы и блоки данных на машинных носителях с записью указанных документов.

Основной задачей информационного обеспечения процессов проектирования является своевременная выдача источнику запроса полной и достоверной информации, приводящей к выполнению определенной части процесса проектирования.

При создании информационного обеспечения основная проблема заключается в преобразовании информации, необходимой для выполнения проектно-конструкторских работ над данным классом объектов, в приемлемую и наиболее рациональную для машинной обработки форму.

Основу информационного обеспечения САПР составляет совокупность всевозможных данных, которые используются в процессе проектирования. При проектировании сложного объекта, в котором участвует более одного проекти-

ровщика, данные, необходимые каждому из них, должны быть легко доступны одновременно.

Данные – это сведения о некоторых фактах, позволяющие делать определенные выводы. Взаимосвязанные данные часто называют *системой данных*, а хранимые данные – *информационным фондом*. Основное назначение информационного обеспечения – предоставлять пользователям САПР достоверную информацию в необходимом им виде в определенное время.

Наиболее высокой формой организации информационного обеспечения для больших систем являются банки данных, представляющие собой совокупность средств для централизованного накопления и коллективного использования данных в САПР. Банк данных является проблемно-ориентированной информационно-справочной системой, которая обеспечивает ввод необходимой информации, автономное от конкретных задач ведение и сохранение информационных массивов и выдачу необходимой информации по запросу пользователя или программы. Банк данных может быть определен как система программных, языковых, организационных и технических средств, предназначенных для хранения и многоцелевого использования информации.

Банки данных должны обеспечивать:

- сокращение времени поиска данных;
- многократность использования данных;
- простоту и удобство обращения к данным пользователей;
- достоверность хранения данных.

Основными частями банка данных являются база данных (БД), представляющая собой систематизированные взаимосвязанные совокупности данных, и система управления базами данных (СУБД), обеспечивающая необходимые манипуляции с информационными массивами.

*База данных* – сами данные, находящиеся в запоминающих устройствах ЭВМ и структурированные в соответствии с принятыми в данном банке данных правилами.

*Система управления базами данных* – совокупность программных средств, обеспечивающих функционирование банка данных. С помощью СУБД производятся запись данных в БД, их выборка по запросам пользователей и прикладных программ, обеспечивается защита данных от искажений и несанкционированного доступа и т. п.

При формировании БД в первую очередь надлежит исследовать информацию, необходимую для решения проектно-конструкторских задач. К этому исследованию следует подходить с двух позиций: с точки зрения полезности информации и с позиции эффективности обработки информации и пропускной способности вычислительной техники и человека.

СУБД допускает множество различных представлений о хранимых данных, а также позволяет прикладным программам работать с БД без знания конкретного способа размещения данных в памяти ЭВМ. СУБД выступает как совокупность программных средств, предназначенных для создания, ведения и совместного использования БД многими пользователями.

БР/57418

В процессе решения задач автоматизированного проектирования для постановки задач и правильной формулировки исходных данных, а также корректной интерпретации получаемых результатов необходимы знания особенностей математических моделей САПР, методов и алгоритмов решения проектных задач.

**Математической моделью (ММ)** называют совокупность математических объектов (чисел, переменных, матриц, множеств и т. п.) и связей между ними, адекватно описывающих основные свойства технического объекта. В ходе преобразований ММ происходит непосредственное выполнение всех проектных операций в САПР. Математические модели проектируемого объекта позволяют оценивать различные варианты его представления, прогнозировать характеристики, проверять их соответствие предъявляемым требованиям, оптимизировать параметры.

При автоматизации проектирования элементов и узлов транспортных машин составляются различные ММ отдельных агрегатов, узлов, деталей описывающие специфические свойства выбранного узла (элемента). Математические модели применяемых в САПР транспортных машин имеют много общего в части классификации, требований, принципов и методов их создания. Общими для ММ являются такие понятия, как параметры и фазовые переменные объекта (модели).

**Параметр** – величина, характеризующая свойства или режим работы объекта. Среди параметров объекта проектирования следует выделить показатели эффективности, являющиеся количественной оценкой степени соответствия объекта его целевому назначению. Различают выходные, входные и внутренние параметры.

**Выходные параметры** – показатели качества, по которым можно судить о правильности функционирования системы. Вектор выходных параметров некоторой системы обозначается как:  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ ;

**Внутренние параметры** – параметры элементов. Вектор внутренних параметров обозначается как:  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;

**Внешние параметры** – параметры внешней по отношению к объекту среды, оказывающие влияние на его функционирование. Вектор внешних параметров обозначается как:  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_k)$ .

На каждом иерархическом уровне выходные параметры характеризуют свойства системы, а внутренние – свойства элементов.

В большинстве случаев связь между выходными, внутренними и внешними параметрами задается не в виде простой функциональной зависимости  $Y = F(x, Q)$ , а в алгоритмической форме, например через числовое решение системы уравнений. Основными задачами таких уравнений являются математическое описание функционирования проектируемого объекта и определение оптимальных вариантов выходных параметров. При этом независимыми переменными могут быть время, частота, пространственные координаты, а зависимыми переменными – величины, характеризующие состояние объекта, так называемые **фазовые переменные**. Примерами фазовых переменных могут

служить различные физические величины объекта (силы, напряжения и деформации и т. д.).

Классифицируются математические модели по признакам принадлежности к иерархическому уровню, характеру отображаемых объектов, способу представления объекта. В иерархии математических моделей для большинства проектируемых сложных объектов объединение уровней, родственных по характеру используемого математического аппарата, приводит к образованию трех укрупненных уровней: микро-, макро- и метауровней.

На микроуровне используют математические модели распределенные, описывающие физическое состояние и процессы в сплошных средах. Фазовые переменные являются в данном случае функциями нескольких независимых переменных, таких как пространственные координаты и время, при этом и пространство, и время непрерывны. Примерами таких моделей служат дифференциальные уравнения в частных производных – уравнения упругости, электродинамики, теплопроводности, гидродинамики, газовой динамики, которые описывают напряженно-деформированное состояние деталей механических конструкций, поля электрического потенциала и температуры и т. п. Подобные модели используются, например, для определения распределения напряжений в деталях конструкции. Анализ таких моделей сводится к решению краевых задач математической физики и представляет значительные трудности вычислительного характера.

На макроуровне используются математические модели сосредоточенные, у которых из числа независимых переменных исключают пространственные координаты. Дискретизация пространства с выделением в качестве элементов отдельных деталей означает переход от распределенных моделей к сосредоточенным. Элементами этого уровня являются объекты, которые на микроуровне рассматривались как системы (например, валы, пружины, элементы сопротивления). Параметры этих элементов, будучи на микроуровне выходными, становятся внутренними. Примерами выходных параметров макроуровня являются касательная сила тяги колеса, уровень нагрузки в отдельных элементах конструкции. Математические модели на макроуровне представляют собой системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которые в частных случаях решения статических задач превращаются в системы алгебраических или трансцендентных уравнений. Для их получения и решения используют соответствующие численные методы. В качестве фазовых переменных фигурируют силы, скорости, температуры, расходы, электрические напряжения, токи и т. д. Они характеризуют проявления внешних свойств элементов при их взаимодействии между собой и внешней средой.

С увеличением числа элементов системы возможности решения задач с использованием ММ макроуровня резко сужаются. В этом случае целесообразен переход к следующему, более высокому иерархическому уровню.

На метауровне с помощью дальнейшего абстрагирования от характера физических процессов удается получить приемлемое по сложности описание процессов, протекающих в проектируемых объектах. Математические модели

на метауровне – системы обыкновенных дифференциальных уравнений, системы алгебраических уравнений, системы логических уравнений, имитационные модели систем массового обслуживания. Здесь роль элементов и внутренних параметров выполняют системы и выходные параметры предыдущего иерархического уровня. Так, элементами автомобиля на метауровне можно считать двигатель, коробку передач, ведущий мост, колесо. Моделирование на метауровне позволяет выполнить тягово-динамический расчет автомобиля, тяговый расчет трактора, решить вопросы компоновки машины, выполнить основные расчеты на прочность и сопротивление усталости деталей.

В зависимости от характера отображаемых свойств объекта модели делятся на структурные и функциональные.

**Структурные математические модели** предназначены для отображения структурных свойств объекта, например его геометрической формы, размера, взаимного расположения элементов в пространстве. Различают *структурные топологические и геометрические ММ*. В топологических моделях отображаются состав и взаимосвязь элементов объекта. Их часто используют для описания объектов, состоящих из большого числа элементов, при решении задач привязки элементов к определенным пространственным позициям (например, задача компоновки машины) или к относительным моментам времени (например, при разработке технологического процесса). Топологические модели часто имеют форму графов, таблиц, списков и т. п. В геометрических моделях помимо сведений о взаимном расположении элементов объекта содержатся сведения о форме элементов.

**Функциональные математические модели** предназначены для представления функционального аспекта проектных процедур, отражающих закономерности функционирования информационных, физических, временных процессов, протекающих в работающем оборудовании. Типичная функциональная модель представляет собой систему уравнений, описывающих механические, гидравлические, пневматические, электрические, тепловые процессы. Поскольку характер функционирования объекта в большинстве случаев невозможно описать без учета его структуры, в функциональных ММ отражаются также и структурные свойства объекта. Функциональные модели более сложные по сравнению со структурными и считаются основным типом моделей в САПР.

В зависимости от способа (формы) их представления различают *аналитические математические модели*, представляемые в виде результата аналитического решения исходных уравнений модели. При этом модели в аналитической форме обычно представляют собой явные выражения выходных параметров как функций внутренних и внешних параметров.

**Алгоритмические ММ** представлены записью соотношений модели и выбранного численного метода решения в форме алгоритма. Вычисление значений искомых величин производится путем решения систем уравнений.

Среди алгоритмических моделей важный класс составляют *имитационные модели*, предназначенные для имитации происходящих в объекте процессов при задании различных зависимостей входных воздействий от времени.

Собственно имитацию названных процессов называют **имитационным моделированием**. Результат имитационного моделирования – зависимости фазовых переменных в избранных элементах системы от времени. Примерами имитационных моделей могут служить модели разгона и торможения транспортного средства.

**Требования, предъявляемые к математическим моделям**

К математическим моделям предъявляются следующие основные требования:

- 1 Универсальность.
- 2 Точность.
- 3 Адекватность.
- 4 Экономичность.

**Универсальность математической модели** характеризует полноту отражения в ней свойств реального объекта. Математическая модель отражает не все, а лишь некоторые свойства реального объекта. Степень универсальности ММ характеризует полноту отображения в них свойств реального объекта и определяется возможностью использования модели для анализа более или менее многочисленной группы однотипных объектов, а также числом доступных для анализа режимов функционирования.

**Адекватность математической модели** – это ее способность отражать заданные свойства объекта с погрешностью не выше заданной. Модель считается адекватной, если она отражает заданные свойства объекта с приемлемой точностью.

**Точность математической модели** оценивается степенью совпадения значений выходных параметров реального объекта и значений тех же параметров, рассчитанных с помощью модели.

Пусть отражаемые в математической модели свойства объекта оцениваются вектором выходных параметров  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ , где  $y_{im}$  –  $i$ -й параметр, рассчитанный с помощью модели, а  $y_{id}$  – истинное значение того же параметра.

В этом случае относительная погрешность математической модели по  $i$ -му параметру будет равна:

$$E_i = \frac{|y_{im} - y_{id}|}{y_{id}}$$

**Экономичность ММ** характеризуется затратами вычислительных ресурсов для ее реализации, а именно затратами машинного времени и памяти. Общие затраты на выполнение в САПР какой-либо проектной процедуры зависят как от особенностей выбранных моделей, так и от методов решения.

