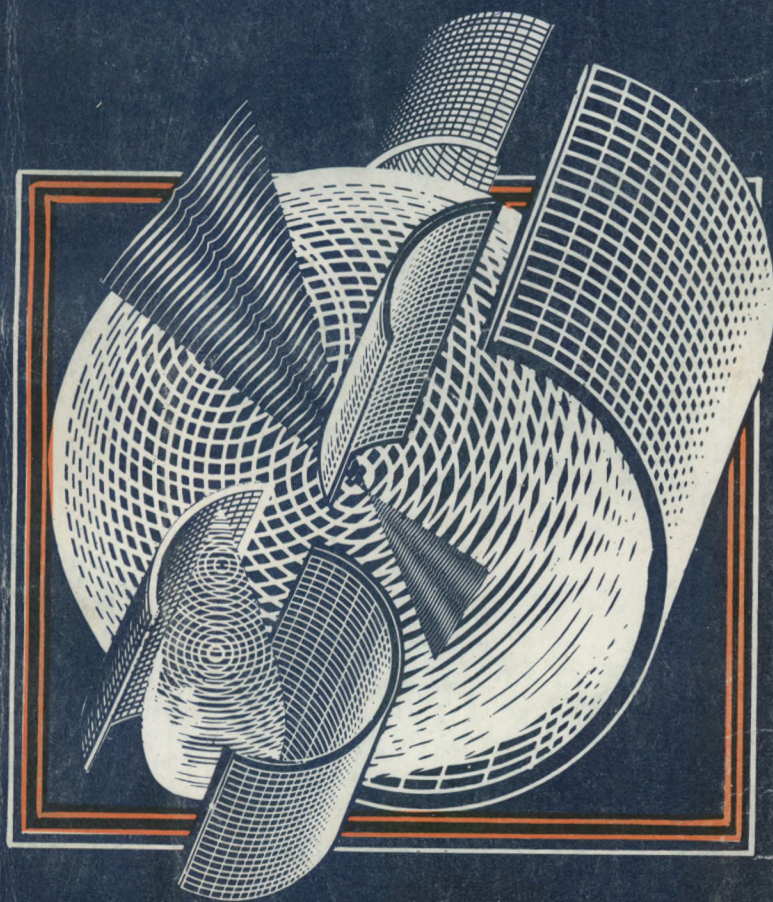


Л. В. Андреев В МИРЕ ОБОЛОЧЕК

Издательство
"Ранис"

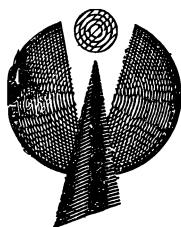
Л. В. Андреев В МИРЕ
ОБОЛОЧЕК



Л. В. Андреев

В МИРЕ ОБОЛОЧЕК

(От живой клетки
до космического
корабля)



Издательство «Знание»
Москва 1986

ББК 30.12
А 65

Автор: АНДРЕЕВ Лев Вячеславович — доктор технических наук, профессор, лауреат премии Совета Министров СССР. Специалист в области конструирования оболочечных систем. Автор более двухсот научных статей и научно-популярных брошюр. Брошюра «Материалоемкость и новая техника» удостоена диплома на Всесоюзном конкурсе научно-популярной литературы.

Рецензенты: У с ю к и н В. И. — доктор технических наук, профессор; Л е б е д е в А. Г. — кандидат технических наук.

Автор предисловия — академик АН УССР В. И. Моссаковский.



Scan AAW

Андреев Л. В.

А 65 В мире оболочек: От живой клетки до космического корабля. — М.: Знание, 1986. — 176 с.

35 к.

70 000 экз.

Одним из интереснейших инженерных решений являются оболочечные конструкции. Но оболочки — это не только конструкции из металла, бетона или пластмасс. Естественные формы оболочек — продукт эволюции жизни на Земле. Таковы панцирь черепахи, «броня» раковины, кожа разнообразных плодов.

В книге идет речь об удивительных «конструкторских решениях» живой и неживой природы. Читатель найдет в ней информацию из самых различных областей знаний: техники, биологии, геологии, механики.

Рассчитана на широкий круг читателей.

А $\frac{2105000000-118}{073(02)-86}$ 31—86

ББК 30.12

ПРЕДИСЛОВИЕ

Конструктивные формы современных машин и сооружений чрезвычайно разнообразны: от массивных оснований плотин до ажурных сетчатых конструкций телевизионных башен. Выбор формы детали, узла или сооружения определяется многими факторами: их назначением, условиями работы и даже методами расчета. Среди всевозможных конструктивных решений особенно выделяется оболочка — тонкостенная пространственная система, очерченная по криволинейной поверхности. Оболочка способна выдержать самые разнообразные виды нагрузок, обеспечивает изоляцию от окружающей среды, легко обтекается потоком воздуха или жидкости, и при этом она самая выгодная в отношении массы.

Выигрыш в массе — важный фактор для многих машин и агрегатов, а в некоторых областях инженерии — авиации, космонавтике, судостроении — жизненно необходимое требование. Да и в традиционных строительных сооружениях замена массивного плоского перекрытия, опирающегося на густой лес колонн, легким безопорным куполом оболочки дает не только экономию материала, но и простор для внутренней компоновки. Именно оболочки позволяют наиболее эффективно решать проблему снижения материалоемкости конструкции.

Что такое оболочка? Каковы ее возможности? В чем природа необычных, своеобразных ее свойств? Как спроектировать оболочку наилучшим образом? Ответ на эти и многие другие вопросы дает предлагаемая вниманию читателей книга.

