

Федеральное агентство по образованию

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В. А. ДЬЯЧЕНКО А. Б. СМИРНОВ

**БИОНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ДИЗАЙН-ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2008**

Федеральное агентство по образованию

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Приоритетный национальный проект «Образование»

Инновационная образовательная программа
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

В. А. ДЬЯЧЕНКО А. Б. СМИРНОВ

**БИОНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ДИЗАЙН-ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2008

УДК 574.6
Д 93

Рецензенты:

Декан факультета медицинской физики СПбГПУ, член-корр. АМН, д-р мед. наук, проф. В.О. Самойлов;
проф. кафедры «Автоматы» СПбГПУ, д-р техн. наук В.Л. Жавнер.

Дьяченко В.А., Смирнов А.Б. Бионические основы дизайн-проектирования. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 195 с.

Пособие соответствует дисциплине «Бионические основы дизайн-проектирования» учебного плана подготовки студентов по направлению 070600 «Дизайн» по специальности 070601.

Рассмотрены современные бионические подходы к созданию технических систем, основанных на использовании принципов построения живых организмов, и их применение в качестве эффективных средств в различных областях техники.

Приведены основные принципы организации и функционирования живой природы. Освещены вопросы гармонии формообразования и цвета флоры и фауны и методы заимствования ее в задачах дизайн-проектирования. Приведены и оценены структура и принципы построения несущих систем растений и животных, рассматриваемых в качестве прототипов объектов техники. Рассмотрены бионические аспекты построения мобильных систем, в том числе роботов. Показаны пути создания сенсорных устройств на базе аналогии с принципами построения рецепторной сферы живых организмов.

Пособие предназначено для студентов различных курсов, обучающихся по направлению «Дизайн» и аспирантов.

Учебное пособие разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы Санкт-Петербургского государственного политехнического университета «Развитие политехнической системы подготовки кадров в инновационной среде науки и высокотехнологичных производств Северо-Западного региона России»

Печатается по решению Дирекции инновационной образовательной программы и редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

ISBN 978-5-7422-2216-3

©Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2008
© Дьяченко В.А., Смирнов А.Б., 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. БИОНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ	6
1.1. Цели и задачи бионики и биодизайна	7
1.2. Бионические системы	10
1.3. «Достижения» живой природы	13
2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЖИВОЙ ПРИРОДЫ — ИСТОЧНИК ИДЕЙ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ДИЗАЙНЕ	15
2.1. Функциональные свойства и основные принципы развития живой природы	15
2.2. Эволюция организмов и их взаимосвязь с неживой природой	18
2.2.1. Влияние сил гравитации	18
2.2.2. Способы существования и особенности построения организмов	20
2.3. Преобразование энергии в живых организмах	21
3. ГАРМОНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ЦВЕТА В БИОНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ДИЗАЙНЕРСКИХ РАЗРАБОТКАХ	23
3.1. Размеры и пропорции в строении биологических систем	23
3.2. Золотое сечение в живой природе	25
3.3. Модульный принцип построения и плотная упаковка в живой природе и технике	33
3.4. Симметрия	42
3.5. Колористика живой природы и ее отражение в дизайне	49
4. НЕСУЩИЕ СИСТЕМЫ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ – ПРОТОТИПЫ ДИЗАЙНЕРСКИХ И ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ	60
4.1. Материалы и структура объектов живой природы и их технические аналоги	60
4.1.1. Гетерогенность структуры биологических тканей	60
	3

4.1.2. Композиционные материалы стеблей растений	64
4.2. Вертикальные стержневые системы	67
4.2.1. Свойства вертикальных бионических структур	67
4.2.2. Устойчивость пластинчато-стержневых систем	73
4.3. Вантовые, мембранные и тентовые системы в живой природе и технике	82
4.3.1. Стержне-вантовые системы	83
4.3.2. Вантовые системы	89
4.3.3. Мембранные и тентовые системы	94
4.3.4. Арки и скорлупы в живой природе и технике	98
4.3.5. Спирали в живой природе и технике	112
4.3.6. Пневмо- и гидростатические бионические системы	121
5. ЛОКОМОЦИОННЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ТЕХНИЧЕСКИЕ АНАЛОГИ	127
5.1. Способы движения живых организмов и их движители	127
5.2. Движение по суше	129
5.3. Движение по воде	140
5.4. Движение в воздухе	156
6. СЕНСОРИКА ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ И В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	171
6.1. Структура биосенсорных систем	172
6.2. Зрение животных и системы технического зрения	174
6.3. Биологические нейронные сети и нейрокомпьютеры	184
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	191
ПРИЛОЖЕНИЯ	192



ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие посвящено одному из наиболее перспективных направлений в области дизайн-проектирования. Живая природа позволяет получить новый импульс для дизайнерского осмысления концептуальных решений новых технических систем. Цель учебного пособия состоит в использовании методологии бионики для решения различных задач в области проектирования и дизайна объектов техники.

Материалы пособия полезны для курсового и дипломного проектирования, а также для аспирантов и научных работников.

Учебное пособие состоит из шести глав. В главе 1 рассматриваются задачи и основные направления бионики – синтетической науки на базе биологических и технических знаний. Глава 2 посвящена изучению принципов построения и эволюционного развития живых организмов. В главе 3 рассматриваются вопросы гармонии формообразования и колористики в живой природе и методы переноса их в дизайн. В главе 4 рассматриваются вопросы построения надежных, легких и прочных несущих систем живых организмов и возможности создания технических объектов, обладающих такими же свойствами. Глава 5 посвящена принципам движения живых существ и способам построения мобильных устройств. В главе 6 рассматриваются некоторые аспекты сенсорики высокоорганизованных организмов и аналогичные системы очувствления в технике.

1. БИОНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Бионические основы построения и функционирования живой природы являются тем эталоном, к которому стремятся приблизиться в своем творчестве дизайнеры и разработчики новой техники. История человечества всегда была связана с живой природой, поэтому не удивительно, что человек черпал в ней вдохновение для своего творчества.

С древних времен человек мечтал летать как птица, плавать как рыба, быстро бегать как ягуар, быть сильным как слон, быть выносливым как лошадь. Человек всегда сравнивал свои возможности и способности с представителями живого мира. Человек, наблюдая за поведением живых существ, пытался копировать их поведение или использовать фрагменты их тел для своих нужд.

Еще в каменном веке человек понял, что кожа кабана намного прочнее кожи человека, поэтому стал использовать ее для обуви и одежды. Кости животных и рыб он использовал в качестве наконечников стрел и рыболовных крючков. Строя свои примитивные жилища, древний человек обращал внимание на гнезда и лежбища животных и насекомых. Сейчас сохранились племена людей в Южной Америке, где люди строят себе небольшие гнезда для семьи из веток деревьев, камыша так же, как большие птицы. Древние народы делали глинобитные конусообразные жилища, похожие на гнезда термитов или ласточек. Технология человека мало отличалась от способа, применяемого другими живыми существами.

Итак, человек с давних пор стремился подражать наиболее рациональным творениям представителей живого мира, однако он пошел дальше, совершенствуя орудия труда и другие необходимые ему предметы. Ему стало тесно в рамках подражательства. Он стал создавать свою искусственную техногенную среду (например, изобретение пороха, совершенно нового продукта, привело к колоссальным изменениям в жизни общества людей). Эпоха капитализма характеризовалась лавинообразным развитием науки и техники, выпуская из виду охрану окружающей среды.

Развитие общества идет по спирали. Подтверждением этого принципа является то, что в середине 20 века люди индустриального общества стали понимать, что их творения становятся все более расточительными, трудно управляемыми и опасными для самой среды обитания человека, полезный выход производства стал уменьшаться. Количество эффективных лекарств растет, а число болезней не уменьшается, и появляются все новые и новые (врожденный и приобретенный иммунодефицит). Где выход? Человек интуитивно и логически пришел к выводу, что нужно опять обратить внимание на живую природу. Она по своей экономичности, целесообразности и утилитарности на порядок выше того, что сделал человек. Конечно, по своим силовым, энергетическим характеристикам творения человека далеко впереди возможностей живой природы (управляемая ядерная реакция, космические корабли, лазеры, компьютеры), но по компактности, универсальности, приспособляемости мы плетемся в хвосте у живой природы.

Таким образом, появилась объективная необходимость проанализировать достижения живой природы, опираясь на весь современный научно-технический потенциал человечества, и использовать их в решении важных творческих задач. Успехи науки в области биологии, понимания механизмов жизни, физики, химии, математики, электроники позволяют на нынешнем этапе развития общества разгадать и понять гениальные творения живой природы, созданные в результате эволюции путем естественного отбора.

1.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ БИОНИКИ И БИОДИЗАЙНА

Бионика – наука, пограничная между биологией и многими техническими науками, решающая инженерные задачи на основе анализа структуры и жизнедеятельности организмов. Бионика тесно связана с биологией, физикой, химией, математикой и техническими науками.

Бионический подход к созданию технических объектов состоит не в слепом подражании тем конструктивным схемам и механизмам, которые выработали биологические системы в процессе эволюционного развития. Он состоит в раскрытии принципов построения структуры, определении

важнейших функциональных зависимостей и методов приспособления, резервирования и самообновления, которые обеспечивают биологическим системам исключительно высокую функциональную гибкость и живучесть в сложных условиях существования.

Нужно всегда помнить, что требования к современным техническим системам в части условий работы являются весьма жесткими и простое копирование и использование материалов, структур, выработанных природой, неэффективно. Диапазон существования живых существ небольшой: температура – 0 – 70⁰ С, давление – 0,7–3,0 атм, состав атмосферы, излучений также колеблется в небольшом диапазоне, иначе – смерть. Условия работы техники намного жестче. Совершенно не удовлетворяют и скорости биологических процессов. Например, время, необходимое для перевода нейрона из невозбужденного состояния в возбужденное составляет 0,01–0,1 с, а в современных компьютерах обмен информации происходит на гигагерцовых частотах.

Задачей бионики является использование в технике наилучших «достижений» живой природы. Есть все основания думать, что мы можем получить более совершенные системы, чем те, которые создала природа, используя закономерности, выработанные живой природой, но с другими физическими принципами их реализации.

Многие идеи применения знаний о живой природе для решения инженерных задач принадлежат гениальному художнику и инженеру эпохи Возрождения – Леонардо да Винчи, который пытался построить летательный аппарат с машущими крыльями, как у птиц, – орнитоптер, парашют, взяв за прототип зонтик одуванчика.

Официально, как новое научное направление, бионика родилась 15 сентября 1960 г. в Дайтоне (США), где проводился международный симпозиум «Живые прототипы – ключ к новой технике». Эту конференцию организовали специалисты, занимавшиеся военной техникой. Для эмблемы бионики был принят графический символ: скальпель и паяльник, соединенные интегралом (эта эмблема помещена в начале книги). В настоящее время этот символ, наверное, устарел.

У. Мак-Каллок ввел общее название подражанию одних форм жизни другим – *биомимезис*. Бионика представляет собой развитие одного из ас-

пектов общей проблемы биомимезиса. Главное ее содержание – изучение тех принципов организации живой природы, которыми она руководствуется для решения своих задач. Конечная цель бионики – воплощение природных приемов и принципов в разработке машин, инструментов, приборов, технологий, материалов.

Бионика имеет ряд основных направлений, занимающихся изучением этих функций и форм живой природы. К этим направлениям можно отнести следующие:

- биомеханика;
- биоэнергетика;
- нейробионика;
- анализаторные системы;
- системы ориентации и навигации.

Для биомеханики характерно исследование морфологических особенностей живых существ. Изучается и моделируется структурно-функциональные, массовые, геометрические, кинематические и динамические характеристики механики живого мира для создания новых механизмов и систем манипуляции, материалов. Изучение внешних форм организмов и их окраски дает особое направление в бионике – биодизайн как инструмент создания удобной для человека среды обитания и стилизации различных технических систем.

Биоэнергетика занимается вопросами создания миниатюрных высокоемких источников энергии и преобразователей энергии. Нейробионика занимается вопросами создания информационных сетей и их элементов. При создании новых анализаторных систем тщательно исследуются аналогичные сенсорные системы биологических объектов. К бионическим системам ориентации и навигации можно отнести приборы, основанные на способности многих животных ориентироваться в пространстве (птицы, рыбы, насекомые).

Бионические основы проектирования методологически включают в себя:

- поиск природных аналогов, имеющих требуемые для проектируемой системы функции, формы и характеристики;
- анализ биологического объекта – прототипа;

- моделирование физико-биологических, физико-механических и иных процессов функционирования организма;
- синтез новой технической системы на базе изученных принципов построения биологического объекта или стилизация разрабатываемой системы под формы прототипа с визуальным отражением свойственных ему характеристик.

При создании новой техники специалисты должны сделать анализ известных технических систем, биологических объектов, в которых реализуются функции, требуемые от нового объекта, что и технические системы. Далее следует провести моделирование функций технических и биологических объектов (в дизайн-проекте – поиск различных графических вариантов стилизации нового устройства под формы и характеристики прототипа). Потом следует выбрать лучший вариант и на его базе создать новый технический объект, обладающий лучшими техническими и дизайнерскими характеристиками.

1.2. БИОНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Подойдем к определению бионики как науки о системах. Бионика – это наука о системах, синтезирующих биологические и технические принципы построения. Более развернуто бионика – это наука об условиях и методах синтеза искусственных систем и процессов, включающих в себя как биологические, так и технические системы или принципы.

На базе этих определений можно предложить следующую классификацию принципов построения бионических систем (рис. 1.1). Бионические системы могут быть построены на основании биологических и технических принципов организации или элементов биологических или технических по сущности. В основе построения бионических систем лежат два метода, имеющих принципиальное различие: аналоговый и композиционный метод построения [2].

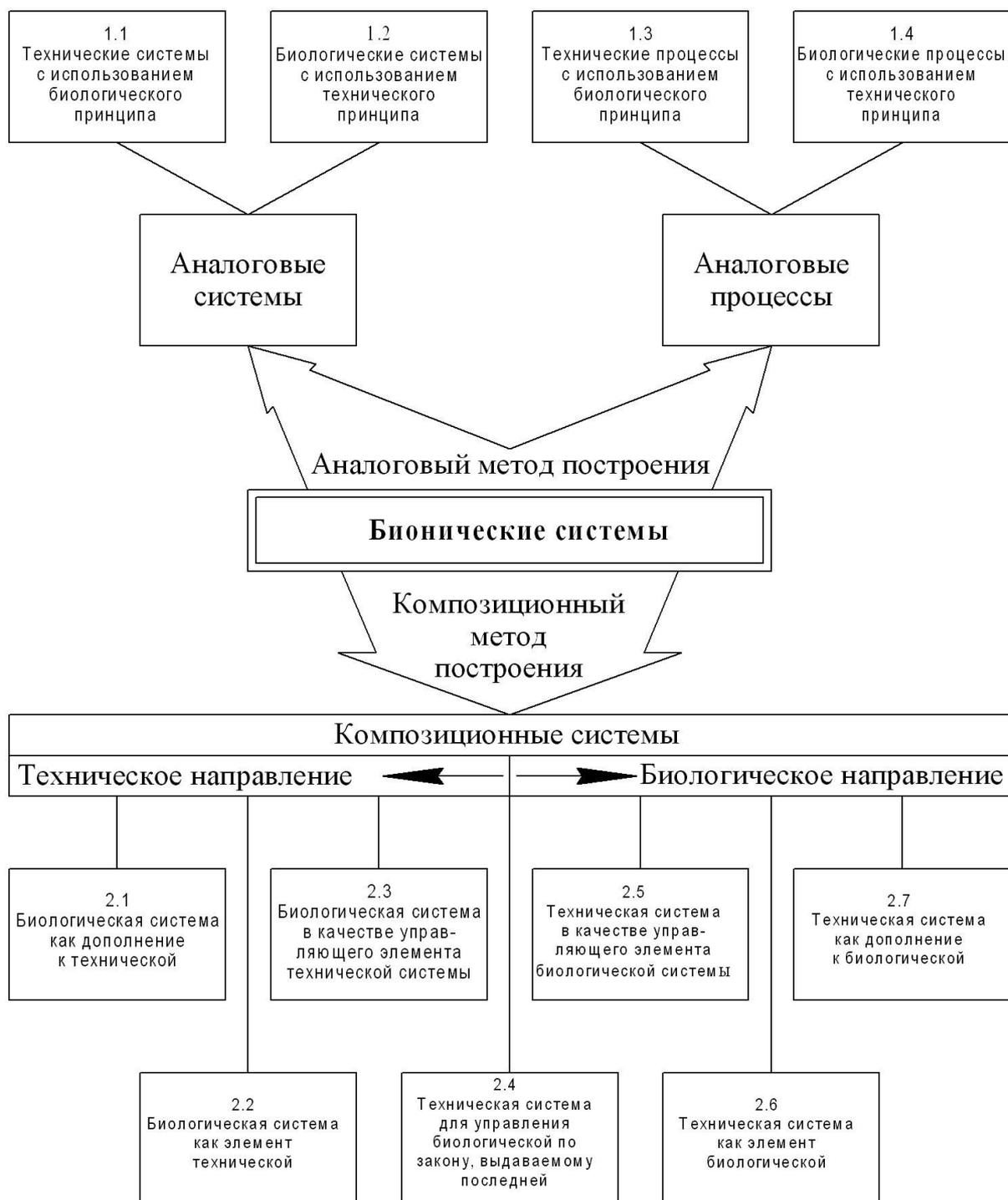


Рис. 1.1. Классификация принципов построения бионических систем

Аналоговый метод построения бионических систем и процессов строится на следующих положениях. Во-первых, построение систем осуществляется на основе технических средств при использовании биологического принципа в построении системы. Создание таких бионических сис-

тем является преобладающим. Во-вторых, построение бионических систем, в основном биологических, осуществляется при использовании принципа функционирования, используемого в технике.

На основании аналоговых методов построения бионических систем создаются также аналоговые бионические процессы, имеющие доминирующую основу либо технического, либо биологического процесса при использовании соответственно биологического либо технического принципа построения.

В качестве примеров аналогового метода построения можно привести следующие. По п. 1.1 (рис. 1. 1) – искусственная кожа «ламинфло» для обшивки маломерных судов, имитирующая кожу дельфина; ласты; застежки-липучки. По п. 1.2 – крокодил заглатывает камни для уменьшения положительной плавучести; куры клюют мелкие камни, используя их в качестве своеобразных жерновов для переваривания зерна; вороны разбивают панцири крабов, бросая их на камни с большой высоты. По п.1.3 – использование естественного брожения для производства хлеба, вина, кваса, спирта; получение электроэнергии при помощи жизнедеятельности бактерий. По п. 1.4 – клонирование организмов, генная инженерия, искусственное оплодотворение, процессы творчества с применением компьютерных технологий.

Бионические системы, основанные на базе *композиционного метода*, предусматривают совместное использование отдельных элементов как технических, так и биологических. Например, по п. 2.1 – человек-наладчик автоматической линии, использование канареек в шахтах для обнаружения метана. По п. 2.2 – система электропитания наручных часов за счет тепла человека, поточная линия сборки автомобилей с непосредственным участием рабочих-сборщиков. По п. 2.3 – пилот, управляющий авиалайнером, оператор экскаватора. Отметим, что системы п.п. 2.2 и 2.3 являются эргатическими системами (системы «человек-машина»). По п.2.4 – аппарат искусственной вентиляции легких (ИВЛ), работающий в режиме, когда пациент пытается сделать вдох, а система управления ИВЛ в этот момент подает воздух в легкие; мониторинговая система поддержания необходимой глубины наркоза. Сюда же можно отнести кардиостимулятор, работающий во вспомогательном режиме. По п.2.5 – аппарат ИВЛ, работающий в ре-

жиме, когда пациенту, находящемуся в бессознательном состоянии, принудительно подается воздух в легкие по программе, то же самое для кардиостимулятора. По п. 2.6 – различные функциональные протезы конечностей, вставные челюсти, аппарат «искусственная почка». По п.2.7 – очки, зубные имплантанты, пломбы.

1.3. «ДОСТИЖЕНИЯ» ЖИВОЙ ПРИРОДЫ

Сравним некоторые достижения технического творчества человека и живой природы. Одна из самых высоких Останкинская телебашня имеет высоту 541 м, у основания ее диаметр порядка 70 м. Коэффициент стройности, т.е. отношение высоты строения к его максимальной ширине для нее – 8. Стебель ржи имеет коэффициент стройности, достигающий 500 при высоте стебля 1500 мм и его толщине у основания – 3 мм, причем масса самого колоса (зерен) в 1,5 раза больше массы самого трубчатого стебля. Такое растение, благодаря наличию на стебле узлов (демпферов), обладает удивительной гибкостью, которая позволяет ему противостоять сильным ветрам.

Атомная подводная лодка развивает скорость 16 м/с, а дельфин – 18 м/с, рыба-меч – 30 м/с. При этом по своим энергетическим затратам на единицу массы животные также существенно опережают творения человека: например, у подводной лодки они составляют 100 Вт/кг, у дельфина – 4 Вт/кг.

За час полета саранча теряет менее 1% своего веса, а реактивный самолет до – 10% своего веса с топливом. Скорость сверхзвукового самолета (около 650 м/с) недостижима для любого живого существа. Однако его так называемая субъективная скорость, равная отношению скорости полета к длине самолета, – 65 с^{-1} . У шмеля субъективная скорость – 500 с^{-1} . Рекорд подъема самолета на высоту составляет 36300 м, а нильские гуси могут подниматься на высоту 17700 м. Рыба бассогигас обитает на глубине 8300 м, где давление порядка 800 атм и температура около 2°C , а некоторые виды морских ежей и звезд живут даже на глубине 11000 м. Альбатрос может парить в воздухе до шести суток, не взмахивая крыльями. Рекорд беспосадочного перелета реактивного военного самолета без доза-

правки равен 21000 км. Зарегистрировано, что альбатрос преодолел путь 6630 км без посадки. Бабочка данаис перелетает океан на расстояние 4000 км. Восточносибирская полярная крачка дважды в год покрывает расстояние 32000 км от Арктики до Антарктики.

Сенсорные системы многих представителей живого мира также имеют характеристики, которые выше или находятся на одном уровне с лучшими техническими сенсорными системами. Глаз орла различает с высоты 3 км мышь, что не всегда удастся оптическим средствам авиаразведки. Биологический анализатор инфракрасного излучения, так называемая «лицевая ямка» змеи имеет чувствительность $0,1 \text{ мВт/см}^2$ и способна различать перепад температуры $0,003^\circ \text{С}$, а лучшие медицинские тепловизоры – только $0,1^\circ \text{С}$. Орган обоняния человека способен различить запах тринитробутилтолуола при его концентрации в воздухе $5 \cdot 10^{-12}$ за $0,1 \text{ с}$, а газовый хроматограф с плазменно-ионизационным детектором – то же вещество с концентрацией 10^{-9} за время 10 с . Радужная форель способна обнаружить 10^{-9} г примесей, растворенных в 1 литре воды, т.е. концентрацию примеси $10^{-10} \%$. Акула распознает запахи в воде на расстоянии до 800 м. Самец бабочки тутового шелкопряда распознает запах самки на расстоянии 12 км.

Можно привести еще множество примеров, когда биологические аналоги технических устройств имеют более высокие параметры, компактность и универсальность. Поэтому тезис «нужно учиться у природы» имеет актуальное значение для разработчиков новых, более совершенных технических систем.

Контрольные вопросы

1. Какие основные направления бионики получили развитие?
2. В чем заключаются бионические принципы проектирования?
3. Какие два метода лежат в основе построения бионических систем?

2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЖИВОЙ ПРИРОДЫ — ИСТОЧНИК ИДЕЙ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ДИЗАЙНЕ

Для дизайнеров окружающая среда, и тем более живой мир, является важным источником творчества. Постигание сущности живого мира и воплощение новых идей в области техники на основе бионики невозможно без понимания основных принципов организации и функционирования живых организмов.

2.1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗВИТИЯ ОБЪЕКТОВ ЖИВОЙ ПРИРОДЫ

Для любых сложных систем, к которым причисляются биологические и многие технические объекты, признаки и свойства являются важнейшими информационными компонентами, характеризующими и отличающими данную систему от других. *Признак* – это качество, по которому можно отличить объект от других. Совокупность признаков позволяет идентифицировать данный объект, систему от других объектов, имеющих множество качеств. *Свойства*, присущие данному объекту, проявляются при его функционировании. Свойства системы можно количественно описать параметрами и характеристиками объекта, системы.

Выделим основные признаки живых организмов, по которым можно отличить их от объектов неживой природы.

- все организмы состоят из сложных органических соединений;
- для всех организмов, не считая вирусов, основной структурной единицей является клетка;
- все организмы могут рождаться только из живых клеток. Все организмы смертны. Вероятность появления живого организма из неживой материи близка к нулю.

Эти признаки отличают живую природу от неживой. Самое важное следствие из указанных признаков заключается в том, что *постоянство*

структуры и форм организма при постоянных условиях в отличие от неживой природы поддерживается за счет непрерывных затрат энергии и обмена веществ (метаболизм). В процессе обмена веществ одновременно происходят синтез и разрушение составляющих элементов живых конструктивных систем (рост и отмирание тканей организма). Живые организмы растут, ремонтируются, регулируют рабочее состояние сами. В этих процессах участвуют четыре класса органических веществ – белки, нуклеиновые кислоты, углеводы и липиды. И только в случае отсутствия подачи энергии, когда прекращается обмен веществ, организм начинает разрушаться. За счет непрерывного самообновления *живые организмы в течение своей жизни почти не изнашиваются*, а искусственные системы нуждаются во внешнем вмешательстве по замене износившихся элементов. Искусственные системы обладают постоянными структурами и формами, которые разрушаются во время эксплуатации. При наступлении смерти сложные органические вещества разлагаются на простейшие устойчивые химические соединения.

Таким образом, свойства биологических систем заключаются в следующем:

- организмы обладают способностью при постоянстве своих форм и структуры потреблять вещества, изменять их химический состав — синтезировать внутри себя сложные органические соединения и выделять из себя продукты жизнедеятельности (экскреция);
- организмы обладают способностью извлекать из внешней среды вещества, имеющие большую энергетическую ценность;
- организмы имеют постоянное развитие и рост (в отличие от объектов неживой природы, например кристаллов, живые существа растут изнутри за счет питательных веществ, получаемых в результате извне);
- организмы обладают способностью двигаться (либо в малом, либо в большом);
- все организмы способны реагировать на изменение внешней и внутренней среды;
- организмы обладают способностью наследственной передачи форм и структур потомству;

- организмы обладают способностью к самовоспроизводству, самосохранению и обучению.

Для механических структур биологических систем характерна неоднородность структуры ее элементов. Одно из свойств крупных организмов заключается в сочетании эффекта накопления потенциальной энергии упругой деформации для совершения полезной работы с эффектом поглощения кинетической энергии для устранения вредных вибраций.

Основными принципами живой природы, которые можно использовать при разработке бионических объектов, являются следующие.

- Первый принцип живой природы – *функция определяет форму*. Нет функции – нет элемента биообъекта. Функция изменилась – изменился элемент биообъекта. Разнообразие функций живого организма и объектов живой природы порождает огромное количество форм живой природы.
- Второй принцип живой природы – *принцип максимума функциональной универсальности объекта (органа, члена тела и т.д.)*. Он позволяет достичь высокой адаптации, приспособляемости к изменению внешних условий, вариативности их применения.
- Третий принцип – *адаптация к новым условиям жизни и обучаемость*.
- Четвертый принцип (вытекает из первого) — *принцип сохранения формы и структуры через их функции*. Он позволяет поддерживать жизнь и форму биообъекта, элементы которого постоянно отмирают и появляются.

Формы и структуры организмов постоянно разрушаются и строятся заново, обеспечивая динамическое равновесное состояние. Каждое состояние биообъекта обусловлено, прежде всего, функциями элементов живой системы – организма. Этот принцип позволяет перестраивать формы и структуры в соответствии с новыми сложившимися условиями внешней среды.

2.2. ЭВОЛЮЦИЯ ОРГАНИЗМОВ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ С НЕЖИВОЙ ПРИРОДОЙ

2.2.1. Влияние сил гравитации

Силы гравитации определяют структуру Вселенной, и, в частности для нашей планеты, удерживают на поверхности Земли гидросферу, атмосферу и весь живой мир.

Согласно научным данным силы гравитации являются одним из главных факторов внешней среды, воздействующих на эволюцию как неживой, так живой природы. В неживой природе эволюция протекает намного медленнее, чем в живой природе. Однако необходимо отметить, что в неживой природе существуют катаклизмы, которые в очень короткие для Земли периоды коренным образом меняют условия существования живой природы.

Гравитация – стабильный фактор на Земле, неподверженный в целом катаклизмам, поэтому эволюция живой природы под действием сил гравитации происходит постоянно и плавно, в том числе и в настоящее время. Гравитация оказывает преобладающее влияние на так называемые несущие системы живых организмов. *Несущая система организма* – это совокупность жестких и мягких тканей организма, позволяющих сохранять форму организма при статических и динамических нагрузках. Эти системы можно характеризовать как относительно жесткий каркас живого организма, на котором фиксируются мягкие ткани. У человека – это скелет, связки и сухожилия. У растения большая часть организма является несущей системой. У автомобиля – это рама, шасси, часть корпуса. У зонтика – спицы и натянутый тент.

Роль сил гравитации очень четко прослеживается при переходе живых существ в результате эволюции из одной среды в другую (табл. 1). При переходе из водной среды на сушу происходит усиление скелета (например, рыба – лягушка) и, наоборот, он облегчается при обратном переходе к водному образу жизни (бобер).

При продолжительных полетах в космос в условиях пониженной гравитации у космонавтов происходит декальцинация скелета (выведение с мочой основного химического элемента кости, который повышает ее

прочность). Тоже самое, но по причине уменьшения механической нагрузки, происходит с челюстью человека при отсутствии зубов – она утоньшается. Таким образом, живая природа приспособляется к отсутствию гравитации. Нет функции элемента системы, – значит, нет и самого элемента.

На роль сил гравитации в процессе развития конструктивных систем живых существ впервые обратил внимание в 1882 г. русский ученый К.Э. Циолковский:

- гравитация Земли в первую очередь влияет на вес живого организма;
- гравитация влияет на форму живых существ: двусторонняя симметрия живых существ вытекает из направления действия сил гравитации.

В условиях, где ослаблена направленность действия сил гравитации (за счет силы Архимеда в воде), живые организмы имеют центрально-лучевую симметрию (морские звезды, медузы). Размеры крупных морских животных (кит) могут в несколько раз превышать размеры аналогичных сухопутных животных (слон). Отношение массы скелета, как основы несущей системы организма, к массе тела также меняется в зависимости от среды обитания (таблица 2. 1) [17]. Для организмов, обитающих в воде, отношение массы скелета к массе тела ниже, чем для обитателей суши. Однако следует заметить, что кроме среды обитания на указанное отношение масс значительно влияет способ существования (например, черепаха, ведущая малоподвижный образ жизни, имеет наибольшее удельное значение массы скелета, так как он является экзоскелетом).

Таблица 2. 1

Весовые характеристики скелета позвоночных животных

Среда обитания	Животное	Масса тела, кг	Отношение массы скелета к массе тела, %
1	2	3	4
Вода	Форель	0,3	7,1
	Севрюга	6,0	7,7
Вода и суша	Лягушка	0,04	11,9
Суша	Степной удав	0,2	14,9
	Черепаха степная	0,5	43,5

Продолжение таблицы 2.1.

1	2	3	4
Суша, вода и воздух	Крчка	0,1	17,9
	Утка пекинская	2,6	9,3
	Утка кряква	1,3	11,2
Суша	Человек	65,0	12,1
	Олень	70,5	13,4
	Кролик	4,0	6,8
Воздух	Летучая мышь	0,06	17,2

Адаптация живых существ при длительном воздействии на организм каких-либо природных факторов (в течение миллионов лет) приводит путем естественного отбора к изменению самой его структуры, формы, размеров, характера протекания обмена веществ, изменяется скорость роста и продолжительность жизни организмов.

Гравитационное поле, борьба за выживаемость, эволюция определили внешний вид живых организмов и их несущих систем, которые стали оптимальными в сложившихся условиях. Необходимо подчеркнуть, что процесс оптимизации живой природы, т.е. естественный отбор, происходит непрерывно в течение всей жизни вида.

2.2.2. Способы существования и особенности построения организмов

Построение и внешний вид определенного вида живого организма зависит от способа существования. Известны два основных способа существования (питания). По способу питания (получения извне энергии) организмов их можно разделить на автотрофные и гетеротрофные организмы.

Автотрофные (само+питание) организмы (растения, некоторые бактерии) те, кто могут синтезировать для питания органические соединения и прежде всего углеводы из неорганических веществ, находящихся вблизи них и ведут неподвижный образ жизни. Их конструктивной особенностью является разветвленная структура. Она позволяет им при закреплении к одному месту на поверхности получать различные неорганические веществ с большой площади или объема.

Гетеротрофные организмы (человек, животные, грибы, многие бактерии) могут синтезировать питательные органические соединения только из органических, поэтому они живут только за счет автотрофных. Так как автотрофных мало в ближайшей среде обитания гетеротрофных организмов, то гетеротрофные организмы вынуждены вести подвижный образ жизни, поэтому их формы несущих систем компактны.

Грибы, а также животные, ведущие малоподвижный образ жизни (губки, актинии, кораллы), могут иметь разветвленную структуру.

И автотрофные и гетеротрофные организмы формируются в гравитационном поле. И те и другие должны постоянно преодолевать его действие. Автотрофные организмы только растут (движение в биологическом смысле). Гетеротрофные организмы из-за необходимости перемещаться в пространстве постоянно расходуют энергию, совершая механическую работу. Поэтому в процессе эволюции выживали только те гетеротрофные организмы, которые соответствовали *критерию максимальной прочности при минимуме веса (максимум удельной прочности) и максимума КПД всего организма.*

Легко показать, что дизайн-проектирование, например, транспортных технических систем, а также элементов других технических устройств, которые двигаются в процессе функционирования, должно опираться на указанный выше критерий.

2.3. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЖИВЫХ ОРГАНИЗМАХ

Для жизни организмов необходимы источники углерода и источники энергии (кислорода в атмосфере достаточно). Автотрофные используют CO_2 , гетеротрофные используют органические источники углерода. По источникам энергии организмы делят на *фототрофные* (фотосинтезирующие), которые используют энергию света, и *хемотрофные*, которые используют химическую энергию. К последним относятся все животные, плотоядные растения, некоторые бактерии. Недавно открыты новые бактерии, которые получают энергию от газа H_2S , выделяющегося из-под земли. Такие бактерии не нуждаются в других источниках энергии.

Эффективное преобразование энергии является одной из важнейших проблем современной техники. В наше время наибольшее распространение получило преобразование электричества в другие виды энергии, как наиболее удобное и экономически выгодное направление.

Начальные этапы этого процесса связаны с получением электрической энергии за счет энергии падающей воды, химических реакций в электролитах и при сжигании органического топлива, расщепления радиоактивных веществ. Для получения энергии требуются довольно сложные, громоздкие установки современной энергетики в виде турбин, генераторов, топок, ядерных реакторов.

В биосистемах осуществляются иные принципы преобразования энергии, благодаря которым при обычных температурах и давлениях химическая форма энергии *непосредственно* преобразуется в другие виды энергии. Сравним, например, получение кинетической энергии движения в трамвае и гужевой повозке. В первом случае органическое топливо (газ) сжигается в топках тепловой электростанции, энергия горения передается воде, которая, превращаясь в пар, вращает ротор паровой турбины. Эта механическая энергия преобразуется турбогенератором в электрическую энергию, которая транспортируется по линиям высокого и низкого напряжения попадает, наконец, потребителю – на электродвигатель трамвая. За счет вторичного преобразования в механическую энергию трамвай движется по рельсам. Во втором случае для обеспечения движения гужевой повозки лошадь, съедая органические вещества (овес и сено), непосредственно преобразовывает энергию химических реакций в механическую энергию сокращения мускулов.

Обобщая, можно сказать, что процесс преобразования энергии в биосистемах характеризуется очень высокой эффективностью и тем, что в них используются сверхминиатюрные «устройства» клеточных органелл – митохондрий. Появление новых бионических идей в этой области, несомненно, окажет глубокое влияние на развитие энергетики.

3. ГАРМОНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ЦВЕТА В БИОНИЧЕСКИХ СИСТЕМАМ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ДИЗАЙНЕРСКИХ РАЗРАБОТКАХ

3.1. РАЗМЕРЫ И ПРОПОРЦИИ В СТРОЕНИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Как было сказано выше, гравитация играет существенную роль в формировании живых организмов, особенно это проявляется в размерах представителей флоры и фауны и в их пропорциях. Самый маленький организм, способный самостоятельно жить и размножаться, – микоплазма имеет массу 10^{-16} кг, самое большое животное – голубой кит имеет массу 10^5 кг. Однако гигантская калифорнийская секвойя имеет массу более 10^6 кг. Самое крупное живущее в наше время наземное животное – слон имеет массу около $5 \cdot 10^3$ кг. Голубой кит, обладая такой гигантской массой, может жить только в воде, где действует значительная по величине архимедова сила. Для того, чтобы такое животное могло жить на суше, ему необходимо было бы иметь намного более прочный и весомый скелет. Однако в этом случае оно было бы очень медлительным и хищником быть бы не могло. Поэтому и слон, и носорог являются травоядными животными. Крупнейшее наземное млекопитающее – доисторический предок носорога *Valuchitherium* имел массу 30 т (рис. 3. 1) [19].

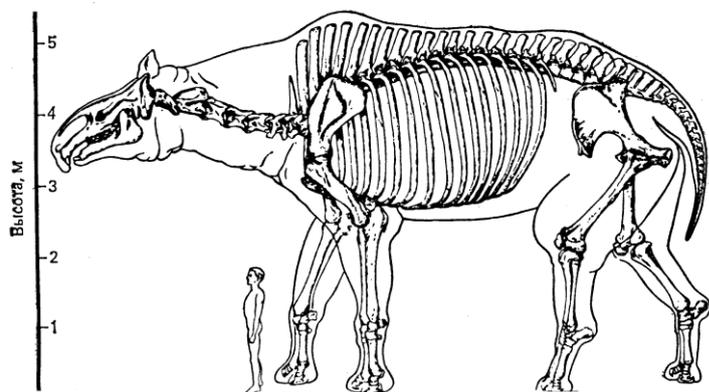


Рис. 3.1. Ископаемый носорог *Valuchitherium*

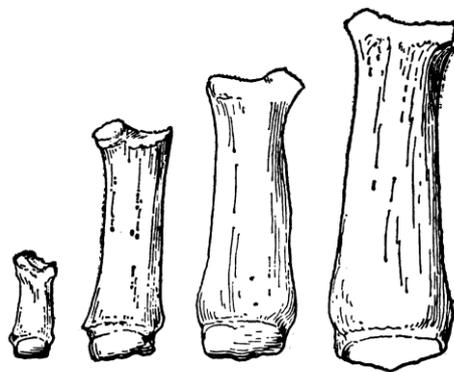


Рис. 3. 2. Пястные кости носорога (крайняя слева) и ископаемого носорога *Valuchitherium*

При пределе прочности костей 180 МПа его кости диаметром 140 мм могли выдерживать силу сжатия до 280 т. это означает, что для 30-тонного животного кости имели практически десятикратный запас прочности. Такой же запас прочности имеет и человек. Хотя ископаемый носорог давно вымер, а человек продолжает совершенствоваться. Можно сделать вывод, что за время эволюции человека природа заложила большой коэффициент запаса в отношении прочности костей, так как динамические нагрузки на скелет человека в экстремальных условиях могут достигать таких больших значений. Поэтому для выживания человека необходим столь большой запас прочности.

Живые организмы – это непрерывно функционирующие системы, в которых и «строительные материалы» и энергия используются очень экономно. Оптимальность конструкции организмов является результатом эволюции. Каждый организм можно рассматривать как оптимальный в данных условиях существования и своих размерах.

Требования экономии материала и энергии вступает в противоречие с требованиями по прочности и динамичности. В любом организме есть некий компромисс между выполнением этих требований, который является оптимальным решением. При анализе биологических прототипов нужно также учитывать, что оптимизация также достигается благодаря усложнению функциональных требований к системе управления, т.е. к нервной системе организма. Кроме этого при проектировании бионических систем необходимо учитывать множество факторов и их взаимовлияние.

В качестве примера сложности выбора размеров и пропорций можно привести следующее. Расчеты и эксперименты показали, что удельные затраты энергии на перемещение тела у крупного животного меньше, чем у мелкого. Следовательно, крупное животное находится в более выгодных условиях, чем мелкое. Однако в поисках пищи лошади надо перемещаться на большее расстояние, чем мыши. При условии, что пищевые ресурсы ограничены, у отдельной мыши преимущество в том, что ей нужно меньше пищи, чем лошади. Гектар луга может прокормить большую популяцию мышей, но не более двух – трех лошадей. Исходя из сказанного, вопрос об оптимальных размерах организма становится сложным.

Учитывая это, при проектировании необходимо изучать биологические аналоги, выявляя эти оптимальные пропорции. Кроме того, у человека как высшего существа существуют дополнительно эстетические требования, которые также должны быть удовлетворены.

3.2. ЗОЛОТОЕ СЕЧЕНИЕ В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

Вопросы гармонии, эстетики, стандартизации и технологии в технике тесно связаны с поиском рациональных в функциональном и морфологическом отношениях количественных мер. Интуитивное представление о существовании таких мер свойственно каждому человеку со времен зарождения цивилизации. В колоссальной разнообразии форм живой природы обнаруживаются и четкие ритмы, и асимметрия, непрерывность и дискретность, статика и динамика. Во всем обилии форм живой природы прослеживается два морфологических принципа развития организмов: принцип спирализации и ветвления. Эти принципы порождают ритмы и пропорции природных образований.

Анализ показывает, что и в лучших творениях человека, так и в исследованных объектах живой природы наблюдаются логически законченные, построенные на определенных законах, соразмерности. Одной из важнейших соразмерностей, зрительно хорошо воспринимаемых, является пропорция *золотого сечения*. Английские исследователи провели эксперимент, выдав группе участников таблицу (рис. 3. 3) с прямоугольниками, имеющими различные соотношения сторон. Более трети участников заявили, что наиболее эстетичным выглядит прямоугольник с отношением 21:34, обратная величина которого близка пропорции золотого сечения. Такой прямоугольник часто называют *золотым прямоугольником*. Прямоугольники с такой пропорцией сторон используются в архитектуре (здание штаб-квартиры ООН в Нью-Йорке). Любая кредитная карточка также имеет пропорцию золотого сечения.

В численном виде пропорция золотого сечения выражается иррациональным числом $\Phi=1,618034\dots$, обозначение этого числа буквой Φ происходит от имени выдающегося скульптора Древней Греции Фидия.

Утверждается, что этой пропорцией пользовались даже люди каменного и бронзовых веков в изображениях наскальной живописи [16].

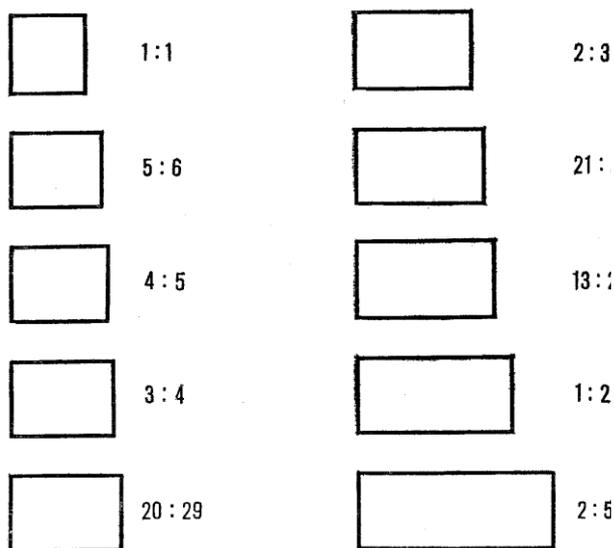


Рис. 3. 3. Прямоугольники с различным отношением сторон



Рис. 3. 4. Здание штаб-квартиры ООН

Золотое сечение – это деление отрезка на неравные части, сохраняющее между частями то же отношение, что между целым и его частями. Пусть имеется отрезок, состоящий из двух отрезков a и b , тогда пропорция золотого сечения имеет вид:

$$\Phi = (a+b)/a = a/b \text{ или } 1 + b/a = a/b.$$

Выразив Φ через a/b , получим

$$1 + 1/\Phi = \Phi. \tag{3.1}$$

Откуда

$$\Phi^2 - \Phi - 1 = 0. \tag{3.2}$$

Решая это уравнение, найдем его положительный корень

$$\Phi = (1 + \sqrt{5})/2 \approx 1,618...$$

Число Φ из (3.1) можно также представить, как $\Phi = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\Phi}}$; про-

должив подстановку, можно получить бесконечную дробь:

$$\Phi = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}} \quad (3.3)$$

Такая дробь называется непрерывной или цепной дробью. Из (3.2) получим

$$\Phi = \sqrt{1 + \Phi}.$$

Подставив в эту формулу вместо Φ правую часть, получим

$$\Phi = \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \dots}}}} \quad (3.4)$$

Заметим, что формулы (3.3) и (3.4) вызывают у человека эстетическое чувство ритма и гармонии, если задумываться над бесконечной повторяемостью.

Геометрически пропорцию золотого сечения можно получить при помощи прямоугольного треугольника с соотношением катетов 1:2 (рис. 3. 5): Проведя окружность радиусом AC из центра C до пересечения с CB , получим точку D . Далее радиусом BD проведем окружность из точки B до пересечения с AB и получим точку E . В этом случае $\frac{AB}{BE} = \frac{BE}{AE} = \Phi$.

Интересен анализ пирамиды Хеопса (рис. 3. 6), оказывается, что $\text{tg}(\angle ABC = 51^\circ 50') = \sqrt{\Phi} = \frac{AC}{CB}$. Если принять, что $CB=1$, то $AB=\Phi$. Часто $\triangle ABC$ называют *золотым треугольником*.

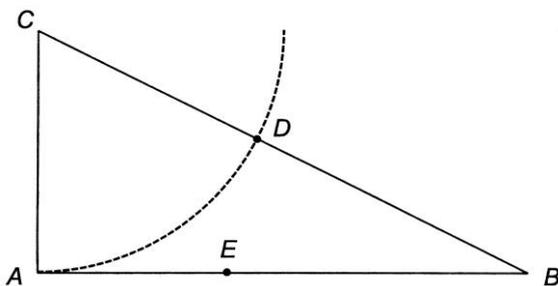


Рис. 3. 5. Геометрическое нахождение числа Φ

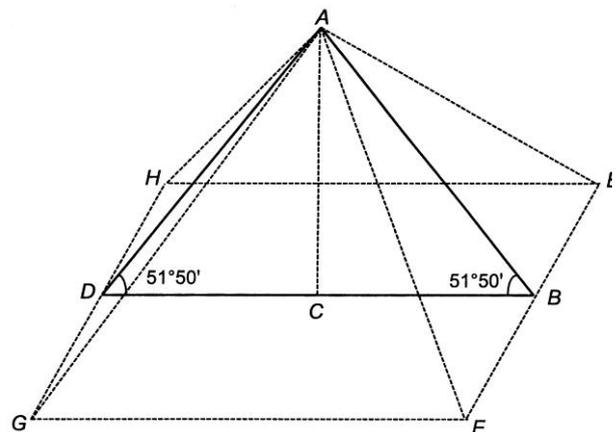


Рис. 3. 6. Пропорции золотого сечения в пирамиде Хеопса

Кроме золотого прямоугольника и золотого треугольника известна замечательная фигура *пентагон* – правильный пятиугольник ABCDE (рис. 3. 7), в котором также есть соотношения золотого сечения. Пятиугольная звезда, образованная диагоналями пентагона, называется *пентаклом* или *пентаграммой*. В пентагоне соотношения отрезков связаны с пропорцией золотого сечения:

$$EF/FG=EG/EF=EB/EG=\Phi.$$

Учитывая, что угол при вершине пентакла равен 36° , получим следующее выражение:

$$\Phi / 2 = \text{Cos}36^{\circ} \text{ или } \Phi = 2 \text{Cos} \frac{\pi}{5}.$$

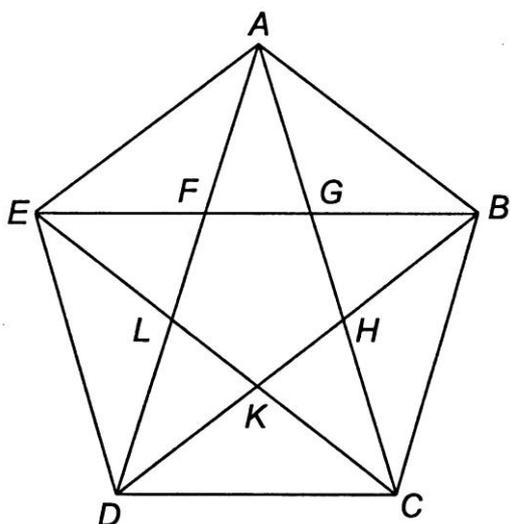


Рис. 3. 7. Пентагон и пентакл



Рис. 3. 8. Морская звезда

Морская звезда (рис. 3. 8) является одним из наиболее красивых морских животных. Пентаграмма в народе называется «ведьминой стопой», так как считается магической фигурой, и раньше рассматривалась как средство защиты от злых духов (для защиты спящего человека от ведьм). Пятиконечные звезды (пентаграммы) присутствуют в гербах и иных государственных символах многих стран (например, США, Китай). В США здание военного ведомства имеет вид пентагона (рис. 3. 9). Фигура пентагона лежала в основе Государственного знака качества СССР

(рис. 3. 10), введенного в 1967 г., который присуждался высококачественным отечественным изделиям.

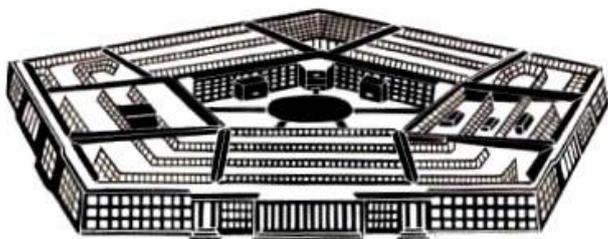


Рис. 3. 9. Здание Пентагона в США



Сделано в СССР

Рис. 3. 10. Государственный знак качества СССР

Анализ размеров храма Парфенона в Греции показывает, что соотношения сторон также подчиняются золотому сечению.

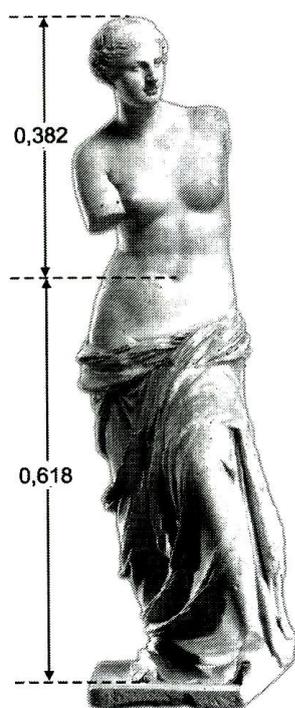


Рис. 3. 11. Статуя Венеры Милосской

Человеческое тело для европеоида также в идеале подчиняется золотому сечению. У взрослого человека отношение роста человека к расстоянию от пупка до подошвы ног приблизительно равно 1,63. Особенно точно пропорция золотого сечения проявляется в эталоне женской красоты – статуи Венеры Милосской (рис. 3. 11).