Требования широких областей адекватности, высокой степени универсальности, с одной стороны, и высокой экономичности, с другой, являются противоречивыми. Наилучшее компромиссное удовлетворение этих требований оказывается неодинаковым в различных применениях. Данное обстоятельство обуславливает использование в САПР многих моделей для объектов одного и того же типа.

Математическая модель технического объекта в САПР обычно создается пользователем на основе уже разработанных и имеющихся в библиотеке ММ элементов и соответствующего программного обеспечения.

Получение моделей элементов (моделирование элементов) в общем случае – процедура неформализованная. Основные решения, касающиеся выбора вида математических соотношений, характера используемых переменных и параметров, принимает разработчик модели. В то же время такие операции, как расчет численных значений параметров модели, определение областей адекватности и др., алгоритмизированы и решаются на ЭВМ. Поэтому моделирование элементов обычно выполняется специалистами конкретных технических областей с помощью традиционных средств экспериментальных исследований и средств САПР.

Методы получения функциональных моделей элементов делят на теоретические и экспериментальные.

Теоретические методы основаны на изучении физических закономерностей протекающих в объекте процессов, определении соответствующего этим закономерностям математического описания, обосновании и принятии упрощающих предположений, выполнении необходимых выкладок и приведении результата к принятой форме представления модели. Основу получаемых моделей обычно составляют системы уравнений, отражающих зависимости фазовых переменных. Такие модели чаще всего относятся к алгоритмическим и адекватны в сравнительно широких диапазонах изменения переменных.

Экспериментальные методы основаны на использовании экспериментально полученных зависимостей между параметрами и фазовыми переменными объекта. Эксперименты при этом могут проводиться на самих объектах, на их физических моделях (макетах и стендах) или с использованием их полных ММ. Для целей моделирования используются пассивные и активные эксперименты. При пассивных экспериментах условия опыта остаются постоянными. В случае использования активного целенаправленного эксперимента опыты проводятся по заранее разработанному плану, определяющему количество опытов и значения факторов в каждом из них. В зависимости от методов планирования преимущества активных экспериментов перед пассивными могут выражаться в сокращении сроков разработки модели и в получении оптимального положения области ее адекватности.

В процессе преобразования экспериментальных данных в ММ возможны их аппроксимация, усреднение, статистическая обработка. Последнее характерно при постановке пассивных экспериментов, когда связь между выходными и внешними параметрами носит не функциональный, а статистический характер. Для получения модели в такой ситуации часто применяют регрессионный анализ. Экспериментальные методы получения ММ удобны для моделирования безынерционных объектов с относительно гладкими зависимостями между переменными. Результатом применения этих методов становятся модели, имеющие частный характер.

### 1.3 Оптимизация проектных решений в САПР

Важной задачей проектирования является оптимальное проектирование, определяемое как экономико-математическая задача, содержащая критерий оптимальности и ограничения и направленная на поиск лучшего в определенных условиях (т. е. оптимального) значения показателя. Поиск оптимальных значений – это отыскание такого решения рассматриваемой задачи, которое дает экстремальное (минимальное или максимальное) значение некоторой функции, называемой целевой [6].

Рассмотрим классификацию проектных процедур (рис. 1.8). Основой проектирования являются две основные проектные процедуры – синтеза и анализа.

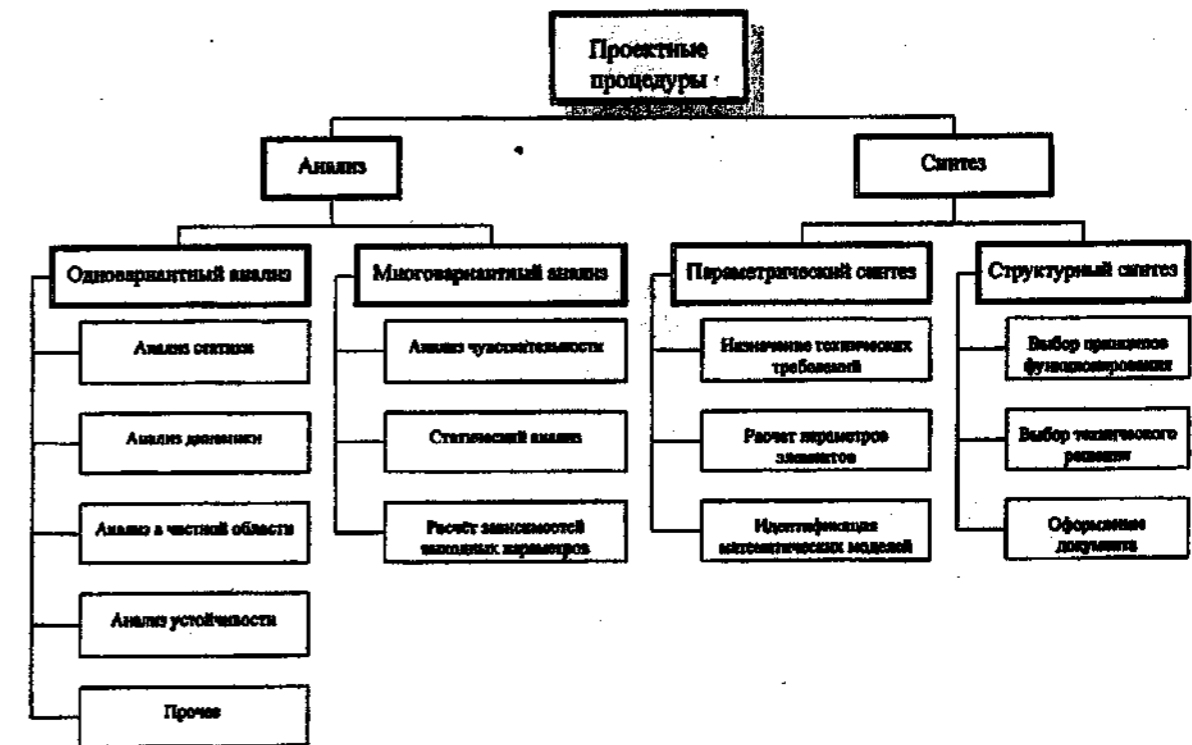


Рис. 1.8. Классификация проектных процедур

Анализ – необходимая составная часть проектирования, служащая для верификации принимаемых проектных решений. Именно анализ позволяет получить необходимую информацию для целенаправленного выполнения процедур синтеза в итерационном процессе проектирования.

В процедурах анализа выделяют одно- и многовариантный анализ. При одновариантном анализе требуется определить значения выходных параметров объекта, если заданы значения внутренних и внешних параметров. Процедура сводится к однократному решению уравнений, составляющих математическую модель. При многовариантном анализе свойства объекта исследуются не в точке, как при одновариантном анализе, а в некоторой области пространства внутренних параметров. Процедура заключается в многократном решении систем уравнений (многократном выполнении одновариантного анализа).



Синтез проектных решений – основа проектирования; от успешного выполнения процедуры синтеза в определяющей мере зависят потребительские свойства будущей продукции. Под синтезом понимаются проектные процедуры, направленные на получение новых описаний проектируемого объекта в соответствии с заданными показателями его функционирования.

Процедуры синтеза делятся на процедуры структурного и параметрического синтеза. Проектирование начинается со структурного синтеза, при котором генерируется принципиальное решение. Задачу выбора оптимальной структуры называют *структурной оптимизацией*. Целью структурного синтеза является определение структуры объекта – перечня типов элементов, составляющих объект, и способа связи элементов между собой в составе объекта. В результате может быть создан облик будущего транспортного средства, или одна из типовых конструкций двигателя и т. п. Но эти конструкции и схемы выбирают в параметрическом виде, т. е. без указания числовых значений параметров элементов. Поэтому, прежде чем приступить к верификации проектного решения, нужно задать или рассчитать значения этих параметров, т. е. выполнить параметрический синтез. Определение оптимальных значений параметров элементов технической системы известной структуры представляет собой задачу параметрического синтеза.

Примерами результатов параметрического синтеза могут служить геометрические размеры деталей в механическом узле, параметры режимов резания в технологической операции и т. п. При параметрическом синтезе механизма необходимо определить такое сочетание его размеров (внутренние параметры), которое наилучшим образом удовлетворяет требуемым эксплуатационным и качественным показателям.

В случае если по результатам анализа проектное решение признается неокончательным, то начинается процесс последовательных приближений к приемлемому варианту проекта. Для улучшения проекта удобнее варьировать значения параметров элементов, т. е. использовать параметрический синтез на базе многовариантного анализа.

При этом задача параметрического синтеза может быть сформулирована как задача определения значений параметров элементов, наилучших с позиций удовлетворения требований технического задания при неизменной структуре проектируемого объекта. Тогда параметрический синтез называют *параметрической оптимизацией*. Если параметрический синтез не приводит к успеху, то повторяют процедуры структурного синтеза, т. е. на очередных итерациях корректируют или перевыбирают структуру объекта.

В САПР процедуры параметрического синтеза могут реализовываться как в процессе многовариантного анализа, так и на базе формальных методов оптимизации (в автоматическом режиме). При этом одним из важнейших этапов постановки задачи оптимизации является выбор критерия, так как все последующие действия направлены на поиск объекта, наиболее близкого к оптимальному по выбранному критерию.

Качество функционирования любой системы характеризуется вектором выходных параметров  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ . К выходным параметрам, определяющим качество транспортной машины, можно отнести тяговые и скоростные характеристики, показатели разгонной и тормозной динамики, управляемости и устойчивости, комфортабельности, расход топлива и др.

Сложность постановки оптимизационных проектных задач обусловлена наличием у проектируемых объектов нескольких выходных параметров, которые могут быть критериями оптимальности, формирующими целевую функцию.

Значение целевой функции может возрастать или убывать с увеличением качества выходного параметра, поэтому может решаться нахождением как максимума, так и минимума целевой функции.

Вектор выходных параметров  $Y$  функционально зависит от множества внутренних параметров проектируемого объекта, которые являются аргументами целевой функции. Одной из распространенных постановок задач оптимизации при оценке нескольких альтернативных вариантов проекта является *детерминированная постановка*, при которой для данной совокупности входных значений на выходе системы может быть получен единственный результат. То есть решается однокритериальная задача.

Например, заданы условия работоспособности на выходные параметры  $Y$ , и нужно найти номинальные значения проектных параметров  $X$ , к которым относятся параметры всех или части элементов проектируемого объекта. За критерий оптимальности принимаем, например, процент выпуска годных изделий в процессе производства. Очевидно, что в этом случае целью оптимизации становится максимизация процента выхода годных, а базовая задача оптимизации ставится как задача математического программирования и поиска экстремума целевой функции путем варьирования управляемых параметров в пределах допустимой области:

$$\begin{aligned} & \text{extr } F(X), \\ & X \in D_x \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$D_x = \{X \mid \varphi(X) > 0, \psi(X) = 0\},$$

где  $F(X)$  – целевая функция,  $X$  – вектор управляемых (проектных) параметров,  $\varphi(X)$  и  $\psi(X)$  – функции-ограничения,  $D_x$  – допустимая область в пространстве управляемых параметров.

Большинство задач параметрической оптимизации технических объектов формулируется в терминах непрерывных параметров. Если экстремум целевой функции ищется в неограниченной области  $XP$ , его называют *безусловным*, а методы поиска – *методами безусловной оптимизации*. Если экстремум целевой функции ищется в ограниченной области  $XP$ , его называют *условным*.

Для решения задач проектирования в машиностроении характерны методы условной оптимизации.

Таким образом, задачу поиска оптимального решения можно в общем случае сформулировать следующим образом:



$$\min(\max)F(X), X \in XP,$$

где  $X$  – вектор управляемых параметров;  $F(X)$  – целевая функция;  $XP$  – область допустимых значений вектора управляемых параметров.