Автор в доступной форме раскрывает главные черты механики оболочек на примерах из инженерной практики и живой природы, останавливается на важности и эффективности применения оболочечных конструкций и на проблемах, стоящих перед разработчиками таких систем.

Безусловно, автору было непросто справиться с поставленной задачей. Механика оболочек в наши дни достигла такого уровня математизации, что излагать ее «на качественном уровне» ничуть не легче, чем, к при-

меру, проблемы теоретической физики. Практически без формул — основного языка инженера и научного работника, без сложных схем автору удалось рассказать о теории оболочек, о проблемах их конструирования так интересно и содержательно, что создается впечатление элементарности этого трудного материала. А вместе с тем книга базируется на фундаментальных принципах теории, современных подходах к анализу и синтезу конструкций. Автор умело сочетает занимательность со строгостью и информативностью, что делает эту научно-популярную книгу доступным и вместе с тем полноценным источником знаний.

Книгу, на наш взгляд, можно рекомендовать школьнику и студенту, инженерам, людям самых различных профессий, интересующимся тем, как рождается прочность окружающих их предметов.

В. И. Моссаковский,

Герой Социалистического Труда,
лауреат Государственной премии СССР,
академик АН УССР

НА ГЛАВНОЙ ВЫСТАВКЕ СТРАНЫ (ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ)

Двадцатый век — самый дерзновенный за всю историю цивилизации. Человек проник в тайны атома и вышел на космические дороги Солнечной системы. Все это стало возможным не только благодаря успехам физики, математики, химии и других фундаментальных наук, но и блестящим достижениям инженерного искусства, воплотившимся в реальных конструктивных решениях. И среди них достойное место занимают оболочечные построения. Сегодня невозможно представить нашу жизнь без оболочек, как трудно обойтись современному человеку без услуг, предоставляемых достигнутым уровнем цивилизации.

Для того чтобы еще раз убедиться в этом, побывайте на главной выставке страны — Выставке достижений народного хозяйства СССР в Москве. Гигантская игла Останкинской башни и нацеленная в неизведанные просторы Вселенной серебристая, стремительная ракета, венчающая обелиск в честь покорителей космоса, поражают воображение. Открывая панораму выставки, они как бы символизируют не только космические скорости и аэродинамическое совершенство форм, но и олицетворяют передовые идеи века — оптимальность, экономичность, максимальную весовую отдачу конструкции в целом и каждого ее элемента в отдельности.

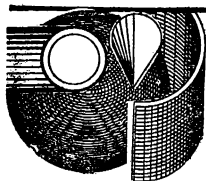
Через главный вход проходим на огромную территорию выставки. Внимание привлекают купола павильонов, ажурные конструкции перекрытий. Восхищают тонкостенные конструкции самолетов, ракет, спутников.

Что же объединяет такие совершенно непохожие друг на друга сооружения, как Останкинская башня, которая вместе с фундаментом весит 55 тысяч тонн, и тонкостенный легчайший корпус искусственного спутника Земли или купола перекрытий павильонов? И железобетонная 536-метровая башня Останкинского телецентра, и корпус современной гигантской ракеты-носителя, позволившей преодолеть земное притяжение, с точки зрения ин-

женерной реализации и функциональных идеи, заложенных в их основу, представляют единый тип конструкции. Они относятся к классу оболочечных построений. Именно оболочечные сооружения стали одним из наиболее распространенных инженерных решений многих технических проблем современности. И очевидно, поэтому сооружения в форме сферы и цилиндра преобладали в архитектурной панораме выставки ЭКСПО-85 в Японии.

Конечно, оболочки как элементы конструкций — изобретения далеко не XX века. Паровой котел (его конструкция — это прежде всего оболочка) верно служит человечеству два века, а римский водопровод существовал еще до нашей эры. С древнейших времен известны человеку емкости для хранения жидкостей, давно он начал строить и криволинейные своды перекрытий. Но подлинно революционную роль в промышленном и гражданском строительстве, самых различных областях машиностроения оболочки стали играть только в наши дни.

Железнодорожная цистерна, резервуары для жидких и газообразных продуктов, трубопроводы, протянувшиеся через бескрайние просторы Сибири и европейские равнины, и тоненькая трубка диаметром всего в несколько миллиметров — невозможно назвать все конструктивные решения, в основу которых положены оболочки. Области их применения необычайно широки: машиностроение, авиация, космонавтика, строительство, атомная энергетика, химическая технология. Не одна отрасль техники не обходится сегодня без услуг оболочечных построений. Уже доказано, что оболочечные системы играют важную роль в обеспечении жизнедеятельности живых организмов. Несомненно, оболочечные конструкции — характерная особенность облика нашей планеты.



ЧТО ТАКОЕ ОБОЛОЧКА

Какой смысл вкладывается в понятие «оболочка»? Термин этот, как принято говорить, относится к числу перегруженных. В этом легко убедиться, обратившись, например, к «Словарю русского языка» С. И. Ожегова: «Оболочка — слой, обтягивающий, покрывающий что-нибудь. Оболочка зерна. Слизистая оболочка. Оболочка аэростата». Вспомните также оболочку «Человека в футляре»: «...У этого человека наблюдалось постоянное и непреодолимое стремление окружить себя оболочкой, создать себе, так сказать, футляр, который уединил бы его, защитил бы от внешних влияний». Известна и электронная оболочка. Все эти примеры весьма наглядно подтверждают, насколько широко и многогранно житейское толкование такого простого, казалось бы, слова, как «оболочка». Из всего многообразия возможных смысловых значений этого слова нас будет интересовать только то, которое связано с понятием оболочки как вполне определенной конструкции, способной выполнять заданные функции: силовые, эксплуатационные, технологические и, несомненно, эстетические. Договорившись о житейском толковании понятия, дадим и определение, принятое в научной литературе.