О Золотом сечении знали Леонардо да Винчи, А. Дюрер, И. Кеплер. Великие эстеты прошлого полагали, что «для того, чтобы целое, разделенное на две неравные части, казалось бы прекрасным с точки зрения формы, между меньшей и большей частями должно быть то же отношение, что и между большей частью и целым». Этот закон проявляется в пропорциях человеческого тела и в теле тех животных, формы которых отличаются изяществом.

То же можно заметить в ботанике. Для одного из грациозных растений европейской части России – купальницы европейской отношение массы растения к массе стебля также равно Φ .

Уравнение золотого сечения (3.2) является частным видом обобщенного уравнения золотого сечения

$$x^{S+1} - x^S - 1 = 0 \text{ при } S = 1, 2, 3, \dots$$

Нетрудно показать, что при $S = 0$ получается деление отрезка пополам, а при $S = 1$ – знакомое классическое золотое сечение. Факты, подтверждающие существование золотых S -сечений в природе, приводит белорусский ученый Э.М. Сороко в книге “Структурная гармония систем”. Оказывается, например, что хорошо изученные двойные сплавы обладают особыми, ярко выраженными функциональными свойствами (устойчивы в термическом отношении, тверды, износостойки, устойчивы к окислению и т. п.) только в том случае, если удельные веса исходных компонентов связаны друг с другом одной из золотых S -пропорций. Это позволило автору выдвинуть гипотезу о том, что золотые S -сечения есть числовые инварианты самоорганизующихся систем. Будучи подтвержденной экспериментально, эта гипотеза может иметь фундаментальное значение для развития синергетики – новой области науки, изучающей процессы в самоорганизующихся системах.

С историей золотого сечения косвенным образом связано имя итальянского математика монаха Леонардо из Пизы, более известного под именем Фибоначчи (сын Боначчи). Он много путешествовал по Востоку, познакомил Европу с индийскими (арабскими) цифрами. В 1202 г вышел в свет его математический труд “Книга об абакке” (счетной доске), в котором были собраны все известные на то время задачи. Одна из задач гласила “Сколько пар кроликов в один год от одной пары родится”. Размышляя на эту тему, Фибоначчи выстроил такой ряд цифр: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, ..., который называется рядом Фибоначчи.

Любой член ряда Фибоначчи задается рекуррентной формулой

$$a_{n+2} = a_{n+1} + a_n.$$

Доказано, что

$$\Phi = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n}.$$

Геометрически ряд Фибоначчи может быть представлен прямоугольниками Фибоначчи. На рис. 3. 12 показан прямоугольник ABCD, в котором расположены квадраты, стороны которых увеличиваются согласно ряду Фибоначчи. Проведя в каждом квадрате дугу, равную четверти окружности и соединив

их, получим *спираль Фибоначчи*. Раковина наutilusа имеет спираль, геометрически близкую к спирали Фибоначчи (рис. 3. 13).

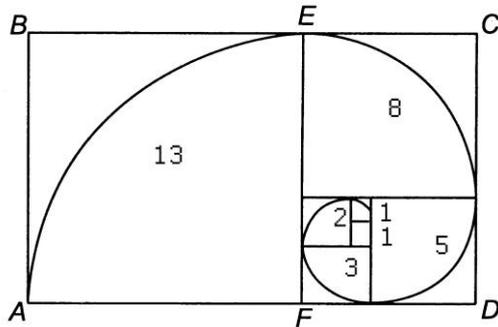


Рис. 3. 12. Прямоугольник и спираль Фибоначчи

Рис. 3. 13. Раковина наutilusа

В природе существует несколько способов листорасположения. В первом листья побега располагаются строго один под другим, образуя вертикальные ряды – *ортостихи*. Условная спираль, соединяющая места расположения листьев на побеге, называется генетической, или основной спиралью, точнее, винтовой линией и делится на ряд листовых циклов (рис. 3. 14). Генетическим этот винт называется потому, что расположение листьев в нем отвечает порядку появления в нем листьев 1,2,... Проекция на плоскость листорасположения позволяет в долях окружности выразить угол расхождения листьев.

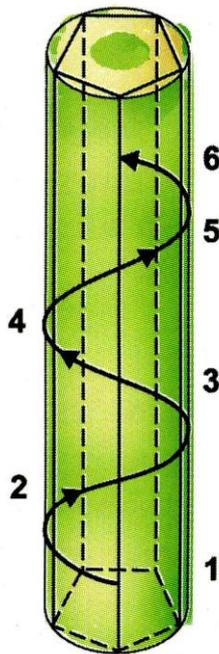


Рис. 3. 14. Ортостихи и спираль на стебле растения

Рис. 3. 15. Листорасположение алоэ

Винтовое расположение листьев выражают дробью, числитель которой равен числу оборотов по стеблю воображаемого винта одного листового цикла, а знаменатель – числу листьев в данном цикле, совпадающему с числом ортогистов на стебле. Эта дробь позволяет рассчитать и угол расхождения листьев. У липы, вяза, бука, злаков листорасположение описывается формулой $1/2$, у дуба, вишни, алоэ (рис. 3. 15) – $2/5$, у малины, груши, тополя, барбариса – $3/8$, у миндаля, облепихи – $5/13$ и т.д. Нетрудно видеть, что в дробях листорасположения встречаются числа Фибоначчи, расположенные через одно. В последовательности числитель дает количество оборотов до того момента, пока лист не вернется в своё первоначальное положение. Нижеприведённый пример показывает углы, при которых листья расположены на стебле:

- очередные листья расположены под углом 180° (или $1/2$);
- 120° (или $1/3$): три листа в обороте;
- 144° (или $2/5$): пять листьев за два оборота;
- 135° (или $3/8$): восемь листьев за три оборота.

В предельном случае, когда отношение чисел в формуле будет отвечать золотой пропорции $\Phi^{-1}=0,38196\dots$, угол расхождения листьев станет равным $137^\circ 30' 28''$. Установлено, что при расположении листьев под идеальным углом ни один лист не будет располагаться точно над другим, чем создаются лучшие условия для фотосинтеза.

Австрийский ученый Цейзинг открыл так называемый «закон углов», согласно которому угловые расхождения α между соседними ветвями (или листьями), отходящими от центрального ствола, для многих растений подчиняются пропорции золотого сечения:

$$\alpha / (360^\circ - \alpha) = (360^\circ - \alpha) / 360^\circ .$$

Решая это уравнение, получим

$$\alpha = 137^\circ 30' 28'' .$$

Учитывая, что

$$\alpha + \beta = 360^\circ ,$$

где β – дополнительный угол для α , получим уравнение

$$\alpha(1 + \beta/\alpha) = 360^\circ , \text{ или } \alpha = 360^\circ / (1 + \beta/\alpha) .$$

Исходя из пропорции Золотого сечения, имеем

$$\beta/\alpha = \Phi, \text{ т.е. } \alpha = 360^\circ / (1 + \Phi) .$$

Но уравнение Золотого сечения дает квадратное уравнение $\Phi^2 - \Phi - 1 = 0$, откуда $\Phi^2 = \Phi + 1$. Следовательно

$$\alpha = 360^\circ / \Phi^2.$$

Угол $\alpha \approx 137^\circ$ между соседними ветвями при спиралевидном расположении ветвей (или листьев) позволяет получить максимальное количество солнечной энергии, падающей на растение. Физический смысл состоит в том, что при таком расположении листьев площадь листьев, не перекрытых другими листьями, максимальна. Этот угол часто называют «идеальным углом».

Использование принципов пропорции золотого сечения при проектировании позволяет повысить эстетические параметры изделия, дает широкие возможности для варьирования формами и объемами, приближая конструкцию к биологическим прототипам.

3.3 МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ И ПЛОТНАЯ УПАКОВКА В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

В живой природе, как и в технике, существует своего рода «стандарт», т.е. повторяемость однотипных элементов. Процесс роста живого организма иногда напоминает процесс монтажа сложного технического изделия, например, рост экзоскелета микроорганизмов – радиолярий, постройка пчелиных сот, развитие кроны деревьев. Повторяемость однотипных элементов в формах живой природы связана с экономией энергетических и материальных ресурсов организма, необходимых для выживания и продолжения рода. Основным «стандартным» элементом живой природы является клетка. Живые клетки, одинаковые по форме, можно встретить как у растений, так и у животных.

В живой природе идеальные, т.е. геометрически правильные, формы встречаются не часто. В основном – в морских глубинах, где влияние гравитации менее значимо, чем гидростатическое давление, действующее во всех направлениях одинаково. В классе радиолярий встречаются октаэдры (8-гранники), состоящие из правильных треугольников, додекаэдры (12-гранники), образованные правильными пятиугольниками, икосаэдры (20-

гранники), содержащие на поверхности двадцать правильных треугольников. Морской еж имеет форму шара.

На плоскости плотная упаковка (т.е. без зазоров между соседними элементами) одинаковых правильных элементов может быть достигнута только при использовании

- равносторонних треугольников,
- квадратов,
- правильных шестиугольников,

причем известно, что правильные пятиугольники и другие многоугольники не покрывают плоскость без зазоров. Из этих трех элементов правильные шестиугольники имеют минимальный периметр при одинаковой площади фигуры, поэтому в живой природе они имеют большее распространение.

Пчелы и осы, имеющие приблизительно одинаковые размеры, при постройке сот образуют плотную упаковку из кругов, которые под действием капиллярных сил превращаются в описанные шестиугольники. Итальянский ученый Маральди в 1712 г. установил, что подобная упаковка пчелиных сот определяется экономичным использованием труда и воска. При таком разбиении в плоскости на равновеликие части шестиугольная сетка имеет минимальный периметр. Такая форма ячеек сот формируется за счет равенства давлений жидкого меда, находящегося внутри сот.

Кроме сот шестиугольную структуру имеют поперечные сечения пучков лубяных волокон льна, это также связано с равномерным распределением внутриклеточного давления в волокнах, причем наружная оболочка является жесткой. Фасеточный глаз насекомых, состоит из омматидий, которые в сечении также имеют форму правильного шестиугольника (рис. 3. 16). Структуры с шестиугольным рисунком можно наблюдать также в тканях кукурузы, в кремнистых панцирях диатомовых водорослей. Биообъект, имеющий такую равномерную структуру, обладает высокой жесткостью, устойчивостью и прочностью при знакопеременных нагрузках.

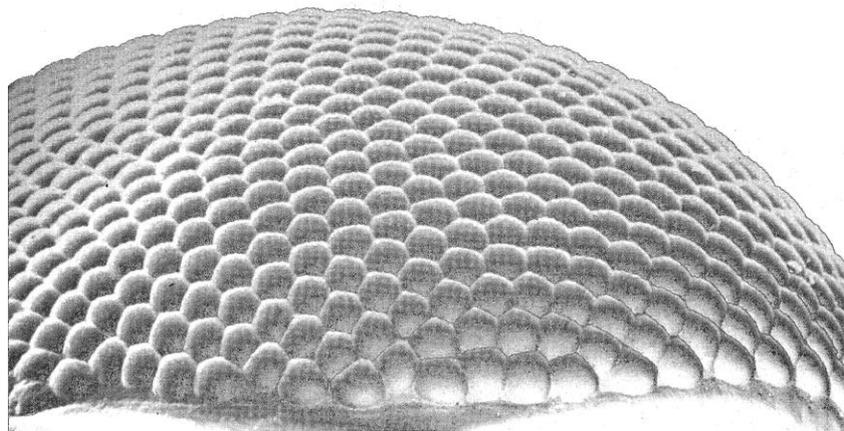


Рис. 3. 16. Часть фасеточного глаза мухи под микроскопом

В технике, в частности в транспортных машинах, для повышения жесткости конструкций при минимуме веса используются сотовые структуры, на поверхности которых закрепляются тонкие листы обшивки. Такие конструкции получили распространение в строительстве и авиастроении. Они имеют название конструкций с сотовыми наполнителями. Сотовые наполнители представляют собой соединение профилированных листов, образующих замкнутые ячейки квадратной или шестигранной формы в виде пчелиных сот. Роль сотового наполнителя заключается в подкреплении и связи несущих слоев, перпендикулярных поверхностям профилированных листов. В авиации эти профилированные листы изготавливают из алюминиевой фольги. Торцевым поверхностям сотов придают нужную форму, например, профиль крыла. Обработка ведется фрезерованием при заполнении сот парафином. При изготовлении сот на тонкие листы наносят специальным образом полосы клея (рис. 3. 17), пропитывают их фенольной смолой, и далее накладывают эти листы друг на друга. После склейки эти листы растягивают и получают соты. Расправленная сотовая структура помещается в печь, там происходит полимеризация фенольной смолы. В конце производства на плиту из сот приклеивают два листа из полимера или легкого металла, после чего получается структура типа сэндвича.

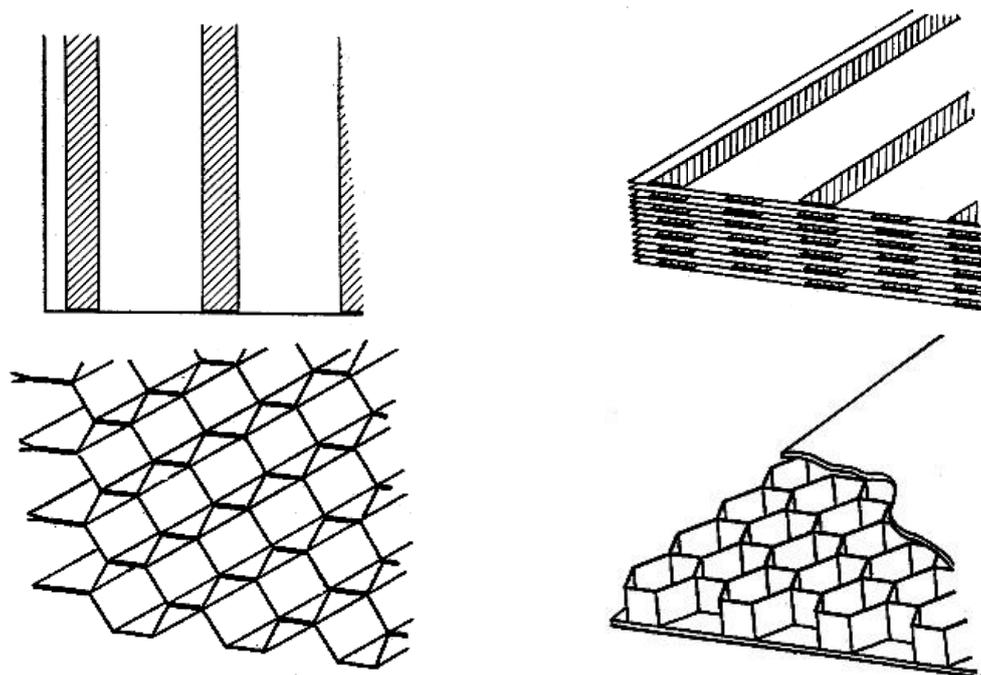


Рис. 3. 17. Этапы изготовления сотовой конструкции фюзеляжа самолета

Вспененные полимеры, например, пенопласт (пенополистирол), имеющие малую плотность, могут использоваться в качестве наполнителей оболочек. Такие композитные материалы кроме высокой жесткости имеют хорошие тепло и звукоизоляционные свойства (рис. 3. 18).

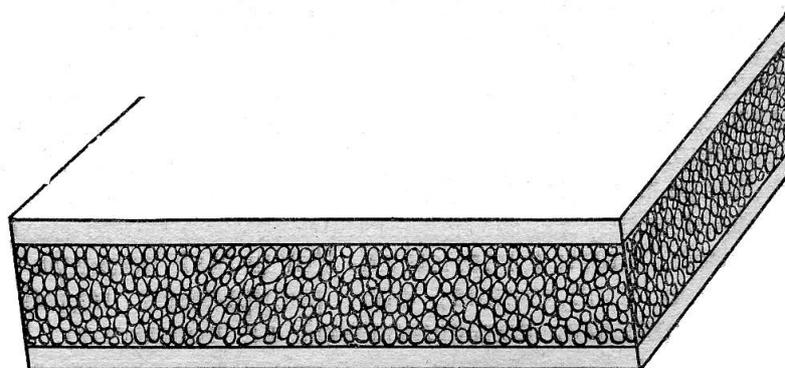


Рис. 3. 18. Композитный материал типа «сэндвич» с пенополистиролом

Кроме вспененных полимеров в строительстве используется также ячеистый бетон. Это высококачественный, многообразный строительный материал, который может производиться в форме блоков, элементов или армированных плит (рис. 3. 19).



Рис. 3. 19. Строительные блоки из ячеистого бетона

Блоки из ячеистого бетона используются практически во всех сферах строительной промышленности, таких как жилищное, промышленное и сельскохозяйственное строительство, возведение школ, больниц, административных и общественных зданий и т.д. Ячеистый бетон предназначен для любых стен, а именно наружных (одинарных или двойных) и внутренних (несущих и ненесущих), заполнения бетонных или стальных каркасов, разделительных перегородок, противопожарных стен, а также для реставрации или перестройки старых зданий (благодаря низкому удельному весу).

Целиком без зазоров правильными многогранниками можно заполнить объем только кубами. Из многогранников заслуживает внимания многогранник Кельвина, грани которого состоят из шести квадратов и восьми правильных шестиугольников. Такую фигуру можно получить, если сжимать 12 упругих сфер относительно одной центральной сферы. При равномерном сжатии эта тринадцатая сфера будет иметь форму многогранника Кельвина. Благодаря такому положению сфероидальные клетки растений деформируются в виде многогранника Кельвина и могут выдерживать большие внутренние давления, несмотря на то, что их стенки очень тонкие.

В живом мире, в частности плодах растений, распространена плотная упаковка элементов (рис. 3. 18), имеющих выпуклые, вогнутые и плоские поверхности (дольки чеснока, мандарина и т.д.).

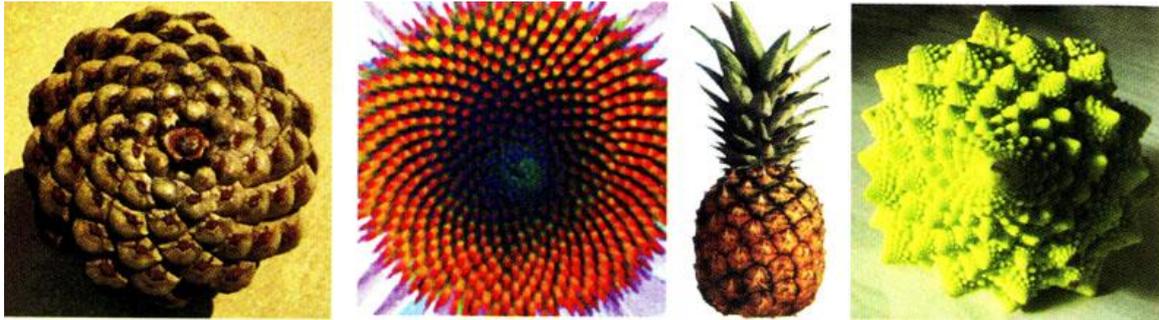


Рис. 3. 18. Плотная упаковка плодов растений

В дизайнерской практике привлекает внимание ячеистая структура початка кукурузы. Ее красивая форма и ритмика вдохновила архитекторов фирмы RMJM к созданию проекта Газпром-Сити в Санкт-Петербурге. Возможно, початок с плотно сидящими зернами символизирует сплоченный коллектив Газпрома.

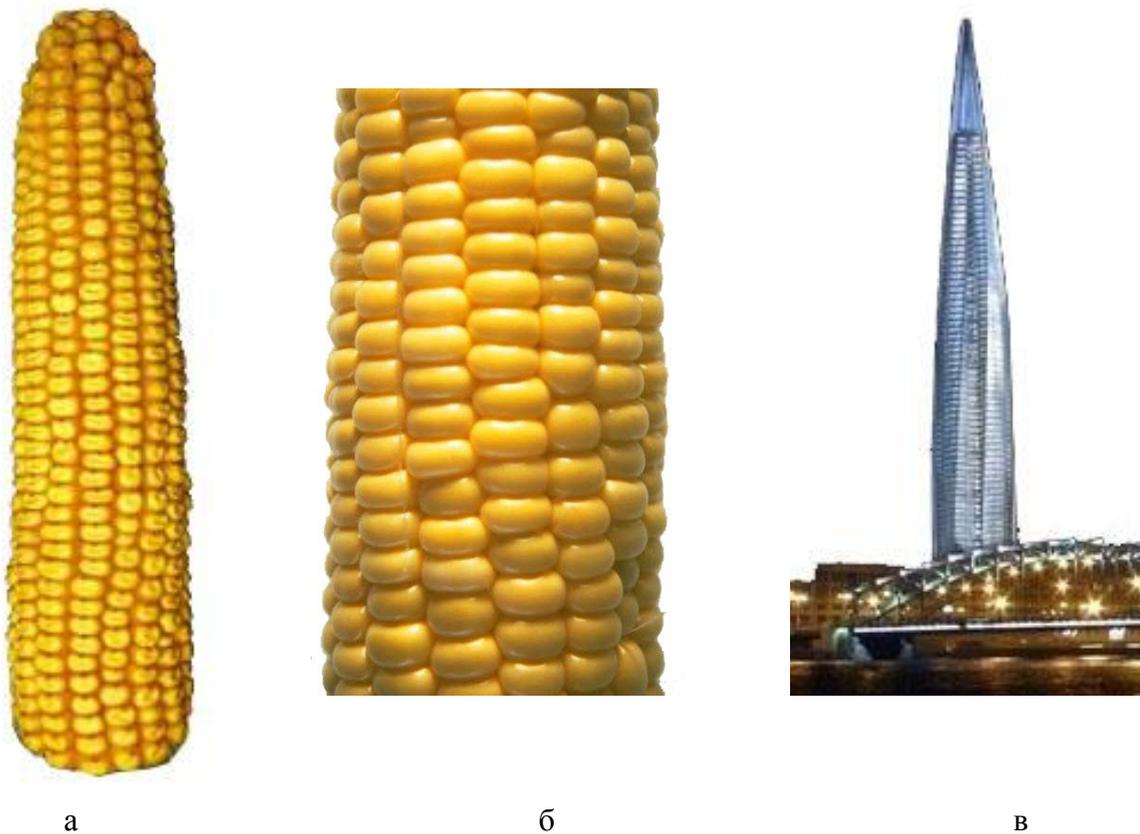


Рис. 3. 19. Початок кукурузы (а), его структура (б), проект башни Газпром-Сити

В отличие от ячеистой структуры плодов растений чешуя рыб и пресмыкающихся, состоящая из одинаковых роговых или костяных пластинок, образует наружный покров, защищающий их от внешней среды и об-

38

ладающий большой гибкостью (рис. 3. 20 а). Дизайнеры в своем творчестве также широко используют чешую и ее стилистику. Более двух тысяч лет назад в качестве доспехов часто применялась бронзовая чешуя, скрепленная кольцами или ремнями (рис. 3. 20 б). В настоящее время чешуя является элементами декора одежды (рис. 3. 21 а), а также используется в качестве черепицы, покрывающей крыши домов, например, архитектор А. Гауди весьма точно копировал форму чешуи рыб для оформления крыш (рис. 3.21 б).

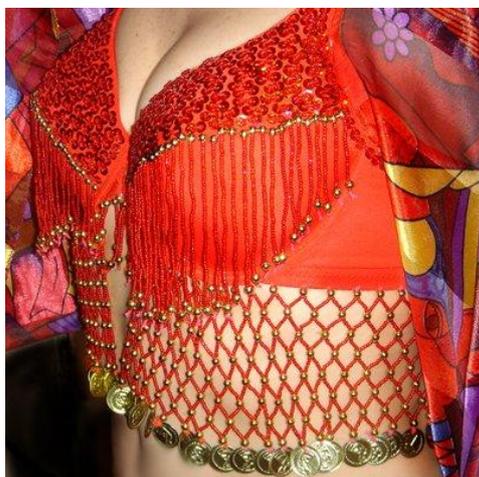


а



б

Рис. 3. 20. Чешуя: а – рыба, б – бронзовая чешуя доспехов древнеримских воинов



а



б

Рис. 3. 21. Декор платья в стиле чешуи (а), черепица крыши (б)

Повторяющиеся элементы живой природы сообщают особую гармонию и ритмичность ее представителям. В них отражена закономерность целого: повторяющиеся элементы представляют собой результат двух

взаимно дополняющих процессов – дифференциации (дробления) и интеграции (соединения). Природа оперирует небольшим числом типов геометрических форм, но их комбинации дают огромное разнообразие форм организмов. В живой природе действуют принципы – чем меньше «стандартный» элемент, тем он более гибок. Их изменения значительно повышают вариационную способность организмов. В пределах одного организма уживаются разнообразные по своей геометрии формы, плотно сомкнутые между собой (треугольные, пятиугольные, шестиугольные и т.д.). Высокая вариативность геометрии формы фигур объясняется разнообразием функций структур организмов. Ярким примером аналогии стандартного элемента в строительстве может быть простой строительный кирпич (рис. 3. 22), пропорции которого позволяют возводить строения различной сложности и формы.

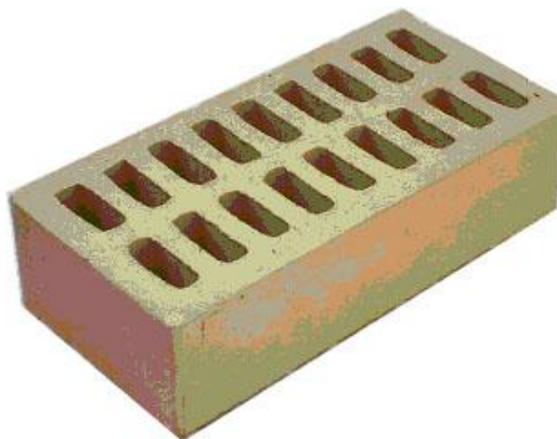


Рис. 3. 22. Строительный ячеистый кирпич

Ячеистая структура внутреннего пространства в живой природе используется также в качестве прочной оболочки для сохранения плода (рис. 3. 23). Ячеистая упаковка различных товаров часто также выполняется по бионическому принципу. Например, таблетки лекарств часто упаковывают в блистерную упаковку (рис. 3. 24).

Плод граната имеет шаровидную форму, внутри которого плотно упакованы зерна. При созревании плод раскалывается, и зрелые семена высыпаются на землю. Вероятно, по этой причине боеприпас, предназначенный для метания в противника, назван ручной гранатой, которая при взрыве разлетается на осколки правильной формы, сформированные насечкой на корпусе (рис. 3. 25).



Рис. 3. 23. Стручок фасоли



Рис. 3. 24. Блистерная упаковка лекарств



а



б



в

Рис. 3. 25. Плод граната (а), его зерна (б), ручная граната (в)

В дизайне ячеистые структуры широко используются в декоре квартир, например, подвесные и напольные полки близки по ритмике и структуре пчелиных сот (рис. 3.26).



Рис. 3. 26. Дизайнерские решения мебельных полок в стиле пчелиных сот

Для дизайн-проектирования изделий различного назначения необходимо учитывать, что плотная упаковка в виде сотовых элементов позволя-

ет не только экономить материал при высокой жесткости и хорошей демпфируемости, но и сохранять тепло и осуществлять вентиляцию.

3.4. СИММЕТРИЯ

Симметрия существует в математике, физике, химии, биологии, социальной жизни и т.д. Терминология в области симметрии зависит от науки, в которой она рассматривается. Смысл симметрии заключается в закономерном повторении объектов или его частей.

Симметрия в биологии – это, прежде всего структурная симметрия, проявляющаяся в закономерности повторения. В биообъектах существуют характерные геометрические элементы (точки, линии, плоскости) относительно которых упорядочены одинаковые части объекта. В биологии принята следующая терминология симметрии.

Аксиальная симметрия достигается вращением объекта вокруг какой-либо оси и характеризуется порядком симметрии $n = \frac{2\pi}{\varphi}$. Например, лист плюща несимметричен (рис. 3. 27). Его можно повернуть только на угол $\varphi = 2\pi$ относительно оси, перпендикулярной плоскости чертежа, поэтому говорят, что он имеет ось первого порядка $n = 1$.

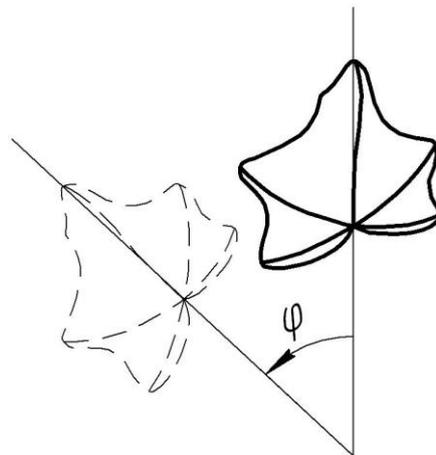


Рис. 3. 27. Несимметричный лист плюща имеет ось симметрии первого порядка

Для медузы *Aurelia insulinda* (на рис. 3.28 – вид снизу) имеется ось симметрии четвертого порядка, так как ее можно повернуть на угол

$\varphi = \frac{\pi}{2}$, и в этом случае ее изображение полностью совпадет с первоначальным изображением. Она имеет ось симметрии четвертого порядка: $n = \frac{2\pi \cdot 2}{\pi} = 4$. Цветок флокса имеет ось симметрии пятого порядка (рис. 3. 29, так как наименьший угол поворота, необходимый для совмещения изображения $\varphi = \frac{2\pi}{5}$.

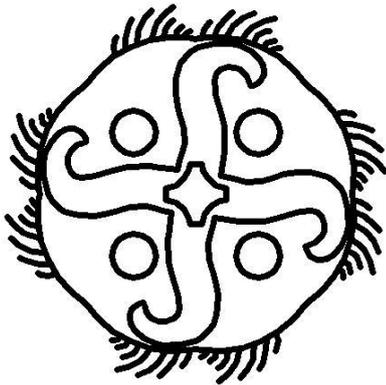


Рис. 3. 28. Аксиальная симметрия четвертого порядка

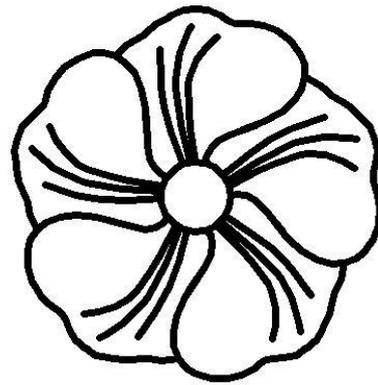


Рис. 3. 29. Аксиальная симметрия пятого порядка

Актиноморфная симметрия характеризуется наличием плоскостей (обозначается буквой m), относительно которых форма объекта имеет зеркальное отражение. Бабочку (рис. 3. 30) для совмещения изображения можно повернуть вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа, только на угол $\varphi = 2\pi$, то есть она имеет ось первого порядка $n = 1$, кроме того, бабочка имеет только одну плоскость симметрии. Обозначение такой зеркальной симметрии – $1 \cdot m$, такой вид симметрии называют двухсторонней. Яркий пример зеркальной симметрии является митоз, т.е. деление клетки. Для листьев кислицы (рис. 3. 31) $n = 3$, поэтому ее актиноморфная симметрия обозначается как $3 \cdot m$.

На низших этапах развития живой природы встречаются представители всех классов точечной (центральной) симметрии (для нее $n \rightarrow \infty$). К таким видам организмов относятся радиолярии

- шарообразная, содержащая бесконечное количество осей, бесконечное число плоскостей симметрии и центр симметрии;
- кубические радиолярии, характеризующиеся симметрией куба, и т.д.

На более высоких ступенях эволюции встречаются растения и животные в основном аксиальной (вида n) и актиноморфной (вида $n \cdot m$) симметрии. Асимметрия характерна в основном для листьев растений.

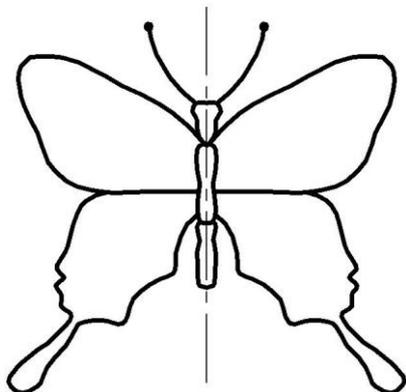


Рис. 3. 30. Актиноморфная симметрия типа $1 \cdot m$

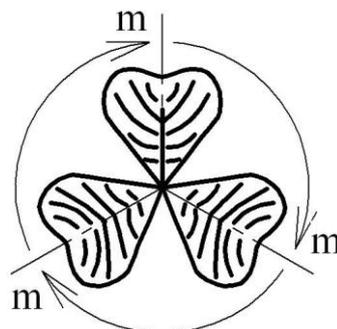


Рис. 3. 31. Актиноморфная симметрия типа $3 \cdot m$

Двусторонняя симметрия характерна для позвоночных животных, для человека она характерна только для фронтального вида. У подвижных животных такая симметрия связана с различиями движения вверх-вниз и вперед-назад, тогда как движения направо-налево одинаковы. Нарушение такой симметрии привело бы к превращению поступательного движения в круговое.

Для органической природы, для живых организмов характерна неполная симметрия (квазисимметрия), (например, в строении человека). Нарушение симметрии, асимметрия (отсутствие симметрии) используется в искусстве как художественное средство. Небольшое отклонение от правильной симметрии, то есть некоторая асимметричность, нарушая равновесие, привлекает к себе внимание, вносит элемент движения и создает впечатление живой формы. Симметрия и асимметрия являются взаимодополняющими принципами морфологического строения организмов живой природы.

В биологии, в основном в ботанике, используют термин *дисимметрические объекты*. Это объекты (каждый из которых может быть несимметричным), которые могут существовать, по крайней мере, в двух модификациях (рис. 3. 32) – в форме оригинала и его зеркального отражения (антипода).

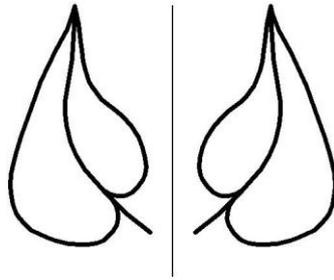


Рис. 3. 32. Два диссимметрических листа бегонии

При этом один объект имеет *D*-форму, а второй объект – *L*-форму. К таким объектам относятся цветы анютиных глазок, раковин прудовника, молекул винной кислоты. Доказано, что изменение формы *D* и *L* объекта может происходить благодаря мутации или иным природным факторам.

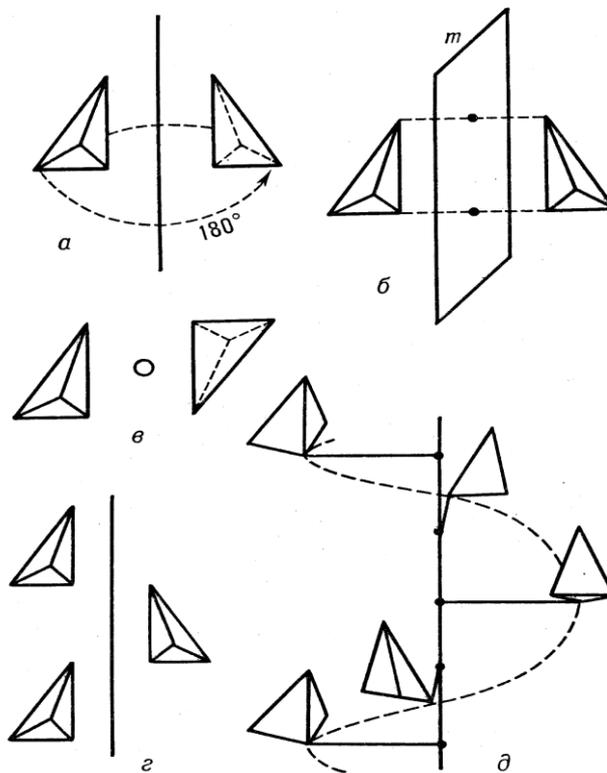


Рис. 3. 33. Простейшие операции симметрии: а – поворот, б – отражение, в – инверсия, г – скользящее отражение, д – винтовой поворот

В геометрии, а также в кристаллографии симметрия имеет большое значение. Симметрия – это свойство геометрической фигуры, характеризующее некоторую правильность формы, неизменность ее при действии движений и отражений. Простейшие операции симметрии (рис. 3. 33) или движения симметрии широко используются в компьютерной графике и

при огранке кристаллов: поворот, отражение, инверсия, скользящее отражение, винтовой поворот. Основные виды симметрии в геометрии и кристаллографии – центральная, осевая, симметрия переноса. Существуют также симметрии, сочетающие в себе комбинации основных видов симметрии, в частности, винтовая симметрия, которая осуществляется вращением фигуры в сочетании с переносом вдоль оси. К частным видам относятся симметрии: зеркально-тождественные, зеркально-симметричные, одноосевые, зеркально-асимметричные многоосевые.

В искусстве симметрия рассматривается как средство гармонизации ее форм, является одним из «механизмов» приведения к единству функционально-утилитарного и духовного содержания объектов. Различные виды симметрии обладают различным воздействием на эстетическое чувство: зеркальная симметрия – равновесие, покой; винтовая симметрия вызывает ощущение движения.

В дизайн-проектировании симметрия получила распространение как один из видов гармоничной композиции. Симметрия используется в качестве основного приема построения бордюров и орнаментов (плоских фигур, обладающих соответственно различными видами симметрии).

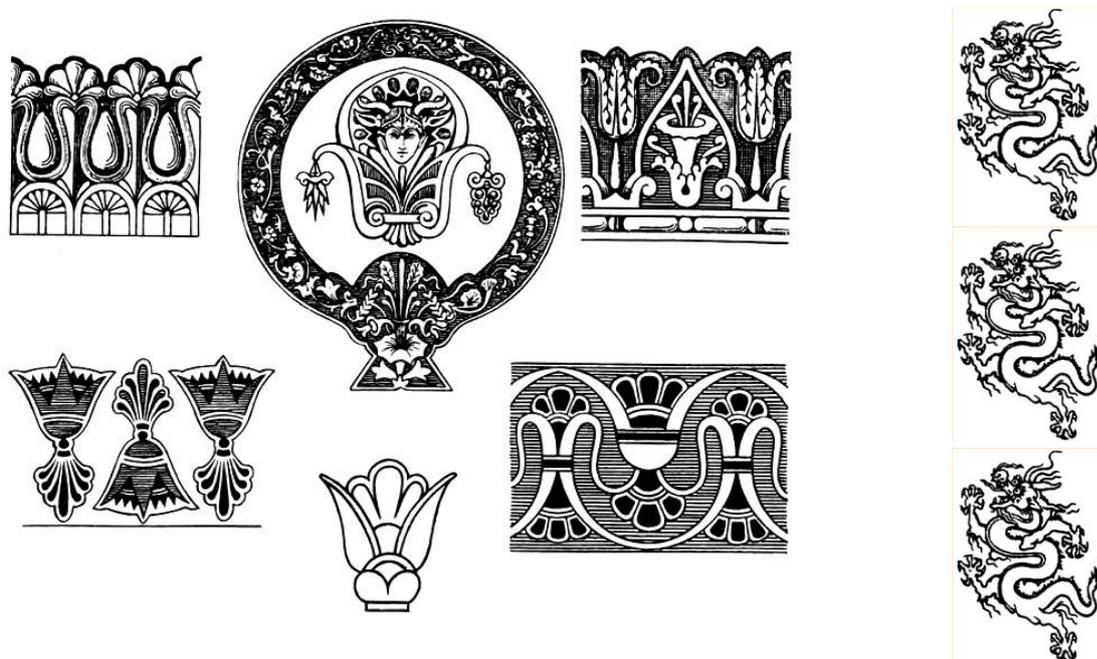


Рис. 3. 34. Древнегреческие и китайские орнаменты

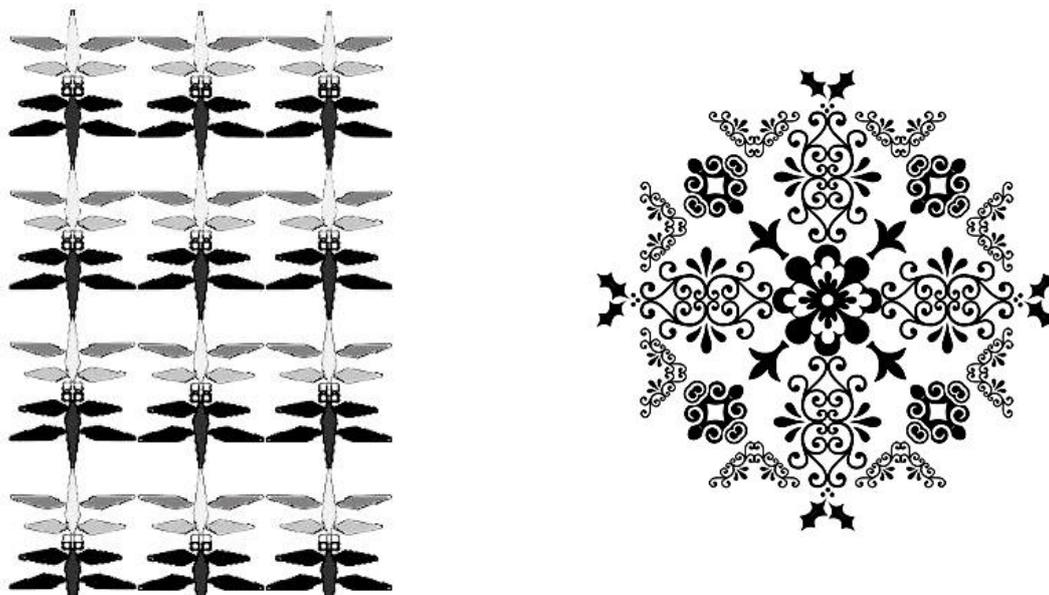


Рис.3. 35. Современные орнаменты

С древних времен в орнаментах и бордюрах использовались изображения растений, животных (в том числе сказочных) и людей (рис. 3. 34). В настоящее время модными являются орнаменты с использованием стилизованных представителей живого мира (рис. 3. 35).

Асимметрия придает композиции динамику и выявляет потенциальную способность к движению, позволяет выразить внутреннюю жизнь элементов, их взаимодействие. Например, рассматривая портреты девушки в анфас, выполненные из двух правых половинок и двух левых половинок (рис. 3. 36 а, в), и нормальный портрет (рис. 3. 36 б) большинство людей признают, что нормальный портрет выглядит более реально, чем остальные, хотя объяснить это сразу не могут.

Феномен асимметрии наблюдается не только в растительном, но и в животном мире. Пример спиральной асимметрии – раковины моллюсков как правой, так и левой ориентации. Как известно, одни и те же моллюски всегда закручивают свои раковины в каком-либо одном направлении – либо вправо, либо влево. Особого рассмотрения требует асимметричная деятельность парных, внешне симметрично расположенных органов. Примерами такой асимметрии могут служить руки человека. Они далеко неравноценны: одна правой, а другая левой ориентации. Хотя анатомически существенной разницы в конечностях нет, однако неравномерная работоспособность, количественная и качественная их характеристики подтвержда-

ют бесспорность доминанты одной из сторон. Имеются данные о доминирующей роли правого глаза, слухового анализатора, кровяного давления при правой ориентации деятельности верхних конечностей. В связи с наличием односторонней доминирующей ориентации в билатерально симметричных образованиях у людей необходим пересмотр существующих стандартных форм в создаваемых человеком объектах архитектуры, объектах внешней среды, предметного мира с целью осуществления соответствующих изменений для удобства людей с преимущественно правой ориентацией (например, в дизайне, в технологическом управлении производства и т. д.).



Рис. 3. 36 . Портрет девушки в анфас: а – составной из двух левых половин, б – нормальный, в – из двух правых половин

Симметрия и асимметрия в природе взаимно дополняются. Без того и другого состояния не может быть, с одной стороны, роста и развития живых организмов, с другой – формирования видов, закрепления наследственности, совершенствования форм.

В технике также редко встречаются чисто симметричные или асимметричные формы. Например, полностью симметричный ступенчатый валик может иметь шпоночные пазы или односторонние лыски, а симметрия вида спереди легкового автомобиля нарушается левосторонним (или правосторонним) расположением руля и места водителя. Подобные симметричные элементы формы имеют место и у изделий с асимметричной в целом формой.

Таким образом, в дизайн-проектировании необходимо применять как симметричные так и асимметричные формы в зависимости от постановки задач, но при этом обычно сохраняется ведущий композиционный признак формы – симметрия или асимметрия.

3.5. КОЛОРИСТИКА ЖИВОЙ ПРИРОДЫ И ЕЕ ОТРАЖЕНИЕ В ДИЗАЙНЕ

В живой природе цвет имеет большое значение. Цветовая гамма и интенсивность окраски внешней поверхности живого организма зависит от нескольких факторов:

- от среды обитания;
- от образа жизни;
- от возраста и состояния здоровья.

Роль цвета в живой природе – в основном информативная, а также обусловлена различными физическими факторами окружающей среды (например, цветовым фоном среды обитания; интенсивностью света, падающего на поверхность организма). Эта информация предназначена:

- для представителей своего вида;
- для других видов живых существ.

Цвет у представителей фауны внутри вида служит:

- для привлечения внимания особи противоположного пола;
- для определения возраста.

У представителей многих видов животных цвет служит для маскировки или отпугивания. Такая функция цвета непосредственно связана с мимикрией цвета. *Мимикрия* – (у животных) - сходство вида животных по цвету с другим видом животного, а также растением или его органом. У животных мимикрия способствует сохранению вида в борьбе за существование. Мимикрия может быть не только направлена на пассивную защиту, но и может служить орудием нападения, подманивания добычи (например, рыба-удильщик имеет люминесцирующий отросток). Цветовую маскировку совместно с орнаментом используют как хищники, так и их жертвы в частности, травоядные животные, а также насекомые. Например, бабочки

на крыльях часто имеют большие темные круги (рис. 3. 37). Очевидно, при раскрытии бабочкой крыльев птицам может показаться, что на них смотрит крупная птица.

Среди различных случаев так называемой гармонической окраски наблюдаются также приспособления к известным условиям освещения, игры света и тени. Животные, вне обычных условий жизни кажущиеся ярко окрашенными и пестрыми, на самом деле могут вполне гармонизировать и сливаться с окраской среды. Яркая, темная и жёлтая, поперечная полосатость шкуры тигра легко скрывает его от взоров в зарослях камышей и бамбуков, где он живёт, сливаясь с игрой света и тени вертикальных стеблей и повисших листьев. Такое же значение имеют круглые пятна на шкуре некоторых лесных зверей: лань (*Dama vulgaris*), пантера, оцелот; здесь эти пятна совпадают с круглыми бликами света, которыми играет солнце в листве деревьев. Даже пестрота шкуры жирафа не представляет исключения: на некотором расстоянии жирафа чрезвычайно трудно отличить от поросших лишаями старых стволов деревьев, между которыми он пасется.



Рис. 3. 37. Отпугивающая окраска бабочки

То же самое явление и в самых широких размерах представляет морская фауна: рыбы, раки и другие организмы, живущие на дне. Эти животные, благодаря своему цвету и неровностям поверхности тела, бывают крайне трудно отличаемы от дна, на котором живут. Это сходство ещё усиливается способностью многих живых организмов изменять свой цвет в зависимости от цвета дна, например, головоногие моллюски, некоторые рыбы и ракообразные. Среди живых организмов моря, свободно плавающих всю жизнь в воде, наблюдается одно из самых замечательных приспособ-

соблений в окраске: между ними существует множество форм, лишенных всякого цвета, со стекловидной прозрачностью тела. Сальпы, медузы, ктенофоры, некоторые моллюски и черви и даже рыбы (личинки морских угрей *Leptocephalidae*) представляют ряд примеров, где все ткани, все органы тела, нервы, мышцы, кровь, сделались прозрачными, как хрусталь.

В технике мимикрия используется в основном в военном деле, охоте и рыбалке. Маскировочные костюмы для живой силы и различные маскировочные сети широко используются в армии. Во время Второй мировой войны военное ведомство США исследовало поведение камбалы, чтобы научиться у нее искусству маскировки. Если поместить камбалу в аквариум с синим дном, она становится синей, с красным – красной, а если дно раскрашено, как шахматная доска, – камбала принимает такую же окраску.

Примечательно, что цвет в сочетании с орнаментом дает большую информативность, чем просто плавное изменение цвета. Например, по ритму чередования полос зебры находят своих жеребят в табуне.

Для растений цвет служит в основном для привлечения насекомых, опыляющих цветы. Неспелые плоды зелены и незаметны среди листвы, но когда они созревают, то становятся весьма привлекательными и аппетитными. Они как бы призывают всех желающих: съешь меня! Растение “знает”, что яркий плод привлечет птиц или животных, которые съедят мякоть, а зернышки, пройдя через пищеварительный тракт (и не растворившись в желудочном соке благодаря защитной оболочке) упадут, в конце концов, на землю – иногда за многие километры от материнского растения.

Колористику живых существ формируют цветные вещества – *пигменты*, входящие в состав тканей организмов. Цвет пигмента определяется наличием в их молекулах так называемых хромофорных групп, которые обуславливают избирательное поглощение света в видимой части солнечного спектра. Пигменты играют важную и разнообразную роль в жизнедеятельности организмов, особенно в фотобиологических процессах. Разнообразие оттенков внешности достигается как насекомыми, так и птицами и рыбами не только за счет красящих пигментов, но и обусловлено *интерференционными и дифракционными явлениями* на чешуйках крыльев бабочек и перьях птиц (например, «глаза» на хвосте павлина – рис. 3. 38).



Рис. 3. 38. «Глаза» в оперении павлина

Исходя из того, что цвет играет большую информационную роль в живом мире, можно предположить, что многие его представители обладают цветовым зрением. В настоящее время считается, что среди позвоночных наличие цветового зрения встречается у всех костных рыб, яркостью окраски часто соперничающих с цветами и оперением тропических птиц, некоторых амфибий (тропические лягушки, жабы, аксолотль) и пресмыкающихся (агама, черепахи, ящерицы, гекконы, змеи). Ряд закономерностей работы цветового рецептора был изучен именно при исследовании сетчатки рыб (очень сходной с сетчаткой приматов) и пресмыкающихся, а не на сетчатке человека. Цвета играют большую роль в инстинктивном поведении многих видов рыб. Например, красное пятно на объекте является врожденным *релизером* агрессивного поведения самца колюшки, а некоторые цехлидовые распознают по цвету своих мальков. (В науке об инстинктах – *этологии* этот релизер означает любой знаковый стимул, который выполняет коммуникативные функции и инициирует социальные модели поведения).