Как уже было показано ранее, проектные задачи являются многокритериальными с несколькими выходными параметрами. Одной из проблем решения таких задач с использованием детерминированной постановки считается проблема сведения многокритериальной задачи к однокритериальной, то есть определение одной целевой функции (принцип однозначности). Сведение многокритериальной задачи к однокритериальной называют *сверткой векторного критерия*. Задача поиска его экстремума сводится к задаче математического программирования.

В зависимости от того, каким образом выбираются и объединяются выходные параметры в скалярной функции качества, различают частные, аддитивные, мультипликативные, минимаксные, статистические критерии и т. д.

Разнообразие транспортных машин предопределяет, что целевой функцией (частным критерием) могут быть различные выходные параметры (грузоподъемность, расход топлива и многие другие). Условия работоспособности объекта по всем остальным выходным параметрам относят при этом к функциональным ограничениям.

То есть в частном критерии среди выходных параметров один выбирают в качестве целевой функции, а условия работоспособности остальных выходных параметров относят к *ограничениям базовой задачи оптимизации*. Оптимизация на основе такой постановки называется *оптимизацией по частному критерию*. Эта постановка вполне приемлема, но в большинстве случаев скажется недостаток частного критерия – возможность получить высокое качество объекта только по тому параметру, который принят в качестве целевой функции.

Аддитивный критерий применяют тогда, когда условия работоспособности позволяют выделить две группы выходных параметров. В первую группу входят выходные параметры  $y^+(X)$ , значения которых в процессе оптимизации нужно увеличивать (производительность, вероятность безотказной работы, для транспортных средств – грузоподъемность, максимальная скорость и т. п.), во вторую – выходные параметры  $y^-(X)$ , значения которых следует уменьшать (расход топлива, масса транспортного средства, время разгона и пр.).

Аддитивный критерий объединяет (свертывает) все выходные параметры (частные критерии) в одну целевую функцию, представляющую собой взвешенную сумму частных критериев

$$F(X) = \sum_{j=1}^m \omega_j y_j(X), \quad (1.2)$$

где  $\omega_j$  – весовой коэффициент,  $m$  – число выходных параметров. Функция (1.2) подлежит минимизации, при этом если условие работоспособности имеет вид  $y_j > T_j$ , то  $\omega_j < 0$ .

В этом случае целевая функция свертки будет иметь вид:

$$F(X) = \sum_{i=1}^k \lambda_i y_i^-(X) - \lambda_i y_i^+(X)$$

где  $\lambda_i > 0$  – весовой коэффициент, определяющий степень важности  $i$ -го выходного параметра (обычно значения  $\lambda_i$  выбираются проектировщиком и в процессе оптимизации остаются постоянными).

Объединение нескольких выходных параметров, имеющих в общем случае различную физическую размерность и величину, в одной скалярной целевой функции требует предварительного нормирования этих параметров. Способы нормирования параметров могут быть различны. Наиболее простым является отнесение этого параметра к некоторой заранее заданной средней величине, определяемой из опыта предыдущего проектирования, или к допускаемой величине (например, допускаемые напряжения). В этом случае все составляющие выражения (1.1) будут безразмерными величинами одного порядка, что делает удобным манипулирование коэффициентами  $\lambda_i$  в процессе проектирования.

Недостатки аддитивного критерия – субъективный подход к выбору весовых коэффициентов и неучет требований ТЗ. Действительно в (4.2) не входят нормы выходных параметров.

Более предпочтительным является максимальный критерий, в качестве целевой функции которого принимают выходной параметр, наиболее неблагоприятный с позиций выполнения условий работоспособности.

#### 1.4 Перспективы развития САПР

Создание сложного технического изделия немислимо без его графического представления и документирования творческих идей разработчика в виде рисунков, схем, чертежей. Неестественное для образа мышления двумерное (плоское) проектирование активно развивалось до середины 1990-х годов. Появление трехмерного (3D) моделирования оказалось настоящим прорывом, и по-настоящему массовым 3D-моделирование стало ближе к середине 1990-х годов. Неоспоримое преимущество пространственного конструирования заключалось в том, что конструктор получил инструмент перевода своих мыслей непосредственно в объемный вид, то есть он мог увидеть разрабатываемый объект таким, каков он будет в действительности [1].

В основе технологии объемного проектирования лежит пространственная геометрическая модель изделия (рис. 1.9), которая является более наглядным способом представления оригинала и более мощным и удобным инструментом для решения геометрических задач.

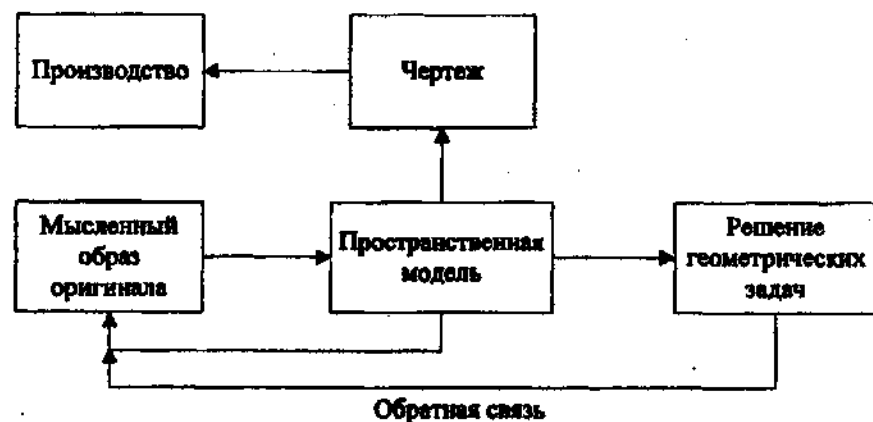


Рис. 1.9. Схема трехмерной технологии конструирования

Чертеж в этих условиях играет вспомогательную роль, а способы его создания основаны на методах компьютерной графики, методах отображения пространственной модели. Обмен информацией осуществляется на основе внутримашинного представления графического объекта, общей базы данных, что способствует эффективному функционированию программного обеспечения САПР конкретного изделия.

Помогает объемная модель и в реализации массы сопутствующих функций. 3D-модель можно использовать для решения расчетных задач (анализ напряжений, перемещений, колебаний, гидродинамики, теплопередачи), подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ, а также реалистичных изображений для технической документации и рекламных материалов, создания физических образцов на установках быстрого прототипирования. Ну и, конечно, по 3D-модели создаются чертежи – причем делать это существенно проще, чем вручную, поскольку вся геометрия на чертеже формируется автоматически, позволяя конструктору не задумываться о правильности построения видов, разрезов и сечений.

В настоящее время характерным является применение мощных профессиональных персональных компьютеров (рабочих станций), предназначенных специально для работы с трехмерной графикой.

Таким образом, вся логика развития автоматизации проектирования определяет интеграцию разрозненных задач в крупные автоматизированные системы, сочетающие в себе чертежные, информационно-поисковые, расчетные комплексы.

Одним из резервов повышения эффективности производства стало расширение сферы применения информационных технологий в компьютеризированных интегрированных производствах.

Понятие компьютеризированного интегрированного производства (КИП) зародилось в конце 80-х – начале 90-х годов. Концепция КИП подразумевала новый подход к организации и управлению производством, на базе применения новых компьютерных технологий и создания интегрированной информационной системы предприятия. Информационная интеграция процессов достигалась

путем использования общих баз данных, позволяющих более эффективно решать вопросы разработки и проектирования изделий, подготовки производства, планирования и управления производством, решения задач материально-технического обеспечения, охватывая все процессы предприятия, – концепция ERP (Enterprise Resource Planning – управление ресурсами предприятия).

Именно в это время на рынке появились самостоятельные программно-технические решения, пригодные для использования на предприятиях с различным уровнем автоматизации. Возникли новые устойчивые понятия, первые стандарты и спецификации, определяющие функциональные требования к системам комплексных решений автоматизации проектирования CAD/CAM/CAE/PDM, обеспечивающие информационную поддержку этапов жизненного цикла продукции.

В стандарте ISO 9004-1 «Административное управление качеством и элементы системы качества», **жизненный цикл (ЖЦ) продукции** – это совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции, до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации продукции.

Жизненный цикл промышленных изделий включает ряд этапов, начиная от зарождения идеи нового продукта до утилизации по окончании срока его использования.

Информационная поддержка этапов ЖЦ изделий на современных предприятиях, выпускающих сложные промышленные изделия, базируется на использовании *автоматизированных систем, разнообразие которых обусловлено спецификой задач, решаемых на различных этапах жизненного цикла изделий* (рис. 1.10) [7].

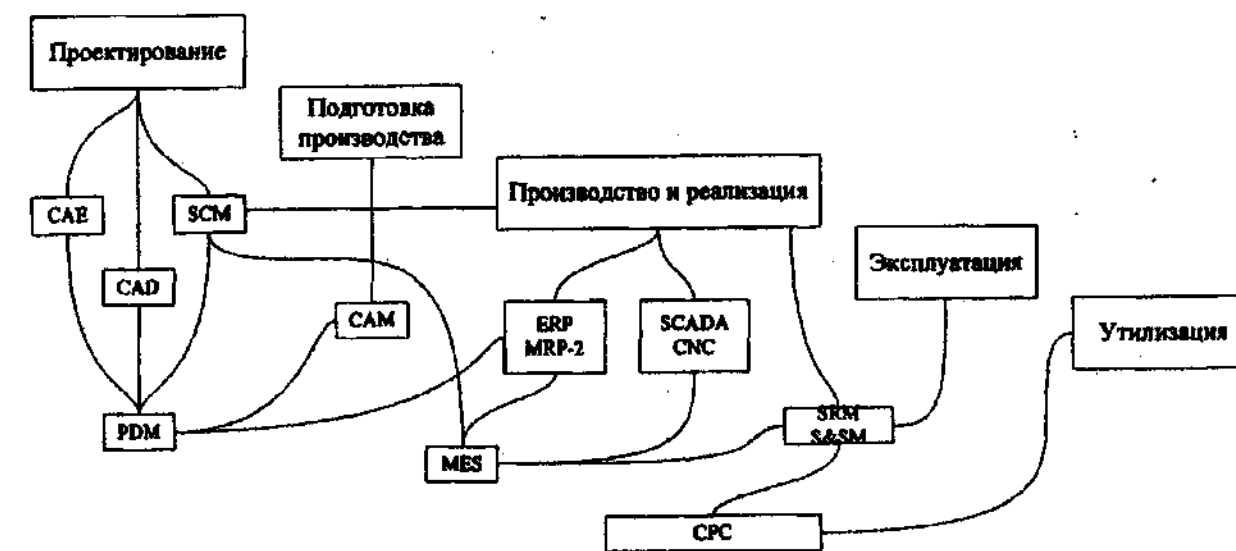


Рис. 1.10. Этапы жизненного цикла промышленных изделий и используемые АС

На этапе проектирования используют системы автоматизированного проектирования: CAD (Computer Aided Design) / CAM (Computer Aided

**Manufacturing) / CAE (Computer Aided Engineering) / PDM (Product Data Management).** В совокупности они формируют комплекс программных средств компьютерного проектирования, подготовки производства, инженерных расчетов и управления проектными данными.

В современных системах интегрированных производств уже на стадии проектирования применяют системы управления цепочками поставок (**SCM – Supply Chain Management, CSM – Component Supplier Management**), которые обеспечивают связь этапа проектирования и этапа производства и реализации продукции, где система **SCM** управляет поставками необходимых материалов и комплектующих.

Информационная поддержка этапа производства продукции осуществляется системами планирования и управления предприятием – **ERP (Enterprise Resource Planning)**.

Разновидностями **ERP**-систем являются системы планирование потребностей в материалах – **MRP (Materials Requirement Planning)** или управления производственными ресурсами – **MRP-2 (Manufacturing Resource Planning)**.