С понятием оболочки в первую очередь ассоциируется представление о геометрической поверхности. В науке о прочности материалов и конструкций — механике деформируемого твердого тела, о чем пойдет речь ниже, классификация объектов, а их принято называть телами, основана на особенностях их геометрической формы, определяющий признак которой связан с соотношением характерных размеров. Принято различать и особо выделять элементы конструкций, один размер которых намного больше двух других. Это стержни, кольца, арки. Тела, у которых один размер намного меньше остальных, образуют класс оболочек и пластин.

С этих позиций оболочка — это тело, ограниченное двумя криволинейными поверхностями, расстояние между которыми, называемое толщиной, мало по сравнению с другими размерами. Значит, оболочка — прежде всего конструкция тонкостенная.

По указанным признакам в разряд оболочек, кроме крупных промышленных изделий, могут быть отнесены и многие предметы быта: абажур для электрической лампы, резиновый мяч или надувной матрац, наконец, обыкновенный стакан и многое, многое другое. Панцирь черепахи, скорлупа яйца, морские раковины, стебли злаковых и т. д. — это тоже примеры оболочечных конструкций. Как видим, понятие оболочечных построений объединяет разнообразные конструкции, создаваемые как руками человека, так и самой природой.

Если оболочка, кроме названных выше двух поверхностей, не имеет других границ, то она называется замкнутой. Но из всякой замкнутой оболочки можно выделить часть, которая будет незамкнутой оболочкой. Такие оболочки часто используются в качестве днищ в различного рода емкостях для хранения жидких и газообразных продуктов, в конструкциях перекрытий.

Оболочка как геометрическая поверхность в любой точке характеризуется двумя взаимно перпендикулярными радиусами кривизны, которые называются главными радиусами кривизны и обозначаются R_1 и R_2 . Очевидно, для сферы все радиусы равны между собой.

В теоретических исследованиях принято представлять оболочку ее срединной поверхностью, которую наделяют всеми геометрическими и физическими свойствами, присущими ее толщине.

Таким образом, основными характеристиками оболочки как геометрической фигуры являются радиусы кривизны ее поверхности, толщина и габариты в плане.

Многообразные оболочечные системы живой природы и техники могут быть систематизированы по разным признакам. Попытаемся «упорядочить» оболочечную «иерархию» с позиций геометрических, силовых и конструктивных отличительных признаков.

Один из важнейших показателей, характеризующих свойства оболочки, — отношение ее толщины, которую обычно обозначают буквой h , к радиусу R . В соответствии с этим отношением принято различать тонкие и толстые оболочки. Тонкими, или тонкостенными, оболочка-

ми принято считать такие, у которых отношение толщины к радиусу $1 : 20$ и меньше. Подавляющее большинство оболочечных инженерных конструкций тонкостенные, К толстостенным оболочкам принадлежат конструкции, для которых соответственно отношение толщины к радиусу больше $1 : 20$. Например, ствол артиллерийского орудия, водопроводная труба — это толстостенные оболочки. Конечно, указанные границы весьма условны.

Среди бесконечного многообразия геометрических форм особо выделяют оболочки вращения — цилиндрические, сферические, конические, торообразные и т. д., которые вследствие ряда неоспоримых преимуществ наиболее часто используются в конструктивных решениях. Подобные поверхности получают путем вращения кривых (такие порождающие кривые называются образующими) вокруг прямолинейной оси. Например, в результате вращения окружности вокруг оси, проходящей через ее центр, получается сфера, а при расположении оси вне круга — тор. Если вращать прямую вокруг оси, то в результате получается цилиндр или конус.

Оболочку вращения можно расечь плоскостями, проходящими через ее ось и перпендикулярно к ней. Кривые на поверхности, являющиеся следом пересечения оболочки с плоскостями, проходящими через ось вращения, называются меридианами. Плоскости, перпендикулярные к оси оболочки, пересекают поверхность вращения по параллельным кругам.

Паровой котел, корпус ракеты, трубопроводы, гигантские нефте- и газохранилища — вот только некоторые примеры использования оболочек вращения.

На современном этапе развития техники с помощью оболочек как структурных элементов конструкций решается комплекс самых разнообразных задач. Среди многочисленных функций, выполняемых оболочками, например в машинах и сооружениях, в первую очередь следует назвать силовые функции и функции разделения.

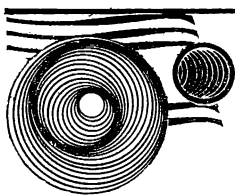
Как силовые конструкции оболочки получили широкое распространение, захватив монополию в некоторых областях техники. Об этом в основном и пойдет речь ниже. Весьма разнообразны решения, в которых оболочки используются как элементы ограждения, разделения. Ну и, конечно же, трудно переоценить роль оболочек как емкостей для хранения и транспортировки самых разнообразных продуктов. Оболочки имеют большие преимущественно

щества как изолирующие элементы, воспринимающие поверхностные и краевые нагрузки. Например, большепролетный купол можно выполнить в виде мощного стержневого каркаса, обшитого снаружи плитами-ячейками. Такая конструкция имеет большую массу, сложна в изготовлении, однако неизбежная многоэлементность несущей пространственной рамы фактически будет попыткой смоделировать, повторить средствами стержневой схемы свойства все той же оболочки.