Цветовое зрение встречается на весьма ранних ступенях эволюционной лестницы: им обладают насекомые (шмели, пчелы, мухи, бабочки). Это следует и из исследования их поведения, и из наличия в цветах целого ряда пигментов, привлекающих насекомых в период опыления. Вместе с тем выяснено, что диапазон чувствительности зрения насекомых сдвинут в

ультрафиолетовую область (в ущерб красной), что означает, что нам недоступны многие видимые ими цвета, а им – красный, который, вероятно, они воспринимают как «инфражелтый» (по аналогии с нашим инфракрасным), или черный. Лучше всего насекомые реагируют на желтые, синие и фиолетовые оттенки, причем доказано, что на их поведение в данном случае влияют не ультрафиолетовые или инфракрасные лучи, а именно цветовые различия. Пчелы, как было доказано экспериментально, также обладают цветовым зрением, причем, в отличие от человека, у пчел цветовая гамма ощущений сдвинута к коротковолновому диапазону, т.е. пчела видит ультрафиолетовый цвет. Кроме того, пчела способна различать направление поляризации света. По-видимому, эта способность помогает пчеле ориентироваться на местности.

Цветовое зрение позвоночных зависит от клеток сетчатки глаза, называемых колбочками. Птицы, ящерицы, черепахи и многие рыбы обладают четырьмя типами колбочек, а большинство млекопитающих – всего двумя типами (цвет распознается колбочками – светочувствительными клетками сетчатки, для распознавания цвета требуется большая интенсивность света, чем для палочек, которые организм использует для определения контуров при малом освещении.). Этим объясняется то, что хорошим цветовым зрением обладают многие дневные птицы, различающие, в отличие от насекомых, и цвета красной области спектра.

Доказано, что красная окраска многих ягод и красные пятна у птиц на теле (клювах, оперении) служат врожденными релизерами поведения ряда видов птиц (серебристая чайка, европейская зарянка, некоторые попугаи). Совы, однако, ведя ночной образ жизни, не видят цветов в красной части спектра. Доказан врожденный характер цветовых ключевых раздражителей при пищевом и половом поведении для некоторых видов птиц. Зяблики, например, предпочитают самок с красной грудкой, птенцы серебристой чайки охотнее выпрашивают корм у родителей с красной отметиной на клюве, утята предпочитают клевать зеленый корм, а цыплята – оранжевый и синий. Ученые-биологи, предлагая птенцам клевать разноцветный корм, посчитали возможным разделить все виды птиц на три категории в соответствии с дифференциальной чувствительностью к цвету:

- кривая чувствительности имеет две вершины: в синей и красной областях спектра;
- одна вершина в желто-зеленой части;
- отсутствие предпочтения какой-либо части спектра.

Для многих птиц цветовое зрение играет важную роль при размножении (привлечение особи противоположного пола), поиске пищи и сохранении жизни (маскировка, мимикрия). Биолог Х. Хайнд выделил дифференциальную реактивность семнадцати различных биологических видов на «ключевые раздражители». В восьми случаях цвет выделяется как главный признак, вызывающий реакцию, в четырех случаях, – как второстепенный. Любопытно, что столь же важную для существования роль цвет играет и для растений, участвующих в симбиозе с насекомыми и птицами.

Среди млекопитающих собаки и кошки обладают слабым цветным зрением. Грызуны (кролики, мыши), а также копытные не различают цвета. Слабое цветное зрение обнаружено у белок и грызунов из семейства беличьих (сурки, суслики). Оно отсутствует или почти отсутствует у большинства травоядных животных (морских свинок, коров, лошадей, свиней, овец и т.д.).

Человекообразные обезьяны и большинство приматов обладают цветовым зрением подобно человеку. У низших приматов (полуобезьян, лемуroidов) цветового зрения нет, поскольку это ночные животные. У хвостатых обезьян обнаружено цветовое зрение типа протонопии: различают только синий и желтый, серый вместо голубого, красные оттенки отсутствуют.

Из сказанного следует, что цветовое зрение - очень древняя способность живых организмов, появившаяся ранее завоевания жизнью суши, и уже тогда цвета имели сигнальную функцию. Отсутствие цветоразличения у большинства млекопитающих объясняется его последующей утратой: на протяжении эволюции наземных теплокровных количество видов, обладающих цветовым зрением, постоянно сокращалось в связи с ночным образом жизни. Такая частичная утрата цветового зрения в связи с ночным образом жизни (совы, хвостатые обезьяны и др.) вызывает *протонопию* – неразличение цветов красного края спектра. Иллюстрирует протонопию человеческое сумеречное зрение и характерный для него "сдвиг Пурки-

нье": в сумерках цвета красной части спектра становятся оттенками серого и коричневого, и синие - становятся ярче и насыщеннее. Вероятно, именно такими видят краски мира ночные животные с остаточным цветовым зрением [20].

Изобретение "камуфляжа" приписывают сугубо мирному человеку – детскому художнику Эбботу Тэйеру (США). В 1901 году он увлекся изучением живой природы, где "натурщиками" служили звери и птицы. Повседневные наблюдения за пернатыми дали толчок Тэйеру к изучению разнообразия красок в природе. В итоге он сформулировал теоретические основы защитных свойств цвета, установив, например, что участки тела животных, которые чаще обращены к свету, обычно темнее, а скрытые от солнца – светлее. Этот принцип получил в США название "Закон Тэйера" и впоследствии нашел весьма неожиданное для автора применение.

В 1909 году Тэйер выпустил книгу для малышей "Защитные окрасы в царстве животных". Каждая ее страница представляла собой "загадочную картинку", где было изображено переплетение стеблей и листьев, и читателю предлагалось определить, кто за ними скрывается. Книга воспринималась как увлекательная настольная игра.

Спустя какое-то время художник и читатели с удивлением узнали, что на издание обратили внимание военные чины США. "Закон Тэйера" лег в основу научной теории мимикрии. На ее базе была разработана система принципов военного камуфляжа.

Вторая мировая война подтвердила непреходящую ценность открытия Эббота Тэйера. Его разработки не только спасли жизнь десяткам тысяч людей, но и составили основу маскировки сотен городов. Конкретный узор и расцветка в разных странах варьируются, однако базовый принцип ("разбивающего рисунка") остается неизменным. В остальном же камуфлированная форма предоставляет большой простор для творчества модельеров и художников.

Армии стран – членов НАТО для действий в средней полосе в летнее время в конце 1970-х – начале 1980-х годов приняли "на вооружение" так называемый "лесной" камуфляж, состоящий из больших, накладывающихся друг на друга пятен и полос черного, коричневого, зеленого и белого цветов (рис. 3. 39).



Рис. 3. 39. Военный камуфляж

В более жарком климате используется "лиственный" камуфляж - беспорядочно разбросанные по ткани пятна четырех основных цветов с преобладанием зеленого и коричневого (с небольшими изменениями в рисунке и расцветке, сохранившийся еще со времен Второй мировой), или вариант маскировочной окраски, известный под названием "тигровые полосы". В 1982 году сначала появился "пустынный" камуфляж - именно в него чуть ли не поголовно были одеты участники операции "Буря в пустыне". Правда, при этом не обошлось без накладок: новую форму испытывали в пустынях Северной Америки, и там ее расцветка оказалась в высшей степени эффективной. А вот в ближневосточных или североафриканских пустынях солдату в такой маскировке не удастся полностью слиться с пейзажем: не тот цвет почвы, меньше камней и т.д.

Последнее достижение ученых в области камуфляжа – плащ-невидимка, на поверхности которого возникает изображение предметов, расположенных позади него, т.е. такой материал плаща становится в первом приближении прозрачным, как, например, медуза (рис. 3. 40). Созданный учеными плащ-невидимка состоит из десятков оптоволоконных колец, покрытых медными элементами. Такими искусственными композитными материалами (или метаматериалами) можно манипулировать, чтобы изменить направление электромагнитных волн, тем самым, маскируя объект.



Рис. 3. 40. Плащ-невидимка

Кроме маскировки одежда может иметь противоположную функцию – фиксации внимания на человеке или его одежде. Общеизвестно, что такая функция, в частности, для привлечения внимания противоположного пола используются в женской одежде довольно часто. В технологическом оборудовании кнопка экстренного отключения от электросети всегда имеет красный цвет и выделяется на нейтральном фоне поверхности.



Рис. 3. 41. Спасательный жилет оранжево-го цвета со фликерами



Рис. 3. 42. Жилет работника ДПС со светоотражательной полосой

Яркие цвета, в частности, оранжевый используется дорожными службами, а также для спасательных жилетов (рис. 3. 41). Кроме того, для большей заметности используются различные светоотражатели или фликеры

(рис. 3. 42). Их высокие отражательные свойства основаны на интерференции и дифракции света, как и в оперении птиц и хитиновых чешуйках насекомых.

Эстетическое чувство присуще только человеку, поэтому красоту палитры может оценить только человек. Хотя некоторые красивые птицы, например павлины, распускают свой хвост, если видят внимание к ним человека.

Колористика живой и неживой природы всегда привлекала человека, вызывала глубокие эмоции, во многом формировала психология и пробуждала его творить по законам красоты. Достаточно вспомнить прекрасные пейзажи И.И. Шишкина, И.И. Левитана, солнечные полотна М. Сарьяна, холодные безмолвные пейзажи Р. Кента или картины М.А. Врубеля.

То же видим и в архитектуре – удивительные заимствования у природы, Колористика архитектурных шедевров А. Гауди (Барселона) или яркая Колористика архитектурного ансамбля Иверского монастыря (Валдай) на фоне темной зелени бескрайнего леса, летнего голубого неба и зеркальной дали воды.

Прямое использование богатой колористики живой природы мы видим в ландшафтном дизайне – в убранстве клумб, скверов и площадей, дачных и коттеджных участков, в садово-парковых ансамблях (например, огромный живой ковер цветов перед Екатерининским дворцом в г. Пушкине).

Другим примером непосредственного привнесения яркой цветовой палитры живой природы в среду обитания человека являются аквариумы с рыбами тропических морей и вольеры с павлинами, фазанами, клетки с попугаями т. п. Несомненно, что все это великолепие красок живой природы благоприятным образом сказывается на эмоциональной сфере человека и его психическом здоровье.

Помимо упомянутых ранее дизайнерских аспектов использование колористики живой природы в создании предметов искусственной среды (ткани, одежда и т. п.) следует также упомянуть широкое применение цветовой палитры различных растений в строительстве и отделке помещений: паркет из набора древесины разных пород и цветов; мебель или стены с

отделкой под березу, дуб, вишню; шторы из бамбука, соломенные шляпы и т. п.

Разумеется, колористика живой природы широко используется в дизайне детских площадок и игрушек.

Эстетические ощущения и психология восприятия человеком колористики живой природы безусловно формирует вполне определенные требования к выбору цветовых решений в дизайн-проектировании практически любых технических объектов, прямо или косвенно взаимодействующих с человеком как частью биосферы Земли.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные принципы существования живой природы?
2. В чем заключаются свойства живой природы?
3. В чем состоит идея золотого сечения?
4. Каковы отношения сторон в золотом прямоугольнике и золотом треугольнике?
5. Покажите принцип построения спирали Фибоначчи. В каких биологических объектах он заложен?
6. Какие геометрические фигуры дают плотную упаковку на плоскости?
7. Почему для подвижных животных характерна двухсторонняя симметрия?
8. Какие черты проявляются в асимметричной дизайнерской композиции?
9. От каких факторов зависит цветовая гамма живых организмов?
10. Что такое мимикрия животных?
11. В чем сущность базового принципа камуфляжа?

4. НЕСУЩИЕ СИСТЕМЫ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ – ПРОТОТИПЫ ДИЗАЙНЕРСКИХ И ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ

4.1. МАТЕРИАЛЫ И СТРУКТУРА ОБЪЕКТОВ ЖИВОЙ ПРИРОДЫ И ИХ ТЕХНИЧЕСКИЕ АНАЛОГИ

4.1.1. Гетерогенность структуры биологических тканей

Большинству биологических тканей присуща гетерогенность, т.е. неоднородность свойств (в том числе и механических). Это свойство связано с необходимостью адаптации биологической ткани к разнообразию внешних воздействий на живой организм в целом. В технике также используются неоднородные структуры, позволяющие существенно повысить механические характеристики материалов. Еще со средних веков применяли композитные материалы, которые по своим свойствам приближаются к свойствам гетерогенных биологических структур. Так называемый азиатский лук, который по своим боевым качествам намного превосходил английские луки из тиса, был выполнен из своеобразного композитного материала. Такой лук имел деревянную основу, на которую наклеивались с внешней стороны сухожилия, а с внутренней стороны – роговые пластины. Рукоятка также часто была выполнена из рога (рис. 4. 1). В наше время композитные материалы на основе углепластика широко используются, например, в авиации. Они по своим удельным прочностным характеристикам превосходят титан и бериллиево-магниевые сплавы.

Кости млекопитающих обладают высокой устойчивостью при сжимающих нагрузках. Экспериментально доказано, что общая устойчивость конструкций с гетерогенным размещением материала во много раз превышает устойчивость отдельных ее слоев, вследствие чего наружные слои из компактной ткани имеют значительно меньшую толщину по сравнению с внутренними слоями губчатой костной ткани. Последняя играет роль заполнителя, создающего практически непрерывную опору для наружных слоев, предохраняя их тем самым от потери устойчивости при сжатии. Это

достигается определенным видом структуры внутреннего слоя, которая образно представляет собой материализацию силового поля, возникающего при действии внешних нагрузок. Таким образом, реализуется принцип траекториального строения решеток конструкций.

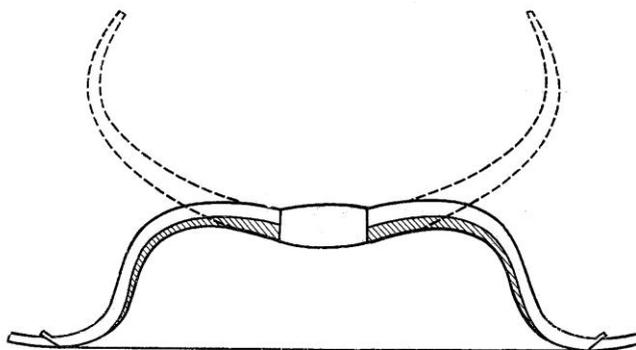


Рис. 4. 1. Азиатский лук с натянутой тетивой и без тетивы

В середине двадцатого века было обнаружено явление, позволяющее организму человека повышать прочность костей в тех местах, где нагрузки максимальны. Известно, что в организме кость растет таким образом, что наиболее прочные структуры в кости возникают там, где нагрузка на них максимальна. Это достигается за счет пьезоэлектрического эффекта костной ткани. Поэтому специально изогнутая форма кости предопределяет автоматическое усиление прочности самого материала в нужном направлении, т.е. материал кости имеет резкую анизотропию по прочности. Пьезоэффект проявляется в том, что в кристаллах гидроксилипатита — $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2$, составляющих неорганическую основу костей, возникает электрическое поле при действии на кости механических нагрузок. Это поле способствует тому, что в местах наибольшей напряженности начинают интенсивно расти вытянутые в одном направлении длинные молекулы коллагена — органического связующего вещества, между которыми потом появляются кристаллы гидроксилипатита. Тем самым в этом месте кость упрочняется. Максимальные изгибающие моменты и напряжения бедренная кость испытывает в своей верхней части около «шейки бедра», поэтому наиболее плотные и прочные костные ткани располагаются именно в этом месте. Продольный разрез (рис. 4. 2) наглядно демонстрирует эту закономерность. Менее плотные участки кости (на рис. 4. 2 они более тем-

ные) также играют важную роль в организме: эти губчатые структуры хорошо демпфируют колебания, возникающие при ударных нагрузках.

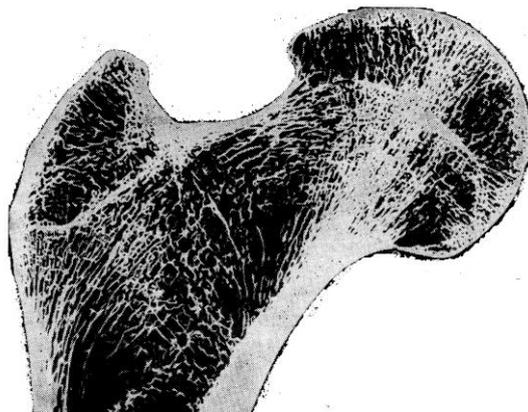


Рис. 4. 2. Продольный разрез бедренной кости

Линии максимальных сжимающих и растягивающих напряжений совпадают с наиболее плотными участками костных тканей, что наглядно из сравнения рис. 4. 3 и рис. 4. 4 а. В начале прошлого века в подъемных кранах часто использовали так называемые кривые крановые балки, в них распределение максимальных напряжений было аналогично распределению напряжений в бедренной кости (рис. 4. 3 б)

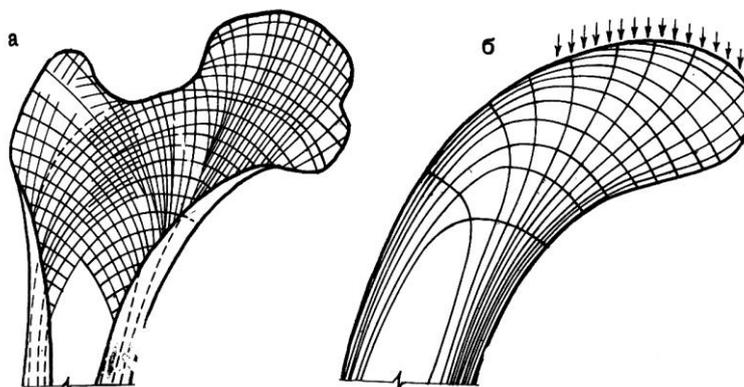


Рис. 4. 3. Линии максимальных напряжений в бедренной кости (а) и кривой крановой балке (б)

Приведенный выше эффект упрочнения костей в местах максимальных механических напряжений может быть использован в технике. Для этого необходимо создать подобные гидроксилпатиту синтетические материалы, которые будут упрочняться автоматически при повышении нагрузки.

В живой природе для обеспечения устойчивости конструкции широко используется гетерогенность. Черепа и панцири различных позвоночных имеют слоистое строение, в частности трехслойное, – между наружным и внутренним компактными слоями располагается слой губчатой костной ткани. Слоистое строение позволяет создать систему из отдельных слоев, прочность которых по отдельности при ударных нагрузках существенно ниже прочности системы в целом. Слоистая структура придает материалу вязкость, позволяющая рассеивать механическую энергию внешних динамических нагрузок. Кроме того, она тормозит образование усталостных трещин в отдельных слоях.

Плоские (пластинчатые) кости человека и позвоночных характеризуются трехслойным строением. Между наружными слоями компактной ткани располагается слой губчатой костной ткани, представляющий собой трехмерную структуру из тонких костных балочек и арок (рис. 4. 4). Эти плоские кости (кости черепа, панциря) подвергаются действию изгибающих, сжимающих и растягивающих нагрузок. Сочетание слоев с разными механическими свойствами позволяют получить конструкцию типа «сэндвич» с высокой прочностью, жесткостью и относительно малой массой.

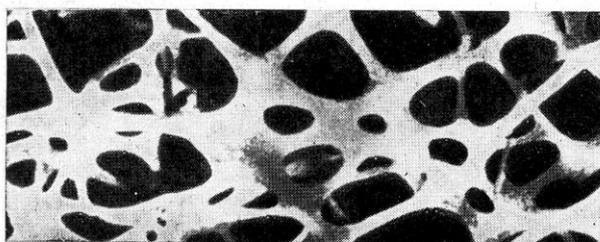


Рис. 4. 4. Внутреннее строение губчатой костной ткани

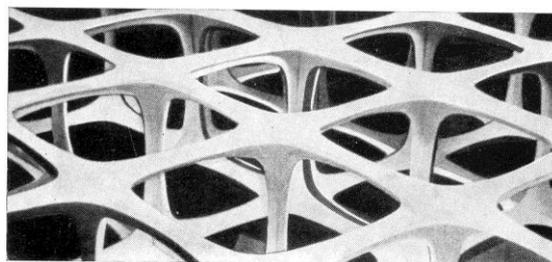


Рис. 4. 5. «Губчатая» прослойка между внешней и внутренней поверхностями кровли здания

В современных ответственных конструкциях также используются указанные принципы построения губчатых костных тканей (рис. 4. 5). Такое конструктивное решение позволяет создать легкие и прочные конструкции не только зданий, но транспортных средств.

4.1.2. Композиционные материалы стеблей растений

На первый план в разделе бионики, изучающей биоматериалы, выдвигается задача изучения свойств материалов стеблей на уровне анализа не только элементов структуры живого организма, но и отношений, связей между элементами, с выявлением тех факторов, которые приводят к экономии материала в природных структурах. Рассмотрим ряд характерных примеров. На рис. 4. 6 изображен фрагмент среза подсолнечника, где прослеживается периодическое чередование колец разной структуры [1]. На рисунке а – эпидермис (покровная ткань), б – колленхима, в – паренхима коры, г – крахмальные зерна (основная ткань), д – склеренхима (опорная ткань), е – паренхима вторичной коры, ж – ситовидные трубки (проводящая ткань), и – камбий, к – паренхима древесины, л – сосуды древесины, м – сердцевина (основная ткань). Таким образом, стебли имеют следующие ткани, различающиеся по своим функциям:

- покровную ткань;
- основную ткань;
- опорную ткань;
- проводящую систему.

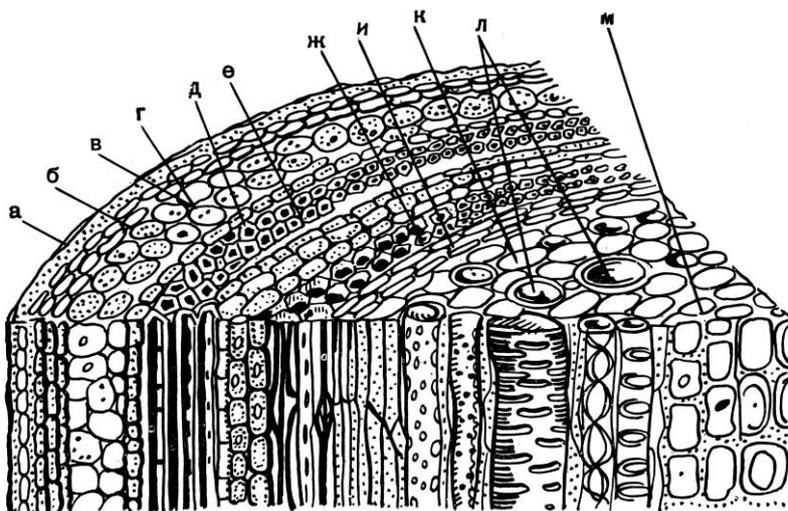


Рис. 4. 6. Структура ствола подсолнечника

Покровная система тканей образует внешнюю оболочку стебля и является «дышащим» ограждением стебля. Принципы структурного построения покровной ткани могут быть положены в основу создания динамических саморегулирующих устройств. Эта система тканей расположена

в той части стебля, которая растет, т.е. в молодых побегах и состоит в основном из *колленхимы*. Колленхима (от латинских слов *колл* – клей, *хим* – ткань) – биологическая ткань с удлиненными клетками, она является прочным элементом в первичной (живой) коре растущих стеблей. Клетки колленхимы находятся в состоянии тургора (повышенного внутриклеточного давления). Они выполняют также функцию запаса энергии и веществ для питания других клеток.

Основная ткань служит своего рода матриксом. *Матрикс* – мелкозернистое гомогенное вещество, заполняющее внутриклеточные структуры и пространство между клеток. В то же время он выполняет функцию связующего эластичного звена, что обеспечивает податливую связь пространственных несущих элементов. В матриксе погружены опорные колленхимные тяжи, несущие *склеренхимное* кольцо и проводящие сосуды. Склеренхима (*skleros* – твердый) – одревесневевшие клетки, образующие волокна.

Опорная (механическая) ткань, состоящая из толстостенных плотно упакованных клеток, создает по периферии стебля мощное склеренхимное кольцо. Такое строение поперечного среза ствола позволяет увеличить жесткость поперечного сечения за счет высокого момента инерции кольцеобразного сечения. Пространственное формирование осуществляется по принципу постепенного облегчения конструкции по высоте, т.е. экономии материала при высокой устойчивости системы.

Исследования при помощи электронного микроскопа (увеличение 8000 раз) показало, что клеточная мембрана – оболочка, окружающая клетку, состоит из трех слоев. Возникновение клеточной оболочки осуществляется путем образования из фрагмопласта (греч. *фрагма* – изгородь) так называемой клеточной пластинки. Растущая клеточная пластинка слоистая. Средний слой называется срединной пластинкой, по обе стороны от нее дочерние клетки начинают строить свою первичную оболочку, которая уже на первой стадии развития содержит включения фибрилл (волокон) целлюлозы. Вторичная оболочка возникает путем наложения новых слоев на первичную оболочку. Она составляет основную массу и придает клетке ее окончательную форму. Основное вещество оболочек – пластическая масса (лигнин, суберин), укрепленная фибриллами. Лигнин обладает

демпфирующими вязкими свойствами. Высокая прочность оболочки объясняется наличием в ней волокнистых структур (микрофибрилл), состоящих из целлюлозы. Технический аналог – армированная полиэтиленовая пленка. Отличия состоят в том, что в пленке армирование равномерное, а в ткани растений волокна располагаются по линиям максимума напряжений.

Для опорной ткани стеблей особое значение имеет процесс *одревеснения*, приводящий к накоплению в клеточной оболочке особого компонента – лигнина. Он как бы обволакивает волокна целлюлозы, образуя структуру напоминающую железобетон. Отметим интересное отличие древесной ткани от железобетона. При растяжении железобетон выдерживает относительное удлинение всего лишь 0,01% и поэтому механические свойства металла используются в малой степени. Сопrotивляемость деформациям композита лигнин-целлюлоза велика – он разрушается не ранее того, как разрываются тяжи арматуры – микрофибриллы. Процесс упрочнения оболочек клеток зависит от внешних нагрузок, испытываемых стеблем. Так, в ткани, находящейся в растянутом состоянии, лигнина откладывается меньше, чем в сжатом состоянии.

В стержневых конструкциях могут быть использованы следующие принципы построения тканей растений:

- Солидарность (согласованность) работы структурных компонентов на всех уровнях конструкционной системы, где связи между элементами, – исполнителями функции устойчивости биологической структуры, – обеспечивают высокую надежность всей системы.
- Армирование, которое осуществляется в слоях оболочек, где различная степень концентрации целлюлозных нитей способствует сочетанию пластичных свойств первичной и упругих свойств вторичной оболочки, создает природный композит. Общее армирование структуры всей несущей конструкции происходит путем заложения и дифференциации «арматуры» и «заполнения» в процессе роста и формирования тканей.
- «Сопrotивляемость по форме», обеспечивающая минимальную затрату «строительного материала».

4.2. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СТЕРЖНЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Вертикальные структуры широко используются в технике: в первую очередь в строительстве и архитектуре при возведении высотных зданий, линий электропередач, антенн, заводских труб, в машиностроении – при создании подъемно-транспортных машин, космической и авиационной техники, в судостроении.

В архитектуре строительные конструкции, в основу которых положены принципы построения вертикальных стеблей растений, называют «биотектонами». В плане бионических исследований научно обоснована гипотеза рационального развития высотных пространственных структур с использованием заимствованных у природы упруго-гибких вертикально развивающихся конструктивных форм, обладающих надежностью и способностью оптимально преодолевать динамические нагрузки.

4.2.1. Свойства вертикальных бионических структур

Стебли злаков представляют собой несущие пространственные многоярусные структуры, которые формируются по принципу вертикального зонирования – изменения функции и формы по вертикали. Они структурно членятся узлами на ряд междоузлий, имеющих веретенообразную форму. При анализе прочности вертикальных структур вводят так называемый коэффициент стройности K_c , который характеризует эффективность конструктивной формы по отношению к ветровым нагрузкам. Стебель ржи при среднем диаметре основания 3 мм может иметь высоту 1500 мм ($K_c = 500$). Он несет колос, масса которого в 1,5 раза больше массы самого стебля. Тростник имеет $K_c = 200$, такой результат достигается за счет особой микроструктуры, свойств материалов, формы стеблей, изменением структуры и формы стебля по высоте.

В нижней части ствол характеризуется не только большим диаметром, но и наличием большой массы затвердевших тканей, обеспечивающих несущую способность нижней части ствола при работе на сжатие с изгибом (рис. 4. 7 а). По такому же принципу сформировано основание Останкинской телебашни (рис. 4. 7 б). Другим техническим аналогом тако-

го биологического прототипа может служить основание сварной конструкции (рис. 4. 7 в).

При конструировании технических объектов, имеющих один из размеров, намного превышающих другие два, и испытывающих в работе статические и динамические нагрузки (например, лестницы, антенны, рессоры, опоры линий электропередач и т. д.), анализ пряморастущих растений может подсказать эффективное решение.

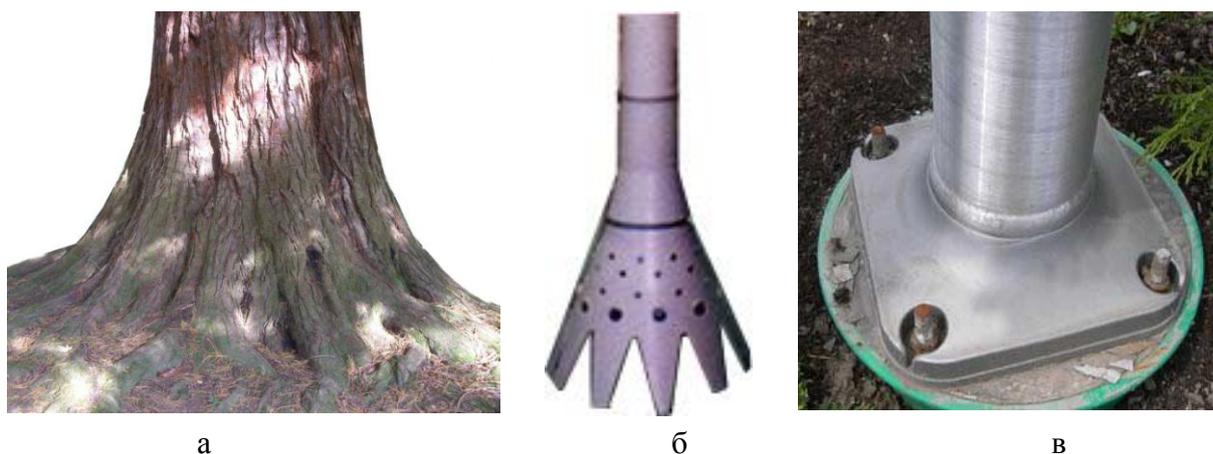


Рис. 4. 7. Нижняя часть: а – ствола лиственницы, б – Останкинской телебашни, в – сварной конструкции

Верхняя часть стволов деревьев более эластична. При действии ветровых нагрузок эластичная часть ствола прогибаясь, амортизирует энергию ветра. Установлено, что во время роста дерева наружные волокна под действием собственных внутренних напряжений растягиваются, а внутренние – сжимаются. Древесные волокна плохо работают на сжатие, а на растяжение лучше. При ветровой нагрузке ствол изгибается, с одной из сторон ствола волокна испытывают сжимающие напряжения, поэтому предварительно растянутые волокна будут при ветровой нагрузке испытывать меньшие сжимающие напряжения (рис. 4. 8). В мертвой древесине эти свойства сохраняются. По этой причине старые мастера делали мачты яхт из цельных стволов, а более поздние мастера мачт хорошо знали сопромат, но не знали указанные свойства дерева, поэтому они для облегчения мачт высверливали сердцевину, не сознавая, что это приведет к снижению прочности.

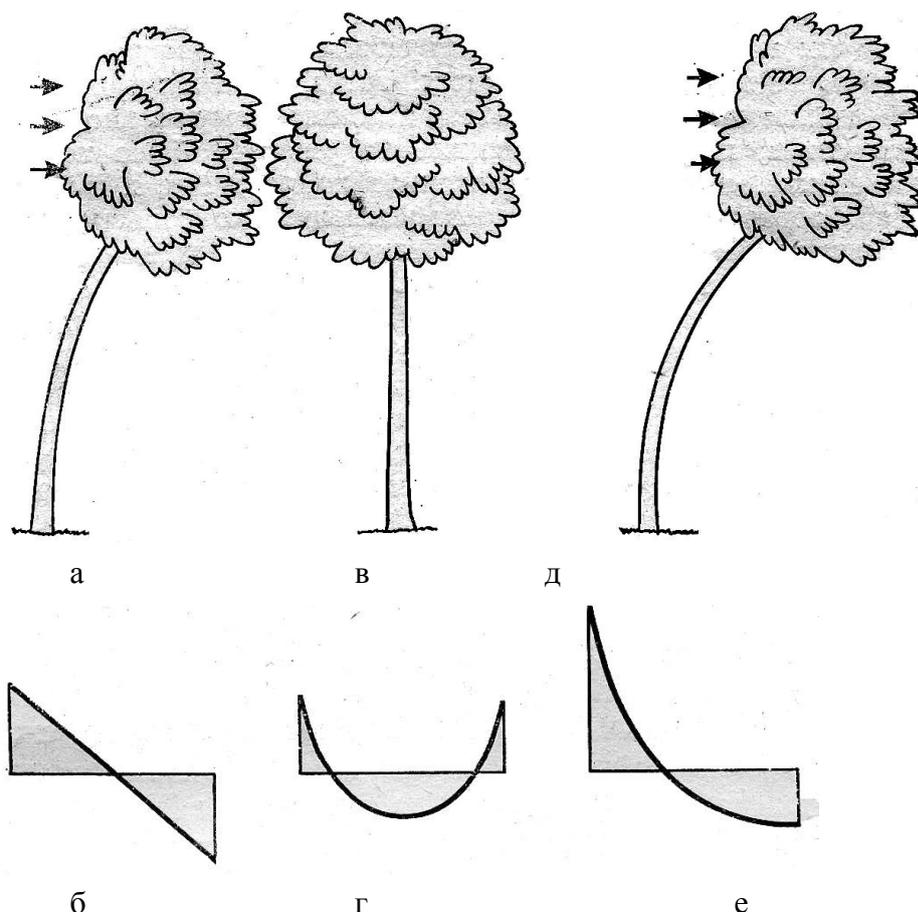


Рис. 4. 8. Деформация ствола дерева и эпюры распределения напряжений в поперечном сечении ствола дерева: а и б – изгиб ствола и напряжения под действием ветра без учета «собственных» внутренних напряжений в стволе; в и г – ствол дерева и «собственные» внутренние напряжения без внешней нагрузки, д и е – изгиб ствола и напряжения под действием ветра с учетом «собственных» внутренних напряжений в стволе

Упрощенную модель ствола дерева, в которой учитывается напряженное состояние ствола от внутренних «собственных» напряжений (рис. 4. 8 в, г), можно представить в виде упругих и демфирующих элементов (рис. 4. 9). Упругие коленичные волокна 1, прикрепленные к верхней части 2, испытывают растягивающие напряжения, а растущая упругая сердцевина 3 испытывает сжимающие напряжения. Склеренхимные волокна 4 являются своего рода демфирующими элементами.

Ствол прикрепляется к земле при помощи корневой системы, располагающейся в основном вблизи поверхности земли. Корни работают на растяжение, поэтому им не требуется высокая изгибная жесткость, следовательно, в корнях прочные ткани расположены внутри сечения, а снаружи

они окружены мягкими растущими эластичными тканями, которые всасывают воду и питательные вещества из почвы. Разветвленная система корней позволяет дереву закрепляться в большом объеме земли, скрепляя и армируя почву.

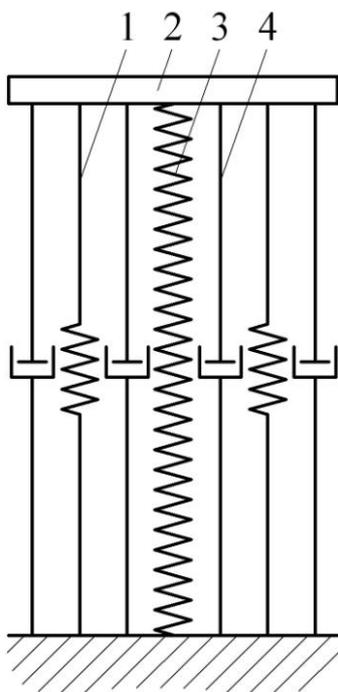


Рис. 4. 9. Упрощенная модель ствола дерева

Особое место в структуре стебля занимают узлы, где осуществляется упругое сочленение междуузлий, и которые способствуют ограничению колебаний междуузлий. Местоположение узлов на стебле соответствует центрам тяжести площадей на эпюре изгибающих моментов, число которых равно числу междуузлий (рис. 4. 10). Узлы стебля злака представляют собой демпфирующие устройства (рис. 4. 11), принципы построения которых могут быть использованы в транспортных машинах. Схема узла показана на рис. 4. 12. Узел-демпфер, состоящий из двух стержней 1 и 2, представляет собой сферический шарнир 3, в котором междуузлия соединены упругими волокнами 4 и окружены высокоорганизованной массой основной ткани с погруженными в нее вязкоупругими тяжами (амортизаторами) 5. Форма тяжей такова, что при изгибе стебля они претерпевают упругие изменения. Расположенные в узлах колленхимные тяжи за счет вязкоупругих деформаций способствуют уменьшению амплитуду колебаний, обес-

печивая амортизирующую способность нижней части каждого междуузлия и стебля в целом.

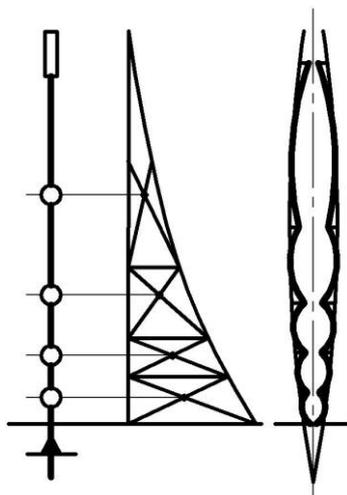


Рис. 4. 10. Конструктивная схема стебля злака, эпюра изгибающих моментов вдоль него и форма ствола злака

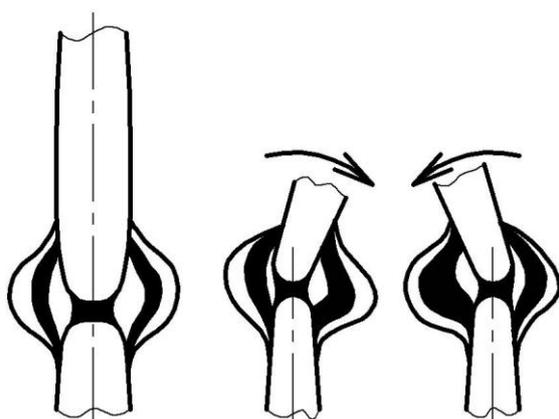


Рис. 4. 11. Поведение узла злака при ветровой нагрузке

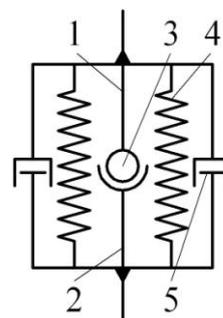


Рис. 4. 12. Схема узла стебля

В технике такое решение нашло применение в конструкции антенн военных переносных радиостанций средней мощности (рис. 4. 13). Антенна состоит из втулок, внутри которых пропущен тросик, закрепленный с одной стороны и подпружиненный с другой стороны. Все элементы конструкции находятся в напряженном состоянии: втулки сжаты, а тросик растянут. При динамических нагрузках такая антенна раскачивается, но довольно быстро после снятия внешних нагрузок устанавливается вертикально (за счет сил упругости), так как силы трения между втулками способствуют демпфированию колебаний.

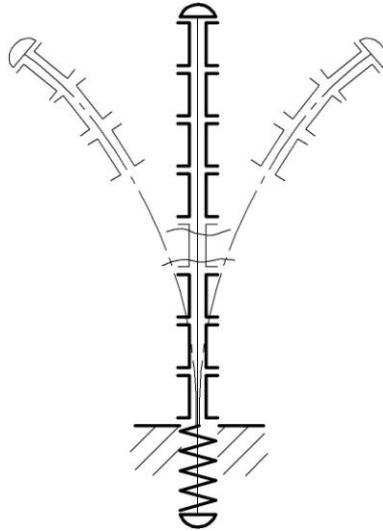


Рис. 4. 13. Конструктивная схема антенны переносной радиостанции

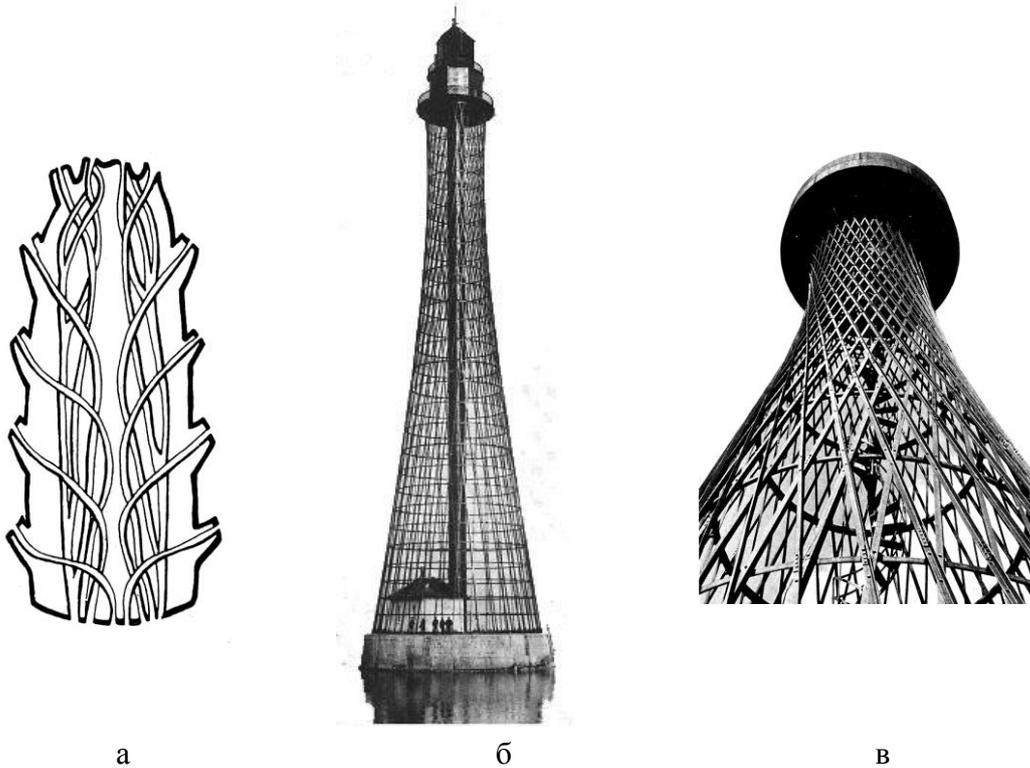


Рис. 4. 14. Каркасные конструкции: а – побег однодольного растения, б – маяк Шухова в Крыму (1911 г.), водонапорная башня Шухова (1912 г.)

Известный русский инженер В.Г. Шухов создавал в конце 19 – начале 20 веков ажурные металлические конструкции, напоминающие одновременно и стволы сосен и стебли трав. Он использовал линейчатые структуры для образования формы гиперboloида (рис. 4. 14).

Для многих растений, особенно для деревьев, характерны две взаимно противоположные тенденции при росте. С одной стороны, деревьям необходимо больше света, поэтому крона начинает расширяться вверх, увеличивая тем самым поверхность массы листьев (рис. 4. 15).

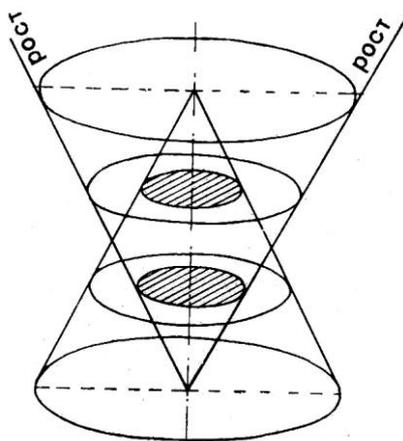


Рис. 4. 15. Конусы роста устойчивости дерева

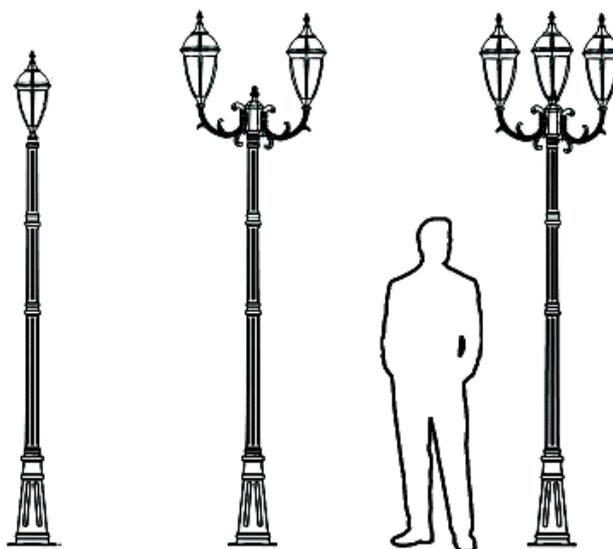


Рис. 4. 16. Уличные фонари

Такой принцип развития кроны носит название *конуса роста*. С другой стороны, по причине увеличения парусности кроны в верхней части дерева опрокидывающий момент, возникающий от действия ветра, возрастает. По этой причине необходимо увеличивать изгибную жесткость сечения в нижней части дерева, следовательно, ствол при росте дерева должен иметь конусообразную форму вершиной вверх. Этот принцип развития ствола называется *конусом устойчивости*. В дизайне эти два принципа также широко используются в вертикальных конструкциях. Например, уличные фонари (рис. 4. 16) построены по этим принципам.

4.2.2. Устойчивость пластинчато-стержневых систем

С развитием производства высокопрочных сталей, алюминиевых и магниевых сплавов, титана, полимерных материалов в машиностроительной практике получают широкое применение тонкостенные конструкции.

Поэтому расчет на устойчивость таких конструктивных систем часто является определяющим в общем процессе расчета на прочность, т.к. разрушение тонкостенных конструкций происходит в основном из-за *общей или местной потери устойчивости*. Особая опасность разрушения вследствие потери устойчивости заключается в том, что она происходит внезапно и при низких значениях механических напряжений сжатия, когда прочность элемента еще не исчерпана. Природа в процессе эволюции отобрала такие конструктивные схемы несущих систем вертикальных биологических объектов, которые обладает хорошей устойчивостью к вертикальным сжимающим нагрузкам.

Упругое равновесие устойчиво конструкции, если при малом отклонении от состояния равновесия она стремится к первоначальному положению. Неустойчивое упругое равновесие характеризуется тем, что конструкция при малом воздействии теряет равновесие и деформация растет лавинообразно. Между этими состояниями существует критическое, при нем тело находится в безразличном равновесии, т.е. тело может сохранить свою форму, а может потерять ее при малом воздействии. Расчет критических сил сжатия для стержней с различными видами закрепления ведется при помощи формулы Эйлера:

$$P_{крит} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{(\nu l)^2}, \quad (4.1)$$

где l – длина стержня, ν - коэффициент приведения длины, который зависит от вида закрепления концов стержня (коэффициенты $\nu=2, 1, 0,7, 0,5$ соответствуют схемам закрепления на рис.4. 17 а, б, в, г), J_{min} – минимальный момент инерции поперечного сечения.

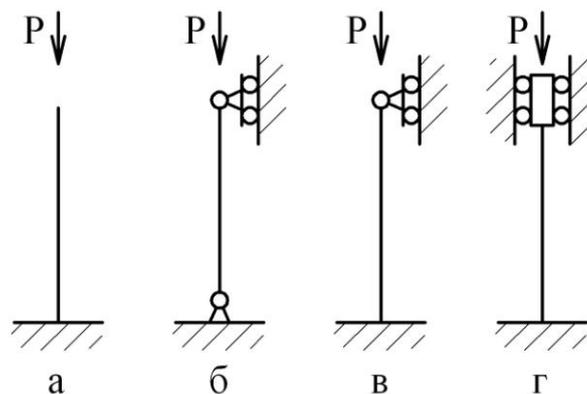


Рис. 4. 17. Расчетные схемы закрепления вертикальных стержней

Эйлер предполагал, что искривление первоначально ровного стержня происходит по синусоиде.

Обычно инженеры при проектировании пластинчатых и стержневых конструкций стремятся избежать потери устойчивости таким образом, чтобы состояние равновесия было однозначным, единственным и устойчивым. Этот принцип часто ведет к перерасходу материала. Поэтому следует обратить внимание на более эффективное решение этой проблемы в живой природе. В ней имеется множество примеров несущих систем со стержнями и пластинами. Причем одновременно с оптимальным распределением материала в конструкциях обеспечивается прочность и устойчивость их элементов. Заслуживает внимания строение скелета человека и в частности бедренной и берцовой костей человека.

Скелет, как основной элемент несущей системы человека, также можно отнести к вертикальным биологическим структурам (рис. 4. 18). Прямохождение человека, являющееся результатом длительной эволюции и естественного отбора, накладывает на несущую систему человека жесткие требования. Они основаны на основных принципах живой природы, рассмотренных выше.



Рис. 4. 18. Скелет человека



Рис. 4. 19. Позвоночник человека

Человеческий организм подвергается большим динамическим нагрузкам при ходьбе, беге и прыжках. Большие динамические нагрузки испытывает позвоночник (рис. 4. 19). В связи с тем, что центр тяжести человека находится по высоте примерно посередине, то для устойчивого положения тела при движении необходима сложная система ориентации и управления телом в пространстве, позволяющая двигаться, имея либо одну опору, либо две опоры, либо без опоры. Кроме того, необходимо учитывать, что движение человека должно быть экономичным. Изучая скелет человека, необходимо в первую очередь рассмотреть вертикальные нагрузки, действующие на человека.

На рис. 4. 20 и рис. 4. 21 показаны схемы закрепления этих костей в разных проекциях и эпюры действующих моментов [17]. Бедренная кость имеет закрепления шарнирные по концам с медиальной стороны, шарнирное на одном и жесткое на другом конце на виде спереди. Большеберцовая кость имеет жесткое крепление на обоих концах. С латеральной стороны большеберцовая кость вместе с малоберцовой также шарнирно закреплены с двух сторон.

Условия критического состояния устойчивости для этих видов закрепления разные, поэтому форма костей имеет не прямолинейную форму, а криволинейную, повторяющую форму критического положения равновесия. Почему в результате естественного отбора форма костей человека имеет такой вид? Вероятнее всего этот факт объясняется тем, что, во-первых, при вертикальных нагрузках на кость при данных формах костей в них возникают однозначно определенные этой формой костей механические напряжения. Во-вторых, искривленная кость при вертикальных нагрузках работает как рессора, запасая и рассеивая достаточно большое количество механической энергии, не передавая ударную нагрузку (при беге, прыжках и т.д.) на суставы. Если представить себе, что кости человека – прямолинейные стержни, то любая вертикальная нагрузка будет передаваться через суставы на верхние отделы скелета и на голову. Такая ситуация равносильна ударам молота по свае, которую вбивают в землю. То же самое можно сказать о позвоночнике человека. Он имеет ярко выраженную S-образную форму (рис. 4. 19). При ходьбе и прыжках ударные нагрузки демпфируются в межпозвоночных дисках.