Производственные исполнительные системы типа **MES (Manufacturing Execution System)** в отличие от систем **MRP-2**, ориентированных на производственные бизнес-функции, решают оперативные задачи управления проектированием, производством и маркетингом.

В настоящее время понятие **MRP** стало общепринятым обозначением комплекса задач управления финансово-хозяйственной деятельностью предприятия. Данное понятие аналогично русскоязычным понятиям **АСУП** – автоматизированные системы управления предприятием, и **АСУТП** – автоматизированные системы управления технологическими процессами.

**АСУТП** контролируют и используют данные, характеризующие состояние технологического оборудования и протекание технологических процессов. Для выполнения функций сбора и обработка данных о состоянии оборудования и технологических процессов в составе **АСУТП** используют систему **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)** – систему диспетчерского управления и сбора данных. Непосредственное программное управление технологическим оборудованием осуществляют с помощью системы **CNC (Computer Numerical Control)** на базе контроллеров (специализированных компьютеров, называемых промышленными), которые встроены в технологическое оборудование.

На этапе реализации продукции выполняются функции управления отношениями с заказчиками и покупателями, проводится анализ рыночной ситуации, определяются перспективы спроса на планируемые изделия. Эти функции осуществляет система **CRM (Customer Requirement Management)** и маркетинговые сервисные системы **S&SM (Sales and Service Management)**.

На этапе эксплуатации применяют также специализированные компьютерные системы, занятые вопросами ремонта, контроля, диагностики эксплуатируемых систем.

В последнее время усилия многих компаний, производящих программно-аппаратные средства автоматизированных систем, направлены на создание систем электронного бизнеса (**E-Commerce**). Они объединяют в едином информационном пространстве запросы заказчиков и данные о возможностях множества организаций, специализирующихся на предоставлении различных услуг и выполнении тех или иных процедур и операций по проектированию, изготовлению, поставкам заказанных изделий. Такие системы **E-Commerce** называют системами управления данными в интегрированном информационном пространстве **CPC (Collaborative Product Commerce)** или **PLM (Product Lifecycle Management)**.

$$[\sigma] = \frac{R_n}{n} \quad (2.2.)$$

где  $R_n$  – нормативное сопротивление материала.

Расчетное значение коэффициента запаса прочности  $n$  определяют по формуле:

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \quad (2.3.)$$

где  $n_1$  – коэффициент условий эксплуатации, учитывающий режим и вероятность возникновения перегрузок;

$n_2$  – коэффициент, учитывающий влияние неоднородности структуры материала на сопротивление разрушению;

$n_3$  – коэффициент, учитывающий точность расчета нагрузок и напряжений в расчетном сечении.

С развитием средств компьютерного моделирования САПР появилась возможность проведения прочностных расчетов несущих элементов металлоконструкций грузоподъемных средств с использованием трехмерного твердотельного моделирования и метода конечных элементов (МКЭ). Характерной особенностью таких расчетов является то, что процедуры для отыскания числовых полей неизвестных функций в теле (таких как перемещения, напряжения, силы) строятся на основе вариационных принципов механики упругого тела без непосредственного использования дифференциальных уравнений. Заметим, что в настоящее время МКЭ является самым эффективным прямым методом приближенного решения прикладных задач механики. Это наиболее перспективный численный метод, позволяющий производить анализ напряженно-деформированного состояния сложной конструкции. Он позволяет учитывать как геометрию конструкции, так и характер нагрузок и свойства материала конструкции.

В основе этого метода лежит представление объекта исследования в виде набора некоторых простых с геометрической точки зрения фигур, называемых конечными элементами, взаимодействующими между собой только в узлах. Расположенные определенным образом (в зависимости от конструкции объекта) и закрепленные в соответствии с граничными условиями конечные элементы, форма которых определяется особенностями моделируемого объекта, позволяют описать все многообразие механических конструкций и деталей. Например, плоскую ферменную конструкцию можно смоделировать набором плоских стержневых фигур, рамную – набором объемных стержневых элементов, различного рода пластины и оболочки – множеством плоских треугольников или прямоугольников. То есть основными типами конечных элементов являются: стержневой (простой фермовый); пластинчатый (плоско напряженный); трехмерный объемный (сплошной). Первые два типа из них могут быть изгибаемыми осесимметричными и изгибаемыми пластинчатыми.

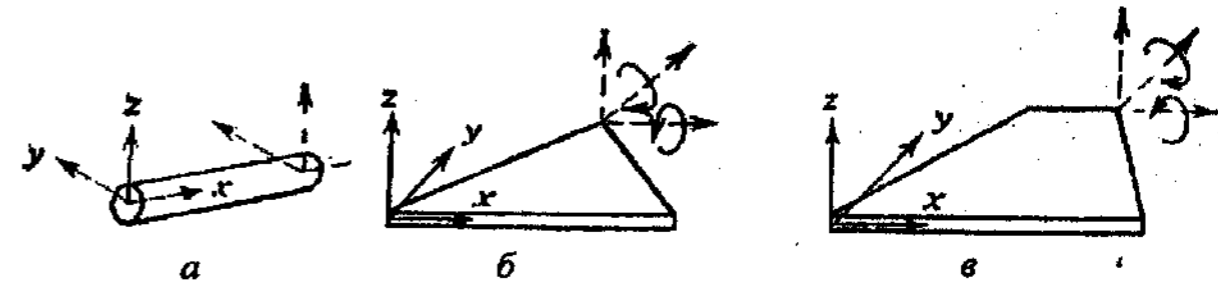


Рис. 2.3. Типы конечных элементов:

а – стержневой элемент; б, в – конечный элемент – пластина

Основным конечным элементом при условии плоского напряженного состояния является пластина, которая может иметь треугольную и четырехугольную форму. С помощью этих элементов решается много прикладных задач проектирования. Поэтому эти элементы и называются основными. Пластины используются также для описания оболочек и тонкостенных элементов.

Сплошные объемные трехмерные элементы необходимы в случае трехмерного плоско-напряженного элемента. Из них тетраэдр и параллелепипед являются наиболее распространенными формами трехмерных элементов, позволяющими анализировать практически любые прикладные трехмерные задачи.

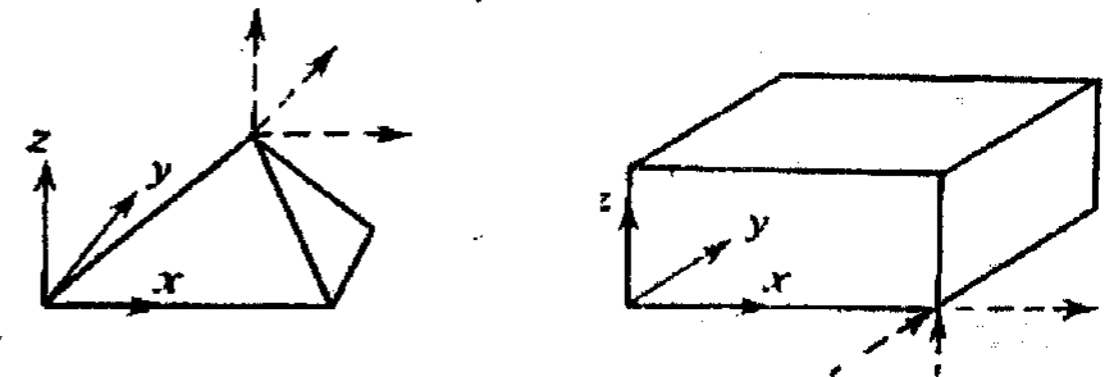


Рис. 2.4. Сплошные объемные конечные элементы

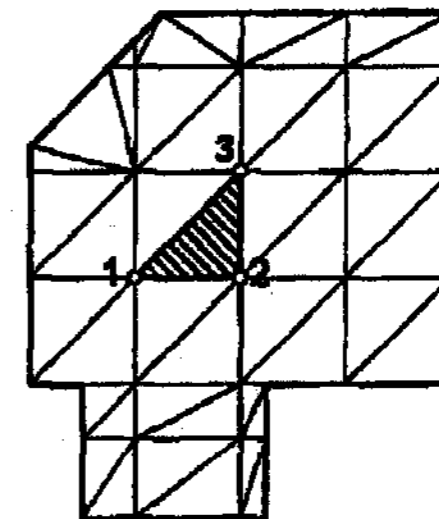


Рис. 2.5. Пример разбивки пластины на конечные элементы

На рисунке 2.5 показан пример разбивки пластины на конечные элементы – треугольники. Такое представление рассматриваемого объекта позволяет решать задачи расчета напряженного и деформированного состояний тела, устойчивости и динамики, нахождения частот и амплитуд собственных и вынужденных колебаний.

Упругие свойства отдельных элементов, на которые разбиваются конструкции, описываются матрицей податливости или матрицей жесткости в зависимости от того, какой метод расчета применяется – метод сил или метод перемещений. Эти матрицы определяют связь между узловыми силами и узловыми перемещениями рассматриваемого конечного элемента.

Мировыми лидерами среди программ конечно-элементного анализа являются программно-методические комплексы Nastran, Ansys, Nisa, Adina, Cosmos. Среди таких программ можно выделить отечественные и зарубежные CAD/CAE системы, имеющие русскоязычный интерфейс, – КОМПАС-3D, APM WinMachine, SolidWorks и др.

Эти программные комплексы позволяют реализовать классический процесс трехмерного параметрического проектирования – от идеи к ассоциативной объемной модели, от модели к конструкторской документации, и в полном объеме учитывают требования государственных стандартов и правил, относящихся как к оформлению конструкторской документации, так и к расчетным алгоритмам. В системах КОМПАС-3D, APM WinMachine, SolidWorks можно эффективно создавать трехмерные ассоциативные модели отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Средства интеграции с различными CAD/CAM/CAE-системами позволяют передавать созданные модели для проведения инженерных расчетов в специализированные модули этих программ. Так, например, интеграция с модулем APM Studio позволяет подготовить построенные в КОМПАС-3D модели к прочностному и динамическому анализу, выполнить расчеты и визуализировать результаты этих расчетов.

Комплексные решения прочностного анализа удобно выполнять в модуле SolidWorks Simulation, основанном на методе конечных элементов. Даже в минимальной конфигурации модуля прочностного анализа обеспечивается полноценный статический анализ как детали, так и сборки с использованием конечных элементов твердого тела, поверхностей и балок. Реализованы разнообразные контактные условия и всевозможные виртуальные соединители. Модуль Simulation не делает различия между моделями, созданными в SolidWorks или импортированными в базовый модуль.

Основными частями программы анализа по МКЭ являются библиотеки конечных элементов, препроцессор, решатель и постпроцессор.

Библиотека конечных элементов (КЭ) содержат модели КЭ – их матрицы жесткости. Очевидно, что модели КЭ будут различными для разных задач (анализ упругих или пластических деформаций, моделирование полей температур, электрических потенциалов и т. п.), разных форм КЭ (например, в

двумерном случае – треугольные или четырехугольные элементы), разных наборов координатных функций.

Исходные данные для препроцессора – геометрическая модель объекта, чаще всего получаемая из подсистемы конструирования. Основная функция препроцессора – представление исследуемой среды (детали) в сеточном виде, т. е. в виде множества конечных элементов.

Решатель – программа, которая ассемблирует (собирает) модели отдельных КЭ в общую систему алгебраических уравнений и решает эту систему одним из методов разреженных матриц.

Постпроцессор служит для визуализации результатов решения в удобной для пользователя форме. В машиностроительных САПР это графическая форма. Пользователь может видеть исходную (до нагружения) и деформированную формы детали, поля напряжений, температур, потенциалов и т. п. в виде цветных изображений, в которых палитра цветов или интенсивность свечения характеризует значения фазовой переменной.