Оболочечные элементы являются гибким инструментом в руках архитекторов, позволяющим им добиваться эстетической выразительности строительных сооружений. Эффективно использование оболочек для создания аэродинамического совершенства обтекаемых объектов, придания им декоративных форм. Широко используются тонкостенные гибкие оболочки в точном приборостроении в качестве чувствительных элементов различного рода регуляторов и датчиков. Появились у оболочек и новые профессии. Их все чаще используют, например, как грузоподъемные и движущие устройства. Говоря о функциях оболочек, нельзя не назвать усиленно разрабатываемые в последнее время конструкции, обладающие заданными свойствами по отношению к окружающей среде: полупроницаемые мембраны, самоподстраивающиеся оболочки.

В подавляющем большинстве случаев четкого разделения функций, выполняемых оболочкой, дать нельзя. Оболочки — структуры с явно выраженными тенденциями к совмещению функций конструкций, и это их лучшая аттестация.

И все же среди самых разнообразных свойств следует в первую очередь назвать прочность оболочек, без которой невозможно их существование. Как рождается это уникальное свойство и как оно проявляется в конкретных построениях? Именно с этого мы начнем знакомство с особенностями оболочечных структур.



ПОЧЕМУ НЕ РАЗРУШАЮТСЯ КОНСТРУКЦИИ

Все, что окружает человека в живой и неживой природе, представляет собой бесконечный мир конструкций, да и сам человек — наиболее совершенный их образец. Конструкции рождаются, живут — действуют и умирают — разрушаются. «Конструкция» — один из специфических синонимов понятия «система», т. е. ряд особым образом организованных элементов. И это прежде всего организация, структура *.

«Конфликты» на атомном уровне

Деформация, напряжение, прочность, упругость, жесткость, изгиб, устойчивость — все это обычные слова повседневной разговорной речи. Но стоит открыть любую книгу по конструированию и расчету оболочечных систем, и сразу можно убедиться, что они такие же привычные, чувствуют себя так же уютно и в специальной научно-технической литературе. Это основной, но далеко не полный перечень терминов, без которых невозможно объяснить принципы, положенные в основу науки о механике конструкций. Как тут не вспомнить слова замечательного французского писателя и летчика Антуана де Сент-Экзюпери: «Пытаясь охватить мир сегодняшний, мы черпаем из словаря, сложившегося в мире вчерашнем».

Чтобы понять, как и из чего рождается совершенство оболочечных конструкций, и разобраться в особенностях их работы как силовых построений, нужно выяснить, какое конкретное содержание вкладывается в названные термины и какова их специфика в такой специальной области знаний, как механика деформируемого твердого тела.

* В английском языке, кстати, конструкция — structure.

Прочность — необходимое условие существования любого объекта реального мира. Это понятие органично вошло в нашу жизнь. Мы говорим о прочности куполов зданий, тоннелей, самолетов, тканей, прочности взаимоотношений и даже человеческих чувств. Например, персонаж Ольги Форш в «Михайловском замке» восклицает: «Разве можно поверить в прочность чувств своих ли, чужих ли?»

В универсальности понятия прочности заключается его фундаментальность как обязательного свойства всей живой и неживой материи. Прочность живых организмов формируется в борьбе за существование, т. е. в том процессе, который Дарвин назвал естественным отбором. Подсчитано, что за три миллиарда лет существования жизни на нашей планете возникло и навсегда исчезло примерно 480 миллионов различных видов животных и растений.

Прочность создаваемых человеком машин и механизмов определяется уровнем наших знаний, зависящих от состояния развития науки, умения материализовать их с помощью конкретных технологий. О прочности конструкций можно заботиться по-разному. Помните, как Н. В. Гоголь в «Мертвых душах» характеризует степень инженерного совершенства сооружений усадьбы Собакевича: «Помещик, казалось, хлопотал много о прочности. На конюшни, сараи и кухни были употреблены полновесные и толстые бревна, определенные на вековое стояние». Современный инженер, вооруженный научно обоснованными методами расчетов, стремится создать конструкцию вполне конкретной прочности, гарантирующей надежность ее функционирования на весь срок службы. При этом наилучшим будет то решение, которое наиболее полно сочетает функциональное совершенство, прочность и экономичность.

Прочность любого элемента конструкции как предмета материального мира рождается на атомном уровне. Как известно, все вещества состоят из атомов и молекул. Атом — мельчайшая частица химического элемента, а молекула — наименьшая частица вещества, обладающая его основными химическими свойствами и способная к самостоятельному существованию. Молекулы состоят из одинаковых или различных атомов. Свойства молекул определяют не только количество и «качество»

атомов, участвующих в «постройке» молекул, но и порядок, и конфигурация их соединения.

По структуре все твердые тела делятся на два типа. Это кристаллические тела, в которых атомы расположены в кристаллической решетке с определенной периодической закономерностью. Современные конструкционные сплавы и большинство окружающих нас твердых тел, как правило, имеют такую структуру. Второй тип твердых тел составляют аморфные тела. Они «конструируются» на основе как атомов, так и молекул. Причем атомы и молекулы в таких телах располагаются хаотично. Атомы и молекулы, образующие вещества, удерживаются вместе с помощью химических связей. Известно несколько типов связей, отличающихся по своим свойствам: ковалентная, ионная, металлическая, водородная связи и силы Ван-дер-Ваальса.

Расстояния между атомами измеряются очень малыми единицами — ангстремами, которые обозначаются Å. Ангстрем равен одной стомиллионной доле сантиметра. «Кирпичики мироздания» отстоят друг от друга на расстояние, определяемое величинами порядка $1-2\text{Å}$.