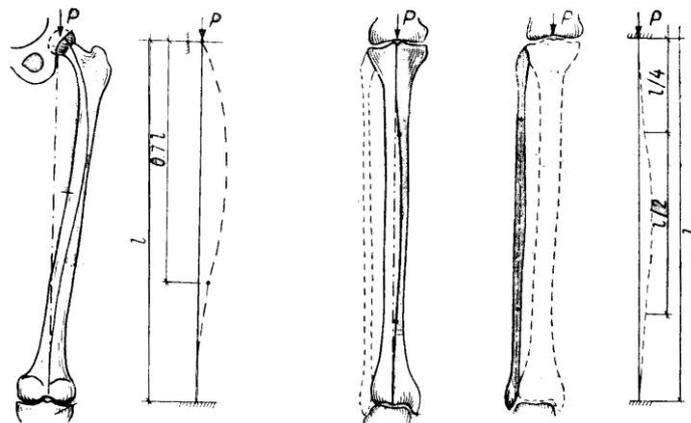


Рис. 4. 20. Закрепления бедренной и большой и малой берцовой костей (вид спереди) и соответствующие формы прогиба при вертикальной нагрузке P

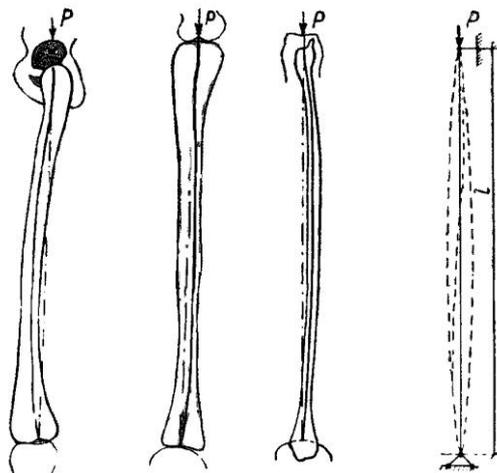


Рис. 4. 21. Закрепления бедренной и большой и малой берцовой костей (вид сбоку) и соответствующие формы прогиба при вертикальной нагрузке P

Таким образом, в человеческом скелете воплощается *принцип направленной формы потери устойчивости* за счет искривленности костей, повторяющей критические формы устойчивости. Чтобы заранее обеспечить единственно устойчивую форму равновесия при деформациях одного типа (вплоть до разрушения), в живой природе стержни заранее несколько искривлены. Такой прием позволяет избежать опасного перехода под нагрузкой от одной формы равновесия к другой, который обычно наблюдается в случае сжатия (изгиба) прямолинейных стержней или пластин. На-

пример, если поставить тонкую стальную линейку вертикально и надавить на нее сверху, то она может изогнуться как в одну сторону, так и в другую.

Рассмотрим распределение напряжений по поперечным сечениям вдоль оси биостержня. Устойчивые формы равновесия стержней с разным закреплением различны, природа учитывает этот факт при формировании поперечных сечений вдоль стержня (кости). Поперечные сечения костей формируются из условия равенства между собой двух критических сил в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Это условие эквивалентно условию равноустойчивости и может быть выражено равенством:

$$P_{крит1} = P_{крит2}.$$

Исходя из (4.1), получим при условии равенства модуля упругости E в разных направлениях

$$J_1 \nu_2^2 = J_2 \nu_1^2, \quad (4.2)$$

где ν_1 и ν_2 – коэффициенты приведения длины кости в соответствующих направлениях.

Крупные кости человека – малая и большая берцовые имеют треугольное поперечное сечение. Одна из гипотез, объясняющих такую форму, состоит в том, что закрепление их на обоих концах разное в двух плоскостях, поэтому $\nu_1 \neq \nu_2$. Следовательно, из (4.2) $J_1 \neq J_2$. Это соответствует в первую очередь треугольному и прямоугольному сечениям. Кроме того мышцы хорошо прилегают к плоским и вогнутым поверхностям кости, поэтому треугольное сечение кости эффективно как с точки зрения прочности, так и с точки зрения компактности системы кость – мышцы.

В связи с тем, что результирующий изгибающий момент имеет при движении человека различное направление вдоль оси кости, то для максимальной прочности необходимо, чтобы направление одной из главных осей сечения совпадало с направлением вектора результирующего изгибающего момента. Минимизация нормальных сжимающих напряжений в поперечных сечениях вдоль оси кости приводит к естественному закручиванию кости. Закручивание наблюдается также и в стеблях растений, что повышает устойчивость стеблей при вертикальных сжимающих нагрузках [17].

Кроме общей потери устойчивости вертикального стержня может произойти *локальная потеря устойчивости*. Этот эффект происходит в

тонкостенных трубах, когда в некоторых местах образуются выпучивания и вмятины (рис. 4. 22), когда сжимающие силы действуют по оси трубы. Для круглой трубы этот момент характеризуется механическим напряжением

$$\sigma_{лок} = E \frac{t}{4r},$$

где E – модуль упругости, t – толщина стенки, r – радиус трубы. Таким образом, если сжимающие напряжения

$$\sigma \geq \sigma_{лок},$$

где $\sigma = P/2\pi rt$, то произойдет локальная потеря устойчивости.

В технике для борьбы с потерей устойчивости применяют стрингеры – продольные ребра жесткости, а также шпангоуты – ребра жесткости в поперечном сечении трубы (в природе – это перегородки у бамбука или борщевика и рис. 4. 23).

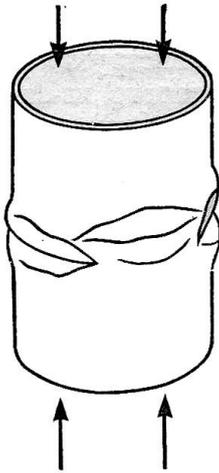


Рис. 4. 22. Эффект местной потери устойчивости тонкостенной трубы



Рис.4. 23. Участок ствола борщевика

В природе встречается богатое разнообразие форм поперечных сечений растений (рис. 4. 24), каждое из которых прошло эволюцию и естественный отбор.

В судостроении, авиационном и транспортном машиностроении для повышения жесткости тонкостенных изделий также широко используются стрингеры и шпангоуты (рис. 4. 25).

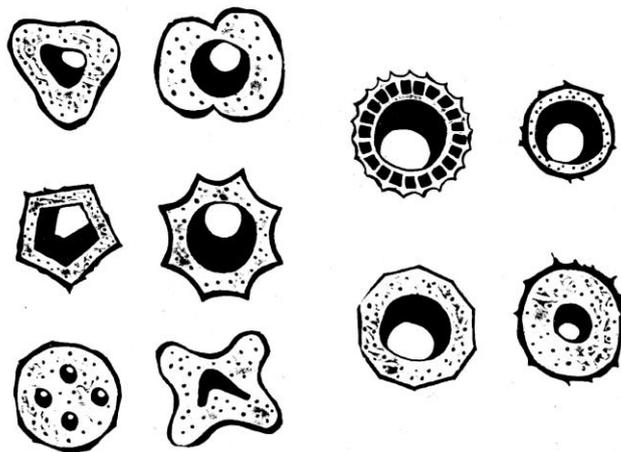


Рис. 4. 24. Поперечные сечения стволов различных растений

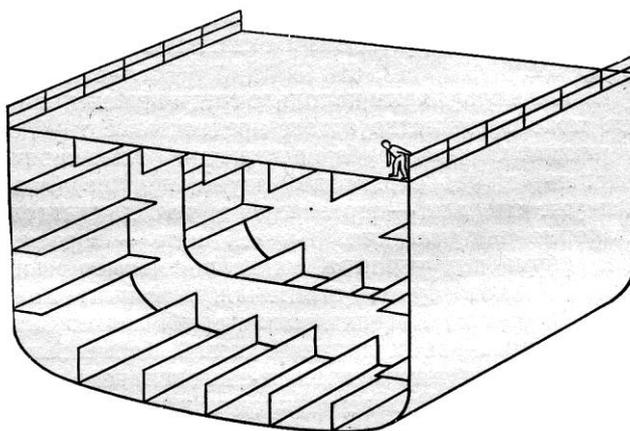


Рис. 4. 25. Отсек танкера со стрингерами и шпангоутами

Способом борьбы с потерей локальной устойчивости является увеличение изгибной жесткости пластин и стержней также за счет образования гофров (рис. 4. 26) по их длине или использования элементов, которые, пересекаясь между собой в процессе роста, образуют в плане спиралевидные системы (соцветие подсолнуха, лианы).

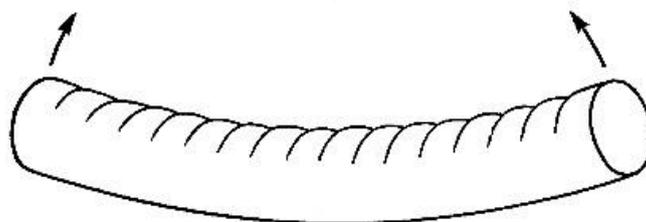


Рис. 4. 26. Складки на стволе дерева при постоянных нагрузках

Такие складки (гофры) возникают при действии постоянных нагрузок и в дальнейшем способствуют повышению жесткости сечения в целом. В технике гофры широко применяются для других целей – для увеличения изгибной гибкости при сохранении высокой жесткости на кручение (например, сильфонные муфты – рис. 4. 27, сильфонные температурные компенсаторы в трубопроводах).



Рис. 4. 27. Сильфонные муфты фирмы R+W®

Конструкция высотной фабричной трубы из железобетона по своему строению и конструктивным принципам почти точно повторяет стебель пухоноса (рис. 4. 28) из семейства осоковых. Их поперечные сечения показаны на рис. 4. 29. Подобие живых и искусственных конструкций не случайно. Эволюция технических и живых систем имеют много общего и определяются сходными факторами. Назначение трубы состоит в создании тяги, необходимой для процессов горения, и отведении вредных продуктов горения в верхние слои атмосферы. Этим обусловлены значительные вертикальные размеры трубы.

Стебель пухоноса играет важную роль проводника питания для всего растения в целом. Его большая высота обусловлена постоянной потребностью растения в энергии солнца при конкуренции соседних растений. Труба в период эксплуатации и пухонос в течение жизни находятся под действием однотипных статических и динамических нагрузок (свой вес, ветер, грунтовые воды).

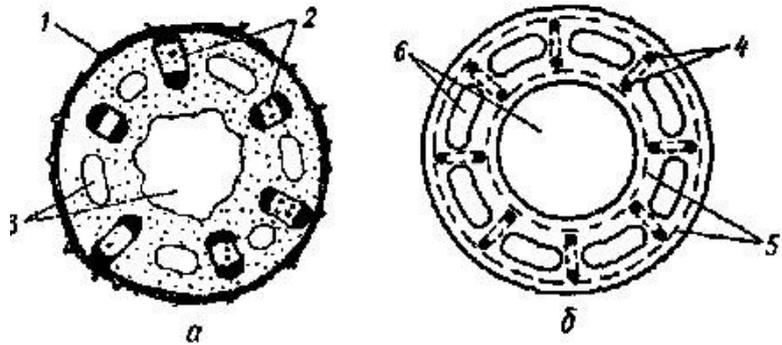
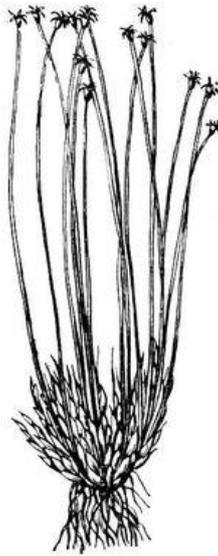


Рис. 4. 28. Пухонос дерни- стый

Рис. 4. 29. Поперечные разрезы трубчатых вертикальных структур: а – стебля пухоноса, б – железобетонной трубы; 1 – кожица, 2 – склеренхимные тяжи, 3 и б – полости, 4 – продольная арматура, 5 – кольцевая арматура

Склеренхимные тяжи растения располагаются также как продольная арматура трубы, кольцевая арматура несет ту же функцию, как и покровная ткань кожицы стебля. И в трубе и в стебле имеются продольные полости для облегчения. Однотипность внешних воздействий и необходимость вертикального строения обусловили их конструктивное сходство.

4.3. ВАНТОВЫЕ, МЕМБРАННЫЕ И ТЕНТОВЫЕ СИСТЕМЫ В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

Стержне-вантовые, вантовые, мембранные и тентовые системы – такие конструктивные системы, в которых есть элементы, имеющие высокую жесткость только на растяжение. Эти элементы называют вантами или тросами, канатами, мембранами и т.д. Такие системы часто встречаются как в живой природе, так и в технике.

4.3.1. Стержне-вантовые системы

Стержне-вантовые системы – это конструкции, состоящие из тонких стержней, на концах которых закреплены тонкие тросы (ванты). Эти конструкции обычно проектируют таким образом, чтобы стержни работали только на сжатие, а тросы – на растяжение. При действии груза W на ферму (рис. 4. 30), состоящую из тросов 1, 4, 5, 8 и шарнирно закрепленных стержней 2, 3, 6, 7, тросы испытывают напряжения растяжения, а стержни – напряжения сжатия. По сравнению с аналогичной конструкцией фермы, состоящей только из стержней, можно предположить, что вес стержне-вантовой конструкции примерно в два раза меньше, чем вес стержневой фермы при той же нагрузочной способности.

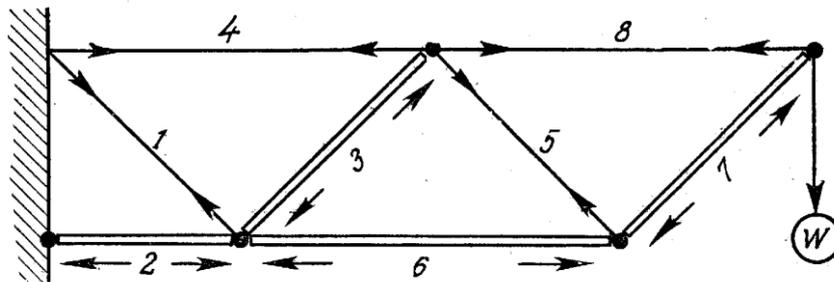


Рис. 4. 30. Стержне-вантовая конструкция

Принцип работы таких технических систем имеет много общего с работой опорно-двигательного аппарата человека и животных. В его состав входят кости скелета и прикрепленные к ним мышцы и сухожилия. Многие позвоночные животные имеют опорно-двигательный аппарат (рис. 4. 31 а), в котором мышцы, сухожилия и кости имеют сложную систему с диагональными растяжками подобными конструкции на рис. 4. 30. Например, на рис. 4. 31 б показан мышечный пояс передних конечностей, в котором сухожилья, мышцы, лопатки и позвоночник образуют подобные фигуры.

Без нагрузки мышца–разгибатель 1 и мышца–сгибатель 2 руки человека находятся в расслабленном состоянии (рис. 4. 32). Но стоит человеку взять в руку груз F и зафиксировать его в каком-либо положении, мышцы-ванты напрягаются и натягиваются. В результате этого конструктивная система кости-мышцы становится жесткой, такая система является само-

напрягающейся. Шарнирно закрепленное в точке O предплечье удерживается в горизонтальном положении при помощи мышцы-сгибателя, прикрепленной к нему в точке A . Сила N , с которой мышца-сгибатель тянет предплечье, примерно в 10 раз больше внешней силы F , так как $b/a \approx 10$.

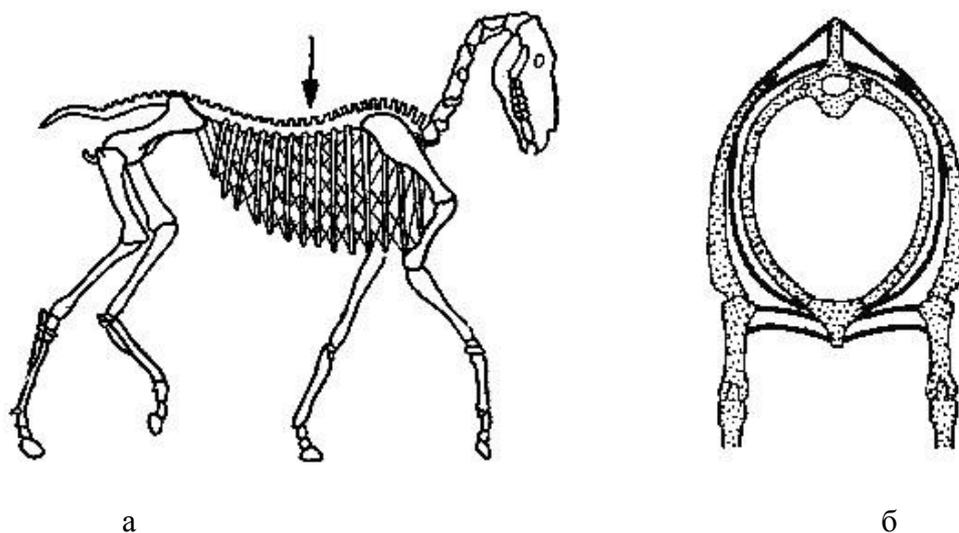


Рис. 4. 31. Опорно-двигательный аппарат лошади: а – скелет, б – мышечный пояс передних конечностей

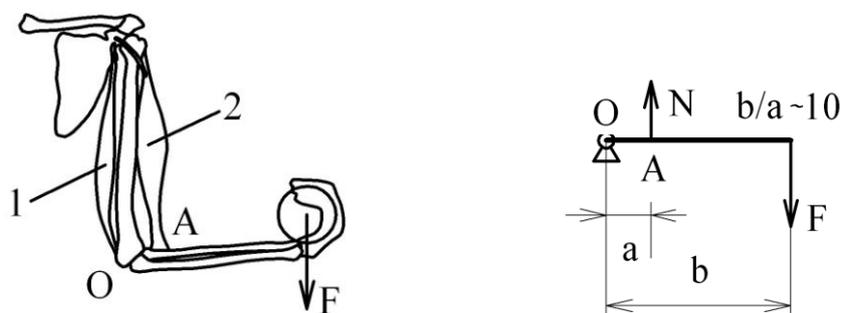


Рис. 4. 32. Несущая система руки «мышцы – плечо, предплечье» под действием нагрузки схема ее нагружения

Представляет значительный интерес стержне-вантовая структура дыхательного аппарата человека. Основу грудной клетки составляют позвоночник, ребра и грудина – длинная плоская кость, соединяющая передние концы ребер при помощи хрящей (рис. 4. 33).



Рис. 4. 33. Грудная клетка человека

Для осуществления дыхания объем пространства внутри ребер должен меняться в процессе вдоха и выдоха. Грудная клетка вместе с мышцами образуют пространственную стержне-вантовую систему (рис.4. 34 а, б).

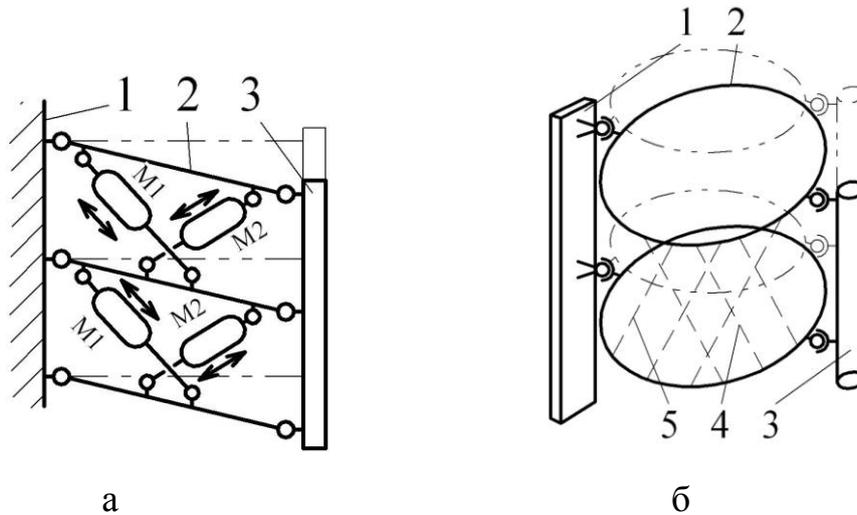


Рис. 4. 34. Схемы работы легких: а – кинематика дыхательного аппарата, б – пространственная схема расположения элементов грудной клетки

Для изменения объема внутри ребер в плоском варианте кинематику работы грудной клетки можно представить следующим образом: на основании 1 (позвоночник) шарнирно установлен параллелограмм, состоящий из наклонных рычагов 2 и подвижной платформы 3 (грудина). По диагонали в противоположных направлениях установлены приводы линейных пе-

ремещений M1 и M2 (внешние и внутренние межреберные мышцы). Таким образом, движения ребер осуществляют диагонально расположенные внешние 4 и внутренние 5 межреберные мышцы (рис. 4. 34 б).

Стержневые системы с диагональными растяжками начали применять в 19 веке при строительстве железнодорожных мостов. Наиболее легкая конструкция получила название фермы Финка (рис. 4.35). При действии сил P уменьшению прогиба моста способствуют вертикальные ребра, концы которых по диагонали связаны с пролетом моста при помощи предварительно натянутых тросов.

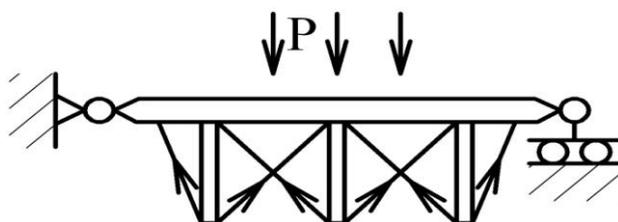


Рис. 4. 35. Конструктивная схема фермы Финка

Удачными конструкциями являются разнообразные фермы с растяжками, разработанные В.Г. Шуховым. Он применил самонапрягающиеся схемы, которые повышают жесткость конструкции в целом, используя вес элементов самой конструкции (рис. 4. 36). Ферма, состоящая из двух шарнирно установленных стержней 1 и 2, по концам связана тросом 3. Реакции T от сил натяжения, возникающих при нагрузке P , не позволяют конструкции развалиться.

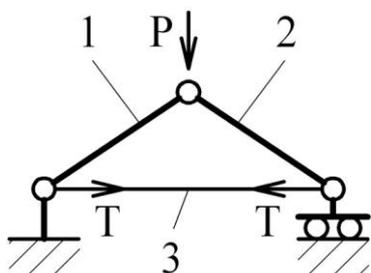


Рис. 4. 36. Самонапрягающаяся стержне-вантовая система

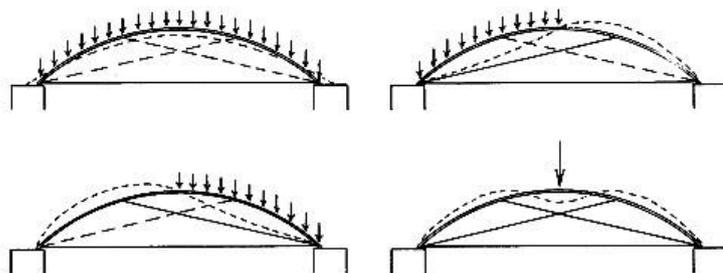


Рис. 4. 37. Формы деформаций крыши при различных видах нагружения

Используя криволинейные стержни, соединенные тросами не только по концам, но и внутри пролета, Шухов создал ряд легких конструкций

каркасов крыш, которые выдерживали значительные нагрузки, например от скопившегося снега и льда (рис. 4. 37). Особенно впечатляют ажурные своды с растяжками в ГУМе в Москве (рис. 4. 38).

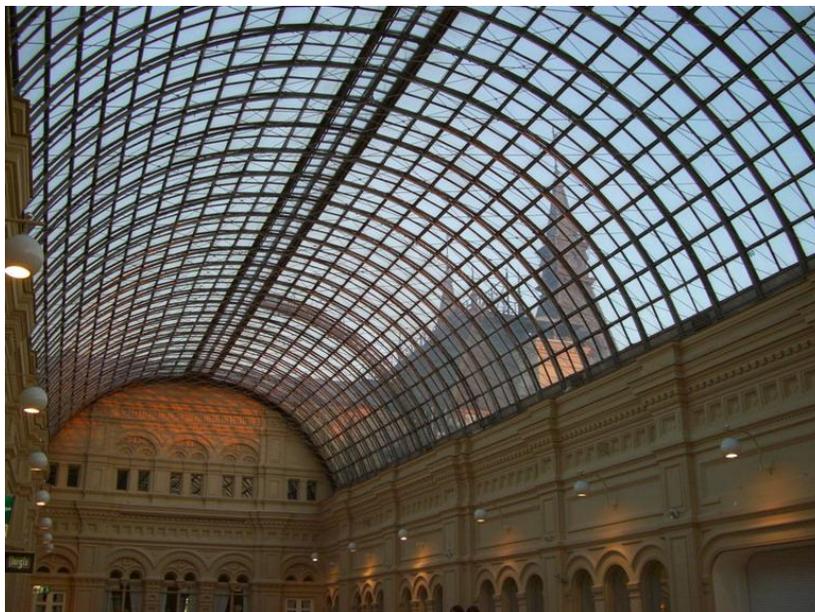


Рис. 4. 38. Купол ГУМа в Москве

Стержне-вантовые конструкции также можно выполнить самонапрягающимися, если за счет привода натягивать ванты или увеличивать длину стержней. В технике такие системы встречаются очень часто. Стержне-вантовая конструкция спортивного снаряда гимнастической перекладины (рис. 4. 39) состоит из самой перекладины 1 шарнирно установленных стоек 2, тросовых и стержневых оттяжек 3 и 5 (с каждой стороны перекладины расположены по три оттяжки). Натяжение всей системы осуществляется при помощи талрепа 4. Простейшее устройство натяжения вантов – талреп, который представляет собой две соосно расположенные и зафиксированные между собой гайки с левой и правой резьбой, в которых ввинчены стержни с резьбой. Эти стержни присоединены к концам вант. При вращении гаек талрепа с левой и правой резьбами стержни будут сближаться, натягивая тем самым ванты.

В качестве примеров стержне-вантовых систем может служить башенный подъемный кран, у которого стрела фиксируется в горизонталь-

ном положении за счет натяжения тросов. Мачты на парусных судах также являются типичными стержне-вантовыми системами.

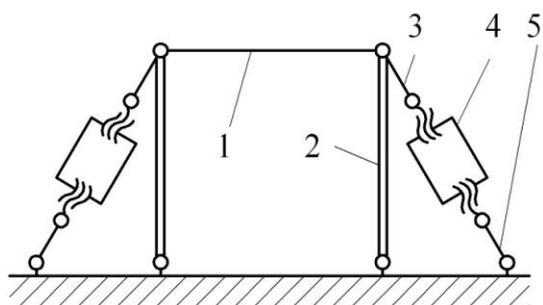


Рис. 4. 39. Схема спортивного снаряда перекладины

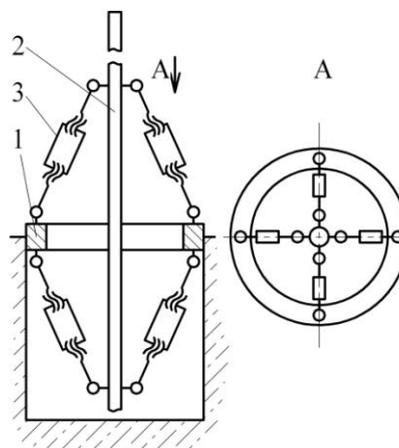


Рис. 4. 40. Конструктивная схема устройства закрепления столба при помощи стержне-вантовой системы

Известно техническое решение фундамента (рис. 4. 40) вертикальной конструкции, основанное на бионическом принципе. Фундамент представляет собой горизонтальную плиту, которая может быть выполнена в виде кольца 1. В центре кольца находится удерживаемая им колонна 2. От колонны радиально под наклоном расходятся ванты (тросы), которые прикрепляются к плите. Нижние ванты являются несущими, так как они воспринимают вес колонны, и работают они на растяжение. Верхние ванты являются стабилизирующими. Ванты предварительно натянуты при помощи талрепов 3 и препятствуют колебаниям колонны при ветровой нагрузке. Таким образом, плита совместно с системой вант представляет собой двухпоясную вантовую ферму, которая не создает момента в заделке.

На ранних стадиях развития авиации у самолетов типа бипланов верхние и нижние крылья фиксировались между собой при помощи натянутых тонких тросиков и стоек (рис. 4. 40).

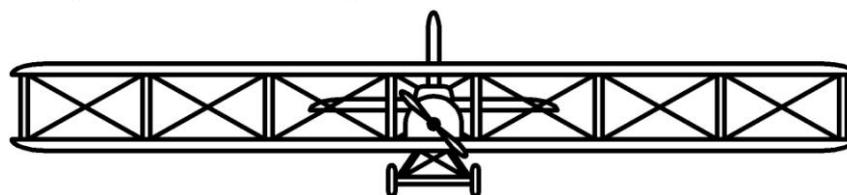


Рис. 4. 40. Стержне-вантовая система для фиксации крыльев биплана

Стержне-вантовые системы в два раза легче стержневых систем. Такие системы удобны при транспортировании в сложенном положении, монтаж и подгонка размеров проще, чем для стержневых систем. Они хорошо зарекомендовали себя в случае стационарных нагрузок. При динамических нагрузках, превышающих расчетные значения, возникает опасность того, что тросы в какой-то момент могут провиснуть, а в следующий момент резко натянуться (эффект щелкающего хлыста).

Недостаток таких систем состоит в том, что при обрыве ванта может произойти резкий скачок напряжений, который приведет к цепной реакции последующих обрывов.

4.3.2. Вантовые системы

Вантовые системы, это несущие конструктивные системы, в которых ванты крепятся друг к другу, а вся эта система гибких натянутых нитей фиксируется к на какой-либо раме или шарнирно скрепленных между собой стержнях. Самые яркие примеры таких систем – это паутина, натянутая между стволами растений, а также переплетение лиан в тропическом лесу. Принцип построения пространственной вантовой системы паука довольно прост и последователен. Конструкция работает за счет оттяжек. Паук прикрепляет к одной нити другую лишь в том месте, где собирается изменить форму паутины, формируя в этом месте излом. Чем интенсивнее изменяется форма паутины, тем больше оттяжек в этой зоне. Паутины могут быть не только плоские, но и объемные за счет оттяжек в разных плоскостях (рис. 4. 41).

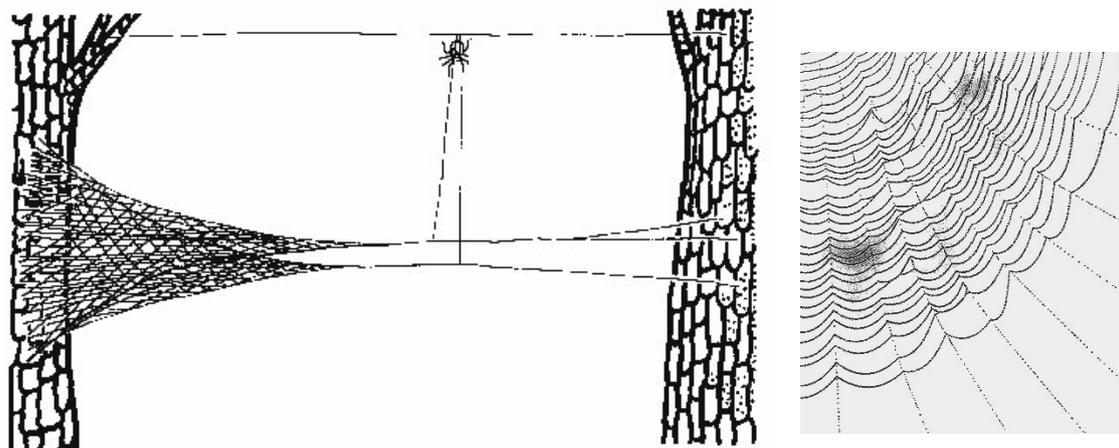


Рис.4. 41. Крепление паутины и ее структура

Одними из наиболее ранних применений вантовых систем, аналогичных функционально паутине, можно назвать рыбацкие сети. Сети получили широкое распространение не только как рыболовные снасти. Сети используют в качестве загоронок, заборов из металлической сетки «рабнца». Сетки широко используют в спорте: волейбольные, теннисные и т.д. После появления металлов появились цепи, которые выполняют до сих пор функции канатов. В дальнейшем, соединяя звенья цепи в двух перпендикулярных направлениях, создали кольчуги, используемые в качестве доспехов (рис. 4. 42). Их также можно отнести к вантовым систем.



Рис. 4. 42. Кольчуга как вантовая система: а – боевые доспехи, б – современное дизайнерское решение одежды

Зоолог Эрнест Кульман исследовал механические свойства паутины. В технике оценивается такой параметр волокон как *длина разрыва*. Это длина вертикально подвешенной нити, которая разрывается под действием собственного веса. Паутина имеет длину разрыва – 70 км, нить кокона – 20 км, х/б волокно – до 50 км, вискоза – 40-70 км, полиэфирное волокно – 70-95 км, стекловолокно – 70-120 км.

Ванты в технике могут быть выполнены из различных материалов, хорошо сопротивляющихся разрыву. В подъемно-транспортных машинах широко распространены стальные тросы, сплетенные в косички из тонких 0,5...3 мм проволок. В судостроении до сих пор применяют канаты из на-

турального волокна – пеньки и сезаля, так как они мало подвержены действию соленой воды (рис. 4. 43). Полимерные (капроновые, полипропиленовые) канаты при высоких эксплуатационных свойствах имеют ограниченный срок службы, так как со временем их прочностные свойства заметно ухудшаются. Примером служит синтетический материал кевлар, который по прочности не уступает стали, а плотность его близка к плотности воды. Однако через 5 – 10 лет службы предел его прочности падает на порядок.



Рис. 4. 43. Пеньковый морской канат диаметром 300 мм

Лианы в лесу – это канаты, которые не просто свисают, а находятся в напряженном состоянии, связывая одно дерево с другим. Пересекаясь друг с другом в разных направлениях они образуют седлообразные поверхности, позволяющие накапливать влагу и улавливать свет. Интересен способ, используемый растением для перекидывания своих стволов от одного дерева к другому. Лианы, обвивая ствол дерева, ползут вверх по стволу, затем верхняя часть лианы отваливается от ствола (рис. 4. 44). Раскачиваясь под действием ветра, лиана цепляется за рядом стоящий ствол другого дерева. Длина одного ствола лианы без ответвлений может достигать 300 м. Аналогичен способ существования для растений семейства тыквенных, плюща, винограда. Для увеличения амплитуды раскачивания свисающих отростков они часто имеют форму винтовых пружин, которые в резонансе имеют большой размах колебаний. С другой стороны, пружинящие системы обеспечивают перераспределение механических напряжений по всему растению. Усики растения огурца также имеют такие свойства. Интересно, что если усик не может зацепиться за какую-либо опору, он отмирает, так как не несет никаких функций. В дизайне широко используются мотивы, навеянные лианами. Интересен дизайн полотенцесушителя (рис. 4. 45). В женской одежде плетения также часто используются. Например, кружева,

дамские ажурные сумочки, туфли, чулки, облегающие ноги благодаря упругости и большому удлинению нитей (рис. 4. 46).



Рис. 4. 44. Лианы



Рис. 4. 45. Полотенцесушитель «лиана»



Рис. 4. 46. Плетения в дамском гардеробе

К вантовым системам можно отнести корни деревьев. Они работают на растяжение, поэтому им не требуется высокая изгибная жесткость, следовательно, в корнях прочные ткани расположены внутри сечения, а снаружи они окружены мягкими растущими эластичными тканями, которые всасывают воду и питательные вещества из почвы. Разветвленная система

корней позволяет дереву закрепляться в большом объеме земли, скрепляя и армируя почву.

Технические вантовые системы обладают еще более высокими соотношениями между механическими характеристиками и собственным весом, чем стержне-вантовые системы. Наиболее интересным использованием вантовых систем можно считать конструкции устройств натяжения линий высоковольтных электропередач (рис. 4. 47), разнообразных канатных дорог, висячих мостов (рис. 4. 48), имеющих горизонтально провисающие тросы, к которым прикреплены вертикальные тросы. Нижние концы этих тросов заделаны в легкое полотно дороги моста. В быту такие системы мы можем обнаружить в конструкции гамака (рис.4. 49), на сидениях и кроватях в виде натянутых сеток, различные сита. В спорте – это волейбольная или теннисная сетка, ракетка.

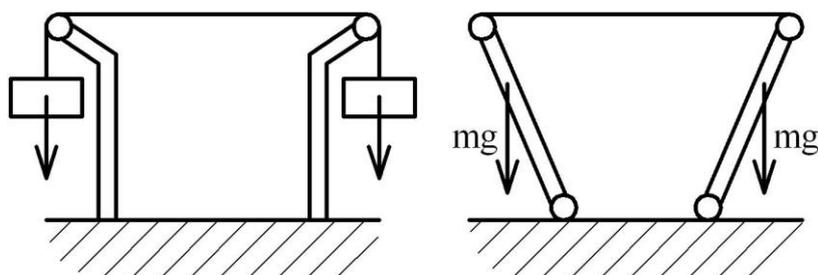


Рис. 4. 47. Схема натяжения вант при помощи грузов и за счет веса опор

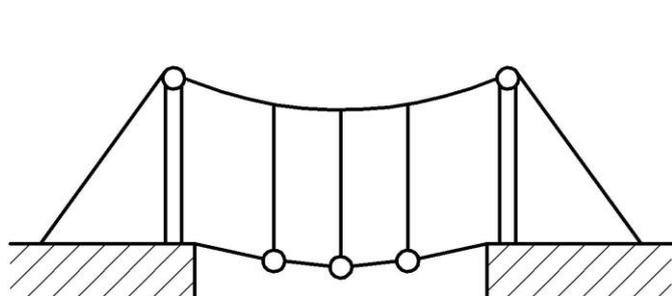


Рис. 4. 48. Вантовый мост

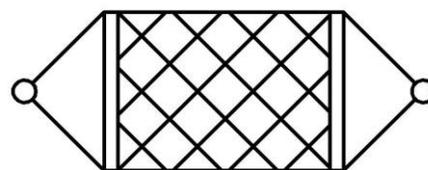
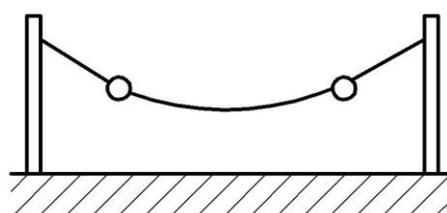


Рис. 4. 49. Гамак

Часто в технике стержне-вантовые и вантовые системы работают совместно, поэтому данная классификация довольно условна. Например, один из самых протяженных в Европе мостов (рис. 4. 50) можно отнести к любой из этих систем.

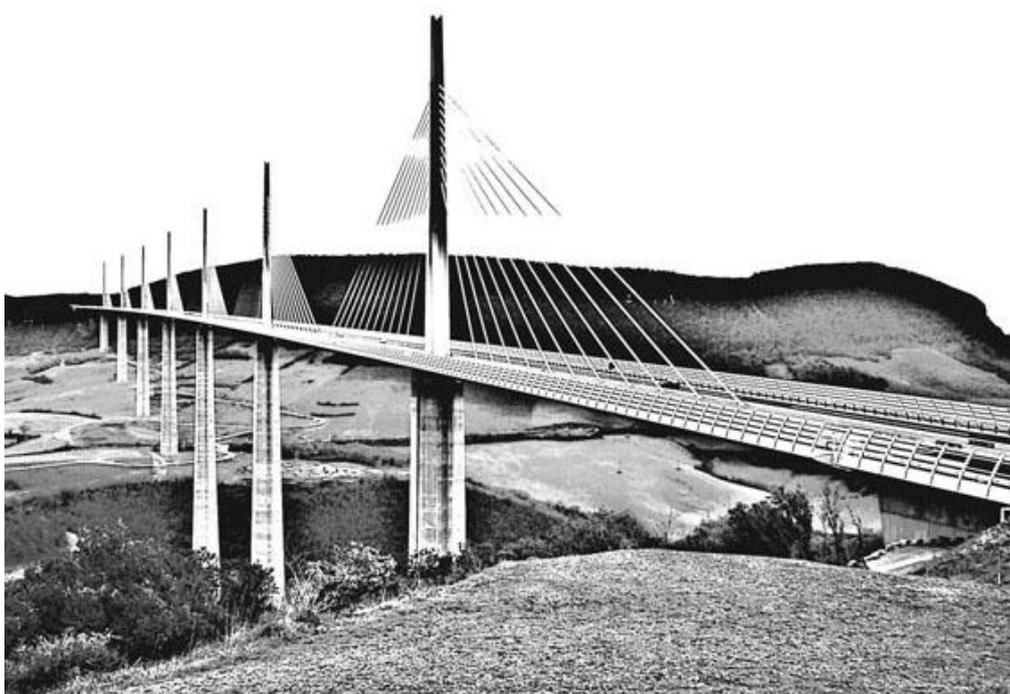


Рис. 4. 50. Вантовый мост вблизи Миллау во Франции

При значительном уменьшении веса по сравнению со стержневыми и стержне-вантовыми системами вантовые конструкции находят ограниченное применение из-за малой жесткости конструкции в целом. В них могут возникать колебания с большими амплитудами на низких частотах, что может привести к разрушению опор и пролетов конструкции.

4.3.3. Мембранные и тентовые системы

К мембранным и тентовым системам относятся системы, в которых в качестве гибких элементов, работающих только на растяжение, выступают пленки. Пленки – герметичные нежесткие тонкие материалы. Отличие мембранных систем от тентовых незначительно. Первые имеют распределенные усилия натяжения по всему периметру мембраны, а тентовые системы имеют сосредоточенные оттяжки, которые создают скачкообразное изменение формы поверхности в этих зонах.

На клеточном уровне мембраны являются основным элементом, отделяющим одну клетку в организме от другой, кроме того, клеточные

мембраны несут множество функций, связанных с обменом веществ и терморегуляцией.

В живой природе мембраны можно встретить в перепонках крыльев летучих мышей, лапок водоплавающих птиц, плавников рыб, крыльев стрекоз (рис. 4. 51). Диафрагму, отделяющую внутренние органы в теле человека, также ушную барабанную перепонку можно отнести к мембранам. Аналогии таких систем в технике – это паруса.

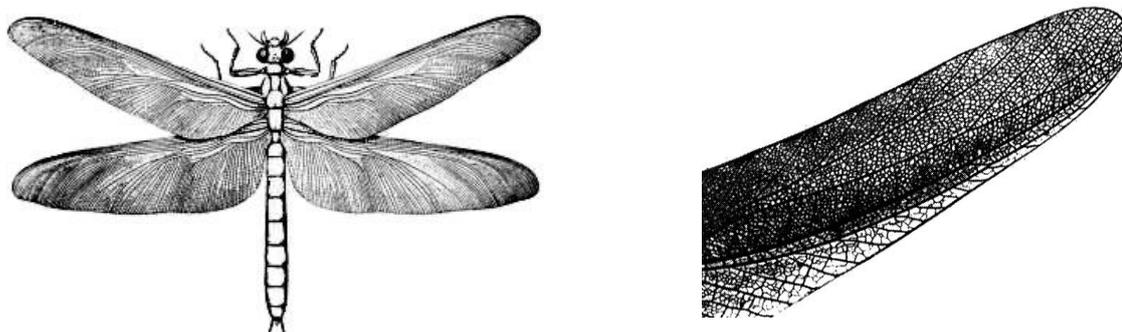


Рис. 4. 51. Стрекоза и ее крылья – мембранные системы

В Индии плодоядные летучие мыши, размах крыльев которых достигает полутора метров, могут пролететь до 60 км. Поэтому летательный аппарат у них весьма эффективен. Очевидно, в процессе эволюции для уменьшения веса произошло уменьшение толщины костей, на которые натянуты крылья (рис. 4. 52).

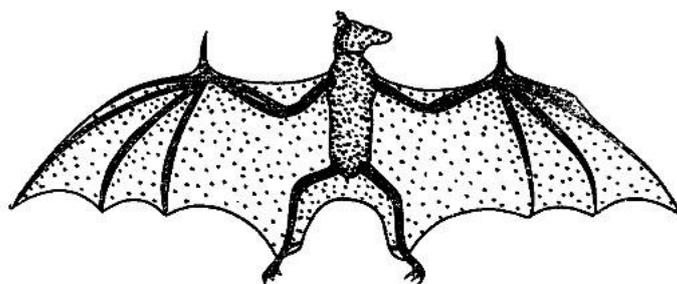


Рис. 4. 52. Плотоядная летучая мышь

Современные паруса являются тентовыми системами, которые довольно сильно натянуты на реях. Такие конструкции используют благодаря высокой прочности современных тканей. В традиционных парусах китайских джонок реи, пересекающие паруса, прикреплены к мачтам, причем они могут свободно скользить вдоль мачты (рис. 4. 53). При усилении ветра паруса выгибаются сильнее, реи поднимаются вверх, радиус кривизны

уменьшается, уменьшая тем самым силы натяжения в парусах. Поэтому не требуются особо прочные ткани. Можно отметить большое сходство китайской джонки и летучей мыши.

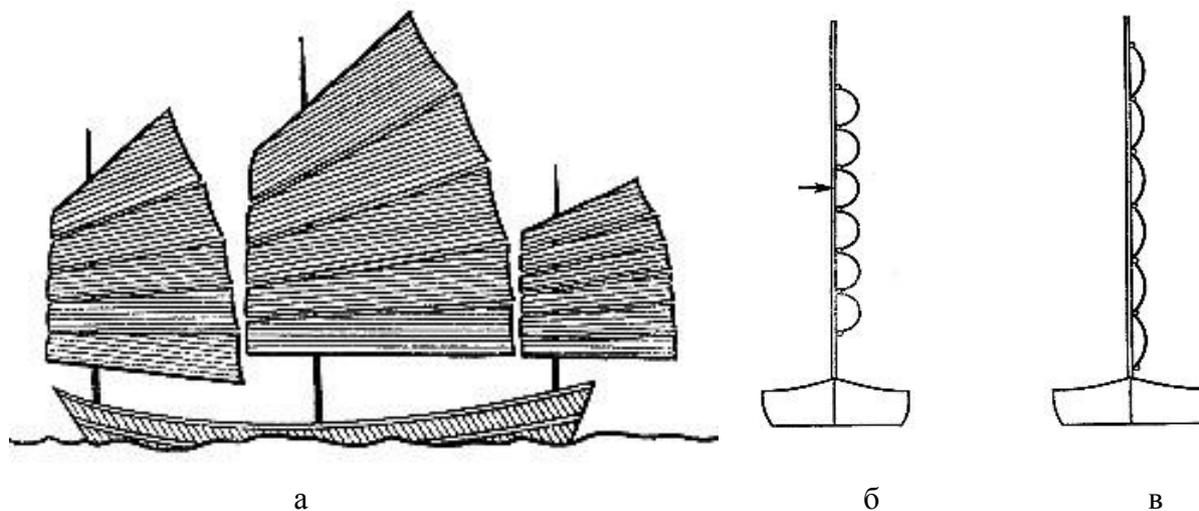


Рис. 4. 53. Китайская джонка:
а – оснастка, б – паруса под действием ветра, в – паруса в безветрие

В быту и в технике также много примеров использования этих конструктивных систем. Палатки и шатры являются древними сооружениями человека. Благодаря развитию текстильной индустрии в 19 веке палаточное строительство было опять возрождено к жизни. Крепление полотна к жестким рамам или оттяжкам осуществляется при помощи так называемых глазных петель. На краю полотна с определенным шагом делаются утолщения, в середине которых формируют кольцо. В это кольцо пропускается канат, который другим концом крепится к раме через натяжное устройство (рис. 4. 54).

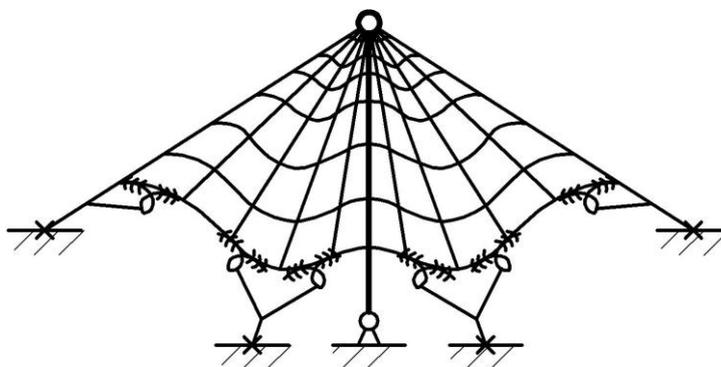


Рис. 4. 54. Крепление шатра оттяжками при помощи глазных петель

Натяжное устройство обычно выполняется в виде системы блоков или талрепов. Для уменьшения динамических нагрузок оно снабжается часто пружинами. Спортивный снаряд – батут является типичным примером мембранной системы (рис. 4. 55).



Рис. 4. 55. Батут

Парус на судне, ударный музыкальный инструмент – барабан также является мембранной системой. Тентовые конструкции широко используются в строительстве. Впечатляет своими размерами олимпийский стадион в Мюнхене (рис. 4. 56), в котором огромные тенты, подвешенные на десяти оттяжках, образуют навес над трибуной стадиона. В садоводстве большое распространение получили парники с полиэтиленовыми пленками, натянутыми на жесткие каркасы.



Рис. 4. 56. Олимпийский стадион в Мюнхене

Интересным примером тентовой системы может служить конструкция складного зонта, который в рабочем состоянии представляет собой довольно жесткую конструкцию, а в сложенном – нежесткую (рис. 4. 57). Для распрямления полотна зонта приводятся в действие шарнирные стержневые механизмы. Звенья, к которым крепится полотно зонта, выполнено из упругого материала с целью создания сил натяжения. На этом же принципе работает гигантская зеркальная система, запущенная на орбиту Земли нашими космонавтами. Параболические антенны в космосе также представляют собой мембранные системы.

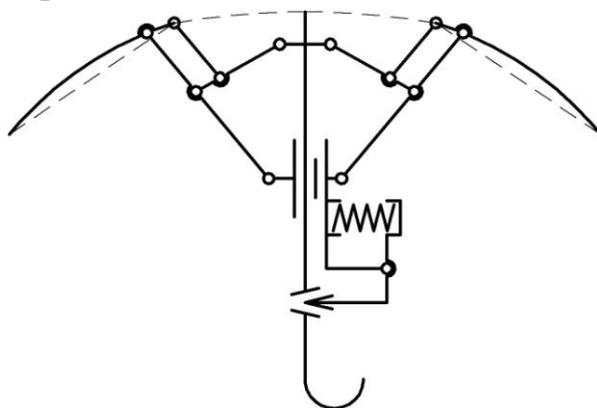


Рис. 4. 57. Зонт в рабочем состоянии

Для дизайн-проектирования важно учитывать, что при всей привлекательности мембранных и тентовых систем они могут хорошо сопротивляться только относительно малым динамическим нагрузкам.