## 2.2 Компьютерное проектирование напряженно-деформированного состояния на примере грузового крюка

Объект проектирования – однорогий крюк с цилиндрическим хвостиком, изготавливаемый методом горячей штамповки (ГШ) и методом свободнойковки (СК), предназначенный для применения в грузоподъемных машинах и механизмах с режимом работы по ГОСТ 25835-83. Расчетная грузоподъемность кранового механизма с ручным приводом  $Q = 0,8$  т.

По грузоподъемности выбираем номер заготовки крюка 4. Основные размеры заготовки однородного крюка принимаем по ГОСТ 6627-74. Заготовка крюка № 13:  $D = 26$  мм;  $S = 22$  мм;  $L = 85$  мм (тип А);  $b = 18$  мм;  $b_1 = 9$  мм;  $d = 20$  мм;  $d_1 = 17$  мм;  $d_2 = M16$ ;  $h = 26$  мм;  $l = 15$  мм;  $l_1 = 40$  мм;  $r_3 = 14$  мм;  $r_5 = 370$  мм;  $r_6 = 14$  мм;  $r_7 = 30$  мм;  $r_8 = 10$  мм;  $r_9 = 1,5$  мм;  $m = 0,5$  кг (не более).

Средствами программы SolidWorks, APM Studio или КОМПАС-3D создаем трехмерную твердотельную модель крюка с заданными геометрическими размерами (рис. 2.6) при этом используем метод создания элементов по сечениям. Твердотельная модели крюка позволяет легко генерировать чертеж в соответствии с требованиями стандартов (см. рис. 2.6).





Рис. 2.6. Трехмерные модели крюка

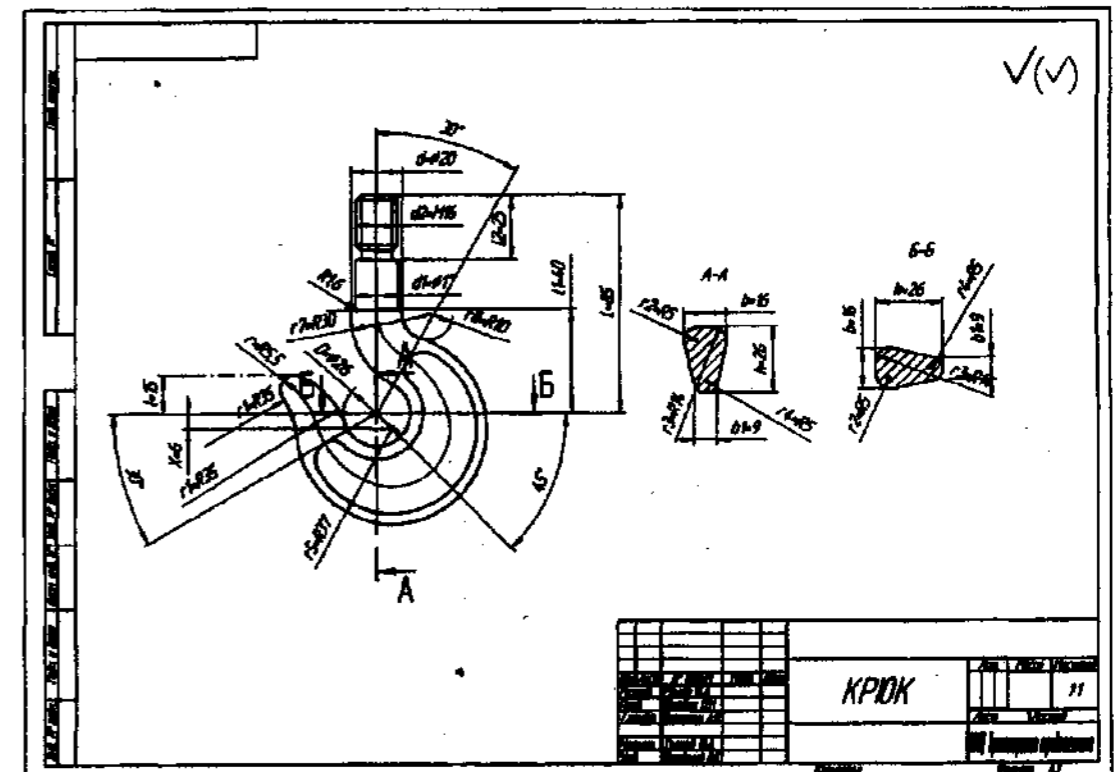


Рис. 2.7. Сгенерированный из трехмерной модели чертеж крюка

Прочностной анализ можно выполнить в модуле SolidWorks или APM Studio. В данном примере прочностной анализ выполнялся в программе SolidWorks 2012 года.

Последовательность проведения анализа стандартна для программ конечно-элементного анализа (рис. 2.8):

- выбираем тип упражнения, при котором исследуются напряжения, перемещения и нагрузки;
- присваиваем модели крюка материал, выбирая из базы данных (сталь простая углеродистая с пределом прочности 399 МПа и текучести 220 МПа);
- определяем и фиксируем места закреплений крюка (цилиндрическая часть хвостовика);
- определяем и устанавливаем место приложения и величину (10 000 Н) нагрузки, действующей от полезного груза на крюк;
- производим разбиение твердотельной модели крюка на объемные конечные элементы;
- запускаем статический и деформационный расчет.



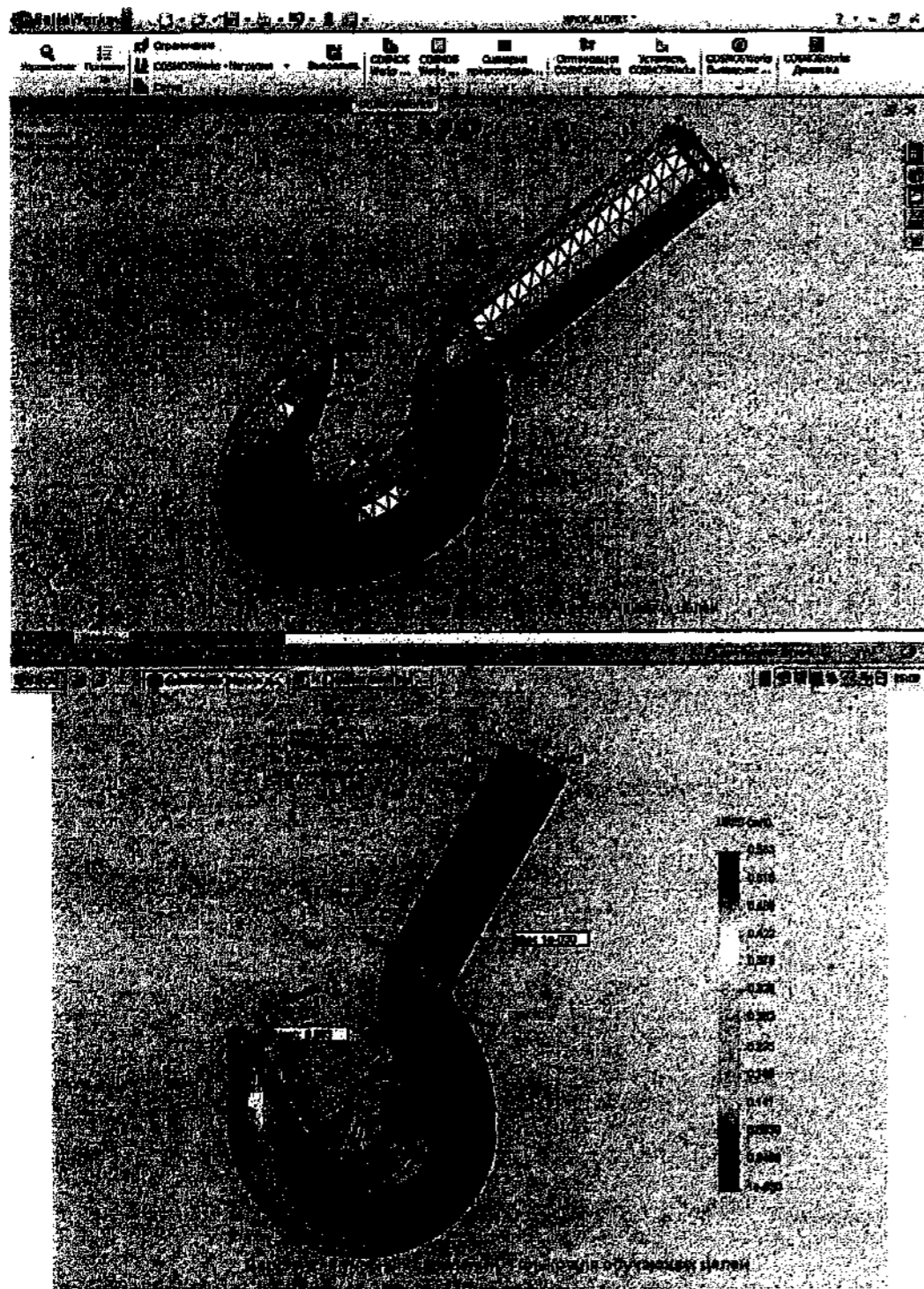


Рис. 2.8. Последовательность конечно-элементного анализа прочностного расчета крюка (продолжение)

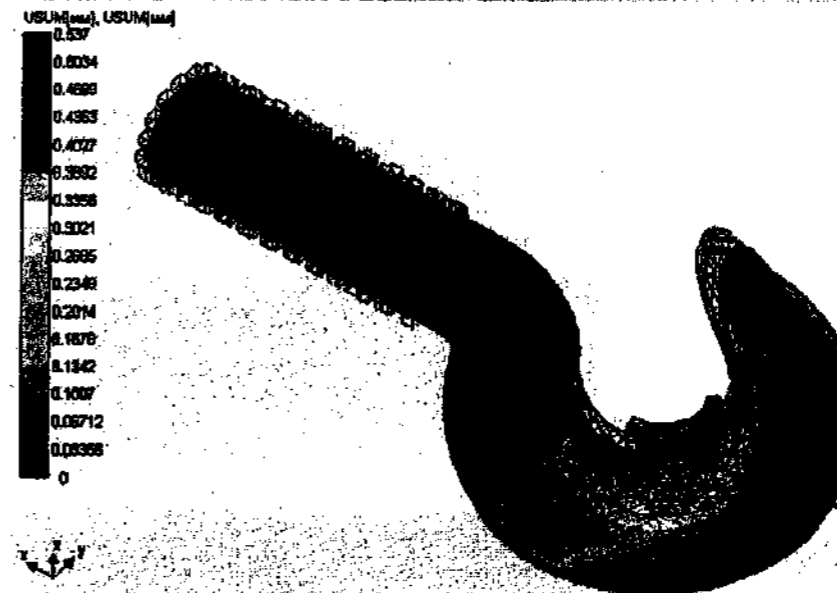
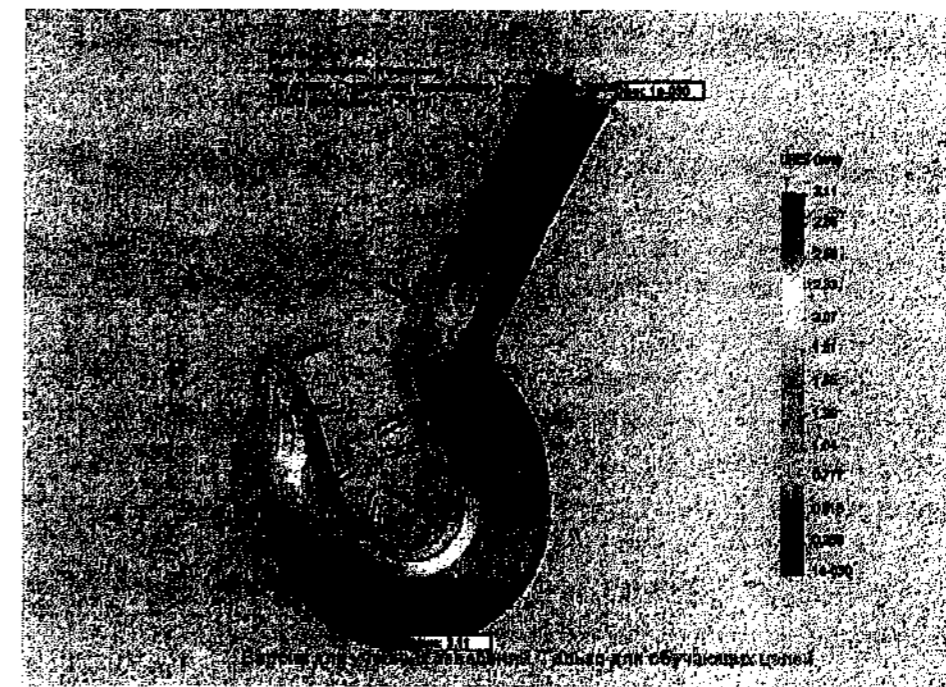


Рис. 2.8. Последовательность конечно-элементного анализа прочностного расчета крюка (окончание)

Результатом прочностного анализа крюка, проведенного программным комплексом Solid Works, является соответствие его ГОСТу 28609-90 по всем расчётным характеристикам. Конкретно – по способности выдерживать статическую нагрузку, превышающую его грузоподъёмную силу на 25 %. Все полученные напряжения находятся в допустимых пределах.