В зависимости от этих расстояний меняются и силы взаимодействия между атомами. На определенных дистанциях силы взаимодействия уравновешены. Находясь на больших расстояниях, атомы притягиваются друг к другу. Причем при увеличении расстояния по сравнению с равновесным силы притяжения вначале растут и в какой-то момент достигают наибольшего значения, а затем при дальнейшем увеличении расстояния весьма быстро уменьшаются и становятся ничтожно малыми. При сближении атомов на дистанции меньше равновесных между ними возникают силы отталкивания. Они нарастают довольно резко до некоторого предельного значения, после которого дальнейшее сближение атомов становится практически невозможным.

Если бы силы химического взаимодействия внезапно перестали существовать, то все твердые тела мгновенно рассыпались бы. С другой стороны, если бы не существовало сил отталкивания, то тела легко бы сжимались, как любой газ.

Описанный механизм взаимодействия атомов во многом объясняет поведение материалов при растяжении и сжатии. Равновесное состояние соответствует ненагру-

женному телу. При растяжении внешние силы стремятся увеличить расстояние между атомами, а при сжатии — уменьшить, но в обоих случаях это приводит к увеличению (без учета направления действия сил) межатомных связей, т. е. к активному противодействию внешним силам.

Чтобы понять поведение твердых тел при нагружении, классифицировать возникающие изменения и установить единицы их измерения, построим силовую модель твердого тела, которая и поможет обосновать особенности его поведения. Нетрудно догадаться, что речь идет о «конструкции» из атомов, соединенных между собой «пружинками», имитирующими связи взаимодействия. Конечно, пружинки эти особые, не всем знакомые механические.

Что подсказала Гуку струна

Возьмем проволоку с подвешенным на ней грузом. Внешне мы не заметим никаких изменений. Но если бы удалось проникнуть внутрь материала, какая неожиданная картина предстала бы нашему взору! Силы натяжения стремятся разорвать многие миллионы прочных химических связей, соединяющих атомы друг с другом, а силы межатомного взаимодействия этому мощно сопротивляются. Идет ожесточенная борьба атомов за возможность «существования» в единой конструкции. Заметим, что, как правило, исследование прочности материалов основано на «пространственном видении». Этот метод исследования называется методом сечений. Однако вернемся к проволоке с грузом. Попытаемся выяснить, как реагирует она на увеличение или уменьшение подвешиваемого груза.

Известно, что все тела под действием внешних сил в той или иной степени изменяют свои размеры. Если рассмотреть этот процесс на атомном уровне, то он проявляется в изменении расстояний между атомами: расстояния при растяжении увеличиваются, а при сжатии уменьшаются. Изменения, происходящие на микроуровне, накапливаются и в итоге приводят к изменениям линейных размеров. Принципиально важным в механизме увеличения или уменьшения размеров тела является обратимый характер процесса: после снятия нагрузки атомы возвращаются в исходное положение, вследствие

чего форма тела восстанавливается. Поэтому как проволоку, так и другие конструкции можно нагружать многократно, и всякий раз после снятия нагрузки остаточных изменений формы не возникает. Такое поведение материала называется упругим. Следовательно, упругость — это свойство твердого тела восстанавливать свои первоначальные размеры после снятия нагрузки.

Понятно, что чем больше масса подвешиваемого груза, тем больше увеличивается и длина проволоки. Разница между размером проволоки в нагруженном состоянии l и ее первоначальной длиной l_0 называется абсолютной деформацией. Обозначим ее символом Δ . Измеряется абсолютная деформация в единицах длины. В научной литературе принято пользоваться безразмерной величиной — отношением абсолютной деформации к исходной длине, выраженным в процентах: $\Delta/l_0 \cdot 100\% = \epsilon$.

Таким образом, ϵ определяет относительное изменение линейного размера.

Фундаментальная закономерность, выражающаяся в зависимости между силой и вызываемым ею перемещением, открыта английским ученым Робертом Гуком (1635—1703). Само открытие сопровождалось весьма любопытной историей. Изучая поведение стальной проволоки и пружин, нагруженных грузами, Гук пришел к выводу, что абсолютно твердых тел нет и что если бы такое тело существовало, то оно полностью было бы лишено упругости. Результаты своих наблюдений и измерений Гук опубликовал в 1676 году в виде анаграммы из латинских букв: «ceiinnosssttuu». В анаграмме буквы расставлены по алфавиту. Но если их расположить в определенном порядке, то может быть составлена известная только автору фраза, выражающая суть найденной закономерности. Подобным образом на заре становления современной науки зашифровывали открытия, если еще не было полной уверенности в их достоверности. Этим как бы делалась заявка на приоритет, чтобы никто не опередил автора. Окончательно убедившись в справедливости своих выводов, Гук в 1678 году в работе «О восстановительной способности или об упругости» расшифровал анаграмму, которая на латыни звучала так: «ut tensio sic vis» («Каково удлинение, такова и сила»).

Интересна с позиций сегодняшних представлений методика постановки опытов Гуком. Он писал: «Возьмите проволочную струну... укрепите ее в верхней части гвоз-

дем, а к нижнему концу подвесьте чашку весов для нагрузки. Затем измерьте циркулем расстояние от дна чашки до земли или пола и запишите это расстояние; далее положите в названную чашку гири, измерьте несколько раз удлинения названной струны, и вы найдете, что они всегда будут относиться друг к другу так же, как вызвавшие их нагрузки».

По существу, Гук открыл важнейший случай зависимости между усилиями и удлинениями — линейный закон. Роберт Гук был выдающимся и разносторонним ученым своего времени. Трудно перечислить то, что он сделал в науке, но, кроме того, он был и талантливым изобретателем, выдающимся архитектором, градостроителем и гениальным экспериментатором. Им сделано много изобретений, в частности сохранившее свое значение до наших дней универсальное соединение «шарнир Гука», используемое во многих механических передачах и в первую очередь в автомобиле.