4.3.4. Арки и скорлупы в живой природе и технике

Арочные конструкции вообще редко используются в живой природе по причине больших затрат материала их конструктивных схем, так как они характеризуются массивными куполообразными сводами из костных и ороговевших тканей. Однако строение костной системы стопы человека (рис. 4. 58) напоминает арочную конструкцию (таранная кость, пяточная кость, ладьевидная кость, клиновидные кости, кубовидная кость, плюсны). Действие вертикальной нагрузки G воспринимается таранной костью, далее передается через реакции N на пяточную, ладьевую и кубовидную кости. Связки, фиксирующие кости стопы, препятствуют расхождению костей

стопы, создавая силы натяжения S . Эта система костей служит для демпфирования ударных нагрузок и для сохранения устойчивого положения вертикально расположенной несущей системы человека.

К арочным системам можно отнести своды черепов горных баранов и других травоядных, имеющих массивные рога (рис. 4. 59), а также птиц-носорогов (рис. 4. 60).

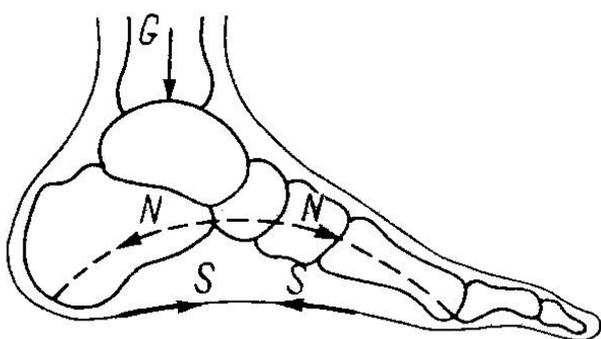


Рис. 4. 58. Арочное строение стопы человека



Рис. 4. 59. Череп горного барана



Рис. 4. 60. Голова птицы-носорога

Арки и скорлупы состоят из прочных элементов, ограниченных криволинейными поверхностями. Скорлупы отличаются тем, что их толщина мала по сравнению с другими размерами, и они представляют собой как бы изогнутые в двух направлениях пластинки.

Назначение арочной конструкции состоит в том, чтобы выдерживать нагрузки со стороны массивных блоков, расположенных над аркой.

В строительстве арка в основном состоит из клинчатых камней. Они работают в основном на сжатие (рис. 4. 61). Центральный верхний клинчатый камень называют замковым камнем, хотя его роль не отличается от остальных, однако его устанавливают последним.

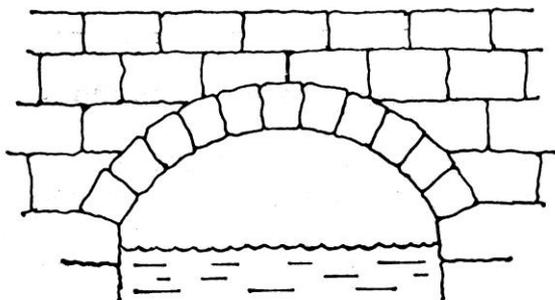


Рис. 4. 61. Арочный мост

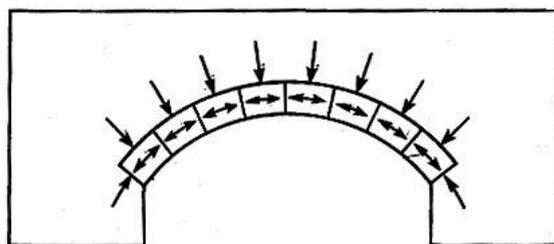


Рис. 4. 62. Нагрузка на арочный мост

Клинчатые камни не могут проскальзывать друг относительно друга, так как угол скоса клинчатого камня меньше угла трения. Нагрузка со стороны верхней части арочной конструкции создает в клинчатых камнях напряжения сжатия (рис. 4. 62) точно также, как вес человека вызывает сжимающие напряжения в костях стопы человека (рис. 4. 58).

В принципе арочный мост сохраняет прочность, если в нем есть не более трех шарниров (роль шарниров могут играть трещины в каменной кладке моста), это свойство определяет высокую прочность и устойчивость в общем смысле этого слова. Эти три шарнира в мостах воспринимают деформации теплового расширения (рис. 4. 63). Арки хорошо выдерживают землетрясения и вибрации транспорта, поэтому сохранилось большое количество строений в виде арок, построенных в древние времена

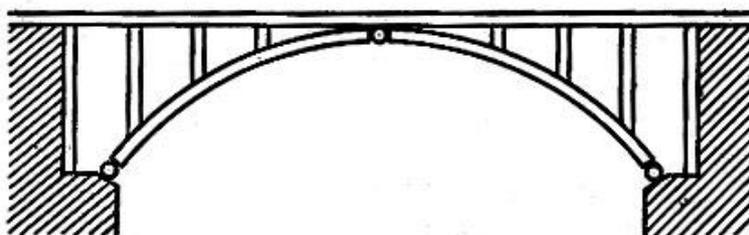


Рис. 4.. 63. Арочный мост с тремя шарнирами

Однако самое опасное то, что опоры могут разбегаться, поэтому арочные мосты не строят в мягком грунте. По этой причине часто мосты

строились многоарочными, что создавало проблемы судоходству (рис. 4. 64).



Рис. 4. 64. Замок, построенный на арочном мосту через реку Луару во Франции

Простые арочные мосты в форме полукруга известны со времен древнего Рима, причем обычно высота арки не более половины длины пролета. Это просто, если мост перекидывают через расщелину, но если



Рис. 4. 65. Свод арочного моста

нужно построить мост на ровной местности, то он будет слишком «горбат». Если арка будет иметь вид половины эллипса, то давление на клинчатые камни возрастет, они могут раскрошиться.

Арки известны не только в строительстве мостов, но и при создании куполов зданий. Чтобы арочные купола не разваливались и их основания не разъезжались, необходимо увеличить силы, действующие вертикально вниз. Для этого в храмах, особенно в католических, снаружи вертикальной

стены сверху устанавливали массивные статуи, которые, во-первых, имели эстетическую функцию, а, во-вторых, они своим весом прижимали бруски стен, увеличивая тем самым силы трения между ними (рис. 4. 66). Арочные купола древних христианских храмов отличались огромными затратами материала и рабочих ресурсов, строительство часто растягивалось на века. Отношение максимальной толщины стенок купола к диаметру купола в основании не превышало 1:10 (рис. 4. 67). Увеличение размера купола при сохранении толщины стенок влекло за собой опасность разрушения при землетрясениях. Для повышения прочности купола стягивали металлическими обручами.

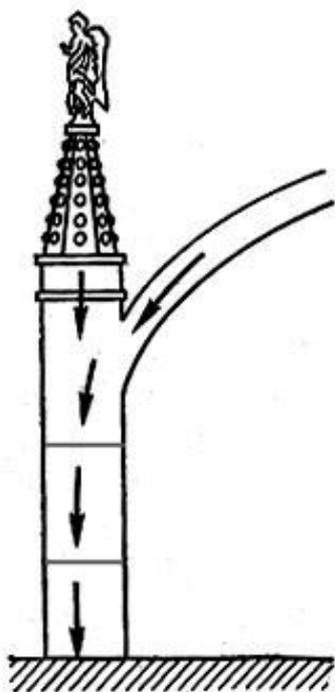


Рис. 4. 66. Декоративная статуя, увеличивающая силы трения

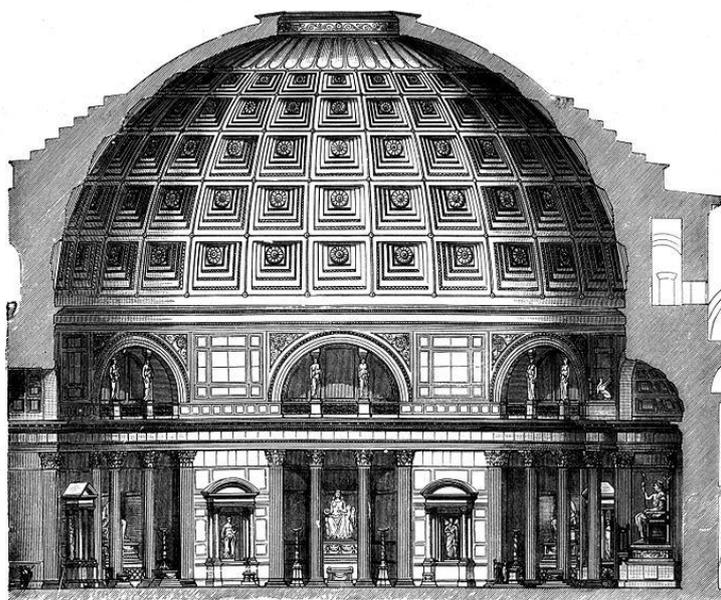


Рис. 4. 67. Купол храма в арочном исполнении

В современной архитектуре арочные строения используются редко. Вызывает определенный интерес бионическая арочная конструкция автобусной остановки, стилистически напоминающую арбуз (рис. 4. 68).

В живой природе чаще встречаются более экономичные с точки зрения расхода материала пространственные формы в виде криволинейных в двух плоскостях тонкостенных скорлуп (оболочек). Они выгодно отлича-

ются от арок по весу при сохранении прочностных характеристик. Этот факт объясняется тем, что жесткость сечения такой конструкции имеет высокие значения в двух взаимно перпендикулярных направлениях.



Рис. 4. 68. Автобусная остановка – арбуз



Рис. 4. 69. Листья растения, свернутые в трубочки

В качестве примера рассмотрим тонкий лист прочного материала. Его жесткость невысока. Если лист свернуть в виде желоба, то конструкция становится более жесткой, и его форма сохраняется под нагрузкой. Лист растения (мягкая оболочка) принимает сложные пространственные формы, которые увеличивают его прочность и устойчивость. Эта особенность проявляется в длинных листьях (рис. 4. 4.69): они свертываются в трубочку (ковыль, злачные), образуют глубокие складки по длине (осока). Итальянский архитектор Паоло Солери придал конструкции железобетонного моста форму свернутого в трубку листа, характерную для полевых растений (рис. 4. 70).



Рис. 4. 70. Мост в виде свернутого листа

Если из листа сформировать тонкостенный купол, то его жесткость повысится уже в двух направлениях. Таким образом, изменение формы тела без увеличения его веса и толщины привело к существенному повышению его нагрузочной способности. В основу надежности биологических оболочек положен принцип «работы по форме». Этот принцип является одним из основополагающих принципов живой природы. Принцип сопротивления нагрузкам оболочек выгодно отличается принципа построения традиционного свода, в котором при увеличении пролета необходимо увеличивать сечение свода.

К оболочкам-скорлупам предъявляются особые требования. Прежде всего, они должны быть из жесткого материала, иметь пространственно изогнутую форму, незначительную толщину по отношению к пролетам, сечение по всей поверхности одинаковое, лишь в заделках иметь некоторое утолщение. В связи с этим распределение усилий в них отличается следующим. В сечениях оболочек должны отсутствовать изгибающие и крутящие моменты в связи с их малой толщиной, а усилия направляются равномерно по касательным к поверхности. Малые изменения толщины скорлупы в сжатой части могут вызвать появление изгибающих моментов. Рабочее состояние оболочек – это состояние напряженной мембраны.

Для повышения жесткости больших листьев болотных растений и панцирях животных в природе часто используются ребра жесткости (рис. 4. 71).

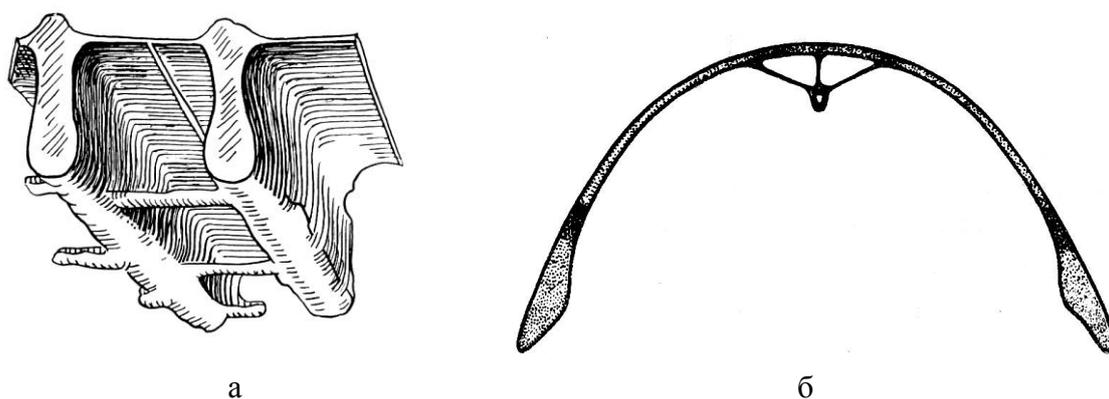


Рис. 4. 71. Ребра жесткости оболочек: а – у листьев болотных растений, б – в поперечном сечении панциря черепахи

Человеческий череп также является биообъектом, имеющим слоистую структуру и форму оболочки-скорлупы (рис. 4. 72)..

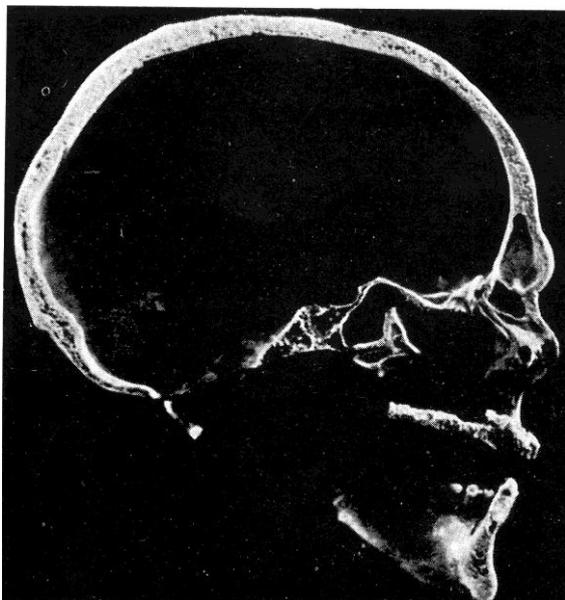


Рис. 4. 72. Сечение черепа человека

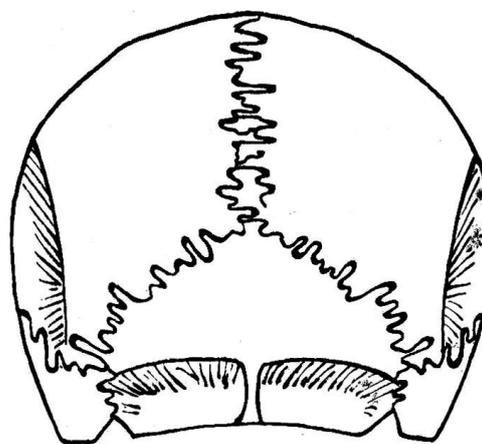


Рис. 4. 73. Соединение костей черепа типа «меандр»

Основная ее функция – защитная от статических и динамических механических воздействий. Форма черепа имеет большое значение. С морфологической точки зрения череп – это сфероид, образованный из примерно одинаковой по толщине костной ткани, плавно меняющей свою кривизну. Надбровные дуги и затылочная часть имеют пазухи, первые – заполнены воздухом (служат в качестве резонаторов при произнесении звуков), вторые – жидкостью (для амортизации ударов). Особо важные области мозга тщательно предохраняются, так как такая конструкция хорошо амортизирует силовые воздействия. В противоположность яйцу черепная коробка не является монолитной, она состоит из скрепленных между собой костей. Соединительно-тканевые швы, напоминающие рисунок орнамента меандра, образованы входящими друг в друга зубцами соседних костей черепа (рис. 4. 73). Такие швы мало снижают прочность черепа, но придают ему упругость и амортизирующую способность.

Микроструктура оболочки черепа – слоистая (рис. 4. 74). Первый слой – кожа 1, второй – сухожилия 2, далее идет костная пористая ткань 3, и на границе с мозгом - витринная (полированная) ткань 4. Между короб-

кой и витринной тканью 6 располагается пограничный слой, представляющий собой частый ряд перегородок 5, предназначенный для локализации распространения трещин в случае повреждения черепной коробки в столь важном слое, каким является витринная поверхность.

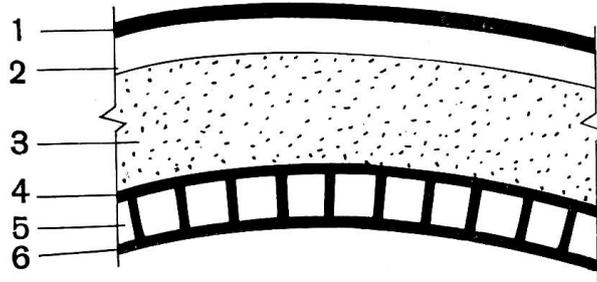


Рис. 4. 74. Строение костной ткани черепа

Череп в последнее время стал мотивом новых дизайнерских разработок. Кроме изображения черепа на дамских сумочках, одежде и аксессуарах появились стилизованные под череп предметы мебели (рис. 4. 75). Однако здесь существуют некоторые эстетические барьеры, связанные с тем, что череп напоминает людям о бренности жизни.



а



б

Рис. 4. 75. Шкаф-диван Sensory Deprivation Skull

Большой интерес представляет собой такая природная оболочка, как скорлупа птичьего яйца. Морфологически она представляет собой тело

вращения с осевой симметрией, продольное сечение которой можно описать уравнением двухфокусной параболы.

Анализируя форму яиц разных птиц, можно отметить следующую особенность. У лесных птиц форма яйца приближается к шарообразной, а у птиц, живущих на скалах форма яйца ближе к конусообразной. Такой факт можно объяснить тем, что в скалах дуют сильные ветры и поэтому, чтобы яйцо не скатилось, оно имеет такую форму, при которой яйцо катается вокруг центра как волчок. Для лесных птиц влияние ветра несущественно, т.к. яйца лежат в гнезде. Поэтому шарообразная форма как наиболее экономичная и равнопрочная при отсутствии других факторов оптимальна для яиц лесных птиц.

Общепризнанно, что скорлупа птичьего яйца является одной из совершенных природных форм. Она относится к оптимальным структурам: ее основное преимущество – минимальный расход материала, обеспечивающий требуемую прочность. Благодаря методам математического и физического моделирования можно совершенствовать проектируемые оболочки при помощи испытаний моделей. Аэродинамические испытания оболочек–скорлуп показали, что модель яйцевидной асимметричной формы имеют меньшее лобовое сопротивление, чем симметричная шарообразная и эллипсоидная.



а



б

Рис. 4. 76. Кресло в виде эластичного яйца: а – в свободном состоянии, б – в рабочем состоянии

К форме яйца часто обращаются архитекторы и дизайнеры. Например, купол Флорентийского собора, построенного в 1420 г., купол планетария в Москве, 1929 г.), эргономичное кресло Doctor Riter's ErgoChair, разработанное группой швейцарских дизайнеров (рис. 4. 76) и кресло-кровать (рис. 4. 77). Различные бытовые приборы также часто имеют форму яйца, например, плеер (рис. 4. 78).



Рис. 4. 77. Кресло-кровать



Рис. 4. 78. Плеер

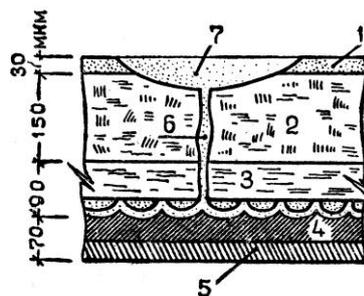


Рис. 4. 79. Структура скорлупы яйца

Структура скорлупы яйца имеет сложное строение. Она состоит из семи слоев: наружная жесткая известковая оболочка 1, губчатые известковые слои с большой и малой плотностью 2 и 3, тонкий слой из каротиновых нитей 4, плотный пленочный слой 5, поры 6, выемки 7. Каждый слой имеет свое функциональное назначение (рис. 4. 79).

Скорлупа предохраняет живой развивающийся организм от различных неблагоприятных атмосферных воздействий, в то же время она позволяет зародышу потреблять необходимую влагу, дышать, осуществлять обмен веществ. Скорлупа не пропускает снаружи воду, но способна отдавать излишки влаги и газов – она дышит. За счет внутренней эластичной оболочки скорлупа находится постоянно в напряженном состоянии сжатия, поэтому хрупкая скорлупа, хорошо работающая на сжатие, может сопротивляться внешним изгибающим деформациям.

Заслуживает внимание панцирь черепахи как конструкция близкая к оболочкам-скорлупам (рис. 4. 80).



Рис. 4. 80. Панцирь черепахи

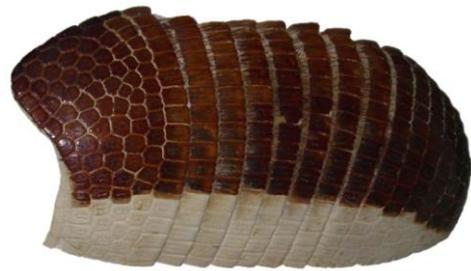


Рис. 4. 81. Панцирь броненосца

Панцирь броненосца (рис. 4. 81) за счет подвижности костных пластинок позволяет животному изменять форму тела, поэтому броненосец более мобилен, чем черепаха. Аналогичные конструкции скорлуп-оболочек использовались в средние века для доспехов рыцарей (рис. 4. 82 и рис 4. 83).



Рис. 4. 82. Панцирь рыцаря



Рис. 4. 83. Доспехи рыцаря

В наше время такие системы также широко распространены в технике, где нужны прочные и легкие конструкции, защищающие внутреннее пространство от внешних воздействий, например, под прочной оболочкой ракеты «Игла» находятся электронные управляющие устройства

(рис. 85 а). Аналогично устроены рога животных: внешняя твердая хитиновая оболочка защищает растущие мягкие ткани (рис. 4. 85 б)



Рис. 4. 85. Оболочки для защиты внутренней среды: а – ракета «Игла», б – хитиновый покров рога и внутренние мягкие ткани

Для дизайнерских разработок конструкций оболочек-скорлуп важным является, во-первых, внешняя форма объекта, которая должна удовлетворять требованиям высокой жесткости, во-вторых, форма должна удовлетворять требованиям минимума аэро- или гидродинамического сопротивления. Например, осиные гнезда, глубинные морские мины имеют сферическую оболочку (рис. 4.86). В третьих, форма оболочки-скорлупы должна удовлетворять эстетическим требованиям.



а



б

Рис. 4. 86. Сферические оболочки с малым аэро- и гидродинамическим сопротивлением: а – осиное гнездо, б – глубинная морская мина

Для облегчения конструкции оболочки необходимо предусматривать ребра жесткости, а также применять материалы, обладающие высокой удельной прочностью. Примером может служить скорлупа грецкого ореха. Английский архитектор лорд Норманн Форстер тяготеет к органическим формам, смело используя оболочки-скорлупы для больших зданий (рис. 4. 87).



Рис. 4. 87. Здания архитектора Форстера, построенные в Монреале и в Лондоне

Творческий метод Фостера возник на стыке "технократически-природной" эстетики Фуллера и функционализма. Для почерка Фостера - родоначальника и лидера архитектуры "хай-тека" - характерно использование пространственных конструкций, больших плоскостей из стекла и профилированного металла, многофункциональность свободных пространств, тектоническая ясность. Коконные оболочки из рефлектирующего стекла и профилированного металла, двухслойные купола-оболочки из прозрачных и матовых пластин выглядят очень эффектно.



Рис. 4. 88. Здание Большого народного театра Китая

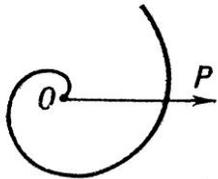
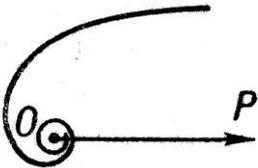
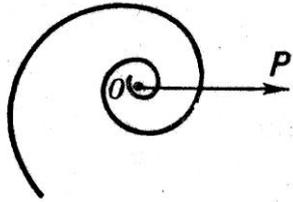
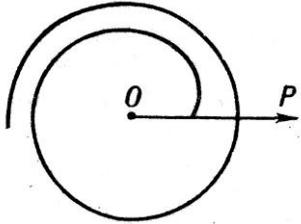
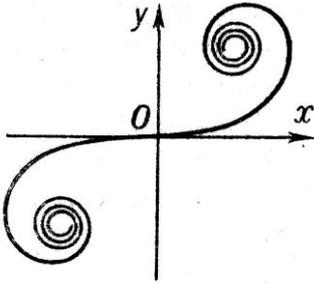
Французский архитектор Поль Андре в 2007 г. построил в Пекине Большой народный театр Китая, в котором также использовал купол из двухслойной стеклянной оболочки (рис. 4. 88).

4.3.5. Спирали в живой природе и технике

Пространственные формы, имеющие сложные закрученные поверхности, называют турбосомами (турбо – вращение, сома – тело). Спиральная конфигурация является фундаментальной морфологической характеристикой систем в живой природе на различных уровнях их организации. Философский принцип диалектики – развитие идет по спирали наглядно проявляется в живой и неживой природе. Спирали могут быть плоскими и объемными, которые часто называют винтовыми кривыми. В геометрии известны такие спирали, описываемые зависимостями в полярной или цилиндрической системах координат (таблица 4. 1).

Таблица 4. 1

Типы спиралей

Название спирали	Формула спирали	Форма спирали
Спираль Архимеда	$\rho = a\varphi$	
Гиперболическая	$\rho = a/\varphi$	
Логарифмическая	$\rho = ae^{k\varphi}, \rho = \rho_0 a^\varphi$	
Параболическая	$\rho = a\varphi^2$	
Спираль Корню	$x = a \int_0^t \cos \pi u^2 / 2 du$, $y = a \int_0^t \sin \pi u^2 / 2 du$	
Винтовая линия	$\rho = const, \varphi = kt$	
Конусообразный винт	$\rho = \rho_0 t, \varphi = kt$	

В формулах таблицы 4. 1 ρ – радиус-вектор, φ – угол поворота радиус-вектора, a – постоянный коэффициент.

Спираль – одна из наиболее удачных форм обеспечения свободного роста в ограниченном пространстве. Ей присущи экономия энергии и «строительного» материала – одна стенка играет роль перегородки.

Компактность – основное свойство спирали. Например, ископаемая раковина Пахадикуса имеет диаметр 0,4 м, а развертка ее составляет 10 м.

В механическом отношении спираль в неживой природе – это результат взаимовлияния на материальный объект двух сил: центробежной и притяжения к Земле. В неживой природе спирали встречаются в виде смерчей, водоворотов, галактик.

Спираль Архимеда отличается от других плоских спиралей тем, что она имеет постоянный шаг, т.е. расстояние между витками постоянно. Она может формироваться из цилиндра (рис. 4. 89). Змея, свернувшаяся в клубок, представляет собой спираль Архимеда. В таком виде змея сохраняет тепло, уменьшая площадь контакта с внешней средой,

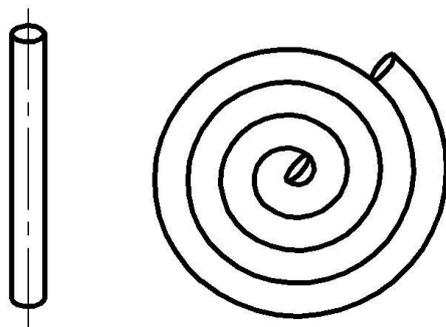


Рис. 4. 89. Формирование спирали Архимеда из цилиндра

В средней кишке миног, акул, скатов находится складка слизистой оболочки, расположенная по спирали (до сорока витков). Она увеличивает всасывающую поверхность кишечника и замедляет продвижение по нему пищи. Для живого мира характерна не спираль Архимеда, а логарифмическая спираль, которая получается из конуса, свернутого в спираль (рис. 4. 90). Фактически такая спираль олицетворяет спираль роста из одной точки.

На молекулярном уровне винтовую конфигурацию имеет молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Из ДНК состоят гены, содержащие наследственную информацию и расположенные в хромосомах. Белковая оболочка вируса табачной мозаики также имеет спиральную структуру и состоит из морфологических единиц – капсомеров. Спиральный тип деления клетки характерен для многих живых организмов. Обычно во всех эмбриональных структурах на начальных стадиях деления клетки распола-

гаются радиально, а на последующих стадиях часто этот тип деления сменяется спиральным.

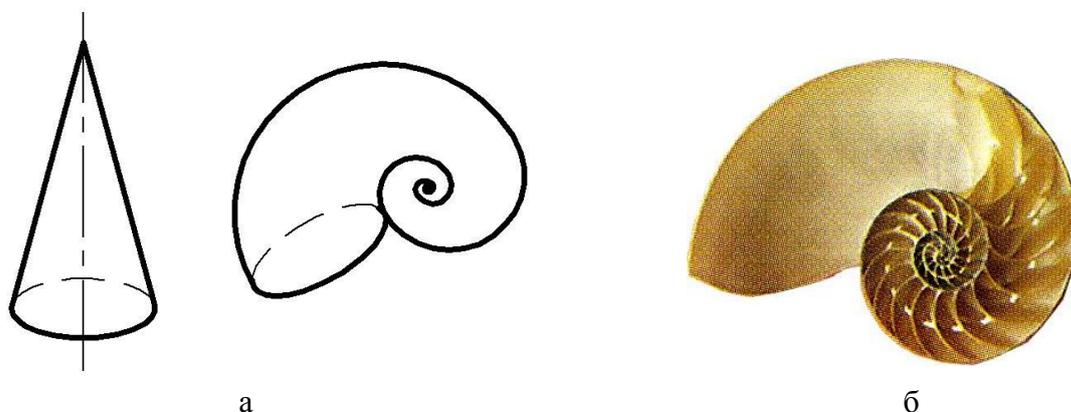


Рис. 4. 90. Логарифмическая спиральная форма: а – формирование спирали из конуса, б – раковина Наутилуса

Наиболее часто встречаются винтовые формы у цветков растений (лепестки ромашки расположены по винтовой спирали) и раковин моллюсков. Ростки папоротника из-за неравномерности роста клеток в вершине стебля растения имеют вид спирали Корню (рис. 4. 91). Также листья многих растений развиваются, раскручиваясь из спирали.



Рис. 4. 91. Растущие листья папоротника



Рис. 4. 92. Винтовая лестница Гауди в Соборе Святого Семейства (Барселона)

Антонио Гауди в своих творениях часто использовал мотивы спирали, особенно эффектно выглядят винтовые лестницы при взгляде сверху (рис. 4. 92).

Орган слуха человека имеет ушную раковину 1, слуховой проход 2, молоточек 3, наковальню 4, полукружные каналы 5, слуховой нерв 6. Во внутреннем ухе человека есть спиральный элемент, называемый улиткой 7, стремечко 8, евстахиеву трубу 9 и барабанную перепонку 10. (рис. 4. 93). Кстати, ушная раковина также напоминает спираль.

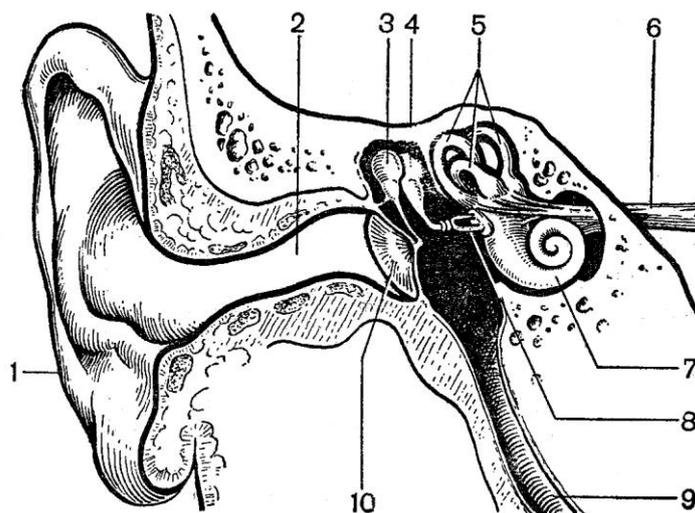


Рис. 4. 93. Строение органа слуха человека

Сложная кинематика (рис. 4. 94) передачи звукового сигнала из окружающей среды в слуховой нерв позволяет человеку различать звук в широком диапазоне частот и интенсивностей. Упрощенно звук, пройдя ушную раковину, колеблет барабанную перепонку 1, которая связана с молоточком 2. Вибрации молоточка 2 через контактную площадку передается на наковальню 3. Вибрация от наковальни 3 передается через стремечко 4 на тонкую мембрану 5. Эта мембрана отделяет воздушную среду от внутреннего пространства улитки 6, которая заполнена жидкостью. Благодаря тому, что поперечное сечение улитки уменьшается от стремечка к полукружным каналам 7, амплитуда колебаний жидкости возрастает. Таким образом, улитка во внутреннем ухе играет очень важную роль, она усиливает акустический сигнал. Далее усиленный акустический сигнал в жидкости улитки преобразовывается в электрические импульсы, идущие по слуховому нерву.

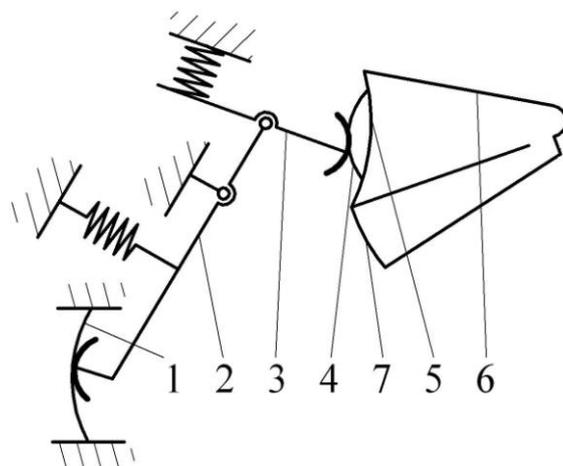


Рис. 4. 94. Кинематическая модель внутреннего уха

Эмоционально спираль воспринимается как тело, в котором запасена потенциальная энергия. Зародыш человека в матке женщины свернут калачиком в виде своеобразной спирали. В шишке чешуйки с семенами плотно примыкают друг к другу по спирали.

С древних времен люди использовали спирали и их изображения в украшениях. Древние греки знали философский смысл спирали и украшали ионические колонны храмов спиральными архитектурными элементами. Библейская Вавилонская башня строилась на основе конического винта. В русских церквях, в их куполах также используются завитки спирали (купол храма Василия Блаженного – рис. 4. 95). В спирали заложена идея роста и развития системы.



Рис. 4. 95. Купола храма Василия Блаженного

Смысл использования природной формы спирали состоит в следующем.

- Прежде всего, спираль позволяет протяженную форму сделать компактной. В функциональном отношении спиральная форма удобна для размещения большого количества элементов конструктивной системы и доступа к ним. Например, винтовые лестницы имеют существенно меньшие размеры, чем обычные маршевые (например, двухзаходная винтовая лестница Леонардо де Винчи в королевском замке на реке Луара во Франции, по этой лестнице могли подниматься знатные господа и челядь, не встречаясь друг с другом; многоэтажные гаражи).

- В определенных случаях спираль может способствовать повышению прочности конструкции, если, например, соединить несколько параллельно расположенных винтовых конструкций. Прочность улитки повышается благодаря тому, что внутренние стенки повышают жесткость всей системы.

- Высокие прямостоящие листья растения рогоза перекручиваются по длине в спираль и этим выигрывают в устойчивости. Аналог в технике – это заневоленная пружина растяжения, в которой витки пружины плотно примыкают друг к другу (рис. 4. 96).



Рис. 4. 96. Винтовые формы лиан, вьюна и телефонного провода

В живой природе такие образования как стволы деревьев, стебли растений или опорные кости скелетов животных для приобретения боль-

шей устойчивости усложняют свою форму за счет закручивания вокруг оси без существенных изменений формы поперечного сечения. Закрученный ствол лианы позволяет скрепить многочисленные ростки растения в объемную прочную систему. Плющ, обвиваясь вокруг гладкой трубы, растет вверх, создавая большую силу трения между стволом и гладкой трубой. Малая берцовая кость человека также имеет вид винта с большим шагом. Горные бараны имеют спиралевидные рога, которые могут спружинить, т.е. действовать как рессоры при ударах (рис. 4. 97).



Рис. 4. 97. Спиральные рога горных баранов



Рис. 4. 98. Неоновая лампа со спиральной колбой

В дизайне спирали также широко используются, например, в осветительных приборах (рис. 4. 98).

Использование в технике различных спиралей очень распространено. В трехкулачковом патроне токарного станка (рис. 4. 99) для равномерного зажима цилиндрических деталей используется спираль Архимеда 1, при повороте которой кулачки 2 одинаково сближаются к центру. Поворот спирали осуществляется при помощи конической передачи 3, 4. Эвольвента окружности, которая также является спиралью, формирует профиль зуба зубчатых колес с эвольвентным зацеплением.

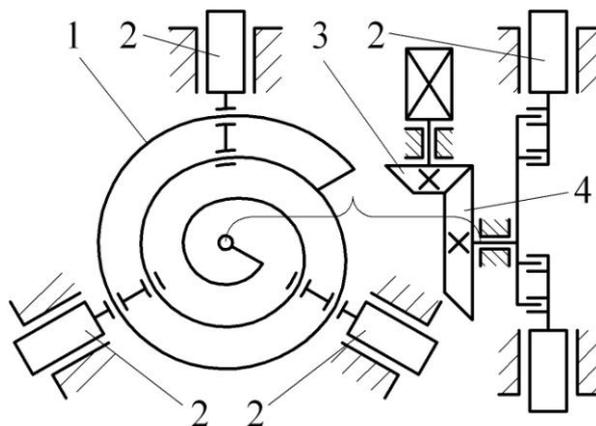


Рис. 4. 99. Механизм трехкулачкового патрона

Используя податливость плоской спирали в направлении, перпендикулярном плоскости спирали, можно формировать полые сферические объекты (рис. 4. 100). Для этого, например, изготавливается полусфера, на которую плотно наматывается спираль из стекловолокна, покрывающую всю сферическую поверхность. Далее полученная сферическая спираль промазывается эпоксидной смолой. После полимеризации полу сферу отделяют от модели.

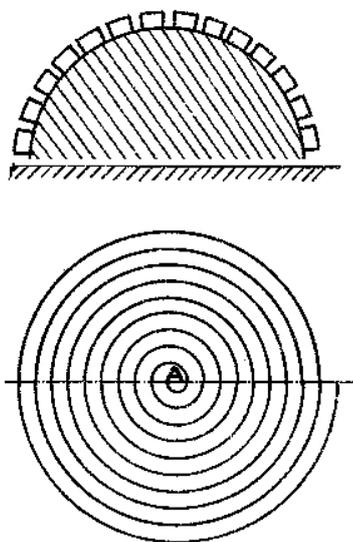


Рис. 4. 100 . Изготовление сферической детали при помощи спирали

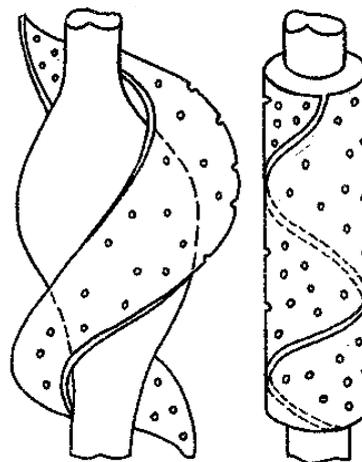


Рис. 4. 101. Метод лечения аневризмы при помощи упругой трубки со спиральным разрезом

Для хирургического лечения аневризмы (местного расширения) артерии применяют упругую трубку со спиральным разрезом. Для этого на

пораженный участок сосуда надевается такая трубка, которая благодаря упругости сжимает кровеносный сосуд (рис. 4. 101).

Используя две катушки с намотанной на них одной лентой, можно создать дозатор с высокоточным расходом жидкости (рис. 4.102). Аналогично, используя непрерывно вращающуюся катушку с намотанной на ней нитью, можно создать самоочищающийся фильтр (рис. 4. 103). Жидкость поступает во внутреннюю полость катушки с радиальными отверстиями. Проходя через отверстия и зазоры между витками нити, жидкость фильтруется. Очищение фильтра осуществляется благодаря непрерывной перемотке нити.

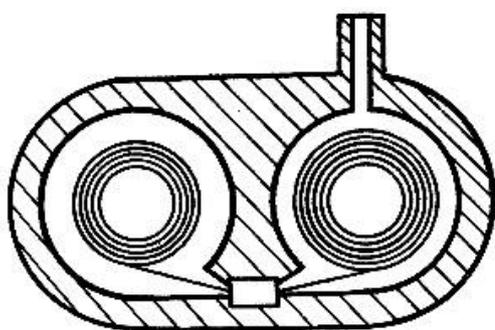


Рис. 4. 102. Дозатор жидкости с двумя катушками со спирально намотанной лентой

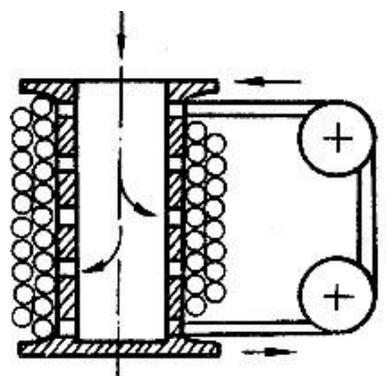


Рис. 4. 103. Самоочищающийся фильтр

При изготовлении труб из узкой полосы металла ее сворачивают винтом, сваривая стыки. Армирование пластикшлангов с целью сохранения сечения при сильном изгибе осуществляется при помощи скрученной винтом пружинной проволоки. Канаты также сплетены из тонких нитей (рис. 4. 43), скрученных винтом.

4.3.6. Пневмо- и гидростатические бионические системы

Тонкие оболочки, не обладающие жесткостью при изгибе, могут сохранять свою форму только при наличии разности давлений снаружи и внутри оболочки. Наглядной моделью пневмостатических систем могут служить мыльные пузыри. Они сохраняют свою сферическую форму только из-за перепада давления. Если внутри оболочки нет градиента сил давления, то оболочка стремится принять сферическую форму, т.к. площадь

сферы минимальна при фиксированном объеме. При этом толщина стенок оболочки, выдерживающей заданный перепад давления также минимальна по сравнению с оболочками других форм (кубических, цилиндрических и т.д.). Это свойство сферических оболочек проявляется во многих биологических системах, начиная от рыбьей икры и склеры глаза и кончая рыбьим плавательным пузырем. Нормальное внутриглазное давление у человека 75 кПа, оно позволяет держать шарообразную форму глаза, обеспечивая тем самым попадание сфокусированного изображения на сетчатку глаза.

Клеточное строение биологических систем основано на принципе сохранения формы оболочки за счет разности давлений (рис. 4.103). Это явление связано с внутриклеточным осмотическим давлением и называется *тургором*. Осмосом называется диффузия молекул воды через полупроницаемые мембраны. Если сорвать молодой стебель или лист растения, то через некоторое время они обвиснут и обмякнут. Это является следствием прекращения питания клеток, что влечет за собой уменьшение тургора, упругости оболочек и способности сохранять форму при внешних механических нагрузках, хотя к растягивающим усилиям ткани сохраняют прочность.

Внутри живой клетки сахарной свеклы существует давление 50 атм, у пустынных растений оно выше – до 200 атм. Эта способность сохранять давление внутри клетки связано с свойствами клеточных мембран. У растений в мембранах этих клеток отсутствуют склерохимические элементы. Давление внутри клеток поддерживается за счет пассивного и активного переноса ионов и молекул через полупроницаемые мембраны, содержащие поры, которыми окружены внутренние субстанции клеток. В последнем случае поры открываются или закрываются под действием внешних факторов и вода вместе с растворенными в ней веществами (например, березовый сок) может переходить в межклеточное пространство (рис.4. 104).

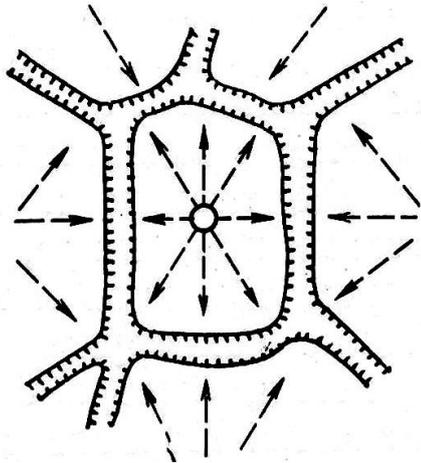


Рис. 4. 103. Внутриклеточное давление поддерживает форму клеток

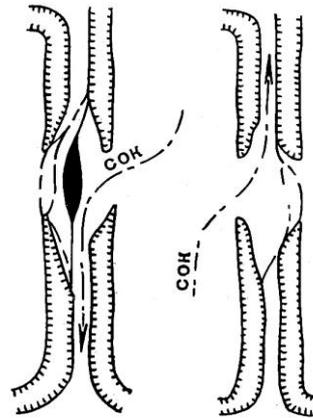


Рис. 4. 104. Поры в мембранах клеток позволяют регулировать внутриклеточное давление

Принцип действия пассивного переноса рассмотрим на следующем примере. Пусть сосуд разделен на две части такой мембраной. В одной части находится вода, а во второй раствор NaCl при одинаковом давлении. Через некоторое время через эту мембрану будут переходить ионы. Пусть отверстия в мембране таковы, что они смогут пропускать только ионы H^+ и OH^- , а более крупные ионы натрия, калия и хлора пройти через них не смогут. Тогда через некоторое время концентрация ионов H^+ и OH^- станут равными по обеим сторонам мембраны, а ионы Na^+ и K^+ и Cl^- так и останутся в одной части сосуда, поэтому в этой части сосуда давление увеличится.

Обычно процессы изменения давления протекают в течение минут и часов. Однако у некоторых растений они могут проходить быстро – в течение нескольких секунд: ветка мимозы стыдливой при небольшом механическом воздействии резко наклоняется и листва обвисает. Это достигается благодаря способности изменять поры полупроницаемых мембран. За счет этого эффекта растение сохраняет свою листву при сильных тропических дождях, насекомые не могут удержаться на листьях и скатываются с них, кроме того, травоядные животные не едят вялую листву.

Виноград, помидоры, апельсины, плавательные пузыри рыб – это аэрогидростатические системы. Например, в плодах растения бешеный огурец при созревании семян повышается давление до 6 атм. При слабом при-

косновении плод отделяется от плодоножки, и жидкость, находящаяся внутри плода, вместе с семенами выстреливается из плода на расстояние до 12 м (рис. 4. 105). Интересен тот факт, что эта жидкость ядовита, поэтому травоядные животные не употребляют плоды бешеного огурца в пищу.



Рис. 4. 105. Плод бешеного огурца во время выброса семян



Рис. 4. 106. Двухместный дирижабль AU-12м (Россия)

В технике широко используются аналогичные пневмо- и гидростатические системы. Они бывают двух типов: повышенное давление внутри замкнутых оболочек и внутри оболочек, одна из стенок которых является жесткой. Первые – это надувные лодки, матрасы, воздушные шары и дирижабли. Оболочка дирижабля AU-12м (рис. 4. 106), созданного в фирме РосАэроСистемы, выполнена из газодержащего ткане-пленочного материала с полиуретановым покрытием, обеспечивающего защиту от ультрафиолетового излучения и минимальную утечку гелия. Дирижабль может быть использован для патрулирования, наблюдения, рекламы и в целях подготовки и обучения пилотов. Вторые – ангары, имеющие специальные шлюзы, а также надувные плавательные бассейны. Такие пневмоангары (рис. 4. 107) могут иметь модульный принцип сборки, при котором длина ангара практически может достигать сотен метров.

Гидро и пневмоконструкции – одни из наиболее легких. Сравним их с другими конструкциями. Обычный ангар с железобетонной крышей имеет удельную массу 300 кг/м^2 , для скорлуп-оболочек - 50 кг/м^2 , для тентов и мембран – 10 кг/м^2 , пневмоконструкция – 2 кг/м^2 .

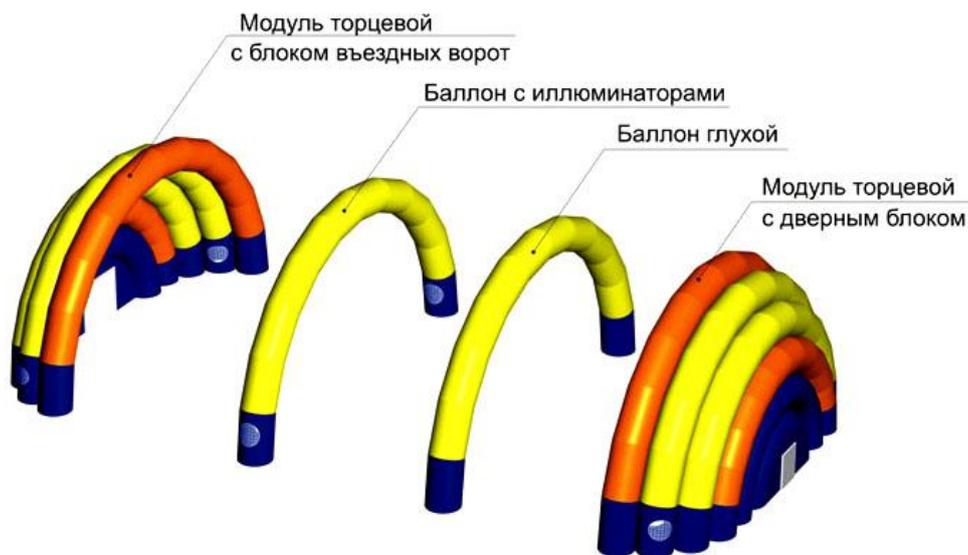


Рис. 4. 107. Модульный принцип сборки пневмоангара

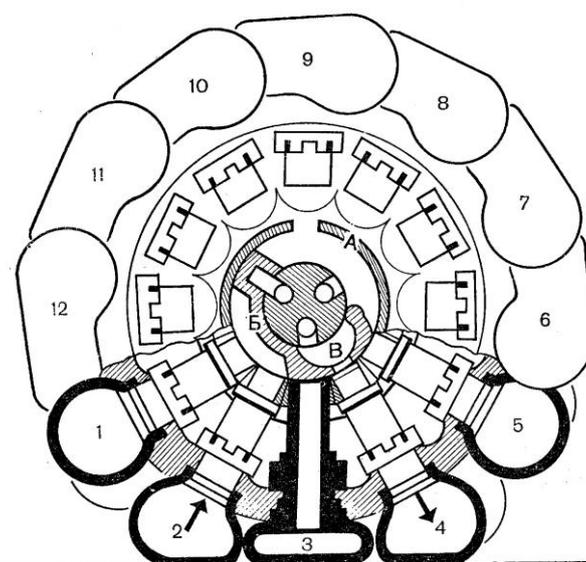


Рис. 4. 108. Перистальтическое пневмоколесо

Бионический принцип перистальтического перемещения использован в колесе (рис. 4. 108), в котором имеется пневмокамеры 1 – 12. В ступице колеса А находится золотник, который вращается при помощи мало-мощного двигателя. Полость Б золотника обеспечивает (в настоящий момент) выравнивание давления в камерах 1 и 2. Полость В обеспечивает подачу давления от внешнего источника в камеру 4. Таким образом, при вращении золотника камеры последовательно раздуваются, обеспечивая вращение колеса в ту или иную сторону.