### 3 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

#### 3.1 Содержание и структура лабораторных работ

При составлении перечня и структуры лабораторных работ использовались следующие методологические принципы:

1 Поэтапное изучение общих принципов трехмерного твердотельного моделирования в одной из программных сред 3D-проектирования, самостоятельно выбранной студентом.

2 Самостоятельное обучение, под руководством преподавателя, прикладных возможностей трехмерного твердотельного моделирования выбранной программной среды поэтапным решением самостоятельных заданий, разработанных авторами пособия.

3 Обучение базируется на использовании принципа перехода от простого к сложному, который реализуется путем выполнения заданий разных уровней сложности. При их выполнении обучающийся решает общую задачу геометрического моделирования типового сборочного узла, поэтапно выполняя частные задачи моделирования составляющих элементов.

4 Сквозной принцип обучения реализуется при выполнении итоговой расчетно-графической работы, которая является собирательным заданием и включает в себя базовые знания, полученные при решении заданий лабораторных работ.

Программа обучения предусматривает выполнение 12 лабораторных работ в компьютерном классе под руководством преподавателя в течение 26 часов и самостоятельное выполнение и расчетно-графической работы в течение 15 часов. Структура лабораторных работ следующая: изучение общих принципов компьютерного моделирования – 8 часов занятий; компьютерное моделирование деталей грузоподъемного механизма – 8 часов занятий; компьютерное моделирование и анализ сборочного узла – 8 часов занятий. Отчетность по лабораторным работам представляется в электронном виде. Файлы выполненных заданий хранятся на сервере заданий, доступном для проверки преподавателем.

#### 3.2 Перечень и краткое руководство лабораторных работ

##### Лабораторная работа № 1

**Тема:** Основные элементы интерфейса программной среды 3D-проектирования (на выбор из имеющихся в классе).

**Цель:** Изучение основных элементов интерфейса программной среды 3D-проектирования.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

Войти в справочную систему изучаемой среды, открыть раздел «Основные элементы интерфейса» и полностью изучить его содержание.

##### Лабораторная работа № 2

**Тема:** Общие принципы моделирования деталей. Построение первой модели.

**Цель:** Изучение общих принципов моделирования деталей.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

1 Войдите в справочную систему программы, откройте раздел, посвященный общим принципам трехмерного моделирования деталей, изучите его.

2 Выполните встроенное виртуальное задание по тематике лабораторной работы. При выполнении заданий следуйте указаниям справочной системы.

3 Представьте результаты проектирования для проверки преподавателю. Обязательно сохраните свои построения в электронном виде, уточнив место хранения у преподавателя.

##### Лабораторная работа № 3

**Тема:** Построение элементов крюковой подвески.

**Цель:** Получение самостоятельных навыков 3D-моделирования деталей.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

1 Постройте трехмерную модель деталей крюковой подвески **Планка** и **Корпус**, показанных на рис. 3.1, 3.2.

2 Индивидуальный вариант задания выберите из таблицы П1 (приложение) по последним двум цифрам зачетной книжки. Конструктивные размеры деталей **Планка** и **Боковина** представлены на рис. 3.1 и 3.2.

3 Назначьте деталям материал – сталь 45, определите их вес и положение центра тяжести. Результаты сдайте для проверки преподавателю и сохраните в индивидуальной папке.

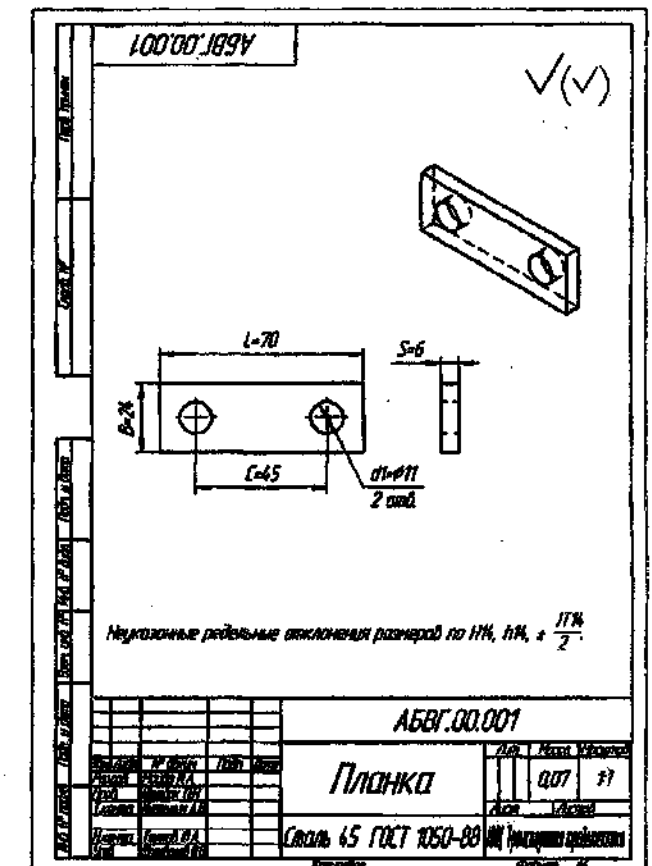
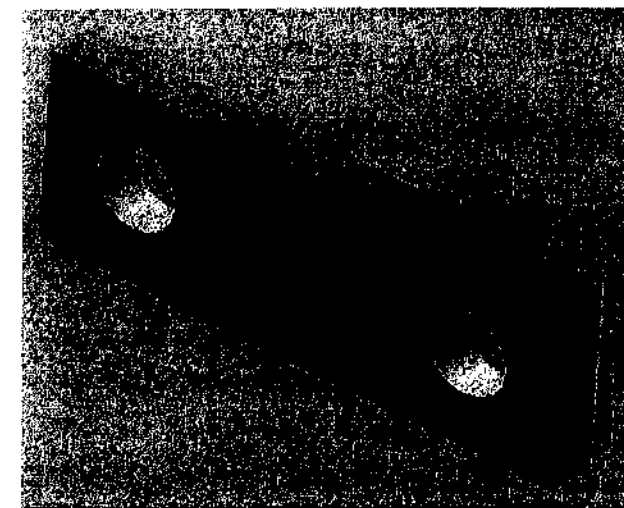


Рис. 3.1. Модель и чертеж детали Планка

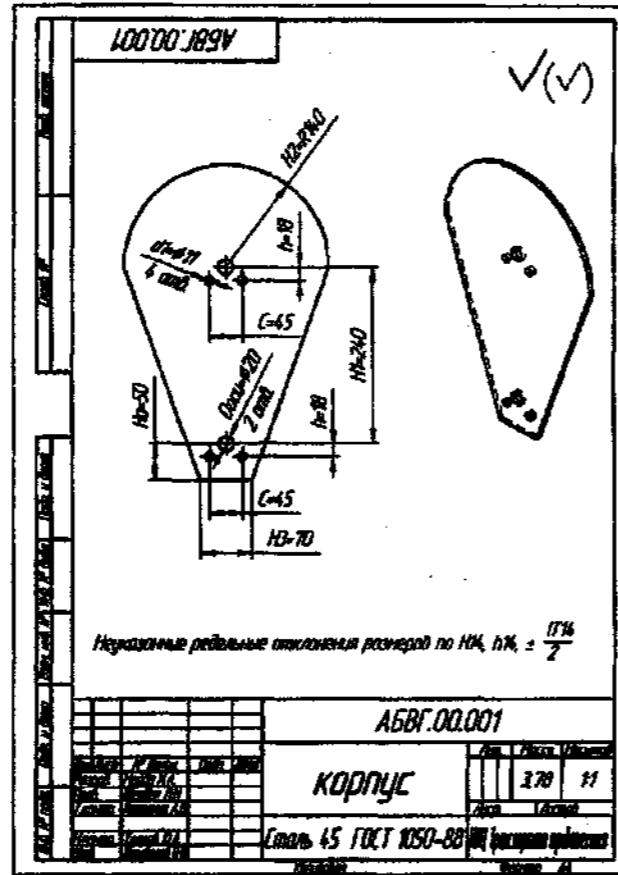
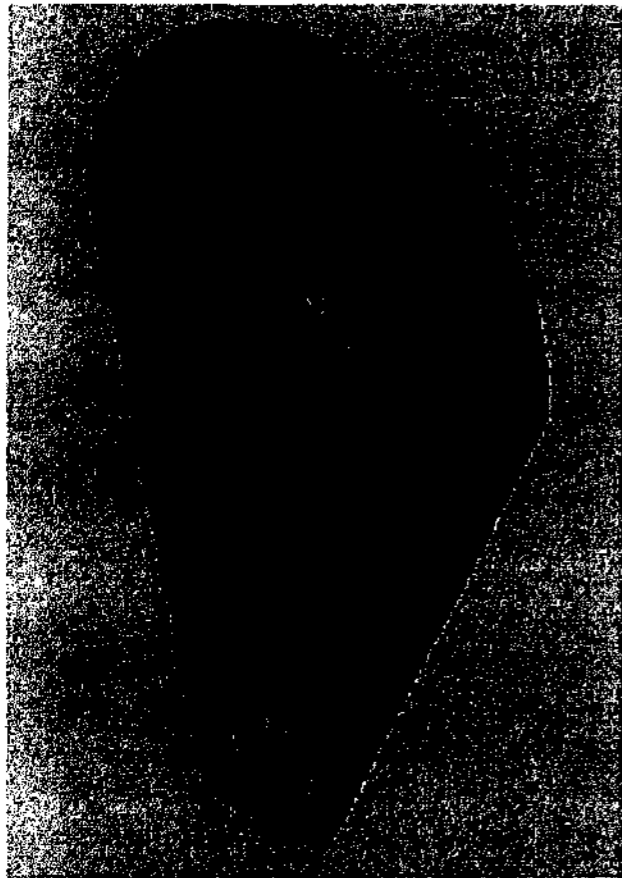


Рис. 3.2. Модель и чертеж детали Боковина

#### Лабораторная работа № 4

**Тема:** Построение рабочих чертежей элементов крюковой подвески с использованием заготовки чертежа.

**Цель:** Получение самостоятельных навыков создания рабочего чертежа детали по его 3D-модели.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

1 Выполните указания, изложенные в справочной системе программы по созданию рабочего чертежа детали по его 3D-модели. Выполните рабочие чертежи деталей крюковой подвески Планка и Боковина, показанных на рис. 3.1, 3.2.

2 Результаты построений сохраните в индивидуальной папке.