Гук был современником и соотечественником другого выдающегося ученого — Исаака Ньютона (1643—1727). Но это, к сожалению, нельзя отнести к положительным моментам его биографии. Как это подчас случается, они были не соратниками, а соперниками и вели тяжбу за открытия в науке. В частности, Гук претендовал и, как признано, не без оснований, на то, что он впервые указал на главные положения закона всемирного тяготения.

Вернемся к фундаментальному соотношению, устанавливающему прямо пропорциональную зависимость удлинения образца от величины растягивающей его силы. В том виде, в каком этот закон был выдвинут Гуком, он имеет скорее познавательное, чем практическое значение. Гук не смог расстаться с конкретными инструментами своего исследования — стальной струной и различными пружинами, которые он испытывал. Он не сумел систематизировать результаты экспериментов в такой форме, чтобы охарактеризовать обнаруженную закономерность как свойство самого материала, не зависящее от формы и размеров испытываемых элементов конструкций. Остался один шаг до общепринятой сейчас формулировки закона Гука. Но сделать его, как показала история, оказалось отнюдь не просто. Чтобы и нам подготовиться к этому решительному шагу, обратимся снова к сложным взаимоотношениям на микроуровне.

Как измерить внутреннюю силу

Жизнь в мире атомов протекает не «бесконфликтно». Как бы ни была совершенна внутренняя структура того или иного материала, в ней обязательно присутствуют какие-то отклонения от идеального порядка. В самом деле, реальные материалы даже в силу молекулярного строения не могут быть полностью однородными. Например, металлы, обладающие поликристаллической, т. е. состоящей из множества хаотически расположенных кристалликов, структурой, естественно, не являются, строго говоря, однородными. Кроме того, встречаются посторонние включения, возможно возникновение различного рода микротрещин и других дефектов. Все это в конечном счете приводит к нарушению однородности материала. В результате при нагружении атомы и соединяющие их связи оказываются не в одинаковых условиях: одним приходится выдерживать большие нагрузки, другим меньшие.

Однако важно другое. В материалах, применяемых в промышленности, дефекты распределены достаточно равномерно по его массе. Кроме того, размеры конструкций всегда несоизмеримо больше не только межатомных расстояний и размеров кристаллических зерен, но и размеров возможных нарушений в структуре. Поэтому принято считать, что материалы представляют собой сплошную однородную среду независимо от особенностей их микроструктуры.

С понятием однородности материала связано понятие его сплошности: материал рассматривается как среда, непрерывно заполняющая отведенный ей объем. Для объяснения указанных свойств существует гипотеза о сплошности и однородности материала. Эта гипотеза играет исключительно важную роль в механике деформируемого твердого тела, так как позволяет применить к исследованию прочности конструкций аппарат высшей математики — анализ бесконечно малых величин. А это открывает широкие возможности для обобщений и «стандартизации». Именно на основе сформулированной гипотезы и концепции упругости материала в точке для бесконечно малой площадки внутри тела вводится одно из важнейших понятий в механике — напряжение.

В самом деле, теперь не представляет никакого труда записать соотношение для более общей характери-

ки состояния тела в любой точке. Если обозначить действующую силу буквой F , а площадь поперечного сечения S , то согласно заключению, к которому мы только что пришли, напряжение σ (это наиболее употребительное его обозначение) есть $\sigma = F/S$.

Как следует из формулы, напряжение измеряется в единицах силы, отнесенных к единицам площади. Напряжение характеризует меру воздействия внешних нагрузок на атомы и молекулы, составляющие материал, которые вынуждены под действием этих сил менять свое положение, сближаясь или удаляясь друг от друга.

Понятие «напряжение» было сформулировано и введено в научную литературу французским математиком Огюстеном Луи Коши (1789—1857) в статье, представленной во Французскую академию наук в 1822 году. К обоснованию понятия напряжения был очень близок еще Галилей. Во всяком случае он установил, что прочность бруса при растяжении пропорциональна площади его поперечного сечения и не зависит от длины. Обнаруженную закономерность Галилей назвал «абсолютным сопротивлением разрыву».

Обратим внимание на одну характерную деталь: Коши сформулировал понятие «напряжение» в 1822 году, а Гук опубликовал свои результаты в 1678 году. Следовательно, для того чтобы проделать элементарную арифметическую операцию — разделить силу на площадь, — потребовалось 150 лет. Необходим был скачок в представлениях, который оказался отнюдь не простым и дался ценой усилий многих исследователей.

Теперь мы можем в самом общем виде сформулировать закон Гука, который является фундаментом механики деформируемых упругих тел. Как мы уже знаем, в соответствии с этим законом связь между нагрузкой и вызванным удлинением (или между напряжением и деформацией) прямо пропорциональная. На любом этапе нагружения материала при упругом его поведении отношение σ к ϵ остается постоянной величиной, т. е. σ и ϵ связаны между собой зависимостью $\sigma/\epsilon = E$.

Величина E называется модулем упругости. Иногда модуль упругости именуют модулем Юнга, по фамилии английского ученого Томаса Юнга (1773—1829), который сделал последний шаг в формулировании закона Гука в его современном виде.

Поскольку ϵ — величина безразмерная, то модуль

упругости выражается в тех же единицах, что и напряжение. Заметим, что связь между σ и ϵ можно представить графически в виде прямой в прямоугольных координатах: по горизонтальной оси откладывают ϵ , а по вертикальной — σ .