Приведенные примеры пневмоконструкций свидетельствуют о том, что они имеют такие преимущества перед остальными, как малый вес (при равных габаритах); простота и высокая скорость монтажа; большие возможности в области трансформации и эстетики формы. Пневмо- и гидростатические конструкции требуют внешний источник давления, поэтому для поддержания формы конструкции необходим постоянный источник энергии. Этот факт также приближает их к биологическим системам, которым для поддержания формы необходимо постоянное питание.

Контрольные вопросы

1. Какую роль в построении костей животных играет пьезоэлектрический эффект кристаллов гидроксипатита?
2. Какие принципы построения тканей растений могут служить для проектирования стержневых конструкций?
3. Какую роль играют узлы в стеблях растений?
4. Почему бедренная кость человека имеет криволинейную форму?
5. В чем заключаются преимущества и недостатки стержне-вантовых конструкций по сравнению со стержневыми конструкциями?
6. Какие живые организмы и технические конструкции можно отнести к вантовым системам?
7. Почему паруса китайской джонки хорошо сопротивляются сильным порывам ветра, у каких животных принцип построения аналогичен?
8. В чем отличия построения арочных конструкций и оболочек-скорлуп?
9. Какой философский принцип заложен в построении турбосом? Как эмоционально воспринимается спиральная форма?
10. Что такое тургор? Какое значение он имеет в жизни растений?
11. В чем заключается принцип перистальтического движения?

5. ЛОКОМОЦИОННЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ТЕХНИЧЕСКИЕ АНАЛОГИ

Развитие современной техники ставит задачу создания машин, выполняющих сложные движения в нестандартных условиях. Речь идет, например, об исследованиях поверхности небесных тел, сборе полезных ископаемых на дне моря, о сложных погрузочных и сборочных работах с предметами произвольной формы, имеющими в частности значительную массу, температуру или радиоактивность. Сложность подобных двигательных программ доступна человеку и высокоорганизованному животному. Непосредственное выполнение этих работ человеком в ряде случаев оказывалось невозможным или нежелательным, поэтому создание роботов, выполняющих эти работы, является актуальным направлением бионики.

Из многочисленных форм локомоции (движения) животных в бионике уделяется особое внимание изучению следующих видов:

- плаванию и ползанию,
- полету,
- шаганию и бегу,
- прыжкам,
- рытью,
- манипуляционным движениям конечностей.

Созданные человеком технические средства передвижения имеют мало общего с принципами строения и функционирования аналогичных живых существ, обладают меньшим диапазоном функциональных возможностей и маневренности, большими габаритами, низким к.п.д. и меньшей надежностью, чем живые организмы.

5.1. СПОСОБЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ И ИХ ДВИЖИТЕЛИ

Основные способы движения животных можно разделить на следующие группы [3].

1. Передвижение в плотной среде

1.1. Рытье грунта, проделывание ходов в древесине с помощью конечностей или ротового аппарата (кроты, короеды).

1.2. Сокращение кожно-мускульной оболочки тела для раздвигания частиц грунта и проделывание ходов (дождевые черви).

1.3. Гидравлическое движение в мягком грунте, характеризующееся направленным перемещением жидкой ткани в организме, которое вызывает толчки хобота, раздвигающего грунт (черви приапулиды, баланоглоссы).

2. Передвижение по поверхности грунта и по растениям

2.1. Передвижение по твердой поверхности путем изгибания тела, лишенного конечностей (черви, безногие рептилии).

2.2. Ползание при помощи пароподий – боковых отростков, ресничек или конечностей (личинки насекомых, хвостатые амфибии).

2.3. Бег и прыжки по поверхности земли и скалам с помощью подвижных конечностей (членистоногие, наземные позвоночные).

2.4. Передвижение по растениям с помощью конечностей (членистоногие, древесно-кустарниковые формы позвоночных).

3. Передвижение по воде и на ее поверхности

3.1. Амебоидное.

3.2. С помощью ресничек или жгутиков (инфузории).

3.3. Путем изгибания тела (некоторые черви, угри, рыбы, морские змеи).

3.4. С помощью волнообразных движений мембран (трипанозомы) или краевых плавников (скаты).

3.5. С помощью ластов или парных конечностей (ракообразные, водные насекомые, амфибии, черепахи, птицы, ластоногие).

3.6. С помощью хвоста или непарного плавника (рыбы, китообразные).

3.7. Гидрореактивное движение (медузы, кальмары, личинки стрекоз).

3.8. Плавание с помощью паруса (сифонофоры, наutilus).

3.9. Глиссирование по поверхности воды с помощью движения хвоста или конечностей (летучие рыбы, птицы при разгоне, утки).

4. Полет

4.1. Планирование при прыжках с деревьев. Летающие лягушки, змеи, сумчатые летяги, летяги).

4.2. Планирование над водой (летучие рыбы).

4.3. Парение с использованием восходящих потоков воздуха (пауки-аргонавты, птицы).

4.4. Машущий полет (насекомые, птицы, летучие мыши).

Различные виды движения у животных неравноценны с точки зрения перспектив бионических разработок. Одни эффективны только для самых мелких объектов, другие – не поддаются моделированию на нынешнем этапе развития техники.

Одним из основных направлений эволюции наземных позвоночных было увеличение скорости передвижения, повышения работоспособности их опорно-двигательного аппарата в условиях непрерывно меняющихся нагрузок. Скелет, являющийся основой опорно-двигательного аппарата млекопитающих, состоит из плоских, длинных трубчатых и коротких костей. Наибольший интерес, с точки зрения механики, представляют длинные трубчатые кости. Эти скелетные элементы являются основными рычагами при локомоции животного. Их можно рассматривать как полые трубки с изменяющейся толщиной стенок в пределах кости по длине конечности. Средний участок называется диафизом, суставные концы кости – эпифизом.

5.2. ДВИЖЕНИЕ ПО СУШЕ

Основным видом движения по суши для многих животных является шагающая локомоция. Общим у них является то, что конечности устроены по принципу открытых кинематических цепей, движителями являются мускулы, приводящие в действие систему рычагов, а управление движением осуществляют нервные центры по каналам прямой и обратной связи. Однако, геометрия и биомеханика их различны. Каждое звено конечности устроено так, что имеет два плеча: плечо силы мышцы и плечо силы сопротивления (для человека см. рис. 4. 32). Различие в длине плеч бывают

весьма большие, например, у саранчи отношение длины плеча приложения силы разгибателей прыжковой конечности к длине голени – 1:60, у лошади - 1:13, у броненосца – 1:4. Это связано с функциональными особенностями конечностей.

У некоторых членистоногих большая скорость во время прыжка достигается не только за счет большого соотношения плеч. Для выполнения особо быстрых движений (удар, прыжковый толчок) у членистоногих существует специальный скелетно-мышечный аппарат. Энергия для такого движения медленно запасается в изометрически напряженной мышце (рак-богомол) или в упругой связке (саранча, блоха) за счет увеличения механического напряжения. В исходном состоянии конечность может быть зафиксирована специальными защелками, с которых она срывается действием особых мышц. Движение продолжается несколько миллисекунд.

В процессе эволюции костного скелета позвоночных совершенствовались формы соединения его компонентов, обеспечивая и прочность соединения, и подвижность соединения. Исходной формой такого соединения костей скелета является соединение с помощью мышечной ткани (синсаркозы). Это самые подвижные, но и самые непрочные соединения, поэтому в процессе эволюции они переродились соединением при помощи связок (синдесмозы) или хряща (синхондрозы). Суставы возникли позже других форм из хрящевых соединений путем размягчения центральной части хряща и образования полости. Только суставы в их эволюционном развитии позволяют сочетать большой объем движений с возможностью фиксации в определенной позиции. Сустав является самой распространенной формой соединения костей в скелете позвоночных.

Для решения бионических задач представляет большой интерес износоустойчивость суставов. Она обусловлена совершенством системы смазки синовиальной жидкостью соприкасающихся концов костей, сводящих к минимуму коэффициент динамического трения. Без подачи синовиальной жидкости коэффициент трения $\sim 0,2$, при смазке он снижается до $0,01 \dots 0,003$. Суставные концы костей находятся, как бы во взвешенном в жидкости состоянии. При этом синовиальная жидкость не может быть вытеснена из суставной щели из-за ее химического сродства с гиалиновым

хрящом и из-за наличия в хряще микроскопических щелей и канальцев для этой жидкости. Хрящ и синовиальная жидкость выступают как два агрегатных состояния единой системы. Такую систему смазки называют выжимающейся. Для надежной работы такой пары скольжения необходимо постоянное перемещение жидкости в полости сустава. Движение смазки внутри сустава является принудительным и достигается создаваемым в суставной сумке перепадом внутрисуставного давления между отдельными областями зон контакта костей. Просачивание синовиальной жидкости через капиллярные щели из зоны с повышенным давлением в зону с пониженным давлением улучшает демпфирующие свойства сустава.

Синовиальная жидкость замечательна тем, что ее вязкость не постоянна и зависит от градиента скорости смещения ее слоев при движениях в суставе. Так, при градиенте скорости $\partial V/\partial x = 0,1 \text{ с}^{-1}$ динамическая вязкость $\mu = 5 \text{ Па с}$, а при $\partial V/\partial x = 1000 \text{ с}^{-1}$ динамическая вязкость $\mu = 0,01 \text{ Па с}$ (координата x направлена перпендикулярна направлению скорости потока жидкости). Такой эффект достигается за счет переориентировки длинных молекул гиалуроновой кислоты и неустойчивости связей между белковыми молекулами этой жидкости. Такое свойство смазки приводит к тому, что сопротивление движению в суставе мало зависит от скорости относительного движения костей. Для обычных однородных жидкостей, подчиняющихся закону Ньютона о внутреннем трении в жидкости (например, для воды), сила сопротивления пропорциональна градиенту скорости.

Таким образом, сустав является одним из интереснейших объектов исследования бионики, который поможет решить ряд задач *трибоники* – науки о трении.

В некоторых тканях, например, в сухожилиях при сгибании нижних конечностей накапливается потенциальная энергия упругой деформации. При разгибании часть энергии возвращается в виде кинетической энергии возвратного движения конечностей, а часть переходит в тепловую из-за демпфирующих свойств мягких тканей, зависящих от вязкости. Высокой способностью возвращать потенциальную энергию наделены ткани, обладающие высоким *резельянсом*, т.е. отношением работы, производимой при восстановлении исходного состояния деформированной ткани, к энергии,

затраченной на ее деформирование (можно считать резельянс к.п.д. упругой системы). Резельянс у резелина равен 97%, у абдуцина – 91%. Функцией высокоупругих тканей сухожилий является антагонистическое действие в отношении мышц. Эти же ткани берут на себя противодействие силам гравитации. Приняв определенную статическую позу с помощью мускулов, организм может тяжесть собственного тела без больших затрат мышечной энергии. У животных позвоночник не прогибается, будучи зафиксированным связками и хрящами, голова и шея не опускаются благодаря вейной связке. Так достигается экономия энергии. Локальной функцией этих образований является создание *рессорности* конечностей при резких прыжках. Горные бараны безболезненно прыгают со скал высотой 10-12 м, их ноги пружинят благодаря способности связок, сухожилий и фасций к обратимой деформации – растяжению. Наличие в каждой конечности у него 7-8 суставов дает суммарное смягчение толчков [3].

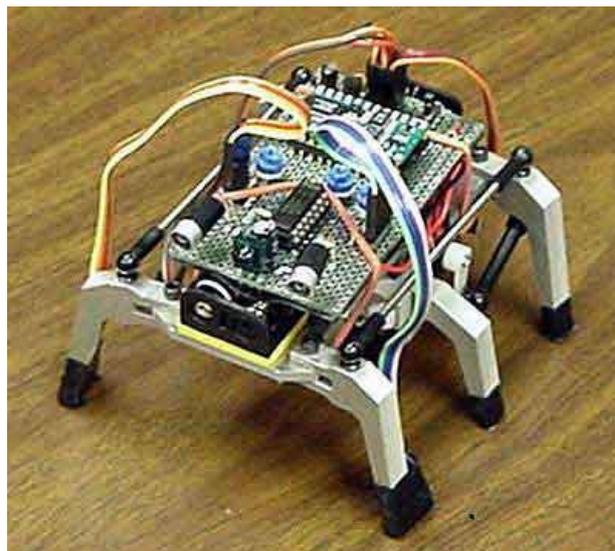
В статике животных участвуют как активные элементы – мышцы, так и пассивные элементы – связки и сухожилия. Мышцы придают конечностям статическую позу, а соединительнотканые – поддерживают ее, экономя мышечную энергию. При этом пассивные элементы накапливают энергию деформации, которая в основном высвобождается в виде работы, направленной на автоматическое разгибание суставов при переходе к движению, а частично преобразуют в тепловую энергию, т.е. демпфируют. Шагающая локомоция животных с позиций бионической механики имеет следующие недостатки:

- 1) При движении тела по прямой конечности имеют очень сложные траектории. Механизмы конечностей обладают большой избыточностью кинематических пар и степеней свободы.
- 2) Локомоция животных на предельных для них скоростях утомительна, имеет невысокий к.п.д. и поэтому не продолжительна.
- 3) Система управления локомоцией живых систем чрезвычайно сложна и может быть смоделирована лишь в грубом приближении.

Однако эти недостатки могут быть устранены в шагающих устройствах (ШУ) специального узкого назначения. Полифункциональность конечностей ШУ может быть достигнута за счет снижения качества выполнения каждой из возможных функций (рис. 5. 1).



а



б

Рис. 5. 1. Шестиногие шагающие роботы: а – Hex Crawler Robot, б – Mini Hexapod

С бионической точки зрения заслуживает особого внимания локомоция не позвоночных (как очень сложная), а членистоногих насекомых, обладающих перечисленными ниже преимуществами.

1. Наличие, как минимум, шестиногой схемы движения, обеспечивающей постоянную устойчивость тела.
2. Точки опоры конечностей на земле вынесены в стороны от тела, что также увеличивает устойчивость и позволяют сохранять ориентацию тела при движении по наклонной поверхности. Они расположены в плане по дуге, что облегчает повороты тела (рис. 5. 2).

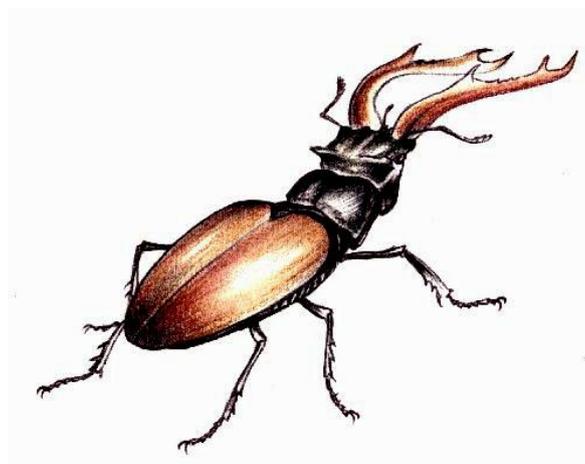


Рис. 5. 2. Жук-олень

3. Суставы конечностей упрощены по сравнению с позвоночными, т.к. допускают качание только вокруг одной оси и приводятся в движение только одной парой мышц-антагонистов.

Локомоция четвероногих и двуногих

При движении четвероногих работа каждой конечности представляет собой строго сфазированные сгибательно-разгибательные движения суставов. Важнейшим компонентом управления движением является координация действий каждой из четырех конечностей, а в каждой из них – движеньем семи суставов. Каждый цикл локомоторных движений состоит из двух фаз: фазы опорного перемещения тела и фазы перемещения конечности относительно тела. Единственным приводом движения являются мускулы. Их энергия механического сокращения превращается в работу с помощью рычагов.

Большое число степеней свободы конечности, определяемое числом и типом кинематических пар, позволяет живому организму реализовать большой диапазон выбора положений опорной точки в пространстве, что дает возможность воспроизводить множество вариантов скоростей и аллюров локомоции.

Циклы (шаги) осуществляются за счет создания мышечных моментов в различных суставах. Животное может перемещаться как симметричным аллюром, так и несимметричным с кратковременной потерей контакта с землей всех четырех конечностей и полетом на небольшое расстояние. Преимущество прыжковой локомоции состоит в использовании сил инерции, развив определенную скорость движения, дальше животное тратит энергию только на поддержание установившегося режима и недопущение затухания движения.

В локомоции животных велико значение позвоночного столба, как упруго-эластичной арки, переброшенной между передними и задними конечностями и объединяющей их в единую функциональную систему. Меняя кривизну, эта арка то сближает, то удаляет друг от друга передние и задние конечности. Если при согнутом положении передний конец дуги, образуемой позвоночником с конечностями, оторвется от земли и дуга

резко распрямится, то тело будет брошено вперед и вверх со значительным ускорением. Т.к. движение позвоночного столба осуществляют мышцы спины и брюшного пресса, то и они принимают участие в локомоции. В роли балансира выступает голова и шея животного. Активно меняя свое положение, они существенно влияют на положения центра масс, обеспечивая равновесие в каждый момент при беге.

Для каждой конструктивной схемы локомоторного аппарата животного, в том числе и человека, существуют свои оптимальные режимы движения, при которых скорость движения максимальна при минимуме затрачиваемой энергии.

Это происходит потому, что колебательные движения верхних и нижних конечностей сопровождаются *рекуперацией* механической энергии (от лат. recuperatio — получение вновь или повторное использование). Простейшая форма рекуперации — переход потенциальной энергии в кинетическую, затем снова в потенциальную и т. д. При резонансной частоте движений такие преобразования осуществляются с минимальными потерями энергии. Это означает, что метаболическая энергия, выделенная мышечными клетками и перешедшая в форму механической энергии, используется многократно – и в этом цикле движений, и в последующих циклах. А если так, то потребность в притоке метаболической энергии уменьшается.

Рассмотрим простейшую модель ходьбы человека. Расход энергии при ходьбе будет минимальным, если частота шаговых движений ноги будет близка к частоте ее свободных колебаний. В простейшей модели ногу можно представить в виде жесткого стержня (рис. 5. 3), качающегося в гравитационном поле вокруг горизонтальной оси, совмещенной с верхним концом (модель физического маятника).

Возвращающий момент

$$M = \frac{mg \cdot L \cdot \sin \theta}{2},$$

для малых углов качания

$$M = \frac{mg \cdot L \cdot \theta}{2},$$

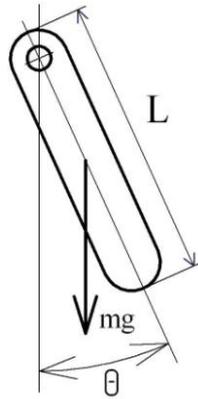


Рис. 5. 3. Расчетная схема ноги человека

где m – масса стержня, L - длина стержня, θ - угол качания относительно вертикали.

Момент инерции такого стержня

$$I = \frac{mL^2}{3}$$

Второй закон Ньютона для вращательного движения

$$I \cdot \ddot{\theta} = -M ,$$

тогда уравнение свободных колебаний

$$I \cdot \ddot{\theta} + \frac{mgL\theta}{2} = 0$$

Ищем решение в виде

$$\theta = \Theta e^{j\omega t} ,$$

где угловая скорость $\omega = \dot{\theta}$.

После преобразований получим

$$\omega = \sqrt{3g/2L} .$$

При длине ноги взрослого человека $L=0,9$ м оптимальная угловую скорость ноги $\omega=4$ рад/с. Следовательно, частота свободных колебаний ноги, соответствующая двум шагам пешехода, равна $0,64 \text{ с}^{-1}$. Принимая длину шага за $0,7$ м, получим оценку оптимальной скорости движения человека $0,9$ м/с или $3,2$ км/ч. Эта оценка довольно близка к реальной скорости человека, хотя реальная несколько выше, так как в рассматриваемой

математической модели нога представлена в виде стержня, а на самом деле состоит из трех основных элементов: бедра, голени и стопы.

При ходьбе и беге механическая энергия определяется скоростями движения тела и его звеньев, а также их расположением, т. е. кинетической и потенциальной энергией. При ходьбе и беге человек затрачивает энергию не только на горизонтальные, но и на вертикальные и поперечные перемещения общего центра масс.

В зависимости от фазы цикла величина кинетической и потенциальной энергии тела изменяется. Характер этих изменений в ходьбе и беге принципиально различен. Кинетическая и потенциальная энергия в ходьбе изменяется в противофазе; например, в момент постановки ноги на опору максимум кинетической энергии совпадает с минимумом потенциальной, а в беге — синфазно (например, в высшей точке полета максимум кинетической энергии совпадает с максимумом потенциальной). Следовательно, при ходьбе происходит рекуперация энергии, т. е. ее сохранение путем перехода кинетической энергии в потенциальную энергию гравитации и обратно, а при беге этот вид рекуперации практически отсутствует. Зато при беге значительно более выражен другой вид рекуперации, когда кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию сокращающихся мышц, действующих подобно пружине.

Энергетические затраты на один метр пути при ходьбе меньше, чем при беге, но только при низких скоростях передвижения. При высоких скоростях бег, наоборот, экономичнее ходьбы. Зона, где более выгоден бег, отделена от зоны, где более выгодна ходьба, граничной скоростью. Граничная скорость определяется числом Фруда

$$F = \frac{v^2}{g L_0},$$

где v – скорость передвижения человека; L_0 – высота общего центра масс тела.

Если число Фруда меньше единицы ($F < 1$), то выгоднее ходьба, а при $F > 1$ выгоднее бег. Граничная скорость соответствует условию $F = 1$ и, следовательно, может быть рассчитана по формуле

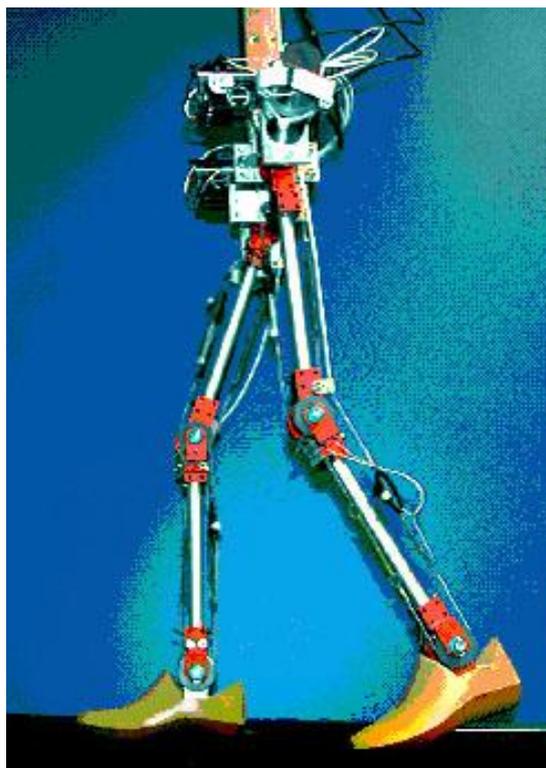
$$v_0 = \sqrt{g L_0}.$$

При $L_0 = 1,2$ м граничная скорость имеет значение $v_0 = 3,4$ м/с (12,3 км/ч).

Энергетические затраты зависят от многих факторов, в том числе от сочетания длины и частоты шагов. При слишком коротких или чересчур длинных шагах (что соответствует недостаточной или чрезмерной силе отталкивания) энергозатраты на один метр пути выше, чем при оптимальном сочетании длины и частоты шагов. Например, отклонение длины шага от оптимальной величины на 6% при беге со скоростью 4 м/с увеличивает энергетические затраты, приходящиеся на метр пути в среднем на 1 Дж.



а



б

Рис. 5. 4. Двунogie роботы: а – Asimo; б – Bioleg 2

В настоящее время ведутся серьезные работы по созданию антропоморфных роботов. Большую известность получил робот Asimo фирмы Honda, который может выполнять большое количество манипуляционных действий, а также совершать движение по плоскости и по ступеням. В лабораториях мира изучаются принципы ходьбы и бега человека с целью создания экономичных педипуляторов (рис. 5. 4). В лаборатории Lauflabor в Германии создано такое устройство Bioleg 2, на котором отрабатываются различные походки человека.

Одним из перспективных направлений в создании антропоморфных роботов являются разработки экзоскелетов, которые позволяют человеку либо существенно увеличить силу его мышц, либо инвалиду заменить его недостающие или пораженные конечности (рис. 5. 5).



Рис. 5. 5. Экзоскелетон – педипулятор

Такие электромеханические системы закрепляются на теле человека, позволяя ему выполнять действия при управлении нервными импульсами, исходящими от него.

Таким образом, в настоящее время наиболее перспективными являются бионические разработки, во-первых, с использованием шестиногой ходьбы для мощных мобильных роботизированных систем, предназначен-

ных для транспортирования грузов, во-вторых, с использованием двуногой ходьбы для создания антропоморфных роботов, выполняющих манипуляционные функции, а также для создания экзоскелетов, предназначенных для инвалидов.

5.3. ДВИЖЕНИЕ ПО ВОДЕ

Несмотря на то, что человек научился летать и плавать дальше, быстрее, выше и глубже, затраты энергии на передвижение транспортных средств намного выше, чем у животных.

В общем случае для анализа принципов движения в вязкой среде необходимо рассматривать плавание, как в воде, так и на поверхности воды. Животные по поверхности воды плавают не часто, только во время питания или отдыха, передвигаясь на небольшие расстояния и с малыми скоростями. С энергетической точки зрения это объясняется тем, что движение вблизи границы раздела сопряжено с появлением дополнительного сопротивления, которое особенно велико при больших скоростях. Конструируя транспортные средства, человек тоже пытается уйти от поверхности воды. В одних случаях он прибегает к подводным крыльям, в других опускается на глубину.

Значительно хуже обстоят дела с подводным плаванием. Здесь человек почти догнал животных по абсолютной скорости, но очень сильно отстает по экономичности. Дельфин развивает скорость в подводном плавании 18 м/с, тунец – 25 м/с, рыба-меч – 30 м/с. Самая быстроходная подводная лодка с атомными двигателями мощностью в десятки мегаватт развивает скорость 16 м/с.

Английский физиолог Грей, сравнивая необходимую и фактическую мощность дельфина, пришел к выводу о том, что дельфин должен обладать сопротивлением в 7-8 раз меньшим, чем его твердая геометрическая модель. Этот факт получил название *парадокса Грея*.

К такому же парадоксальному выводу можно прийти, вычислив мощность, необходимую для движения модели тунца (рис. 5. 6). Мощность, расходуемая на преодоление сил сопротивления, вычисляется по формуле

$$N = \frac{c_x \rho v^3 S}{2},$$

где c_x – коэффициент сопротивления (обычно находится опытным путем на твердых моделях), ρ – плотность воды, v – скорость тела, S – площадь поперечного сечения движущегося тела. Коэффициент сопротивления для тунца был найден экспериментальным путем при исследовании каплеобразных моделей. Для крупных особей тунца при поперечном размере порядка 0,5 м, длине 4 м и при скорости 25 м/с мощность сопротивления движению N составляет 73,6 кВт. Очевидно, что холоднокровное животное, пользующееся малым количеством кислорода, растворенного в воде, не может иметь мощность, эквивалентную табуны из сотни лошадей. По этой причине специалисты по аэрогидродинамике внимательно изучают плавание животных. Здесь можно подчеркнуть, что плавные, обтекаемые формы рыб способствуют тому, что рыбы в основном двигаются в ламинарном режиме. Однако, как было сказано выше, модели, имевшие такие же контуры, как и живые особи, имели в экспериментах Грея намного большее сопротивление. Судостроители уже давно используют формы акул, китов, тунцов при создании крупных подводных и надводных судов. Однако только этим методом копирования не удастся добиться экономичности плавания, характерного для водоплавающих.

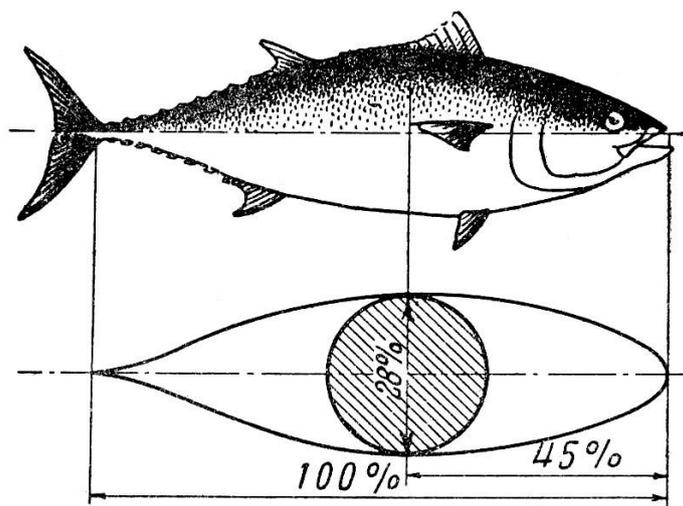


Рис. 5. 6. Тунец и его модель

Над разгадкой парадокса Грея ученые трудились довольно долго. На начальных стадиях изучения гидродинамики животных превалировали две

крайние точки зрения на эту задачу. Представители биологической школы рассматривали эффект плавания с чисто биологической точки зрения, не вдаваясь в физические эффекты. Представители физической науки чрезмерно упрощали явления, не рассматривая особенности биологического характера. На современном этапе биологи и специалисты-физики по гидроаэродинамике совместно вырабатывают гипотезы и их проверяют. Основным интерес в настоящее время представляют тонкие процессы взаимодействия биологических тел с потоками жидкости в пограничном слое.

Исходя из формулы для нахождения мощности сопротивления, можно сделать вывод, что для понижения сопротивления воды необходимо уменьшить коэффициент c_x . Теоретически и экспериментально доказано, что живые морские животные имеют несколько способов его снижения. Во-первых, многие речные и морские рыбы выделяют слизь, которая позволяет понизить вязкость воды. Коэффициент c_x существенно зависит от вязкости жидкости. Известно, что, например, соли цезия, дестабилизируют связи молекул воды и уменьшают ее вязкость. В настоящее время получила признание теория, согласно которой большая часть молекул воды благодаря водородным связям образует кристалл, между решетками которого двигаются свободные молекулы. Такие кристаллические связи не долговременны, они легко рвутся и восстанавливаются под действием теплового движения. Таким образом, касательные силы сопротивления зависят от теплового движения молекул и кристаллических связей. Различные вещества, растворенные в воде, существенно влияют на вязкость. Эксперименты со слабыми растворами полимеров, имеющих большую молекулярную массу и линейную структуру, подтвердили это предположение. Такие растворы с мизерной концентрацией полимера $10^{-4} - 10^{-5}$ моль создают на 30 – 40% меньшее сопротивление турбулентного течения, чем чистая вода. Такое снижение сопротивления по одной из гипотез связано с влиянием вязко-упругих свойств полимерных молекул на высокочастотные пульсации в турбулентном потоке. Таким же свойством обладает слизь, выделяемая рыбами на своей поверхности. Другие полимеры, не образующие в воде электролитов, стабилизируют структуру воды и увеличивают ее вязкость.

Некоторые микроорганизмы и водоросли, живущие как в пресной, так и в соленой воде, выделяют полисахариды, уменьшающие в два раза

силы сопротивления. Интересно, что синтезированные человеком подобные полисахариды теряли это свойство через несколько часов, а натуральные выделения микроорганизмов сохраняют эту способность в течение нескольких месяцев. К сожалению, в настоящее время данное направление техники по уменьшению сопротивления оказалось не экономичным, т.к. расход полимера слишком велик для практического использования и экологически не безопасен. По-видимому, это связано со способом передачи слизи в поток омывающей рыбу воды. В экспериментах раствор полимера выдавливался через небольшие отверстия на поверхности модели, при этом образовывалось облако полимера вокруг модели. У рыб выделение слизи происходит равномерно по всей поверхности, и образовывается очень тонкий пограничный слой.

Во-вторых, другой способ, который используют быстроплавающие водные животные для уменьшения гидродинамического сопротивления, получил название «бегущая волна». Сущность его заключена в следующем. При высоких скоростях в приграничном потоке возникают вихри, которые движутся относительно тела назад как ролики, катящиеся по телу. Тело как бы отталкивается от них, создавая дополнительную тягу. Однако эти вихри крайне неустойчивы и дробятся, создавая дополнительное сопротивление за счет турбулентных пульсаций. В этом случае сопротивление становится большим, чем при ламинарном течении. Для преодоления этого нежелательного эффекта на поверхности тела дельфина (рис. 5. 7) образуется бегущая волна складок кожи, скорость которой согласуется со скоростью относительного движения вихрей. Такое согласование скорости бегущей волны и вихрей не позволяет разрушаться вихрям раньше, чем они покинут поверхность тела.

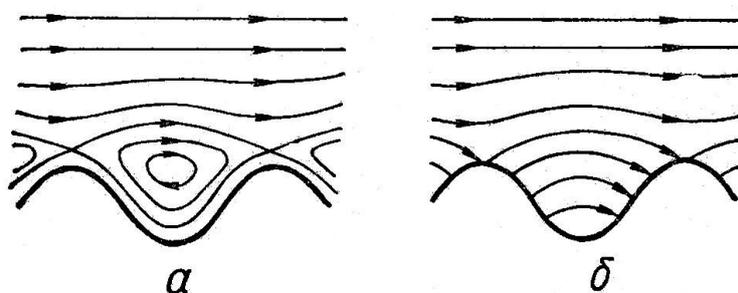


Рис. 5. 7. Течение вихрей вдоль бегущей волны складок кожи дельфина: а – в подвижной системе координат, б – в неподвижной системе координат

Встает вопрос, каким образом возникают бегущие волны на поверхности кожи, ведь мышцы дельфина в этом процессе явным образом не участвуют. Вероятно, бегущие волны возникают в режиме автоколебаний упругой кожи под действием потока омывающей ее воды. Простой пример аналогии – полощущийся флаг на ветру. Разница в том, что у дельфина скорость волны строго согласована со скоростью вихрей. Это достигается тем, что при изменении скорости движения подкожные мышцы регулируют упругие свойства кожи, а не создают бегущую волну (рис. 5. 8). У человека существует атавизм, напоминающий создание бегущей волны на коже – это «поеживание», когда по телу бегут «мурашки».

Такой механизм регуляции очень интересен для гидромеханики, т.к. неправильно подобранные упругие свойства кожи способны турбулизовать поток и резко увеличить сопротивление. Эффект бегущей волны, используемый животными для уменьшения сопротивления, объясняет в частности тот парадокс, что кожа у акул-парусников и меч-рыбы довольно шершавая. Ведь известно, что шероховатость увеличивает сопротивление ламинарному потоку. У животных эта шероховатость позволяет увеличить сцепление и удержать водяные вихри у поверхности кожи.

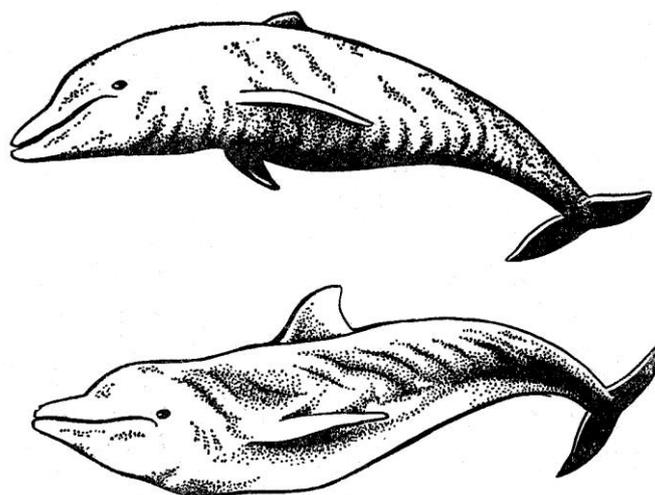


Рис. 5. 8. Бегущая волна складок на коже дельфина

В-третьих, кроме способа бегущей волны для уменьшения сопротивления некоторые виды животных, в частности дельфины, умеют ламинаризовать пограничный слой. Детальный анализ микроскопического разреза кожи дельфина, сделанный В.Е. Соколовым, показал, что структура кож-

144

ного покрова его очень тонкая и сложная. Характерным является мелкоячеистое строение верхнего слоя кожи, в котором имеются утопленные под поверхностью чувствительные сосочки, а также продольные упругие перегородки и заполненные жиром каналы (рис. 5. 9).

Кожный покров дельфина послужил бионическим прототипом для создания в США в 50-х годах 20-го века искусственных демпфирующих покрытий твердых тел в целях снижения сопротивления, получивших название «ламинфло» (покрытия разрабатывал М. Крамер, сотрудник печально известного фон Брауна – создателя ракеты ФАУ-2). Были испытаны два типа такого покрытия – со столбиками (рис. 5. 10) и с перегородками (рис. 5. 11). В них через бесшовный эластичный слой 1 резиновая диафрагма 2, будучи чувствительной к колебаниям давления, воспринимает турбулентные пульсации в пограничном слое и передает их вязкой демпфирующей жидкости, заполняющей промежутки 3 в конструкции покрытия. Нижний эластичный слой 5 примыкает к корпусу объекта 5. Этим достигается эффект, при котором энергия турбулентных пульсаций поглощается за счет упругих свойств резины и вязкости жидкости, что ведет к ламинаризации пограничного слоя.

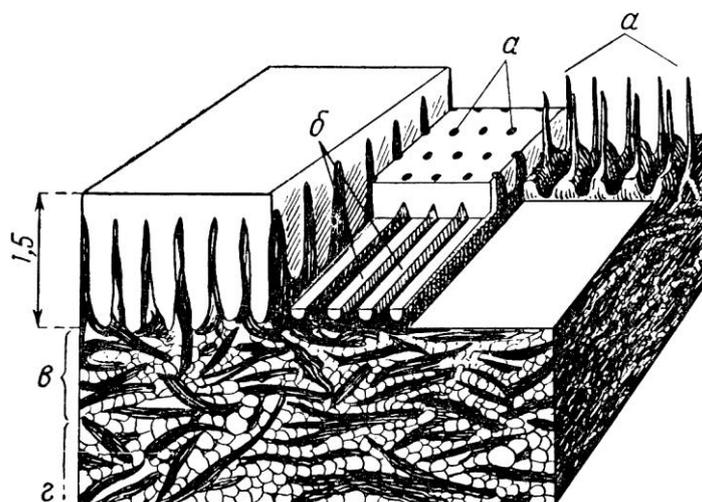


Рис. 5. 9. Поперечный разрез кожи дельфина: а – дермальные сосочки, б – эпидермальные перегородки с каналами, в – подсосочковый слой, г – подкожная жировая клетчатка

Такие искусственные покрытия, ламинаризирующие поток обтекаемой воды, являются довольно грубым приближением к коже дельфина,

однако они позволяют на треть снизить энергетические затраты. Недостатками таких покрытий являются зависимость эффективности от температуры воды, а также низкая прочность. Современные атомные подводные лодки в России также имеют аналогичные покрытия, которые служат не только для снижения турбулентности, но и для акустической изоляции.

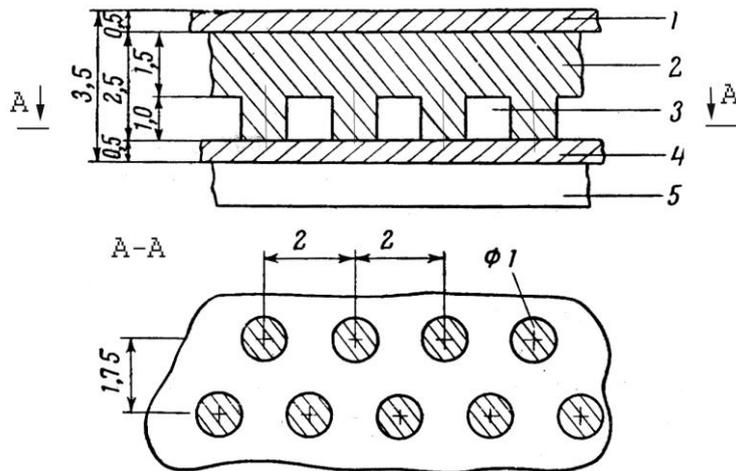


Рис. 5. 10. Поперечный и продольный разрезы искусственной кожи «ламинфло» со столбиками

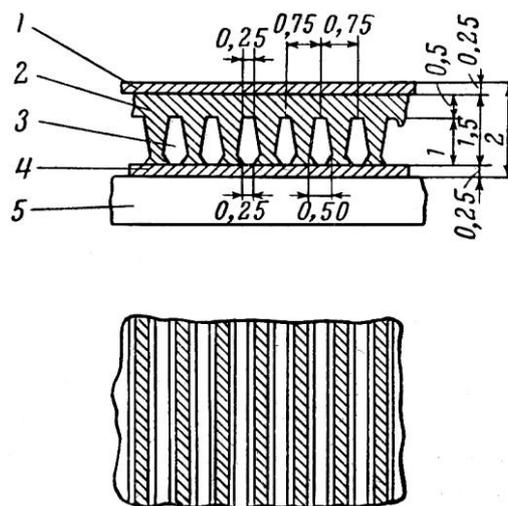


Рис. 5. 11. Поперечный и продольный разрезы искусственной кожи «ламинфло» с перегородками

Австралийский олимпийский чемпион по плаванию Ян Торп использовал плотно облегающий комбинезон из эластичного полимера для уменьшения сопротивления, помогший установить мировые рекорды.

Тропическая рыба кузовок *Diodon orbicularis* (рис. 5. 12) вдохновила дизайнеров компании Mercedes-Benz на создание концепта Bionic.



Рис. 5. 12. Рыба кузовок – бионический прототип автомобиля

На разработанной модели кузова автомобиля был получен чрезвычайно низкий коэффициент лобового сопротивления $c_x = 0,019$ (рис. 5. 13).

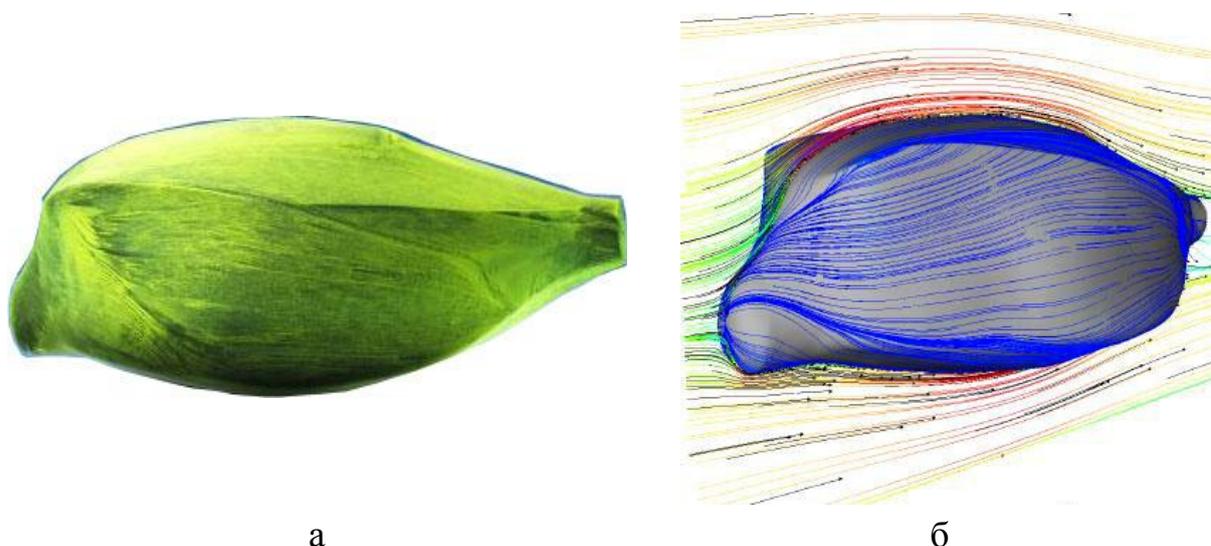


Рис. 5. 13. Гидродинамическая модель кузова автомобиля: а – макет, б– компьютерная имитация обдува макета потоком воздуха

Форма кузова была создана на основе природных принципов костеобразования этой рыбы, что позволило увеличить жесткость кузова и снизить его вес (рис. 5. 14). Автомобиль построен на базе купе А-класса. Он оснащается 140-сильным дизелем, который расходует всего 4,3 л на 100 км. Ав-

томобиль разгоняется до 100 км/ч за 8,5 сек, а его максимальная скорость - 190 км/ч. С помощью каталитического нейтрализатора Selective Catalytic Reduction удалось снизить токсичность выхлопных газов на 80%.



Рис. 5. 14. Концепт автомобиля Bionic-Mercedes: а – компьютерная модель несущей системы, б – внешний вид

Кроме биологических способов уменьшения сопротивления воды, разработчиков транспортных средств интересуют и способы передвижения животных в воде. Этот интерес связан в первую очередь с бесшумностью и экономичностью плавания животных.

Среди различных типов движителей, распространенных у водных животных, выделяют три характерных:

- угревидный;
- машущий;
- гидрореактивный.

Представителями угревидного типа являются угри, мурены, головастики, тритоны. Их движение напоминает движение змеи (рис. 5. 15). В подвижной системе координат, связанной с головой животного, изгибаемая бегущая волна распространяется от головы к хвосту.

Силы взаимодействия со средой имеют инерционный и вязкий характер. Инерционные силы при полной периодичности движения тела в среднем за период не совершают работу. Движение вперед достигается

- за счет нарастающей от головы к хвосту амплитуды бегущей изгибаемой волны;
- благодаря нарастающей скорости волнообразного движения;
- за счет обоих факторов.

Такой тип движения характерен для рыб, имеющих длинное гибкое тело. Указанный механизм движения выгоден при движении рывками, когда нужно поймать добычу или преодолеть бурный поток воды.

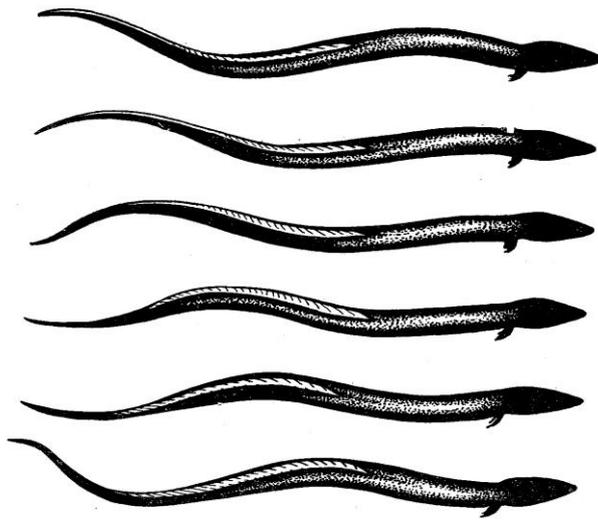


Рис. 5. 15. Кинограмма движений угря

Угревидный тип движения применяется рыбами не только при движении самого туловища, но и при помощи угреобразного движения ленточными плавниками, расположенными вдоль всего тела (рис. 5. 16). Такой тип движителя имеет рыба-нож. Он может создать большое ускорение телу, однако, энергетические затраты велики, поэтому скорость движения этой рыбы высока только на небольших дистанциях.

Другая составляющая тяги угревидного движителя обязана вязкости воды, за счет чего возникают вихри в хвостовой части тела. Однако, из-за малой жесткости ленточных плавников вихри незначительны.

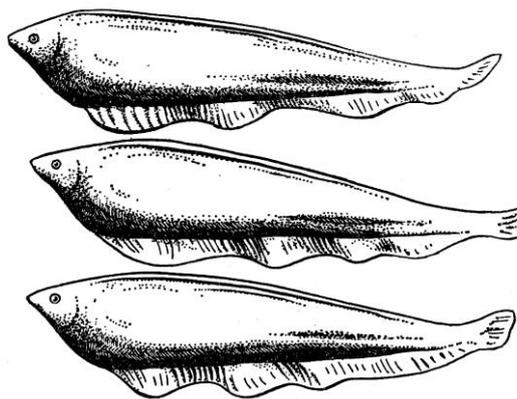


Рис. 5. 16. Кинограмма движений плавников рыбы-ножа

Эти силы более характерны для движителя, который называют *машуцим*. Типичными представителями животных с таким типом движителя

являются китообразные, тунцы, акулы, рыба-меч. У этих организмов отличия состоят лишь в том, что у одних движение осуществляется в вертикальной плоскости, у других – в горизонтальной. Отличие связано с тем, что у водных млекопитающих, дышащих воздухом, изгибы в вертикальной плоскости дает некоторые преимущества при плавании у поверхности воды.

При поперечных колебаниях хвоста или плавников в вязкой жидкости появляется циркуляция жидкости вокруг них. С концов хвоста или плавников сходят вихревые потоки, которые сносятся назад.

Машущий движитель обладает видимыми преимуществами перед пропеллерным. Ометаемая площадь таких движителей велика и превосходит максимальную площадь поперечного сечения животного. Исследования показали, что машущий движитель обладает тягой в 3...4 раза выше, чем роторный (винтовой) движитель при равных площади и скорости движения рабочих частей систем. Это обстоятельство позволяет уменьшить частоту колебаний хвоста и, следовательно, уменьшить вязкие потери. Столь большой эффект объясняется тем, что в нестационарных условиях он допускает примерно в два раза больший угол атаки, при котором сохраняется безотрывное обтекание. Вторая причина состоит в том, что при обратном движении хвост опирается на вихрь, созданный в предыдущий момент. Данные обстоятельства дают и еще один положительный эффект – работа машущего движителя существенно менее шумная, чем роторного.

В конструктивном отношении машущий движитель значительно сложнее роторного (винтового). Кроме того, машущий движитель динамически неуравновешен, что приводит к рысканию всего тела. Работа движителя сопровождается большими динамическими нагрузками. По этой причине машущий движитель в чистом виде может найти применение на сравнительно небольших объектах. Ученые из университета города Essex (Англия) создали макет подводного робота с габаритами 500x150x120 мм и массой 3,5 кг, которая может плавать на глубине до 10 м. Макет имеет машущий движитель хвоста с четырьмя степенями подвижности (рис. 5. 17 и рис. 5. 18).