#### Лабораторная работа № 5

**Тема:** Основы редактирования модели.

**Цель:** Изучение способов редактирования модели.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

Выполните редактирование моделей деталей крюковой подвески Планка и Боковина (пример отредактированных деталей на рис. 3.3). Результаты редактирования сохраните в индивидуальной папке и представьте для проверки преподавателю.



Рис. 3.3. Пример модели Планка и Боковина после редакции

#### Лабораторная работа № 6

**Тема:** Гибкие технологии моделирования. Параметризация моделей.

**Цель:** Изучение способов параметризации моделей.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

1 Постройте гибкую модель детали Корпус, выполнив указания, изложенные в разделах справочной системы по теме работы.

2 Результаты редактирования сохраните в индивидуальной папке и представьте для проверки преподавателю.

#### Лабораторная работа № 7

**Тема:** Построение оси барабана и траверсы.

**Цель:** Получение самостоятельных навыков построения деталей вращения.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

1 Выполните построение геометрических моделей деталей крюковой подвески Ось барабана и Траверса.

2 Индивидуальный вариант задания выберите из таблицы П2 (приложение) по последним двум цифрам зачетной книжки. Соотношение геометрических размеров деталей Ось барабана и Траверса показано на рис. 3.4 и 3.5.

3 Результаты построений сохраните в индивидуальной папке и представьте для проверки преподавателю.



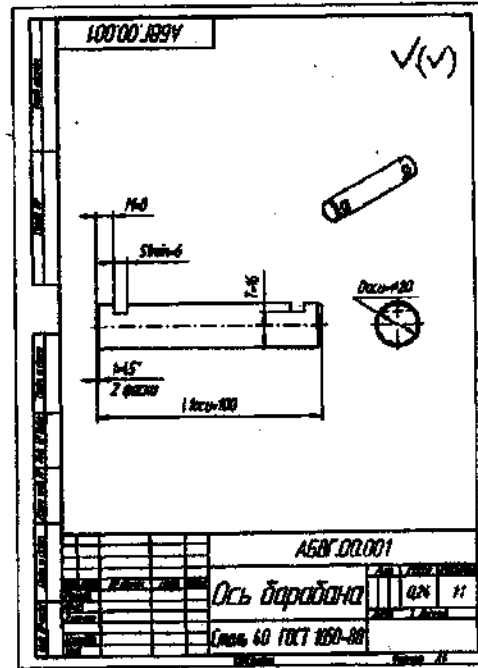


Рис. 3.4. Чертеж и модель детали **Ось барабана**

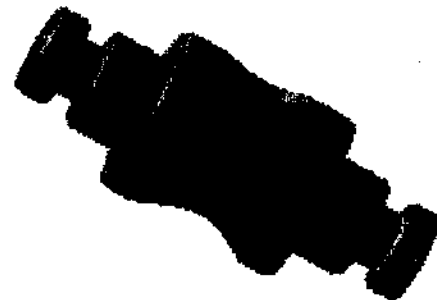
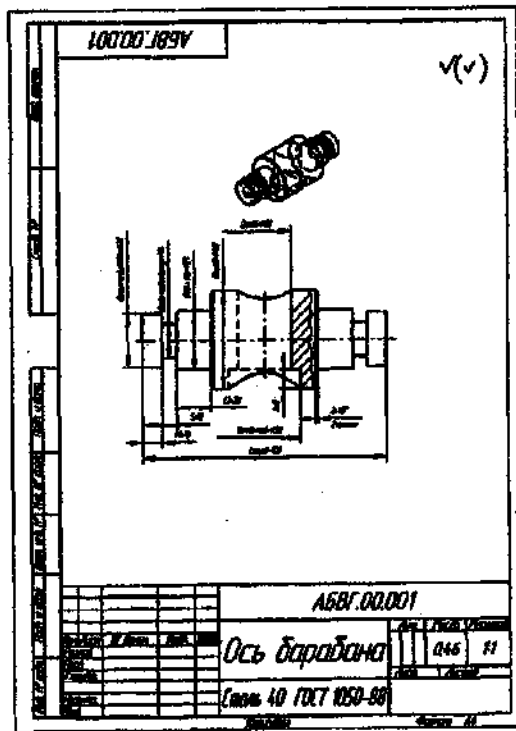


Рис. 3.5. Чертеж и модель детали **Траверса**

**Лабораторная работа № 8**

**Тема:** Дополнительные возможности моделирования. Построение элементов по сечениям.

**Цель:** Изучение дополнительных способов построения деталей.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

1 Двойным щелчком левой кнопки мыши на ярлыке «Учебник 3D», расположенном на рабочем столе, откройте главу 6 «Дополнительные возможности моделирования» электронного варианта книги А. Потемкина «Трёхмерное твердотельное моделирование».

2 Выполните построение модели детали **Молоток**, используя указания, изложенные в разделе «Создание элементов по сечениям» шестой главы (с. 329–350). Для выполнения построений войдите в программу КОМПАС-5.11.

3 Результаты построений сохраните в индивидуальной папке и представьте для проверки преподавателю.

**Лабораторная работа № 9**

**Тема:** Дополнительные возможности моделирования. Создание кинематических элементов.

**Цель:** Изучение дополнительных способов построения деталей.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

1 Выполните построение 3D-модели детали крюковой подвески **Блок** (пример детали на рис. 3.6). Индивидуальный вариант задания выберите из таблицы ПЗ (приложение).

2 Результаты редактирования сохраните в индивидуальной папке и представьте для проверки преподавателю.

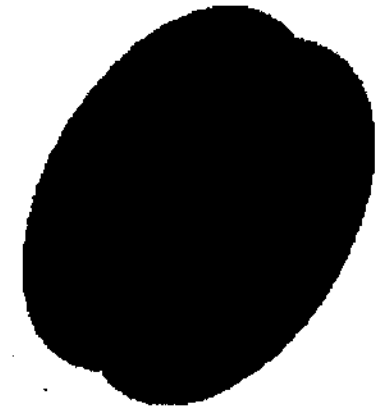
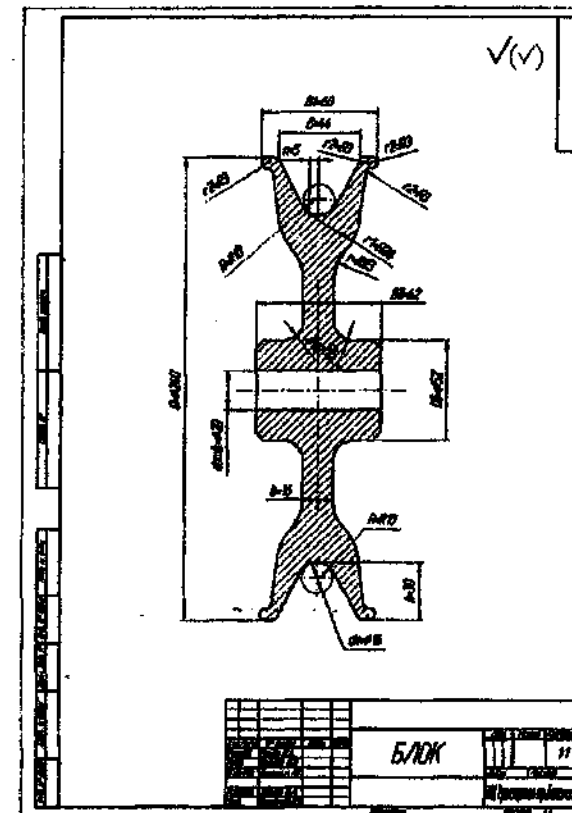


Рис. 3.6. Чертеж и модель детали **Блок**

### Лабораторная работа № 10

**Тема:** Построение детали Крюк.

**Цель:** Получение самостоятельных навыков дополнительных способов построения деталей.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

1. Выполните построение геометрической модели детали крюковой подвески **Крюк**.

2. Индивидуальный вариант задания выберите из таблицы П4 (приложение), по последним двум цифрам зачетной книжки. Соотношение геометрических размеров детали **Крюк** показано на рис. 3.7.

3. Результаты построений сохраните в индивидуальной папке и представьте для проверки преподавателю.

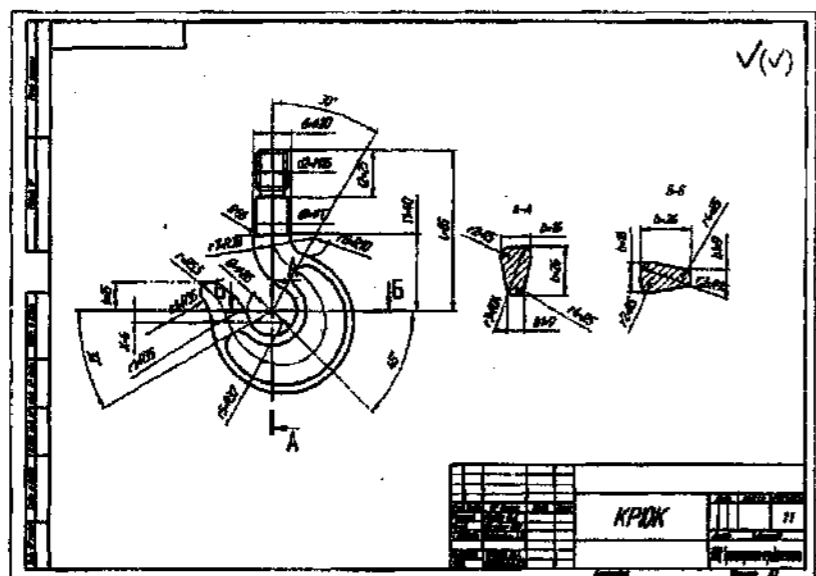


Рис. 3.7. Чертеж и модель детали **Крюк**

### Лабораторная работа № 11

**Тема:** Создание 3D-сборки крюковой подвески.

**Цель:** Получение самостоятельных навыков создания 3D-сборки

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

1. Выполните построение 3D-сборки геометрической модели крюковой подвески (пример сборки на рис. 3.8). При построении сборки пользуйтесь ранее созданными 3D-моделями деталей крюковой подвески **Планка**, **Боковина**, **Ось барабана**, **Траверса**, **Блок**, **Крюк**.

2. Недостающие крепежные детали выберите из электронной библиотеки стандартных крепежных элементов программы.

3. Результаты построений сохраните в индивидуальной папке и представьте для проверки преподавателю.

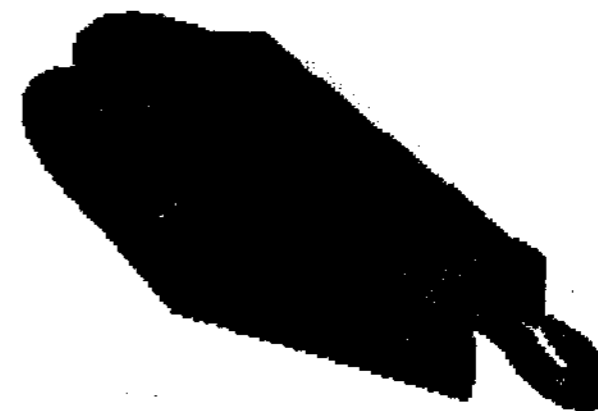


Рис. 3.8. 3D-сборка крюковой подвески

### Лабораторная работа № 12

**Тема:** Самостоятельная работа. Оформление расчетно-графической (контрольной) итоговой работы.

**Цель:** Подведение итогов 3D-моделирования.

**Руководство по выполнению лабораторной работы:**

1. Оформите результаты моделирования деталей крюковой подвески в виде РГР по требованиям СТП РГУПС – 2007. Результаты должны содержать построения деталей в виде файлов электронных 3D-моделей и 2D-чертежей, собранных в одну папку:

- **Планка** (3D-модель и 2D – рабочий чертеж);
- **Боковина** (3D-модель и 2D – рабочий чертеж);
- **Ось барабана** (3D-модель и 2D – рабочий чертеж);
- **Траверса** (3D-модель и 2D – рабочий чертеж);
- **Блок** (3D-модель и 2D – рабочий чертеж);
- **Крюк** (3D-модель и 2D – рабочий чертеж);

и 3D-сборки крюковой подвески.