При растяжении разрушение происходит за счет разрыва межатомных связей. Существует еще один вид разрушения материала, связанный со стремлением внешних сил разделить атомный монолит в направлении действия сил. Подобную операцию можно произвести над аккуратно сложенными друг на друга несколькими книгами, если сдвинуть одну часть книг относительно другой в направлении плоскости стола. Возникающая в этом случае деформация называется деформацией сдвига и соответственно разрушение материала — разрушением путем сдвига или среза. Именно так разрушаются заклепки в заклепочном соединении. Этот вид деформирования играет важную роль в обосновании механизма разрушения твердых тел. Но к объяснению механизма работы оболочек он прямого отношения не имеет. Поэтому мы не будем подробно его рассматривать.

Наблюдения показывают, что, когда величина подвешенного груза достигает определенного значения, возникают некоторые новые особенности в поведении материала. В процессе сопротивления действию внешних сил в межатомных связях появляются признаки «усталости»: атомы одной части тела способны перемещаться по отношению к атомам другой части тела, меняя при этом своих соседей, т. е. наблюдается соскальзывание по некоторым плоскостям. После снятия нагрузки они уже полностью не возвращаются в исходное положение, материал приобретает свойство пластичности, т. е. наряду с упругими в нем возникают необратимые пластические остаточные деформации. Процесс образования остаточных деформаций можно наблюдать, растягивая стержень из пластилина или глины: после снятия нагрузки он останется в том виде, какой получил в процессе растяжения. По мере увеличения нагрузки на проволоку ее пластические деформации будут также увеличиваться, причем рост их происходит опережающими темпами по сравнению с ростом напряжений. И наконец, при некотором значении массы груза произойдет разрыв. Соответствующая моменту разрушения величина напряжения называется пределом прочности материала.

Способность сил межатомного взаимодействия изменять характер своего поведения — очень важное свойство материалов. Представим, что этот механизм для всех материалов одинаков и с увеличением нагрузок силы межатомного взаимодействия пропорционально увеличиваются до предельного состояния, соответствующего моменту разрыва связей. Гипотетически так ведут себя идеально упругие материалы. При снятии нагрузки они полностью восстанавливают свою форму. Но в этом случае возникло бы много неразрешимых проблем.

Не менее важное свойство материалов — пластичность. На основе способности материалов к пластическому деформированию построены многие технологические процессы, определяющие лицо современного машиностроения:ковка, штамповка, прессование и прокатное производство. Пожалуй, успехи в создании металлических оболочек стали возможны благодаря способности материалов проявлять пластические свойства при определенном уровне напряжений.

Что такое жесткость

Понятие о модуле упругости, как уже было сказано, сформулировано английским ученым Томасом Юнгом. Круг научных интересов Юнга, одного из проницательнейших умов своего времени, был необычайно широк. Он открыл интерференцию света и занимался расшифровкой египетских иероглифов. В 1807 году вышел знаменитый труд «Натуральная философия», в первом томе которого в главе о пассивной прочности и трении Юнг впервые ввел определение: «модуль упругости какого-либо вещества представляет собой столбик этого вещества, способный произвести давление на свое основание, которое так же относится к весу, создающему некоторую степень сжатия, как длина столбика к уменьшению его длины». Определение Юнга, несмотря на немногословность, не отличается ясностью изложения. Это дало основание английскому адмиралтейству в письме к Юнгу отметить: «Хотя их светлости весьма уважают науку и очень ценят вашу статью, она слишком учена... говоря короче, она непонятна».

Попытаемся уяснить смысл умозаключений Юнга на простых примерах. Из житейского опыта хорошо извест-

но, что довольно легко растянуть резиновую ленту, чего нельзя сделать с обыкновенной веревкой того же сечения, не говоря уже о проволоке. Отсюда становится ясно, что одно и то же напряжение вызывает у разных материалов различные удлинения. Следовательно, чтобы в соответствии с законом Гука произведение $\sigma \cdot \epsilon$ оставалось постоянным, каждый материал должен иметь свою константу E . Она-то и определяет способность материала упруго сопротивляться действию внешних сил. Чем больше модуль упругости, тем меньшие деформации возникают в материале при одном и том же уровне действующих напряжений.

На основании этих наблюдений можно составить наглядное представление о таком важнейшем свойстве материалов, как жесткость. Жесткость материала — его модуль упругости — можно вычислить, зная напряжение и вызванное им удлинение. Из закона Гука следует также, что модуль упругости можно рассматривать как напряжение, при котором удлинение при нагружении достигнет первоначальной длины образца. Такие деформации выдерживает, например, резина. Известно множество материалов, как натуральных, так и синтетических, в которых упругие деформации достигают сотен процентов. Это так называемые эластомеры.

А теперь изменим условия эксперимента: оставляя неизменным материал, будем увеличивать размеры поперечного сечения. Результаты не заставят себя ждать: все труднее будет растягивать даже обыкновенную резиновую ленту. С увеличением сечения она непрерывно «ужесточается». Следовательно, способность элемента конструкции сопротивляться растяжению — сжатию, т. е. его жесткость, характеризует не только модуль упругости E , но и площадь поперечного сечения S . А полная жесткость сечения определяется их произведением.

Приведенные рассуждения можно обобщить следующим выводом. Если модуль упругости E (как и предел прочности σ_b) определяет механические показатели материала, а S — площадь сечения, то жесткость сечения является комплексной характеристикой, учитывающей механико-геометрические свойства конструкции.

Изгиб и его последствия

Растяжению подвергаются далеко не все элементы конструкций. Повседневный опыт убеждает в том, что очень часто силы действуют не вдоль оси стержня, а поперек. К чему это приводит? Вспомним, какие неприятные ощущения возникают, когда приходится переходить бурлящий ручей по перекинутой через него доске. Как угрожающе прогибается доска, издавая подозрительные звуки, едва человек достигнет ее середины.