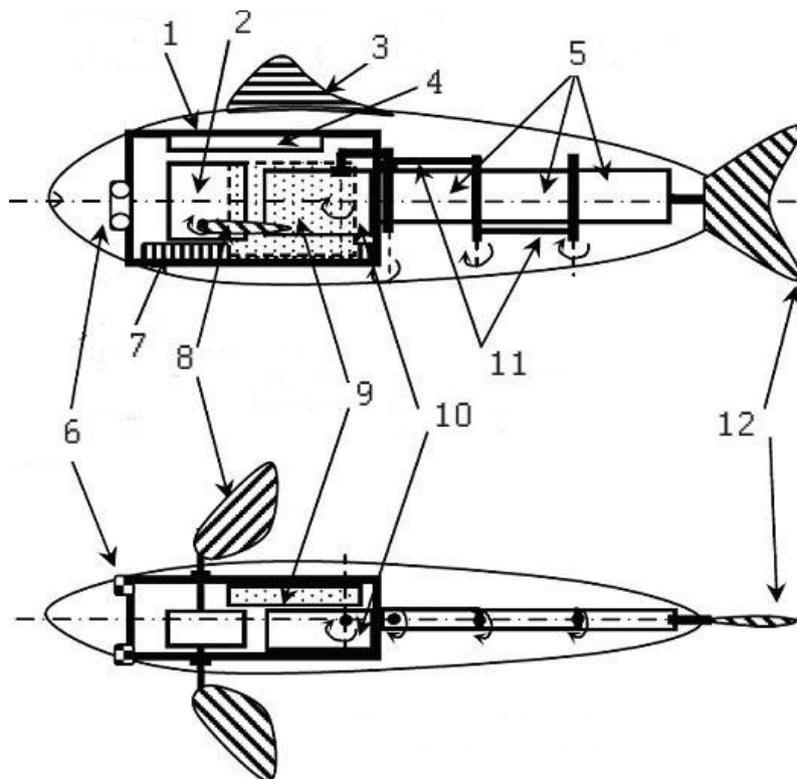


Рис. 5. 17. Схема макета подводного робота с машущим движителем: 1 – водонепроницаемый отсек, мотор-редуктор привода боковых плавников, 3 – спинной плавник, 4 – гироскопы и радиопередатчик, 5 – упругая пластина, 6 – датчики давления и дистанции, 7 – аккумулятор, 8 – боковые плавники, 9 – контроллер, 10 – мотор-редуктор привода хвостового плавника, 11 – рычажные передачи, 12 – хвостовой плавник

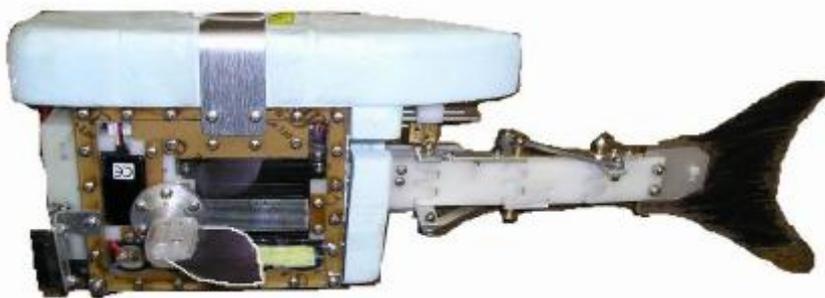


Рис. 5. 18. Действующий макет подводного робота с машущим движителем

Для маломерных судов (лодок) вместо весел в российском патенте № 2109655 был предложен машущий движитель «рыбий хвост» (рис. 5. 19). Движитель состоит из гибкой оболочки 1 («рыбий хвост»), полости 2, привода, выполненного в виде последовательно соединенных S-образного патрубка 3, цилиндра 7, который оканчивается с обоих торцов

закрытыми с внешних торцов сильфонами 8, к цилиндру прикреплен румпель 10. S-образный патрубок 3 гидравлически связывает полость 2 и цилиндр 7. Патрубок проходит через подшипник 4, который с помощью кронштейна 5 крепится на транце 6. На транце крепятся также ограничители 9 перемещения цилиндра.

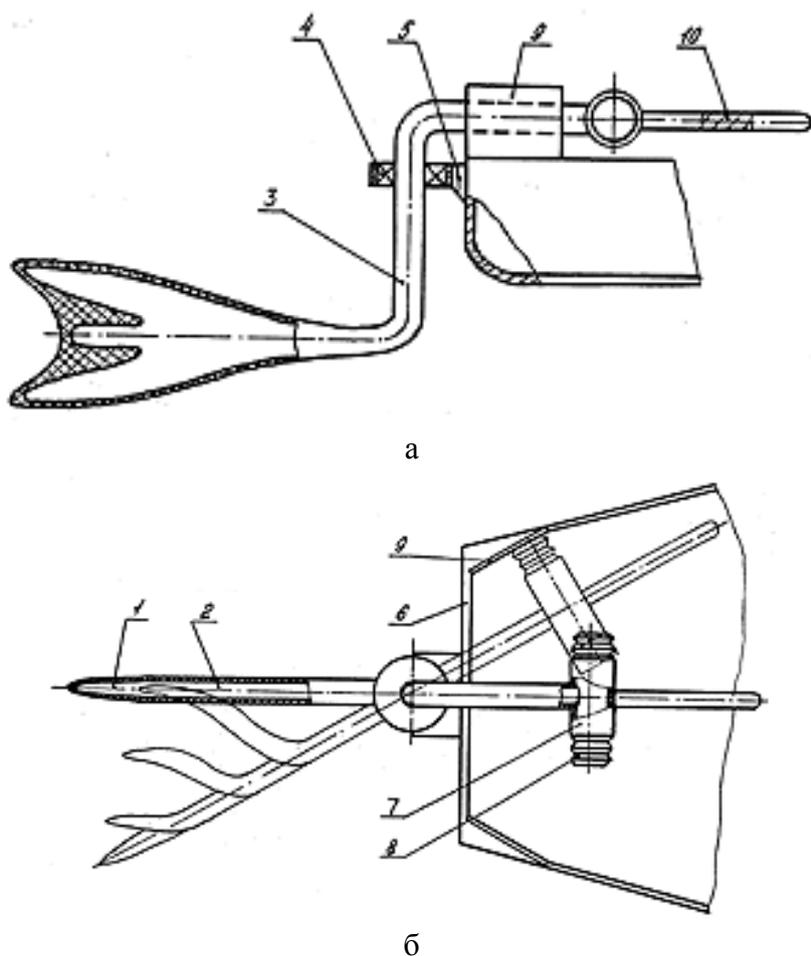


Рис. 5. 19. Лодочный машущий движитель «рыбий хвост»: а – вид сбоку, б – вид сверху

Движение маломерного судна осуществляется следующим образом. Перемещая с помощью румпеля 10 цилиндр 7 до упора сильфоном 8 в ограничитель 9, тем самым изгибают гибкую оболочку с полостью "рыбий хвост", заполненной жидкостью. В результате изгиба полость уменьшится в объеме, и часть жидкости переместится в цилиндр, заполняя объем цилиндра и сильфонов. Затем в крайнем положении движителя, сжимая сильфон об ограничитель, повышают давление жидкости в цилиндре, а,

значит, и в сообщающейся с ним полости плавника. Повышение давления заставляет полость принять первоначальный объем и распрямить оболочку. При этом плавник будет отталкиваться от внешней среды, сообщая судну момент движения. Затем перемещают цилиндр до противоположного ограничителя. Как только, отойдя от упора, цилиндр начнет перемещаться, на сильфон перестанет действовать сжимающая сила, он увеличит свой объем, давление в полости упадет, и оболочка, вынужденная перемещаться, изогнется из-за сопротивления среды перемещению. При достижении ограничителя процесс выпрямления плавника повторится.

Для крупных надводных и подводных судов машущий движитель в том виде, в котором он существует у животных, в настоящее время непригоден. Человеку нет нужды слепо копировать биологические объекты. Анализ машущего движителя может помочь создать движитель, более удобный для изготовления и пригодный для различных судов.

Возможно соединение достоинств машущего и роторного движителя. Если в роторном движителе добиться того, что при каждом повороте можно переключать лопасти под таким углом атаки, чтобы реализовывался режим создания вихрей как у машущего движителя, то становится возможным избежать недостатков роторного движителя, объединив достоинства обоих типов движителей.

Гидрореактивный движитель, которым пользуется головоногие моллюски (кальмары, каракатицы, осьминоги), весьма специфичны и являются объектом исследования бионики. Размеры этих животных изменяются в широких пределах, от долей метра до 20 метров в длину. Тело у них мягкое, но упругое и может существенно деформироваться.

Наибольший интерес представляют кальмары. Они имеют хорошо обтекаемую форму, развивают скорость до 15 м/с. Они перемещаются хвостом вперед, а голова и десять ног-щупалец с присосками дополняют кормовую часть тела (рис. 5. 20).

При движении щупальца плотно складываются, они снабжены продольными киями, которые образуют кормовое оперение корпуса. Кальмар располагает двумя принципиально отличными движителями. При медленном движении он пользуется большим ромбовидным плавником, который периодически изгибается в виде бегущей волны вдоль корпуса. Для быст-

рого движения кальмар применяет реактивный принцип движения. Специфика состоит в том, что животное, выталкивая воду через профилированное поворотное сопло, одновременно уменьшает свою массу, что приводит к значительному дополнительному увеличению скорости, однако затем при заполнении мускульного мешка (мантийная полость) водой происходит замедление движения. Всасывание и выброс воды у кальмара чередуется с неуловимой быстротой. По-видимому, отсос воды осуществляется из пограничного слоя, что предотвращает срыв потока при нестационарном режиме обтекания.

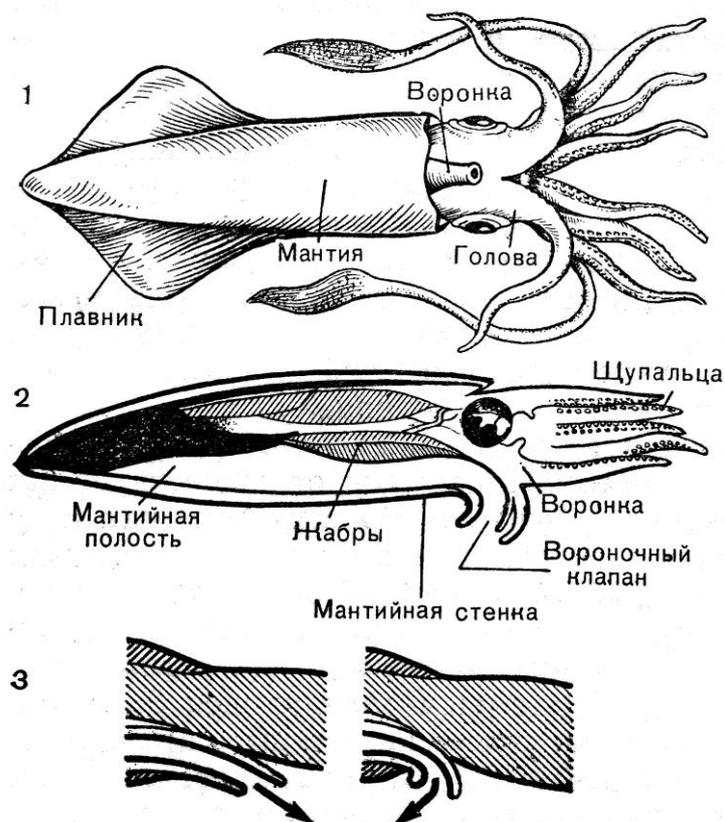


Рис. 5. 20. Строение кальмара: 1 – внешний вид, 2 – строение мускульного мешка, 3– поворотное сопло

Отметим высокую надежность гидрореактивного движителя кальмара. Упругая, но податливая ткань мантии очень прочна и состоит из нескольких слоев перекрестных мышц, волокна которых направлены вдоль и поперек тела. Нервные волокна, возбуждающие сокращение мышц, име-

ет повышенную проводимость и из-за этого они примерно в 50 раз толще, чем у большинства животных.

В технике широко используется гидрореактивный метод движения: водометные движители являются наиболее безопасным приводом гидроциклов (водных мотоциклов), так как отсутствие гребного винта предотвращает травмы людей, находящихся рядом с водным мотоциклом (рис. 5. 21). Однако для водомета используют ротационный насос (импеллер).

Коленчатый вал двигателя соединен с приводным валом, который вращает импеллер. Импеллер точно центрирован в корпусе, через который проходит вода, засасываемая из-под гидроцикла. Затем вода попадает в сужающееся сопло. При этом поток воды ускоряется, обеспечивая силу тяги и двигая гидроцикл.



Рис. 5. 21. Гидроцикл с водометным движителем

Нажатие на рычаг дроссельной заслонки приводит к увеличению частоты вращения коленвала двигателя, и, следовательно, к ускорению гидроцикла. Для движения гидроцикла вперед рычаг переключения передач должен находиться в положении передней передачи. Движения руля передаются на сопло водомета, которое контролирует направление движения гидроцикла. Повернув руль направо, гидроцикл повернет направо и наоборот. Для прохождения поворота необходимо нажать на рычаг акселератора.

Можно отметить, что поворотное сопло используется также в сверхзвуковых истребителях четвертого поколения для изменения направления вектора тяги. В России производится - высокотемпературный форсажный двигатель АЛ-31Ф модульной конструкции со смешением потоков за турбиной. Обладает высокой степенью надежности, в том числе при работе в

экстремальных условиях по уровню неравномерности и пульсаций на входе (рис. 5. 22).



Рис. 5. 22. Поворотное сопло реактивного двигателя самолета

Двигатель АЛ-31Ф устанавливается на истребители Су-27 и его модификации, палубные истребители Су-33, многоцелевые истребители Су-30МК, фронтовые бомбардировщики Су-34. Характерная конструктивная особенность АЛ-31ФП – поворотное осесимметричное сопло с отклоняемым в вертикальной плоскости вектором тяги в диапазоне углов $\pm 15^\circ$, обеспечивающее режим сверхманевренности самолета.

5.4. ДВИЖЕНИЕ В ВОЗДУХЕ

В отличие от плавания полету птиц и насекомых посвящено много исследований. Однако в этой области также нет полного понимания принципов их экономичности. Для сравнения энергетических затрат различных по мощности и размерам животных и машин оценивают их грузоподъемность следующим образом. Пересчитывают грузоподъемность объекта в случае, если бы он имел мощность в одну лошадиную силу (одна лошадиная сила равна 0,74 кВт). Для этого составляется пропорция:

масса объекта – мощность объекта,

эквивалентная масса – мощность, равная одной лошадиной силе.

Таким образом, птицы транспортируют эквивалентную массу 120 кг, самолет – 20 кг, вертолет – 4 кг. Однако по скорости летательные аппараты значительно обошли птиц.

В процессе эволюции вырабатывались различные виды полета в зависимости от величины животного и его жизненных потребностей. Все это привело к чрезвычайному многообразию форм полета в природе.

Можно выделить основные типы полета: *планирующий* (парение), *машущий* полет и комбинированный - *полет над экраном*.

Рассмотрим основные принципы действия привода крыльев насекомых и птиц. Их объединяет то, что имеется шарнирное соединение основания крыльев с корпусом аэриобионта. Такое конструктивное решение позволяет совершать махи крыльев с амплитудами более 45° . Шарниры при этом имеют, как правило, две степени свободы. Общим является также то, что крылья приводятся в действие мышцами-антагонистами, т.е. одни мышцы двигают крылья вверх, другие – вниз (рис. 5. 23 , 5. 24, 5. 25).

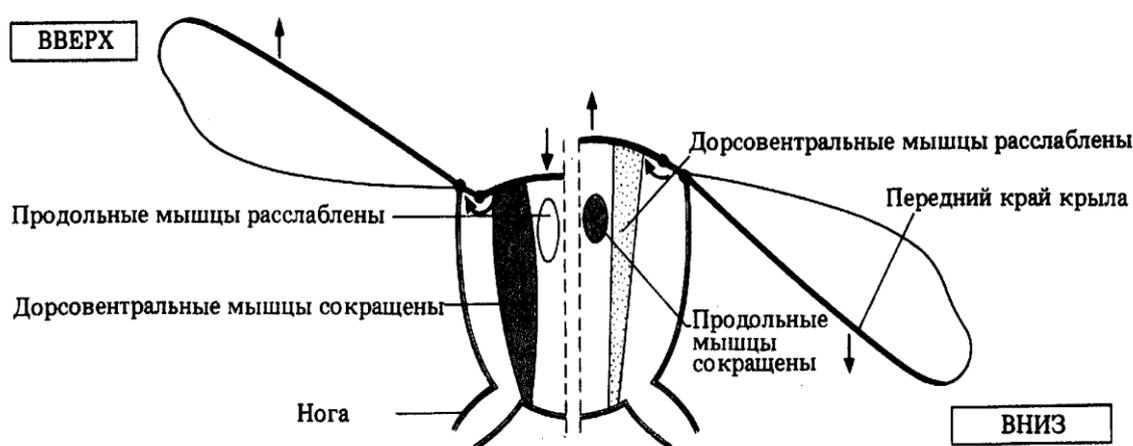


Рис. 5. 23. Аппарат привода крыльев малых насекомых: слева – при движении крыла вверх, справа – при движении крыла вниз

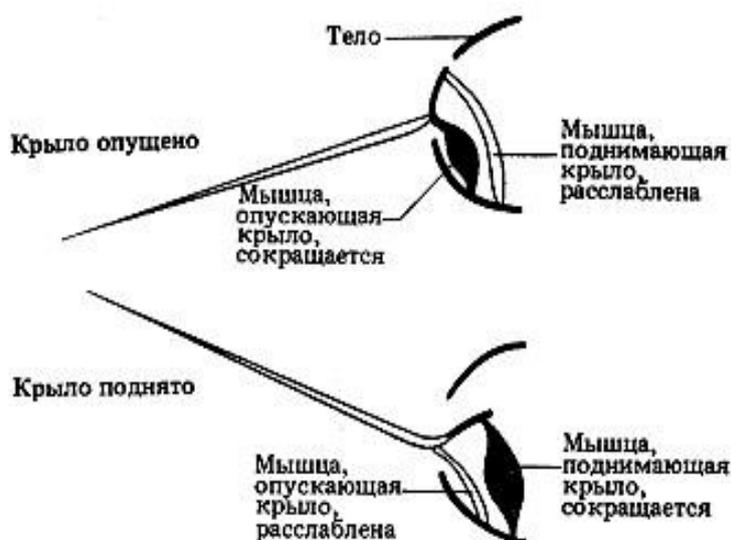


Рис. 5. 24. Аппарат привода крыльев стрекоз и бабочек: сверху – крыло опущено, снизу – крыло поднято

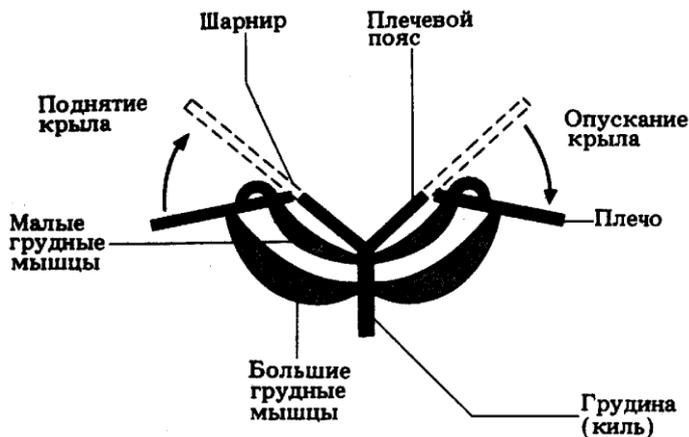


Рис. 5. 25. Аппарат привода крыльев голубя

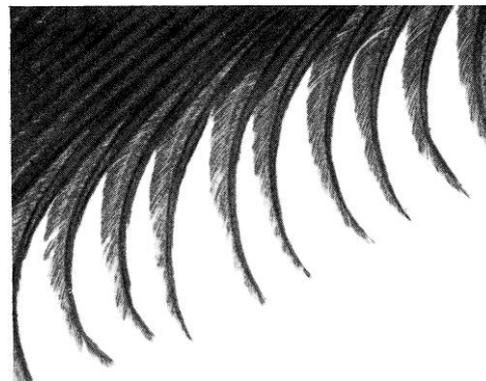


Рис. 5. 26. Маховое перо мохноногого сыча

Планирующий полет. На разных этапах перемещения в воздухе птицы и крупные насекомые пользуются планированием. Кроме того, существуют животные, которые пользуются исключительно планирующим полетом. Летучие рыбы могут при помощи хвостового плавника совершать планирующие полеты со скоростью до 18 м/с на расстояние 20-40 м. Летящие лягушки используют перепонки на конечностях для создания тяги и планирования на 20 м. Некоторые сумчатые, белки-летяги хорошо приспособлены к планирующему полету. Птицы в отличие от перечисленных животных могут, летая на неподвижных крыльях, набирать высоту за счет восходящих потоков воздуха. Крупные птицы (орлы, журавли) имеют многощелевые крылья (рис. 5. 26), которые обладают большим коэффициентом подъемной силы ($c_y = 3,9$), чем не разрезные ($c_y = 1,5$). Такие крылья способствуют также бесшумности полета.

Большая подъемная сила позволяет этим птицам использовать слабые восходящие потоки воздуха, возникающие из-за неравномерности прогрева земли (это характерно только для дневного полета). Такое парение называют *статическим*. При *динамическом* парении птицы используют турбулентное движение воздуха, неравномерность соседних потоков, что часто встречается над волнующейся поверхностью моря. Парящие птицы, использующие динамическое парение, имеют узкие длинные крылья. Эти птицы то резко спускаются к поверхности воды за добычей, то подбрасываются вверх восходящими над волнами турбулентными потоками.

ми воздуха. Чайки, буревестники и другие морские птицы имеют отличную реакцию, прекрасно сохраняют устойчивость *полета и равновесие*.

Машущий полет. Машущий полет насекомых представляет собой, по-видимому, наиболее древнюю форму полета. По этой причине встречается большое разнообразие типов машущих полетов у насекомых. Частота взмахов насекомых варьируется от 5 Гц (крупные бабочки) до 1000 Гц. Существенно варьируются форма траектории, описываемая крылом, участие задних и передних крыльев в полете. Многие насекомые могут зависать в воздухе, двигаться вперед, назад, вбок, напоминая манерой движения вертолет. Однако, крылья насекомых, в отличие от лопастей вертолета, совершают не вращательные, а колебательные движения (рис. 5. 27).

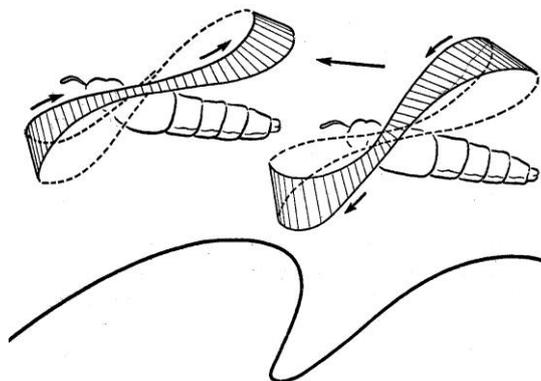


Рис. 5. 27. Траектории движения конца крыльев пчелы в подвижной и неподвижной системах координат

У рукокрылых млекопитающих (летучие мыши) конец крыла описывает овал, который разворачивается в синусоиду в полете. Траектории точек крыльев (рис. 5. 28) снимались с частотой 10 Гц, частота взмахов – 12 Гц, скорость полета – 2,4 м/с.

Наибольшего совершенства полета среди позвоночных достигли птицы. По скорости, высоте, продолжительности полета птицы не имеют себе равных в животном мире. Поэтому с бионической точки зрения их полет представляет значительный интерес.

Машущий полет можно разделить на следующие виды:

- горизонтальный машущий полет;
- трепещущий (для зависания).

При горизонтальном полете птицы эффективно используют подъемную силу, которая формируется за счет формы крыла и перьев (рис. 5. 29).

Стержень махового пера утончается в направлении к концу, и на конце практически сходит на нет. Поэтому, чем ближе к концу, тем больше гибкость махового пера. Это свойство приводит к тому, что из-за сопротивления воздуха маховым движениям, концы маховых перьев изгибаются в сторону, противоположную направлению маха. Задние части крыльев, составленные из концов маховых перьев, работают как гибкие закрылки –

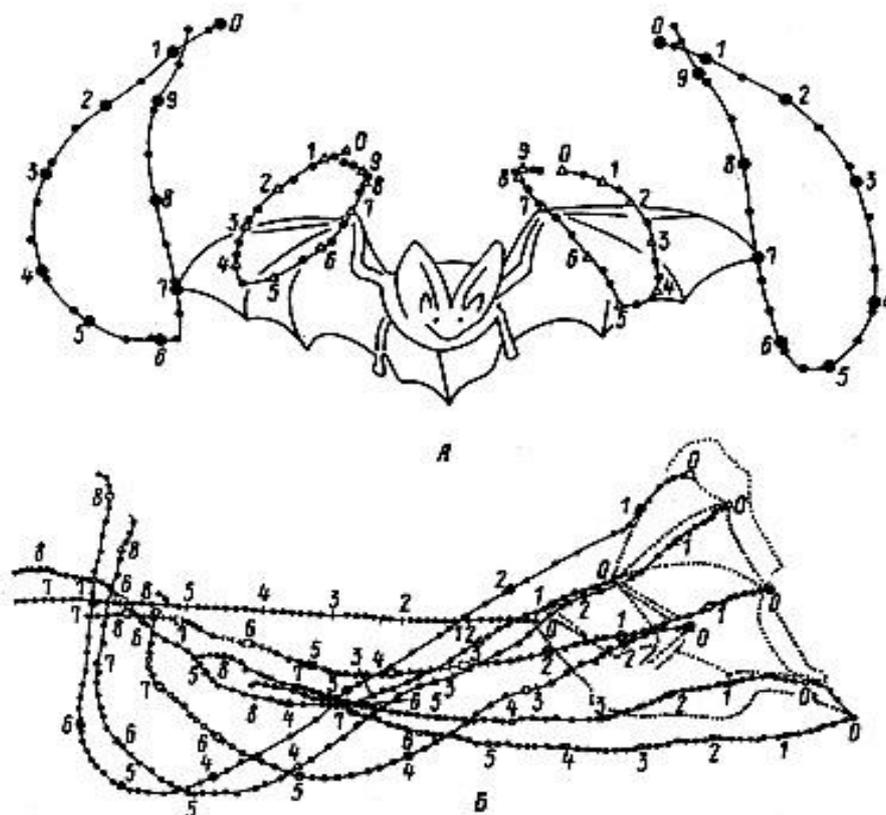


Рис. 5. 28. Траектории движения характерных точек движения крыльев летучей мыши: а – поперечная проекция траекторий, б – продольная проекция траекторий

которые, при махе крыльями вниз, пассивно отгибаются вверх, и наоборот. При этом, как можно видеть, именно гибкими закрылками машущие крылья “отмахивают” воздух назад. Вероятно, это порождает реактивную силу, толкающую птицу вперед. Крылья птиц отмахивают воздух по хорошо известному принципу гибкого дамского веера. Птица, отталкивая назад потоки воздуха, создает подъемную силу.

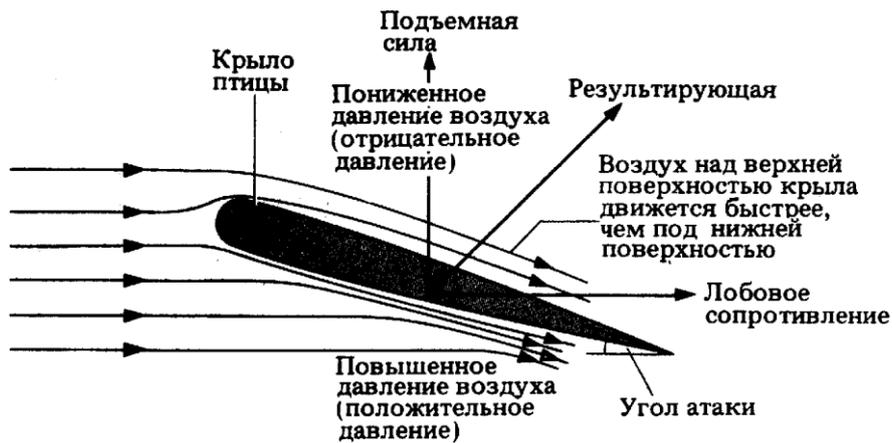


Рис. 5. 29. Появление подъемной силы при горизонтальном полете

При движении крыльев вниз перья смыкаются, и крыло становится непроницаемой для воздуха пластиной (рис. 5. 30 А). При движении вверх между перьями образуются зазоры и воздух проходит через них без большого сопротивления (рис. 5. 30 Б). Это позволяет получить подъемную силу даже при гармоничном движении крыльев вверх-вниз.



Рис. 5. 30. Работа крыльев птицы в машущем полете

Трепещущий (или вибрационный) полет используется в основном малыми птицами для зависания на одном месте (рис. 5. 31). Миниатюрные птицы могут не только зависать, но и отлетать задним ходом или переверчиваться в воздухе. Частота взмахов достигает 60 Гц. Недостатком такого типа полета является большой расход энергии из-за больших амплитуд скоростей, что влечет увеличение потерь на аэродинамическое сопротивление.



Рис. 5. 31. Колибри в трепещущем полете

Полет над экраном. Этот вид полета используется крупными птицами при движении низко над поверхностью земли или воды, т.е. над экраном. Он по своей сущности близок к планирующему, однако, для поддержания необходимой минимальной высоты над экраном птицы чередуют его с машущим. При таком полете с неподвижными крыльями три фактора приводят к улучшению аэродинамического качества.

- Во-первых, когда крыло движется над экраном с положительным углом атаки, оно как бы подминает под себя воздух, создавая под крылом область повышенного давления, своего рода воздушную подушку. Активные взмахи, чередуясь с планированием, создают еще более высокое давление под крылом.

- Во-вторых, вблизи экрана частично разрушаются вихри, возникающие на концах крыльев и ухудшающие аэродинамические качества крыльев.

- В-третьих, благодаря близости экрана уменьшается угол скоса встречного потока воздуха, отбрасываемого крылом вниз. Экран как бы отражает скошенный поток, а уменьшение угла скоса ведет к уменьшению лобового сопротивления.

Скоростная киносъемка показала, что скорость полета над поверхностью воды заметно возрастает при уменьшении амплитуды взмахов, при этом нижние точки крыльев почти касаются воды, но не задевают ее даже при волнах 20 – 30 см высотой. Очевидно, воздушная подушка настолько уплотняется, что эластичные крылья пружинят, отталкиваемые возрастающим давлением. Полет над экраном возможен в штиль, при встречном и боковом ветре, но никогда – при попутном. Для поворота птицам прихо-

дится подниматься несколько вверх, а потом опускаться в экранирующий полет.

Основные параметры полетов насекомых и птиц следующие. Бабочка летит со скоростью 8 км/ч, майский жук – 11 км/ч, шмель – 18 км/ч, пчелы – 80 км/ч. Однако субъективная скорость у них высока: шмель покрывает в минуту расстояние, равное 10000 длин своего тела, этот параметр выше, чем у любого самолета. Большинство птиц передвигается со скоростью 30 – 50 км/ч, стрижи 100 – 160 км/ч. При пикировании сокол сапсан доводит скорость до 300 км/ч. Птицы могут подниматься в высоту до 6 км. По выносливости птицы имеют неоспоримый приоритет, в воздухе они без посадки могут находиться до 40 ч и совершать беспосадочный полет длиной в тысячи километров.

Моделирование полета. В настоящее время получает развитие перспективное направление в авиации – экранопланы. Они несравненно экономичнее судов на воздушной подушке и вертолетов, т.к. последние должны иметь тягу, равную весу вертолета, а экраноплан – только 30% веса машины. У них мощность расходуется на движение вперед, а подъемную силу создает крыло над экраном. Птицы подсказывают конструкторам методы подкачки воздуха под крыло, а также методы повышения маневренности экраноплана.



Рис. 5. 32. Экраноплан

Интересна идея частичного моделирования посадки птиц. Самолет с дельтовидным крылом садится, как и птица, без пробежки, скорость гасится за счет поворота сопел, размещенных по краям крыльев.

Возможно, перспективным окажется уменьшение сопротивления трения самолета путем моделирования тонкой структуры поверхности перьевого покрова птиц. Бороздчатая поверхность перьев организует по-

граничный слой, ламинизируя его, и препятствует образованию турбулентности.

Планирующий полет (парение) в настоящее время широко используется в дельтапланеризме.

Махолеты пытались воплотить еще в средние века, наиболее известная конструкция предложена Леонардо да Винчи (рис. 5. 33). Джеймс Делориер (Канада) построил махолет по его эскизам в 1996 году (рис. 5. 34), но за десять лет доработок научить его летать так и не удалось.

Таким образом все попытки поднять в воздух человека не увенчались успехом, так как энергетические затраты оказались для человека слишком большие. Кроме доисторических животных других летающих субъектов с массой более 30 кг в живой природе не существовало.

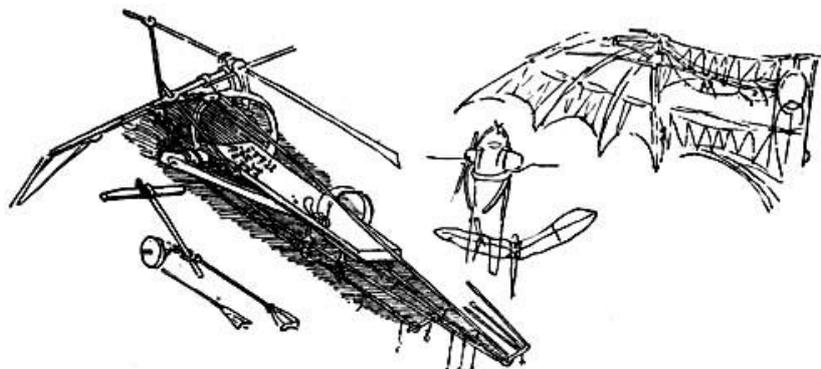


Рис. 5. 33. Эскизы махолетов Леонардо да Винчи



Рис. 5. 34. Макет махолета Делориера

В настоящее время в ведущих научных центрах развитых стран интенсивно проводятся научно-исследовательские работы по созданию миниатюрных и микромеханических летательных аппаратов (МЛА), которые планируются использовать для систем мониторинга и в качестве специальных средств. В миниатюрных летательных аппаратах (массой от 0,5 кг до 10 кг) используют традиционные пропеллерные двигатели внутреннего сгорания и электродвигатели. Для МЛА (массой от 1 г до 50 г) такой путь оказался бесперспективным в основном из-за шумности, поэтому основное

направление при разработке МЛА – создание движителей на принципе машущего полета. В качестве живых биологических прототипов – аэробиев исследуются крупные насекомые, летучие мыши и мелкие птицы (таблица 5.1).

Насекомые являются наиболее древними организмами, применяющими такой способ полета. Сохранившиеся останки древних насекомых, живших миллионы лет назад, почти не отличаются от современных насекомых. Эволюция и естественный отбор за этот период не принесли каких-либо существенных изменений в их конструктивные системы за этот период. Поэтому можно сделать вывод, что летательный аппарат насекомых совершенен еще с тех времен. Очевидно, что и траектории движения элементов крыльев также неизменны и совершенны.

Таблица 5.1

Основные параметры летных качеств малых аэробиев

	Масса, г	Частота взмахов, Гц	Гориз. скорость, м/с	Размах крыльев, мм	Удел. мощность, Вт/кг
Жуки	1–10	30–100	4–5	35–170	75–116
Колибри	2–20	15–80	20–27	30–150	210–230
Летучие мыши	4–1380	8–12	4–7	200–1000	54–160

В качестве приводов МЛА разработчики и исследователи применяют микроэлектродвигатели и биморфные пьезоэлектрические актюаторы.

Наиболее успешным на сегодня является опыт создания МЛА с микроэлектродвигателями. В таком аппарате электродвигатель через редуктор передает движение на кривошипно-шатунный механизм, на выходных звене которого закрепляются крылья (рис. 5. 35).

Использование биморфных пьезоактюаторов перспективно по той причине, что качательный характер движения крыльев согласуется с колебательным режимом актюатора. Обеспечение нужного угла взмахов крыльев можно осуществить за счет резонанса упругой колебательной системы «крыло-пьезоактюатор». Самой актуальной задачей является получение подъемной силы, превышающей вес снаряженного МЛА, при помощи машущего движения крыльев. На этом этапе основные проблемы связаны,

во-первых, с эффективной передачей энергии низкочастотных колебаний (порядка 10 – 30 Гц) от пьезоэлектрического актюатора на жесткие элементы крыльев, во-вторых, – с конструкциями шарниров и крыльев. Созданы летающие микророботы массой менее 1 г, приводом для них служит биморфный пьезоэлектрический преобразователь (рис. 5. 36).



Рис. 5. 35. МЛА с приводом от микроэлектродвигателя

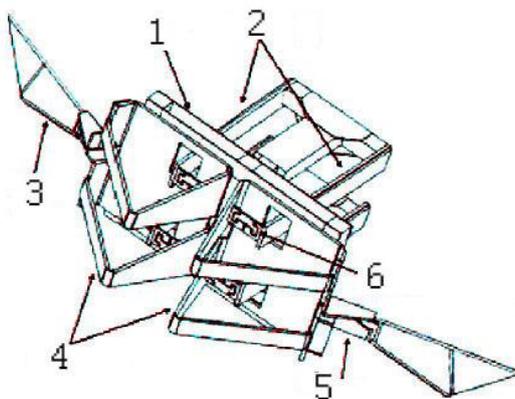


Рис. 5. 36. МЛА с пьезоприводами: 1 – рама, 2 – пьезоэлектрические актюаторы, 3 – крыло, 4 – четырехзвенники, 5 – дифференциальный механизм, 6 – тяга

Очевидно, что одним из важнейших элементов конструкции МЛА являются микромеханические шарнирные соединения каркаса крыльев с корпусом МЛА. Сферический шарнир должен обеспечивать три вращательные степени свободы крыла относительно корпуса. Основные требо-

166

вания к конструкции микрошарнира, исходя из биологических аналогов, сводятся к следующему: обеспечение угла качания в двух плоскостях не менее $\pm 60^\circ$, минимальные силы сопротивления (моменты) в шарнире, минимальные люфты (менее 1 мкм) в шарнире.

На кафедре «Автоматы» СПбГПУ были созданы макеты МЛА с биморфными пьезоактюаторами, для которых были изготовлены сферические микрошарниры, объединенные одним корпусом (рис. 5.37, фото сделано с экрана монитора телевизионного комплекса микроскопии). Это позволяет уменьшить вес конструкции.

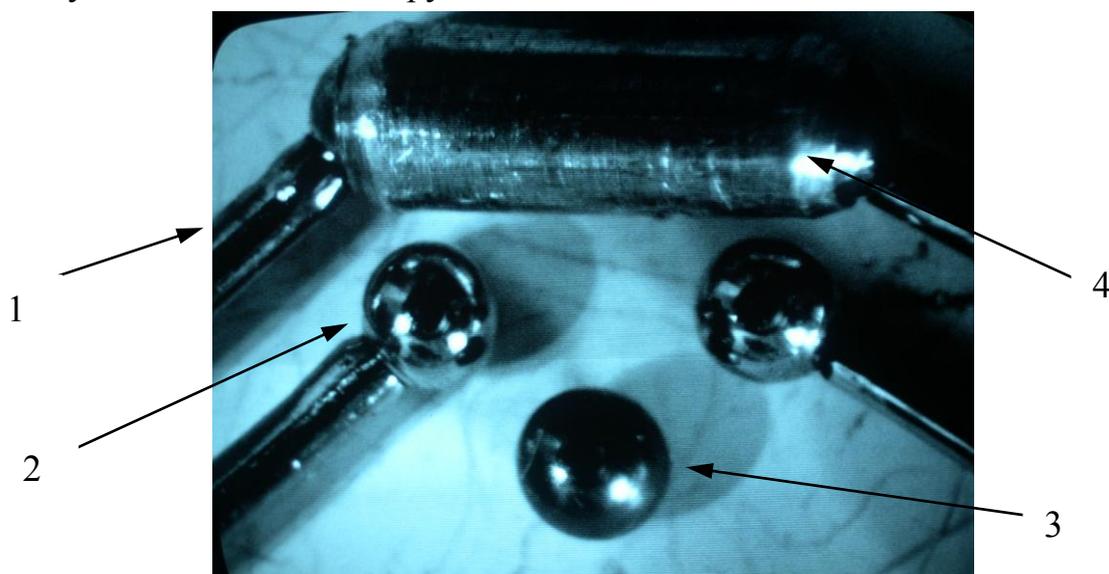


Рис. 5. 37. Сферические микрошарниры и их элементы под микроскопом

Микромеханическая система имеет два стальных рычага 1 диаметром $\varnothing 0,7$ мм со сферическими головками 2 диаметром $\varnothing 1,5$ мм. В качестве головок были взяты шарики 3 от шарикоподшипников. Латунный корпус 4 имеет размеры $\varnothing 1,8 \times 5$ мм. Шарниры имеют углы качания $\pm 45^\circ$ в двух направлениях. Люфты в шарнирах – не более 1 мкм, моменты сопротивления – не более $2 \cdot 10^{-4}$ Нм. Шарики прикреплены к рычагам при помощи электроконтактной сварки, а установлены в корпусе при помощи обжима.

Для создания качательных движений рычага крыла O_1D (рис. 5.38) биморфный пьезокерамический актюатор AB связан с ним при помощи нити BC , возврат осуществляется при помощи пружины растяжения K_1 . Для разгрузки БПА служит пружина сжатия K_2 , которая не позволяет прогибаться биморфу AB при снятом электрическом напряжении. Теоретически

амплитуда угловых колебаний O_1D тем выше, чем меньше отрезок O_1C . Однако, как показали испытания, при $O_1C \leq 5$ мм резко возрастают силы трения из-за повышения сил реакций в шарнире O_1 .

Каждое крыло приводится в движение двумя биморфными пьезоэлектрическими актюаторами (рис. 5. 39). Пленки крыльев выполнены с обратными клапанами, позволяющими пропускать воздух через крылья при их движении вверх и не пропускающими воздух при движении крыльев вниз.

Оценим затраты энергии на машущий полет. Универсальной формой полета является активный машущий полет, применяемый птицами, насекомыми и летучими мышами.

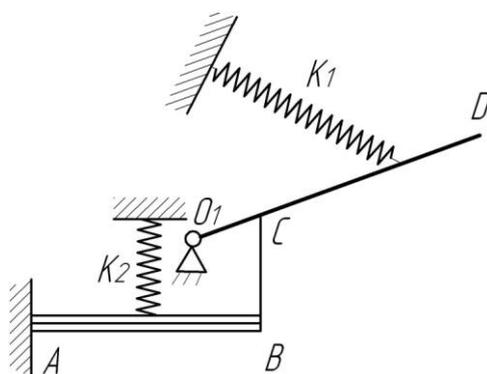


Рис. 5. 38. Кинематическая схема привода крыла МЛА

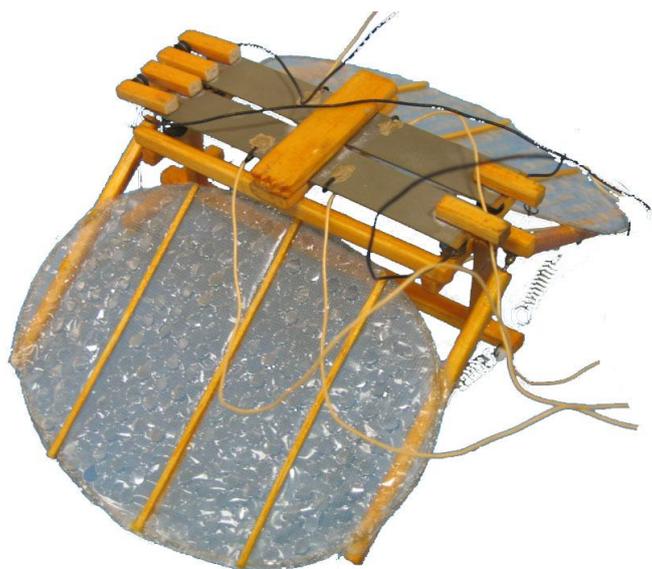


Рис. 5. 39. Макет МЛА, вид снизу

Рассмотрим зависание летательного аппарата при помощи машущего движения крыльев (в биологии такое движение при зависании называют трепещущим). В соответствии с законом импульса объект массой m_1 будет висеть в воздухе в течение времени dt , если он отбрасывает вниз элементарную массу воздуха dM со скоростью v :

$$m_1 g dt = v dM,$$

откуда

$$m_1 g = \frac{dM}{dt} \cdot v, \quad (5.1)$$

где $\frac{dM}{dt}$ – количество (масса) воздуха, отбрасываемого вниз при помощи крыльев в единицу времени. Оно может быть определено через площадь крыльев S :

$$\frac{dM}{dt} = \rho S v, \quad (5.2)$$

где ρ – плотность воздуха. Таким образом, из (5.1) и (5.2) имеем

$$m_1 g = \rho S v^2. \quad (5.3)$$

Полезная мощность, расходуемая крыльями на отбрасывание вниз воздуха, определяется выражением

$$N_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{dM}{dt} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho S v^3. \quad (5.4)$$

Из (5.3) и (5.4) найдем полезную мощность

$$N_1 = \frac{(m_1 g)^{3/2}}{2 \sqrt{\rho S}}. \quad (5.5)$$

При массе МЛА $m_1 = 3,0 \cdot 10^{-2}$ кг, плотности воздуха $\rho = 1,29$ кг/м³, размахе крыльев $L = 0,12$ м, ширине крыльев $B = 0,1$ м, площади крыльев $S = LB = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м² определим мощность при зависании

$$N_1 = 0,64 \text{ Вт.}$$

Для насекомого при $m_1 = 0,6 \cdot 10^{-3}$ кг $N_1 = 0,6 \cdot 10^{-7}$ Вт, а для человека с оснащением при $m_1 = 100$ кг $N_1 = 7$ кВт. Это доказывает, что махолет для осуществления зависания бесперспективен для человека.

Для определения минимальной мощности, необходимой для горизонтального полета, воспользуемся эмпирической формулой:

$$N_2 \approx 0,24 \cdot \frac{(m_1 g)^{3/2}}{L}. \quad (5.6)$$

Численно мощность при указанных выше параметрах составит $N_2=0,32$ Вт. Формула (5.6) – оценочная, в нее не входит скорость горизонтального полета, так как подразумевается, что летательный аппарат сначала вертикально набирает высоту при помощи трепещущего движения крыльев, а потом планирует со снижением высоты, набирая тем самым горизонтальную скорость. Этот цикл постоянно повторяется. По этой причине $\frac{N_1}{N_2} \approx 2$. Тогда суммарная мощность, необходимая для полета МЛА будет около 1 Вт. Такую мощность может обеспечить батарейка для часов при нескольких минутах полета.

Таким образом, рассмотренные биологические прототипы транспортных средств являются хорошей основой для проектирования высокоэкономичных маломощных мобильных роботов и других подвижных систем. Для крупногабаритных транспортных средств живые организмы могут послужить в качестве образа, воплощение которого повышает эстетические качества, проявляемые во внешних формах машин. Например, междугородние автобусы имеют систему зеркал заднего вида, напоминающую усики майского жука.

Контрольные вопросы

1. В чем основные отличия локомоции членистоногих насекомых от позвоночных животных? Почему она перспективнее для бионических транспортных средств?
2. Как достигается высокая износостойчивость суставов животных?
3. Какой режим хождения человека наиболее экономичен?
4. В чем заключается парадокс Грея?
5. За счет каких эффектов достигается однонаправленное перемещение при угревидном типе движения?
6. Почему принцип действия махолета бесперспективен для движения человека в воздухе?

6. СЕНСОРИКА ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ И В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Информация об окружающем нас мире воспринимается человеком по классическому представлению (классификацию ввел Аристотель) при помощи пяти чувств: зрения, слуха, вкуса, обоняния и осязания. Однако человека по его сенсорному оснащению вовсе не следует считать венцом творения: он не видит ультрафиолетового излучения и поляризованного света, как насекомые; не слышит ультразвук и не пользуется им для эхолокации, как летучие мыши и дельфины; а как «выглядит», например, образ электромагнитного поля океана для рыбы, обладающей системой электро-рецепторов, человек даже и представить себе не может, так как не имеет нужных биосенсоров. Антропоморфные обозначения органов чувств часто несостоятельны по отношению к беспозвоночным животным. Насекомые, например, лишены носа в нашем понимании, хотя чувствительность их хемосенсорных систем с обонятельными рецепторами на антеннах не уступает остроте обоняния наиболее способных к этому позвоночных. Однако миниатюрный мозг насекомого не в состоянии различать и идентифицировать такое громадное количество запахов, как, скажем, более мощный мозг («нос») собаки или квалифицированного парфюмера.

Эти простые рассуждения уже позволяют нам понимать под биосенсорами те датчики, которые организм выносит на периферию нервной системы, чтобы получать информацию о процессах, происходящих во внешней среде. Термин «биосенсоры» — скорее технический, под ним подразумеваются, прежде всего, создаваемые современной биотехнологией искусственные датчики, или сенсоры, на основе биомолекул. Для физиологических наук естественные биосенсоры — это просто рецепторные, или сенсорные, клетки, располагающиеся в органах чувств и предназначенные для решения сложной диалектической задачи: изменяться под влиянием внешнего сигнала (иначе он не дойдет до нервной системы), оставаясь, однако, самими собой даже при очень сильных воздействиях. В качестве семантического курьеза стоит отметить, что термин «рецепторы», которым обозначали рецепторные клетки органов чувств в 60 – 70-е годы, постепенно взяли на вооружение специалисты по молекулярной биологии. В на-

стоящее время под словом «рецептор» они однозначно подразумевают белковую молекулу, избирательно взаимодействующую с гормоном, нейромедиатором или феромоном, т.е. с сигнальным веществом. В сенсорной физиологии принято говорить о «рецепторных клетках», или, что то же самое, о «сенсорных рецепторах».

6.1. СТРУКТУРА БИОСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

В высокоорганизованном организме позвоночных существует сенсорная система, под которой понимают совокупность органов и структур, обеспечивающих:

- восприятие различных раздражителей, действующих на организм;
- преобразование и кодирование внешней энергии в нервный импульс;
- передачу по нервным путям в подкорковые и корковые центры, где происходят анализ поступившей информации и формирование субъективных ощущений.

Сенсорная система – это *анализаторы* внешней и внутренней среды (термин «анализатор» ввел академик И.П. Павлов), которые обеспечивают адаптацию организма к конкретным условиям.

В каждом анализаторе различают три части:

- периферическую (рецепторную);
- промежуточную;
- центральную.

Периферическая часть представлена органами, в которых находятся специализированные рецепторные клетки. По специфичности восприятия стимулов различают:

- механорецепторы (рецепторы органа слуха, равновесия, тактильные рецепторы кожи, рецепторы аппарата движения, барорецепторы);
- хеморецепторы (органов вкуса, обоняния, сосудистые интерорецепторы);
- фоторецепторы (сетчатки глаза), терморецепторы (кожи, внутренних органов);
- болевые рецепторы.

Рецепторные клетки периферического отдела анализаторов являются составной частью органов чувств (например, глаз, ухо и др.), а также органов, выполняющих в основном несенсорные функции (нос, язык и др.).

Промежуточная (проводниковая) часть сенсорной системы представляет собой цепь вставочных нейронов, по которым нервный импульс от рецепторных клеток передается к корковым центрам. На этом пути могут быть промежуточные, подкорковые, центры, где происходят обработка афферентной информации и переключение ее на эфферентные центры.