2. Для проверки преподавателю представьте РГР в электронном и распечатанном на формате А4 виде.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- 1 Зыков, О. Промышленная автоматизация: движение от САПР к PLM / О. Зыков. – ITNews. – 4 с.
- 2 Романычева, Э.Т. AutoCAD 14 / Э.Т. Романычева, Т.М. Сидорова, С.Ю. Сидоров. – М. : ДМК, Радио и связь, 1997. – 480 с.
- 3 Дементьев, Ю.В. САПР в Автомобиле- и тракторостроении: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Ю.В. Дементьев. – М. : Издательский центр «Академия», 2004 – 224 с.
- 4 Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов / И.П. Норенков. – М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 360 с.
- 5 Головицина, М.В. Технические средства САПР и их развитие. Лекция 5 и 6 [Электронный ресурс] / М.В. Головицина // Интернет-Университет. – Режим доступа: <http://www.intuit.ru/>
- 6 Р50-1-031-2001. «Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Часть 1. Стадии жизненного цикла продукции». – М. : Госстандарт РФ, 2001.
- 7 Р50.1.028-2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования». – М. : Госстандарт РФ, 2001.
- 8 Концепция развития ИПИ-технологий в промышленности России. – М. : ВИМИ, 2002.
- 9 Лившиц, Я.Д. Примеры расчета железобетонных мостов / Я.Д. Лившиц, М.М. Онищенко, А.А. Шкуратовский. – Киев : Вища шк. Головное изд-во, 1986.
- 10 СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы. – М. : Стройиздат, 1985.

Таблица П1

Варианты заданий (соответствуют последним цифрам номера зачетной книжки)	Параметры деталей крюковой подвески													
	Планка (рис. 3.1)				Меж-центровой размер	Боковина (рис. 3.2)								
	Ширина планки	Длина планки	Толщина планки (корпуса)	Диаметр отверстий		Конструктивные размеры корпуса крановой подвески								
B, мм	L, мм	S, мм	d <sub>1</sub> , мм	C, мм	H <sub>3</sub> , мм	H <sub>2</sub> , мм	H <sub>1</sub> , мм	H <sub>0</sub> , мм	h, мм	D, мм				
00	25	50	75	24	70	6	11	45	70	140	240	50	18	22
01	26	51	76							142	242	52	19	25
02	27	52	77							144	244	54	19,5	28
03	28	53	78							146	246	56	21	30
04	29	54	79	29	95	7	13	65	80	148	248	58	22	35
05	30	55	80							160	255	68	26,5	40
06	31	56	81							162	257	70	29	45
07	32	57	82							164	259	72	30,5	50
08	33	58	83							166	261	74	32	55
09	34	59	84							168	263	76	33,5	60
10	35	60	85	33	110	8	15	75	90	170	270	80	35	65
11	36	61	86							172	272	82	36,5	70
12	37	62	87							174	274	84	37	75
13	38	63	88							176	276	86	28,5	20
14	39	64	89	24	70	6	11	45	60	140	240	50	18	22
15	40	65	90							142	242	52	19	25
16	41	66	91							144	244	54	19,5	28
17	42	67	92							146	246	56	21	30
18	43	68	93							148	248	58	22	35
19	44	69	94							29	95	7	13	65
20	45	70	95	162	257	70	29	45						
21	46	71	96	164	259	72	30,5	50						
22	47	72	97	166	261	74	32	55						
23	48	73	98	168	263	76	33,5	60						
24	49	74	99	170	270	80	35	65						

Таблица П2

Варианты заданий (соответствуют последним цифрам номера зачетной книжки)	Параметры деталей крюковой подвески: ось барабана (рис. 3.3), траверса (рис. 3.4)															
	Диаметр оси барабана и траверсы			Длина оси барабана и траверсы			Технологические размеры		Диаметр траверсы	Диаметр гнезда подшипника	Диаметр под отверстие крюка	Диаметр под канавку	Глубина гнезда подшипника	Длина траверсы		
	$D_{оск}$ мм	$L_{1оск}$ мм	$L_{2оск}$ мм	Sk	M	T	$D_{трав.}$ мм	$D_{подш.}$ мм	$d_{отв.}$ мм	$D_{кан.}$ мм	$H_{подш.}$ мм	$L_{1трав.}$ мм	$L_{2трав.}$ мм	Один барабан	Два барабана	
														Один барабан	Два барабана	
00	25	50	75	20	100	-	7	8	16	40	28	22	12	8	40	-
01	26	51	76	22	100	-			18	44	30	22	14		40	-
02	27	52	77	25	100	-			20	50	35	27	17		45	-
03	28	53	78	28	105	-			23	56	42	27	19		52	-
04	29	54	79	30	105	-			25	60	47	32	20		57	-
05	30	55	80	35	134	-	8	9	29	70	52	37	23	10	62	-
06	31	56	81	40	140	-			34	80	60	37	26		70	-
07	32	57	82	45	145	-			38	90	65	42	30		75	-
08	33	58	83	50	150	-			42	100	70	48	33		80	-
09	34	59	84	55	158	-			46	110	78	54	36		88	-
10	35	60	85	60	160	-	9	10	50	120	80	58	40	12	90	-
11	36	61	86	65	165	-			54	130	85	64	43		95	-
12	37	62	87	70	170	-			58	140	90	70	46		100	-
13	38	63	88	75	180	-			62	150	100	82	50		110	-
14	39	64	89	20	-	200	7	8	16	40	28	22	14	8	-	80
15	40	65	90	22	-	200			18	44	30	22	15		-	80
16	41	66	91	25	-	200			20	50	35	27	16		-	90
17	42	67	92	28	-	210			23	56	42	27	18		-	104
18	43	68	93	30	-	210			25	60	47	32	20		-	114
19	44	69	94	35	-	205	8	9	29	70	52	37	23	10	-	124
20	45	70	95	40	-	215			34	80	60	37	26		-	140
21	46	71	96	45	-	220			38	90	65	42	30		-	150
22	47	72	97	50	-	225			42	100	70	48	33		-	160
23	48	73	98	55	-	235			46	110	80	54	36		-	170
24	49	74	99	60	-	260	9	10	50	120	85	58	40	12	-	180

Таблица П3

Варианты заданий (соответствуют последним цифрам номера зачетной книжки)	Конструктивные размеры блока крюковой подвески (рис. 3.6)														
	R	B	B1	h	r	r1	n	b	D	Bб	Dб	dотв.			
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	
00	25	50	75	25	20	22	4	14	240	51	50	20			
01	26	51	76						242	52	52	22			
02	27	52	77						244	53	54	25			
03	28	53	78						246	54	56	28			
04	29	54	79						248	55	58	30			
05	30	55	80						260	56	68	35			
06	31	56	81						262	57	70	40			
07	32	57	82						264	58	72	45			
08	33	58	83						266	59	74	50			
09	34	59	84						268	60	76	55			
10	35	60	85	9.5	44	60	30	23	26	5	16	270	61	80	60
11	36	61	86									272	62	82	65
12	37	62	87									274	63	84	70
13	38	63	88									276	64	86	75
14	39	64	89	7	36	50	25	20	22	4	14	240	51	50	20
15	40	65	90									242	52	52	22
16	41	66	91									244	53	54	25
17	42	67	92									246	54	56	28
18	43	68	93									248	55	58	30
19	44	69	94									260	56	68	35
20	45	70	95									262	57	70	40
21	46	71	96									264	58	72	45
22	47	72	97									266	59	74	50
23	48	73	98									268	60	76	55
24	49	74	99	9.5	44	60	30	23	26	5	16	270	61	80	60

Таблица П4

Варианты заданий (соответствуют последним цифрам номера зачетной книжки)	№ заготовки крюка	Конструктивные размеры крюка, мм (рис. 3.7)																				
		D	S	L	b	b1	d	d1	d2	h	l	l1	l2	r	r1	r2, r4	r3	r5	r6	r7	r8	r9
00; 25; 50; 75	4	26	22	85	18	9	20	17	M16	26	15	40	25	5,5	35	5	14	37	14	30	10	1,5
01; 26; 51; 76	5	28	24	90	20	9	20	17	M16	28	16	45	25	6	38	5,5	16	40	16	32	11	1,5
02; 27; 52; 77	6	32	26	105	22	10	25	20	M20	32	18	50	30	6	40	5,5	18	45	18	36	13	2,5
03; 28; 53; 78	7	36	30	120	24	10	25	20	M20	36	20	55	30	6,5	45	6	20	50	20	40	15	2,5
04; 29; 54; 79	8	40	33	130	26	12	30	25	M24	40	22	65	35	7	50	6	22	56	30	45	17	2,5
05; 30; 55; 80	9	45	35	145	30	12	35	30	M27	45	25	70	40	8	55	7	25	62	36	50	18	2,5
06; 31; 56; 81	10	52	40	165	34	12	35	30	M30	52	30	85	45	10	60	8	28	70	38	55	20	2,5
07; 32; 57; 82	11	60	45	180	38	16	40	35	M33	55	34	90	50	10	70	9	30	78	42	60	21	2,5
08; 33; 58; 83	12	65	50	195	40	16	46	40	M36	65	36	95	55	10	80	9	35	90	45	70	22	2,5
09; 34; 59; 84	13	75	55	250	48	20	52	45	M42	75	38	100	60	11	85	10	40	100	50	75	25	2,5
10; 35; 60; 85	14	85	65	260	54	20	56	50	M48	82	42	120	70	12	95	12	45	110	60	85	28	2,5
11; 36; 61; 86	15	95	75	310	60	20	62	55	M52	90	46	135	75	15	110	13	50	125	65	95	30	2,5
12; 37; 62; 87	16	11	85	340	65	20	68	60	M56	100	55	150	80	16	120	13	55	140	75	110	34	2,5
13; 38; 63; 88	17	12	90	41	75	20	80	70	M64	115	60	165	90	20	125	14	62	155	84	120	36	2,5
14; 39; 64; 89	4	26	22	85	18	9	20	17	M16	26	15	40	25	5,5	35	5	14	37	14	30	10	1,5
15; 40; 65; 90	5	28	24	90	20	9	20	17	M16	28	16	45	25	6	38	5,5	16	40	16	32	11	1,5
16; 41; 66; 91	6	32	26	105	22	10	25	20	M20	32	18	50	30	6	40	5,5	18	45	18	36	13	2,5
17; 42; 67; 92	7	36	30	120	24	10	25	20	M20	36	20	55	30	6,5	45	6	20	50	20	40	15	2,5
18; 43; 68; 93	8	40	33	130	26	12	30	25	M24	40	22	65	35	7	50	6	22	56	30	45	17	2,5
19; 44; 69; 94	9	45	35	145	30	12	35	30	M27	45	25	70	40	8	55	7	25	62	36	50	18	2,5
20; 45; 70; 95	10	52	40	165	34	12	35	30	M30	52	30	85	45	10	60	8	28	70	38	55	20	2,5
21; 46; 71; 96	11	60	45	180	38	16	40	35	M33	55	34	90	50	10	70	9	30	78	42	60	21	2,5
22; 47; 72; 97	12	65	50	195	40	16	46	40	M36	65	36	95	55	10	80	9	35	90	45	70	22	2,5
23; 48; 73; 98	13	75	55	250	48	20	52	45	M42	75	38	100	60	11	85	10	40	100	50	75	25	2,5
24; 49; 74; 99	14	85	65	260	54	20	56	50	M48	82	42	120	70	12	95	12	45	110	60	85	28	2,5