Центральная часть сенсорной системы представлена участками коры больших полушарий. В центре осуществляются анализ поступившей информации, формирование субъективных ощущений. Здесь информация может быть заложена в долговременную память или переключена на эфферентные пути.

Как уже говорилось, этими системами в той или иной комбинации снабжены все организмы, но не все системы представлены у человека, да и сам перечень сенсорных рецепторов и систем, возможно, пока не полон.

Таким образом, понятие «сенсорная система» включает в себя не только периферически расположенные биосенсоры, но и всю систему обработки передаваемых ими сигналов, т.е. мозг. Например, оптические биосенсоры, или фоторецепторы, превращают оптическое изображение в нейроизображение. Чтобы почувствовать, как наш собственный мозг видит и обрабатывает информацию, заключенную в нейроизображении, поставим простой эксперимент с последовательными образами (этот опыт много лет назад продемонстрировали сотрудники Института проблем передачи информации РАН Г.М. Зенкин и А.П. Петров). Войдем в хорошо затемненную комнату и адаптируемся к темноте в течение 10 – 15 мин. Затем возьмем в правую руку заранее приготовленную импульсную фотовспышку, направим ее на ближайший предмет – вначале на собственную свободную руку – и нажмем спусковую кнопку. Вспышка длительностью около миллисекунды давно кончилась, свет уже не действует на нашу сетчатку, но мы четко видим... нейроизображение собственной руки. Уберем ее за спину: где же она на самом деле? Глаз (точнее зрительная система!) сообщает, что рука перед нашим лицом, а соматосенсорная система утверждает, что рука за спиной... Примерно в течение 10 секунд, пока мы еще видим так

называемый последовательный образ, попробуем сделать легкое и плавное движение головой или телом – слегка повернем голову, чуть-чуть отклонимся вперед или отступим на полшага назад – и сможем изучать работу собственного мозга, удивляясь тому, как другие сенсорные системы влияют на характер нейроизображения. Мы смотрим глазом, а видим мозгом. При этом мы не удивляемся тому, что это известное свойство сенсорных систем нашло свое отражение в языке: «смотреть» и «видеть», если речь идет о зрении, «слушать» и «слышать» – о слухе, «нюхать» и «чувять» – это уже об обонянии. Таким образом, в основе восприятия информации извне лежат сенсорные рецепторы, которые понимают язык внешней среды. За ними располагаются более или менее совершенные звенья центрального анализа, но они общаются и друг с другом, и с сенсорными рецепторами исключительно на языке нервных сигналов.

Таким образом, для специалистов по бионике структура и функции элементов сенсорных систем животных представляет большой интерес для создания более эффективных автоматических технических систем с осязанием.

6.2. ЗРЕНИЕ ЖИВОТНЫХ И СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Зрение – самое важное для человека и многих животных чувство, т.к. около 90% процентов информации о внешнем мире человек воспринимает органами зрения при помощи фоторецепторов, находящихся в сетчатке глаза. Кстати, до И. Кеплера считали, что чувствительным органом является хрусталик.

Фоторецептор (в технике – фотодатчик) – это чувствительный элемент глаза, преобразующий энергию падающего на него света в биоэлектрический сигнал, идущий по зрительному нерву к головному мозгу. Фоторецепторная клетка глаза позвоночных животных имеет форму ампулы с вытянутым носиком.

Очевидно, что для технических систем, выполняющих сложные задачи в недетерминированной среде, системы технического зрения (СТЗ) являются одними из важнейших сенсорных систем.

Человеческий глаз (рис. 6.1) является сложной оптической системой, преобразующей оптические сигналы в нервные импульсы (электрические). Светочувствительным элементом глаза является сетчатка, максимум чувствительности приходится на желтое пятно, находящееся в области центральной ямки. Здесь сосредоточена основная группа фоторецепторов.

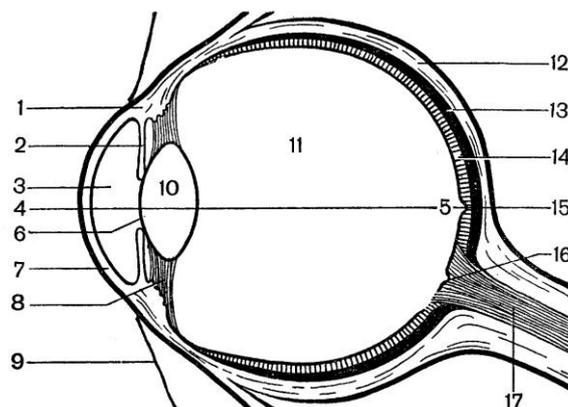


Рис. 6. 1. Схема глаза человека:

1 – ресничная мышца, 2 – радужная оболочка, 3 – водянистая влага, 4 – зрачок, 5 – оптическая ось, 6 – хрусталик, 7 – роговица, 8 – связка, поддерживающая хрусталик, 9 – конъюнктивa, 10 – хрусталик, 11 – стекловидное тело, 12 – склера, 13 – сосудистая оболочка, 14 – сетчатка, 15 – центральная ямка, 16 – слепое пятно, 17 – зрительный нерв

Оптические свойства фоторецепторов в сетчатке глаза оказались настолько интересными, что возникла и успешно развивается такая область сенсорной физиологии, как оптика фоторецепторов. Молекулярной основой фоторецепции остается мембранный белок, точнее, окрашенный хромопротеид, родопсин. Его белковый компонент — опсин — не поглощает свет, эту способность и окраску он приобретает при взаимодействии с хромофором — 11-*цис*-изомером ретиналя (альдегида витамина А — ретинала). Максимумы спектров поглощения родопсина у разных животных могут располагаться как в видимой, так и в ультрафиолетовой части спектра. В отдельных случаях молекулы родопсина ориентированы в фоторецепторной мембране в одном предпочтительном направлении, и тогда возникает различие в поглощении света в зависимости от направления его распространения (дихроизм). Некоторые группы животных (членистоногие, высшие моллюски) используют это свойство для анализа естественного

го поляризованного света (голубое небо, отражение от водных поверхностей). Что же касается опсинов, то это — видоспецифичные белки. Сейчас уже известен их аминокислотный состав для животных многих видов, оценено сходство молекул, т.е. степень гомологии, и на этой основе развиваются представления об эволюции фоторецепторов. Современные полупроводниковые фотоэлементы также могут иметь высокую чувствительность в различных диапазонах спектра, начиная от инфракрасного и кончая ультрафиолетовым.

Фокусировка изображения на сетчатке достигается при помощи аккомодации хрусталика – при помощи мышц, окружающих хрусталик, осуществляется изменение кривизны хрусталика, т.е. изменение фокусного расстояния (рис. 6.2).

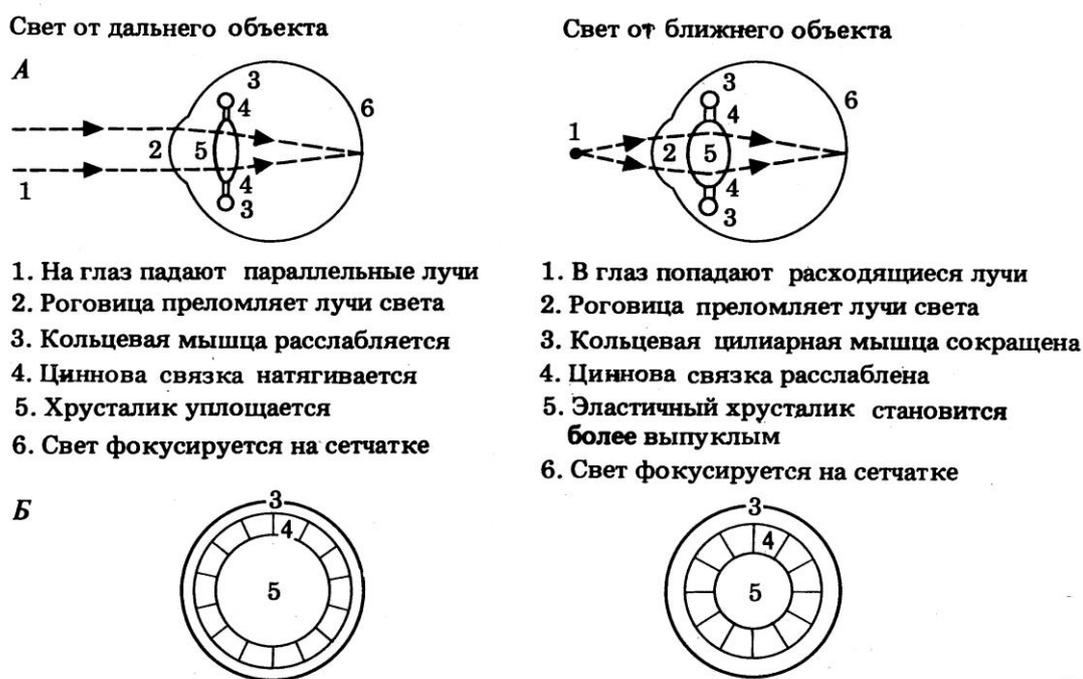


Рис. 6. 2. Схема аккомодации хрусталика при восприятии дальнего и ближнего объекта: А – вид сбоку, Б – вид спереди

Такой способ аккомодации применяется в технике. В современных оптических приборах фокусировка (аккомодация) изображения на светочувствительном элементе может осуществляться благодаря изменению кривизны линз при помощи управляемых биморфных пьезоэлектрических актюаторов (БПА). В корпусе 1 через резиновые прокладки 2 закреплены

БПА 3, выполненные в виде склеенных тонких шайб, имеющие круглые отверстия (рис. 6. 3). На них закрепляется прозрачная упругая мембрана 4. Пространство между актюаторами 3 заполнено прозрачной жидкостью (глицерином) 5. Электроды БПА подключены к источнику управляющего напряжения $U_{упр}$. При подаче напряжения БПА изгибаются в том или ином направлении в зависимости от полярности $U_{упр}$. Деформация БПА приводит к изменению объема жидкости 5. В результате этого мембраны 4 втягиваются внутрь или изгибаются наружу, изменяя тем самым фокусное расстояние оптической линзы, заключенной между мембранами.

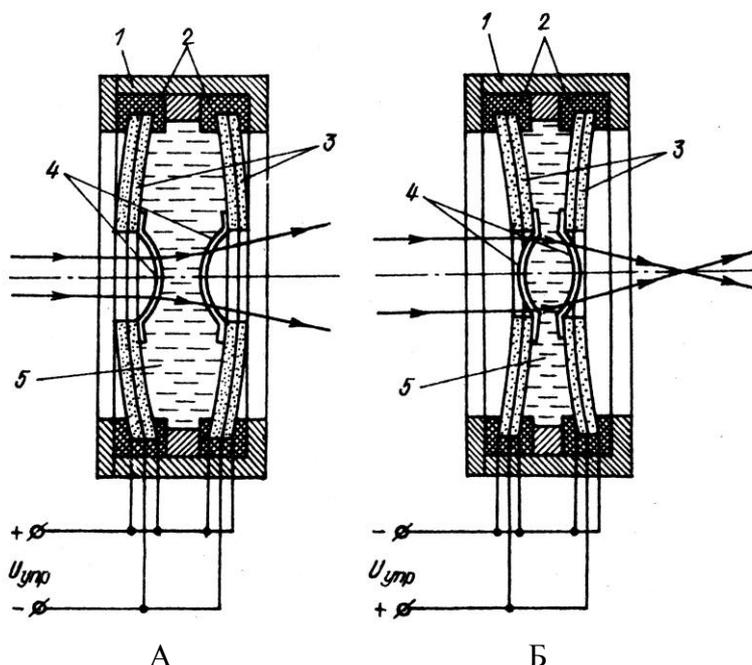


Рис. 6.3. Бионическая система фокусировки: А – схема прохождения расходящихся лучей, Б – схема прохождения сходящихся лучей

В настоящее время разработчики систем технического зрения стараются уйти от электромеханических схем оптической системы. В последних разработках для изменения фокусного расстояния линз применяют эффект изменения кривизны мениска под действием электростатического поля. Линзовая система FluidFocus (рис. 6. 4), созданная специалистами исследовательского подразделения голландской фирмы Philips Research, имеет уникальную черту, выделяющую ее среди объективов с переменным фокусным расстоянием: она не содержит движущихся механических частей и

фактически имитирует человеческий глаз, в котором фокусировка осуществляется изменением формы хрусталика. FluidFocus состоит из двух несмешивающихся жидкостей с различными коэффициентами преломления: электропроводящего водного раствора и нейтрального масла. Они помещены в цилиндр с прозрачными основаниями, покрытый изнутри гидрофобным материалом. Благодаря этому поверхность водного раствора приобретает форму полусферы и становится способной выполнять функции линзы. Кривизна ее может регулироваться в широких пределах с помощью электрического поля, изменяющего поверхностное натяжение жидкости (используется эффект электросмачивания). Принцип действия FluidFocus заключается в следующем: при приложении напряжения на внешних стеклянных стенках и в проводящей жидкости образуются заряды противоположного знака; под действием электростатического поля сила поверхностного натяжения на границе раствора и гидрофобного материала, а следовательно, и угол смачивания Q уменьшаются, и происходит изменение фокусного расстояния линзы.

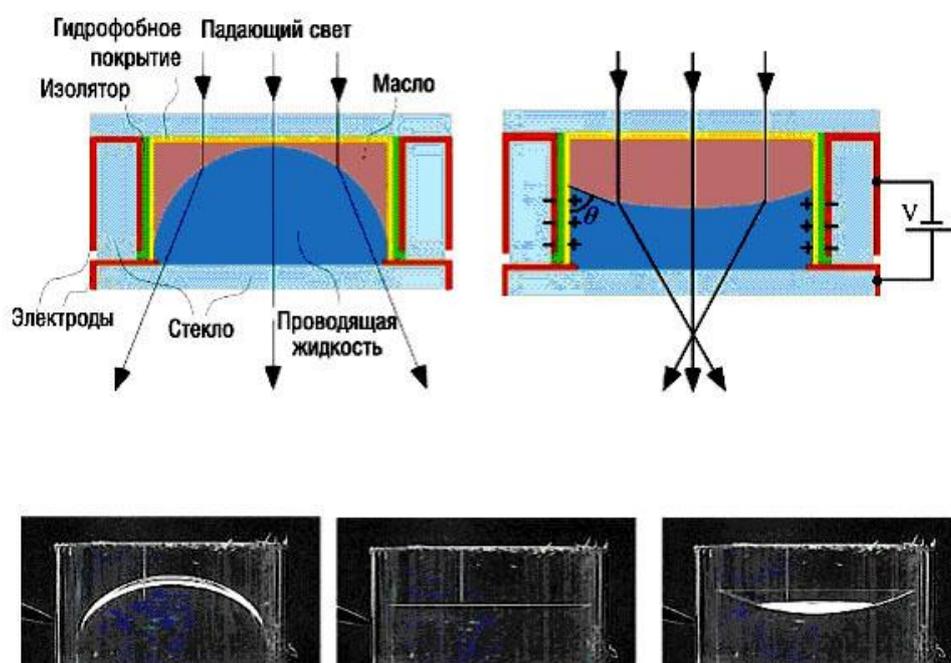


Рис. 6. 4. Электростатическое устройство изменения кривизны линзы

Опытный образец объектива FluidFocus имеет диаметр 3 мм и длину 2,2 мм. Его фокусное расстояние меняется от 5 см до бесконечности менее

чем за 10 мс. Кроме того, согласно утверждению ученых Philips, объектив обладает большой долговечностью и надежностью. Так, в ходе проведенных экспериментов устройство выдержало более 1 млн. операций фокусировки без какого-либо ухудшения оптических характеристик. Оно при этом способно работать в широком диапазоне температур и отличается хорошей удароустойчивостью.

В человеческом глазу регулирование потока света, попадающего на сетчатку, осуществляется мышцами радужной оболочки глаза, которые сужают или расширяют зрачок (рис. 6. 4). Дополнительное преимущество достигаемое благодаря сужению зрачка, состоит в том, что увеличивается глубина резкости, поэтому различия в расстоянии от объекта до глаза меньше сказываются на четкости изображения.



Рис. 6. 4. Реакция зрачка глаза на яркий и слабый свет

В фотоаппаратах часто применяют так называемую ирисовую диафрагму (рис. 6. 5), которая также регулирует поток света, изменяя входное отверстие. Название устройства, связано с латинским словом *iris* – радуга, от которого происходит термин радужная оболочка.

Ирисовая диафрагма имеет малые размеры и позволяет изменять входное отверстие в широких пределах. В корпусе 1 установлены штифты 2 и 3, на которых установлены дугообразные лепестки 4. Штифты 3 входят в отверстия корпуса 1, а штифты 2 – в радиальные пазы вращающегося кольца 5, называемого коронкой. При повороте корпуса 1, связанного с коронкой винтом, лепестки, поворачиваясь относительно неподвижной оси, изменяют размеры входного отверстия.

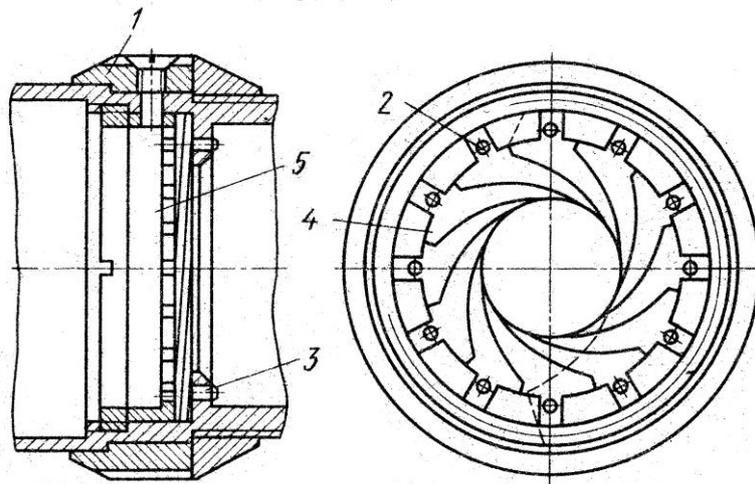


Рис. 6. 5. Механизм ирисовой диафрагмы фотоаппарата

Человек, не меняя положение глаза, может видеть сектор с телесным углом порядка 60° . У рыб отсутствуют мышцы, которые позволяют менять положение глаза, поэтому строение глаза рыбы таково, что у него угол зрения в воде порядка 160° , хотя изображение будет искаженным. Оптические свойства водной среды таковы, что не позволяют видеть находящиеся в ней предметы на больших расстояниях. Соответственно этому обстоятельству устроен и рыбий глаз. Он приспособлен хорошо видеть в воде лишь те предметы, которые находятся от него не далее 1 – 1,5 м. Таким образом, по природе своей рыбы близоруки.

Однако их близорукость в известной степени компенсируется возможностью видеть в нескольких направлениях одновременно в обширной зоне. Большинство рыб способно, не поворачивая головы, видеть каждым глазом предметы в секторах до 150° по вертикали и до 170° – по горизонтали.

Такую обзорность в воде обеспечивают и строение глаз, и их размещение (рис. 6. 6). Глаза рыбы не имеют век и никогда не закрываются. Они снабжены шарообразными хрусталиками, воспринимающими наибольшее количество световых лучей с разных направлений. Расположены глаза на голове рыбы в виде небольших возвышений (выпуклостей) над поверхностью тела, что позволяет воспринимать не только прямые, но и косые лучи (спереди, сзади, снизу, сверху и т. д.).

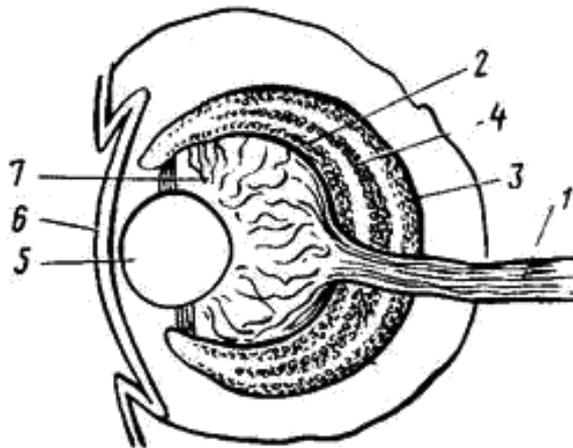


Рис. 6. 6. Строение глаза костистых рыб: 1 – оптический нерв, 2 – ганглиозные клетки, 3 – слой палочек и колбочек, 4 – сетчатка, 5 – хрусталик, 6 – роговица, 7 – стекловидное тело

Когда рыба хочет тщательнее рассмотреть предмет, она вынуждена развернуться так, чтобы этот предмет оказался у нее впереди. Дело в том, что прямо впереди рыбы есть узкое конусообразное пространство, в котором она видит сразу двумя глазами. Несколько иначе видит рыба предметы, находящиеся над водой. По закону преломления световых лучей она в состоянии воспринять только те предметы, которые находятся над ее головой в пределах конуса в 97° . Так что рыболова, сидящего в лодке, особенно если поверхность водоема неспокойна, рыба видеть издали не может.

В фотоаппаратуре для получения широкоугольного фотоснимка применяются широкоугольные объективы (рис. 6. 7), получившие название

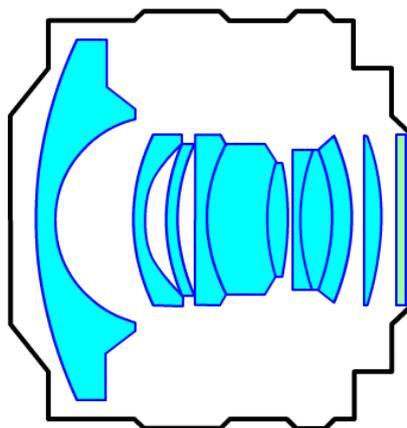


Рис. 6. 7. Оптическая схема широкоугольного объектива МС Зенитар-М

«рыбий глаз», которые позволяют иметь примерно такой же растровый угол, как у рыб. Такие объективы имеют очень сложную оптическую систему, состоящую из десятка линз различной формы.

В настоящее время создана относительно простая оптическая система «рыбий глаз» (рис. 6. 8) с углом обзора до 160° для видеокамер наблюдения. Ее оптическая схема подобна структуре рыбьего глаза. В центре устройства, закрытого сферической прозрачной оболочкой, находится зеркальный конус. По оси конуса на прозрачной оболочке закреплен волоконно-оптический кабель с фокусирующей линзой на торце, который соединен с видеокамерой (на рис. 6. 8 а видеокамера не показана).

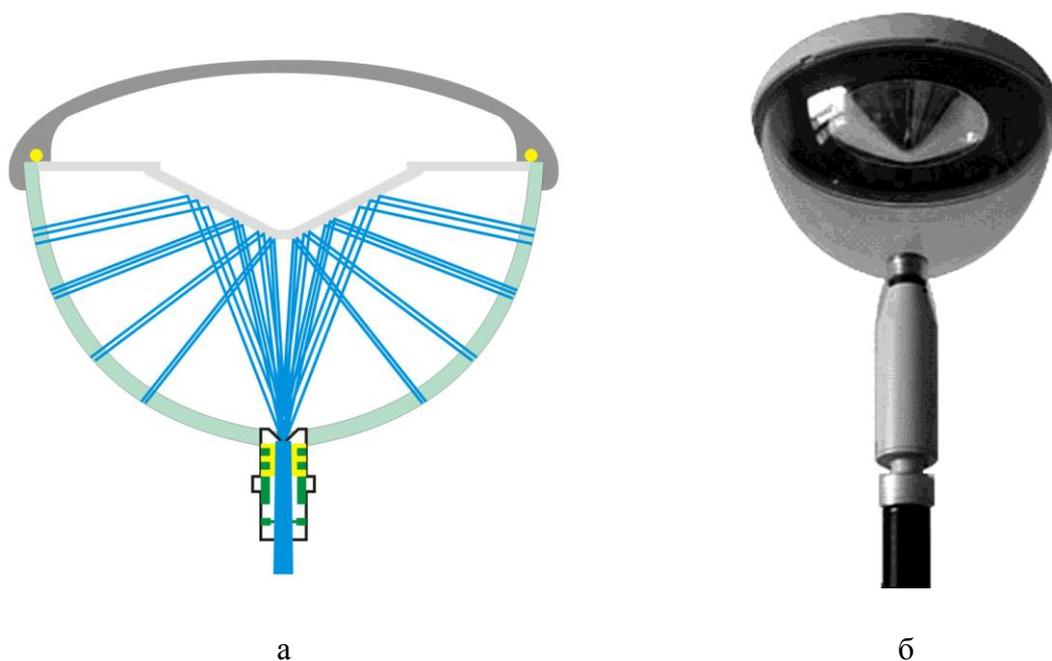


Рис. 6. 8. Оптическая система «рыбий глаз» для видеокамер наблюдения: а – оптическая схема, б – внешний вид

Световые лучи от объекта наблюдения проходят через прозрачную оболочку и попадают на внешнюю поверхность конуса и, далее, отражаясь от нее, входят через фокусирующую линзу в торец волоконно-оптического кабеля. Недостатком такой системы является меньшая четкость по сравнению с обычными оптическими системами.

Оптические системы типа «рыбий глаз» широко используются для дверных глазков и встроенных потолочных светильников (рис. 6. 9 и 6. 10).



Рис. 6. 9. Дверной глазок



Рис. 6. 10. Потолочный светильник

Глаз насекомого намного старше глаза позвоночного млекопитающего или рыбы и мало изменился за миллионы лет. Это факт говорит о том, что для образа жизни насекомых их глаз достиг эволюционного совершенства еще в доисторические времена. Логично было бы предположить, что для ряда задач принципы его действия могут быть использованы в технике.

Фасеточный глаз насекомого (рис. 6. 11) также как и сетчатка млекопитающего состоит из тысяч чувствительных элементов (у человека – колбочки и палочки, у насекомого – омматидии). Глаз насекомого имеет угол зрения около 180° , однако различительная способность его намного ниже, чем у камерного глаза млекопитающего. Как было отмечено выше, цветное зрение насекомых намного лучше.

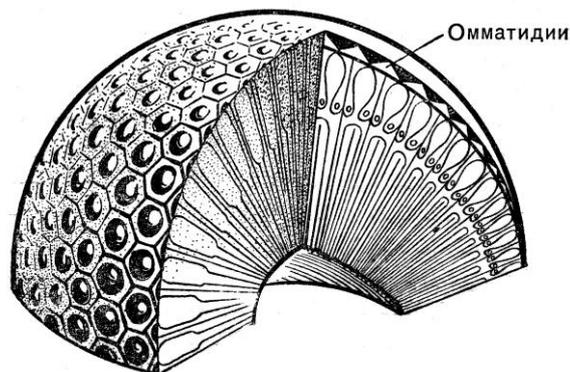


Рис. 6. 11. Глаз насекомого

Все современные видеокамеры имеют интегральные фотоприемные устройства (ИФП) на базе матриц полупроводниковых светочувствительных элементов. ИФП по своему действию и структуре близки к фасеточному глазу насекомого и характеризуются малыми размерами и повышенной надежностью. Наиболее перспективными в настоящее время являются

ИФП на базе кремниевых приборов с зарядовой связью (ПЗС). Основой ПЗС является полупроводниковая структура на базе SiO_2 и Si p-типа (рис. 6. 12). Размеры электродов, соответствующие одному чувствительному элементу, имеют размеры до 5×5 мкм, зазоры между ними – $0,1 \dots 1$ мкм. Электроды выполняют напылением из алюминия (для увеличения прозрачности).

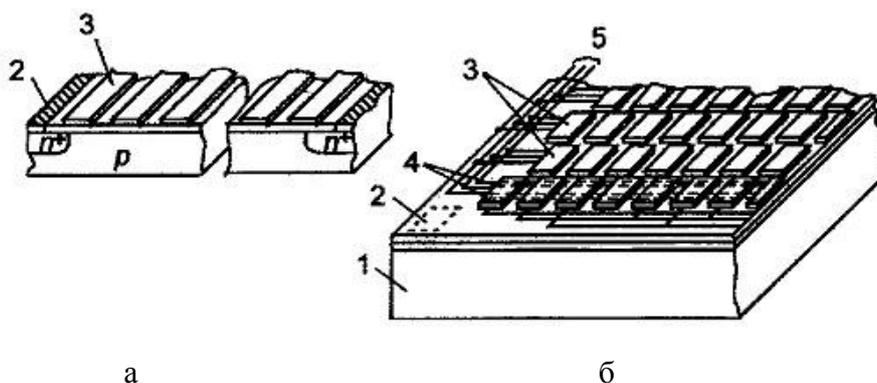


Рис. 6. 12. Линейные и матричные структуры с приборов с зарядовой связью: 1 – кристаллы кремния, 2 – выходные контакты, 3 – электроды, 4 – система разводок

Такие полупроводниковые оптические системы состоят из миллионов чувствительных элементов (например, цифровой фотоаппарат имеет параметр чувствительности – 3,5 Мегапикселей, т.е. светочувствительная матрица содержит 3,5 миллиона фотоэлементов), каждый из которых имеет электрический проводник, связанный с системой управления.

6.3. БИОЛОГИЧЕСКИЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ И НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

В последние десятилетия наблюдается интерес специалистов по управлению к методам и системам организации управления в живых организмах. Человеческий интеллект является вершиной в развитии биологических систем. В настоящее время разработаны компьютерные системы на основе нейронных сетей. Такой бионический подход к созданию систем управления мехатронных объектов перспективен, т.к. принцип интеграции исполнительных, управляющих и сенсорных элементов в едином объеме заложен в основу как мехатронных, так и живых объектов.

Нервная система биообъектов состоит из нейронов. В человеческом организме их порядка 10^{12} , причем насчитывается 57 видов нейронов, отличающихся размерами и функциями. Основные типы нейронов: сенсорный, двигательный и вставочный (рис. 6. 13). Все они имеют древовидную структуру. *Нейроны* – это функциональные единицы нервной системы.

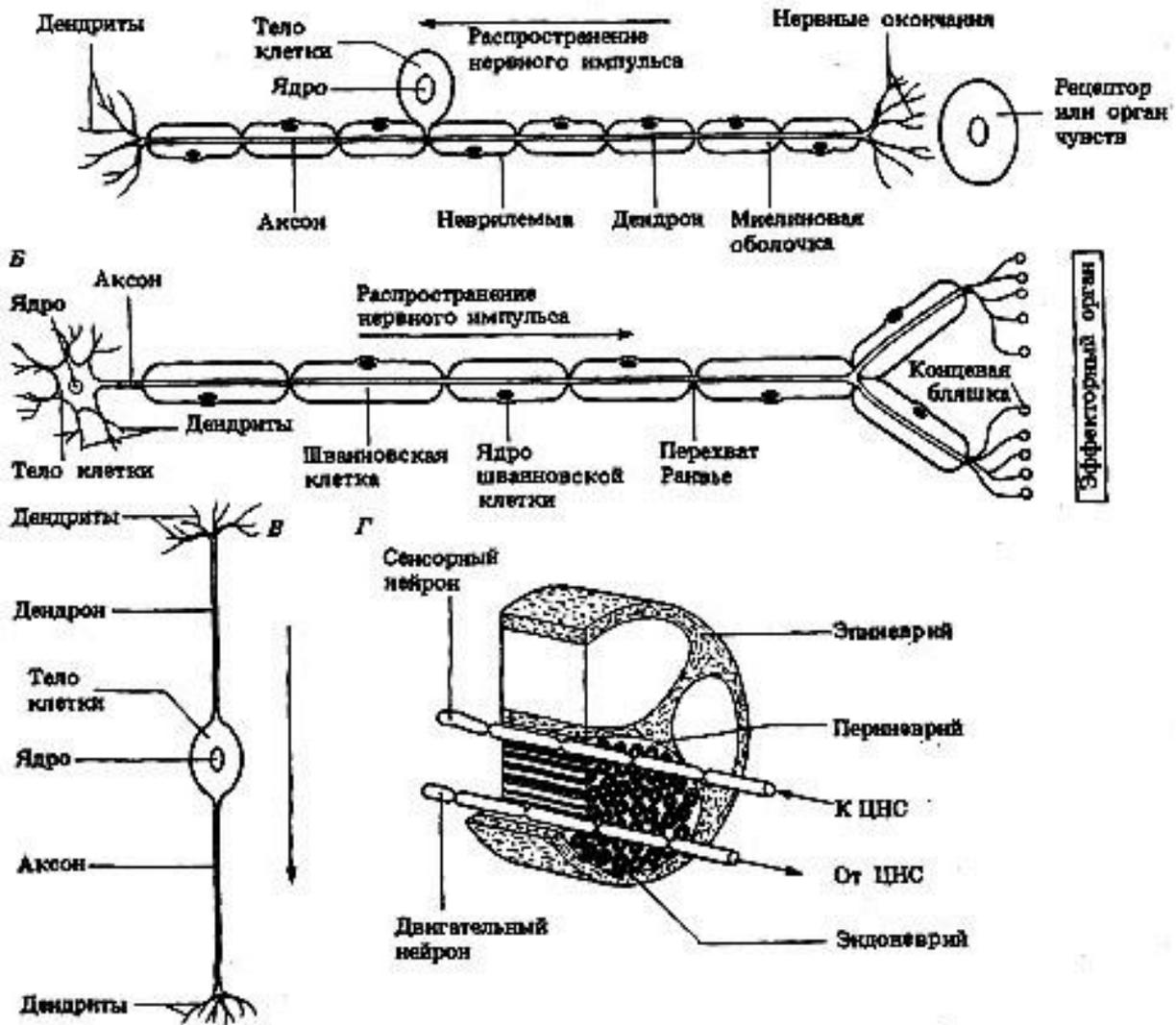


Рис. 6. 13. Схемы нейронов, А – двигательного, Б – двигательного, В – вставочного, – поперечный срез нервного волокна

Они восприимчивы к раздражению, т.е. способны возбуждаться и передавать электрические импульсы, что позволяет осуществлять коммуникацию между *рецепторами* (датчиками) и *эффекторами* (двигателями). Нейроны, передающие импульсы в центральную нервную систему (головной и спинной мозг) – *сенсорные нейроны*. *Двигательные (эфферентные) нейроны*

передают импульсы от центральной нервной системы к эффекторам. *Вставочные (промежуточные)* нейроны осуществляют связь между сенсорными и двигательными нейронами.

Электрические импульсы (порядка 70 – 120 мВ) входят в нейрон через его нервные окончания (*синапсы* – это своеобразные разъемы), которые находятся на *дендритах* (ответвлениях). Нервные импульсы передаются как потоки ионов. Синапсы могут быть возбуждающими и тормозными. Через дендриты электрическое раздражение поступает в тело клетки – нейрона. В нем происходит обработка раздражения (сигнала) и оценка. Скорость распространения импульса от 0,5 м/с до 120 м/с. Кодирование нервной информации и передача импульсов осуществляется по принципу «все или ничего», т.е. 1 или 0. В связи с этим информация не может кодироваться амплитудой, а используется только частота импульсов. Конфигурация нейронов в зависимости от их функций может быть разная (рис.13.10).

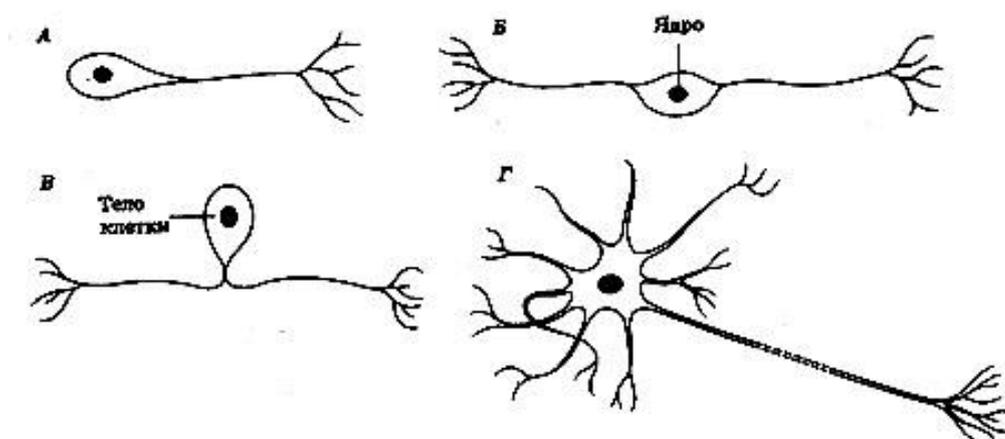


Рис. 6. 14. Типы нейронов: А – униполярный, Б – биполярный, В – псевдо-униполярный, Г – мультиполярный

Основное отличие традиционной схемы передачи сигналов в искусственных системах управления от нервной системы, это преобладание последовательного соединения элементов цепи управления. В нервной системе каждый нейрон связан примерно с 10^4 других нейронов. Такие *нейронные сети* имеют замечательное свойство – свойство обучения. Передача определенных раздражительных импульсов может со временем меняться, т.е. организм или его орган будут по-разному реагировать в начале и в

конце после опытной деятельности. В этом свойстве проявляется принцип адаптации биологических систем.

Весьма заманчиво создать компьютеры, которые могли бы самообучаться и совершенствоваться по мере работы на нем. С другой стороны нейронные сети более надежны, чем традиционные последовательные электрические цепи, используемые в компьютерах. При отказе одного из элементов нейронной цепи вся сеть не выходит из строя, т.к. на вход каждого нейрона подается множество сигналов. Использование этого принципа в компьютерных системах позволит также повысить их надежность.

Математическая модель единичного нейрона строится на основе схемы суммирования (рис. 6.15). Входные сигналы поступают на сумматор, где определяется их взвешенная сумма (т.е. с учетом весовых коэффициентов):

$$y = w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n.$$

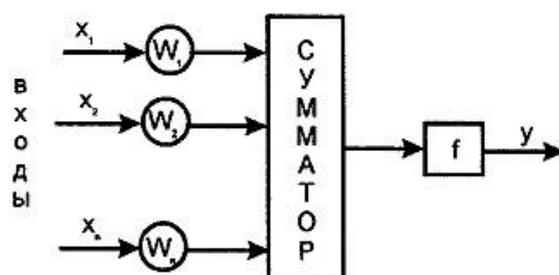


Рис. 6. 15. Математическая модельнейрона

Эти *весовые коэффициенты* зависят от того, какие синапсы задействованы: возбуждательные или тормозные. Выходной сигнал нейрона формируется на выходе нелинейного блока *f* в виде пороговых и экспоненциальных функций (рис. 6.16). Биологические нейроны при сильном внешнем воздействии насыщаются, т.е. уровень выходящего сигнала при таких воздействиях остается постоянным.

Математическая модель нейрона легко реализуется на компьютере. В компьютерных моделях, как и в биологических системах, нейроны объединяются в *сети с перекрестными связями* (рис. 6.17). Нейронные сети обучаются разработчиком на конкретных примерах: разработчик вводит информацию о входных и желаемых выходных сигналах.

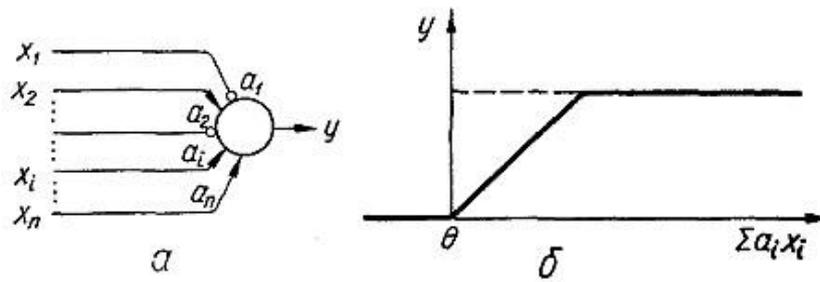


Рис. 6. 16. Схематичное изображение нейрона (а), и его характеристика «вход-выход»

Специальная программа подбирает весовые коэффициенты для всех нейронов таким образом, чтобы добиться желаемого отклика. Обучение проводится на всех вариантах возможных ситуаций, т.е. приобретается опыт. Главная особенность программирования нейронных сетей – не нужен четкий алгоритм работы каждого из элементов компьютерной системы. Чем более сложная задача, тем больше слоев нейронов имеет такая сеть. Главная проблема построения нейронной сети – это выбор типа нелинейного оператора f .

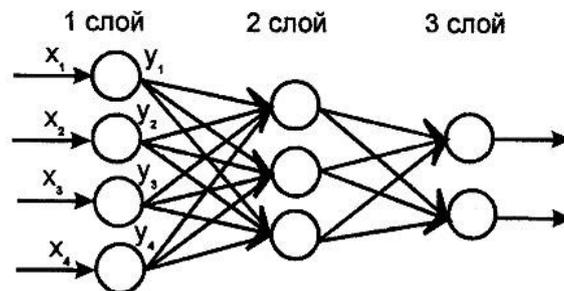


Рис. 6. 17. Схема трехслойной нейронной сети

В отличие от цифровых систем, представляющих собой комбинации процессорных и запоминающих блоков, нейропроцессоры содержат память, распределенную в связях между очень простыми процессорами, которые часто могут быть описаны как формальные нейроны или блоки из однотипных формальных нейронов. Тем самым основная нагрузка на выполнение конкретных функций процессорами ложится на архитектуру системы, детали которой в свою очередь определяются межнейронными связями. Нейрокомпьютинг является научным направлением, которое занимается разработкой вычислительных систем шестого поколения – нейроком-

пьютеров, состоящих из большого числа параллельно работающих простых вычислительных элементов (нейронов). Элементы связаны между собой, образуя нейронную сеть. Они выполняют однообразные вычислительные действия и не требуют внешнего управления. Большое количество параллельно работающих вычислительных элементов обеспечивают высокое быстродействие.

Контроллеры (промышленные компьютеры) на базе нейронных сетей эффективны в случаях, когда создание адекватной математической модели исполнительской системы и синтез ее на основе регуляторов крайне затруднителен. Ситуации, когда такие контроллеры эффективны:

- неопределенность внешних условий;
- переменность параметров и структуры мехатронной системы;
- существенные внутренние возмущения (сухое трение, гистерезис);
- сложные физические взаимосвязи между элементами (пьезоэлектрики, гидравлика);
- технические проблемы при проведении экспериментальных исследований на реальных объектах.

Нейронная сеть (НС) как универсальное средство решения задач планирования и управления движением может быть использована на всех иерархических уровнях управления сложных технических систем. Нейроконтроллеры позволяют управлять на базе накопленных знаний, практического опыта. Основные преимущества нейрокомпьютеров:

1. Все алгоритмы нейроинформатики высокопараллельны, а это уже залог высокого быстродействия.
2. Нейросистемы можно легко сделать очень устойчивыми к помехам и разрушениям.
3. Устойчивые и надежные нейросистемы могут создаваться и из ненадежных элементов, имеющих значительный разброс параметров.

Нейронные сети находят свое применение в различных системах распознавания образов, обработки сигналов, предсказания и диагностики, в робототехнических и бортовых системах. Нейронные сети решают сложные задачи за времена порядка времени срабатывания цепочек электронных и оптических элементов. Решение мало зависит от неисправности отдельного нейрона. Это делает их привлекательными для использования в бор-

товых интеллектуальных системах. Разработки в области нейрокомпьютинга ведутся по следующим направлениям:

- разработка нейроалгоритмов;
- создание специального программного обеспечения для моделирования нейронных сетей;
- разработка специализированных процессорных плат для имитации нейросетей;
- электронные реализации нейронных сетей;
- оптоэлектронные реализации нейронных сетей

Нейрокомпьютеры составляют перспективное направление развития современной высокопроизводительной вычислительной техники, а теория нейронных сетей и нейроматематика представляют собой приоритетные направления российской вычислительной науки. Причиной активного развития нейрокомпьютеров является кардинальное отличие нейросетевых алгоритмов решения задач от однопроцессорных и малопроцессорных.

Контрольные вопросы

1. Какие функции обеспечивает сенсорная система позвоночных животных?
2. Какие типы рецепторов воспринимают раздражение от внешнего и внутреннего воздействия?
3. Составьте кинематическую схему ирисовой диафрагмы.
4. Для каких целей разработана бионическая оптическая система «рыбий глаз», и почему она так названа?
5. В чем разница построения фасеточного глаза насекомого и современной цифровой видеокамеры?
6. Какие биологические принципы заложены в основу искусственных нейронных сетей?
7. Каковы основные преимущества нейрокомпьютеров?

Библиографический список

1. Архитектурная бионика/ Под ред. *Ю.С. Лебедева*. – М.: Стройиздат, 1990, 269 с.
2. *Белькевич В.И., Венде Э.Ю.* Об определении предмета и метода бионики / Бионика. Под ред. *Б.С. Сотскова*. – М.: Наука, 1965, С. 469 – 472.
3. Бионика. Биологические аспекты. Под ред. *Л.В. Решодько*. – Киев, Вища школа, 1978, 304 с.
4. *Владимиров Ю.А., Роцупкин Д.И., Потапенко А.Я., Деев А.И.* Биофизика: Учебник.– М.: Медицина, 1983, 272 с.
5. *Гика М.* Эстетика пропорций в природе и искусстве. М. 1936.
6. *Жерарден Л.* Бионика. – М., Мир, 1971, 232 с.
7. *Ичас М.* О природе живого: механизмы и смысл. – М.:1994, 496 с.
8. *Лебедев Ю.С.* Архитектура и бионика.- М.: Стройиздат, 1971, 120 с.
9. *Лебедев Ю.С., Вознесенский С.Б., Гоциридзе О.А.* От биологических структур к архитектуре.– М.: Знание, 1971, 32 с.
10. *Литинецкий И.Б.* Бионика. Пособие для учителей. – М.: Просвещение, 1976, 336 с.
11. *Нерви П.Л.* Строить правильно. – М. 1956.
12. *Патури Ф.* Растения – гениальные инженеры природы. – М.: Прогресс, 1982, 272 с.
13. *Першин С.В.* Гидродинамические аспекты изучения движения водных животных / Бионика. Под ред. *Б.С. Сотскова*. – М.: Наука, 1965, С.207 – 215.
14. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерностей в механике. – М.: Наука, 1972, 440 с.
15. *Семенов В.Н.* Природа учит строить. – М., Знание, 1966, 33 с.
16. *Стахов А, Слученкова А., Щербаков И.* Код да Винчи и ряды Фибоначчи. – СПб: Питер, 2007, 320 с.
17. *Темнов В.Г.* Конструктивные системы в природе и строительной технике. – Л. Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987, 256 с.
18. *Урманцев Ю.А.* Симметрия природы и природа симметрии, – М. 1974.
19. *Шмидт-Ниельсон К.* Размеры животных: почему они так важны? – М.: Мир, 1987, 259 с.
20. *Яньшин П.В.* Психосемантический анализ категоризации цвета в структуре сознания субъекта. Автореф. дисс. на соиск. д.п.н. 2001 М.: МГУ. 2001, 32 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение П. 1

Темы индивидуальных заданий для практической работы «Бионический анализ технических устройств и синтез новых дизайнерских решений»

1. Транспорт (и его элементы):
 - наземный;
 - воздушный;
 - водный и подводный.
2. Строительно-дорожная и подъемно-транспортная техника.
3. Медицинская техника и технологии:
 - хирургический инструмент;
 - клонирование;
 - физиотерапевтическая техника;
 - средства для инвалидов.
4. Спортивный инвентарь и тренажеры.
5. Мебель и материалы для мебели.
6. Кухонная утварь и предметы обихода.
7. Сложная домашняя техника.
8. Слесарный и столярный инструмент.
9. Сантехника.
10. Садово-огородный инвентарь.
11. Одежда и материалы для одежды.
12. Упаковка и материалы для упаковки.
13. Военная техника:
 - оружие и боеприпасы;
 - средства маскировки;
 - средства защиты.
14. Охотничьи принадлежности и рыболовные снасти.
15. Осветительная техника и оптические бытовые устройства.

16.Строительные материалы:

- теплоизоляционные материалы;
- связующие материалы;
- красящие вещества;
- метизы.

17.Преобразователи энергии:

- насосы и компрессоры;
- элементы гидро- и пневмосистем;
- искусственные мышцы.

18.Информационные техника и технологии.

19.Технологии приготовления и сохранения пищевых продуктов.

20.Компьютерные нейронные сети.

21.Системы ориентации в пространстве.

22.Системы отопления и терморегуляции.

Приложение П. 2

Рекомендации по практической работе

«Бионический анализ технических устройств и синтез новых дизайнерских решений»

В отчете по практической работе должна быть приведена информация о биологических аналогах (не менее трех), которые могут иметь довольно отдаленные общие функции и формы с рассматриваемыми техническими устройствами. Из этого множества биологических аналогов необходимо выбрать наиболее близкий аналог – прототип. Этот биологический прототип и рассматриваемое техническое устройство необходимо подвергнуть бионическому анализу по приведенной ниже схеме (в зависимости от рассматриваемых объектов некоторые пункты анализа могут быть исключены из рассмотрения). Отчет должен быть снабжен эскизами, поясняющими анализ объектов.

Конечной целью бионического анализа является синтез нового дизайнерского и технического решения устройства, характеристики которого должны быть улучшены по сравнению с известными. В этой части отчета

необходимо привести доказательства улучшения его характеристик на основе использования каких-либо принципов построения рассматриваемых биологических прототипов. Эскизы синтезированного бионического устройства необходимо выполнить по возможности подробно с его описанием.

Основные направления бионического анализа объектов

1. Анализ функций (назначения) известного технического устройства, сравнение с функциями биологических объектов-аналогов и (или) их элементов. Принцип действия, сравнительные количественные и качественные характеристики.
2. Анализ внешних форм, размеров и структуры сравниваемых технического устройства и биологического объекта. Анализ влияния этих характеристик на их функции и функций на форму и размеры объектов.
3. Анализ внутреннего строения технического устройства и биологического объекта на макро- и микроуровне исходя из назначения и функций объектов в целом и их частей.
4. Анализ материалов технического устройства и тканей биологического объекта. Сравнение физических, физико-химических и других свойств материалов и биотканей.
5. Анализ систем преобразования энергии в механическую в сравниваемых объектах.
6. Анализ сенсорных систем и систем управления и адаптации (если есть).

Основные источники информации

Ботанический сад Санкт-Петербурга, Зоологический музей Санкт-Петербурга, Кунсткамера этнографического музея, музей санитарии и гигиены, Национальная Российская библиотека, библиотека Медицинского университета Санкт-Петербурга, универсальные и специализированные магазины игрушек, выставки.

ДЬЯЧЕНКО Владимир Алексеевич
СМИРНОВ Аркадий Борисович

БИОНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИЗАЙН-ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Учебное пособие

Редактор *О.К. Чеботарёва*

Технический редактор *А.И. Колодяжная*

Оригинал-макет подготовлен составителями

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Свод. темплан 2008 г.

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции ОК 005–93, т. 2;
95 3005 – учебная литература

Подписано в печать 23.12.2008. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 12,5 . Уч.-изд. л. 12,25 . Тираж 100. Заказ 4213б

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета.
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.
Адрес университета и издательства:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.