Нетрудно убедиться, что если силы действуют перпендикулярно оси стержня, то в процессе нагружения происходит искривление его оси. В этом случае стержень называют балкой. Следовательно, балка при действии поперечных нагрузок изгибается. По характеру деформаций, испытываемых балкой, этот вид нагружения и получил название изгиба.

Концы балки закрепляют с помощью специальных конструктивных устройств — опор. Доска, перекинутая через ручей, в соответствии с принятой терминологией — это балка на двух опорах, роль которых выполняют берега ручья. Расстояние между опорами принято называть пролетом балки.

Для прыжков в воду спортсмены используют доску, один конец которой свободно висит над водой. Это консольная балка. Принципиальное отличие между доской через ручей и консольной балкой как элементами силовых конструкций не только в количестве опор. Балка на двух опорах может иметь множество способов закрепления концов. Опорное сечение консольной конструкции должно быть, как говорят инженеры, жестко заделано, иначе она будет поворачиваться, уподобляясь механизму.

Балки человек применял с незапамятных времен. Очевидно, первым инженерным сооружением, позволившим преодолеть естественное препятствие, явилось дерево, перекинутое через овраг. Вместе с первыми осмысленными шагами человек научился использовать обыкновенную палку для многократного увеличения своей мускульной силы, используя ее в качестве рычага.

Рычаги бывают разные. Рычаг первого рода можно рассматривать как две разной длины консоли, поскольку под грузом его сечение находится в тех же условиях, что и сечение консольной балки в месте крепления. Ры-

чаг второго рода — это не что иное, как двухопорная балка.

Поведение балок при изгибе намного сложнее, чем стержней при растяжении. Предварительную информацию об особенностях изгиба можно получить из общих наблюдений и возникающих на их основе логических построений. Поскольку ось балки при изгибе искривляется, то следует предположить, что ее продольные волокна находятся не в одинаковых условиях. Однако механизм изгиба может быть исследован только на основе глубокого изучения поведения модели. Это очень распространенный прием, к нему прибегают всегда, когда явление не удается достаточно хорошо познать «лобовой атакой». Кроме того, схематизация сложного явления позволяет наглядно представить картину происходящих процессов.

Наша модель представлена на рис. 1. Около места крепления разрежем балку на две части и тут же соединим их так, чтобы сохранялись условия ее работы как непрерывной конструкции. Модель имитирует любое поперечное сечение балки. В представленном механизме сплошность материала в поперечном направлении гарантирована введением шарнира посередине высоты балки, а способность продольных волокон сопротивляться растяжению-сжатию — пружинами.

На боковой поверхности балки нанесем несколько (1, 2, 3) поперечных рисок, обозначающих соответствующие сечения. Роль их в эксперименте будет ясна из дальнейшего. Изгибающий момент в любом сечении балки определяется по правилу рычага как произведение силы на соответствующее плечо, на которое она действует. В нашем примере плечом балки являются расстояния от точки приложения силы до сечений соответственно a_1 , a_2 , a_3 . В справедливости такой процедуры можно легко убедиться на основании простых рассуждений. Мысленно (это общераспространенный прием) приложим в сечении, где расположен шарнир, две равные по величине

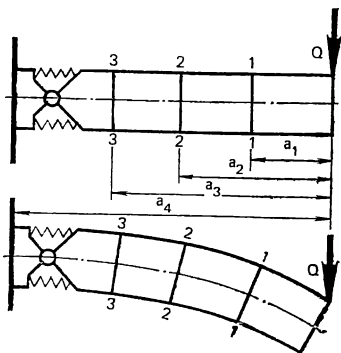


Рис. 1. Схематическое изображение балки под нагрузкой

не и противоположные по направлению силы Q . Поскольку силы, как равные по величине и противоположно направленные, взаимно друг друга компенсируют, то ни на равновесии, ни на нагружении балки эта процедура не отразится. Но в то же время такой подход дает право говорить об изгибающем моменте в этом сечении, который создается парой сил, действующих в разные стороны, и поперечной силе Q .

После того как мы обо всем условились в самых общих чертах, можно перейти и к эксперименту. Прикладывая на свободном конце балки силу и постепенно увеличивая ее, легко обнаруживаем, что пружинки начинают деформироваться, причем верхняя будет растягиваться, а нижняя сжиматься. Чем больше сила, тем большие деформации будут испытывать пружинки. Как и при растяжении, зависимость линейная. Отсюда можно сделать вывод, что в балке поперечные силы трансформируются в продольные напряжения растяжения-сжатия, которые и вызывают соответствующие удлинения. В рассматриваемой модели посередине балки нет продольных напряжений, вокруг шарнира происходит только поворот сечения. Это так называемый нейтральный слой балки. Если рассмотреть явление на молекулярном уровне, то, оказывается, в силу сплошности материала напряжения должны изменяться непрерывно.

А теперь обратим внимание на поперечные риски. В процессе искривления балки они останутся практически прямыми и повернутся на некоторые углы так, что по-прежнему будут перпендикулярны оси балки. Это дает возможность ввести так называемую гипотезу плоских сечений, т. е. образование деформаций рассматривать как результат поворота плоских поперечных сечений друг относительно друга. Следовательно, деформации и соответствующие им силы межатомного взаимодействия, определяемые как напряжения, не остаются постоянными по поперечному сечению, а изменяются по линейному закону. Причем меняется и сам характер межатомных связей. Часть связей оказывается растянутой, а другая — сжатой. Это и приводит к заключению, что одни продольные волокна удлиняются, а противоположные им по высоте сечения укорачиваются. Неравномерно распределенные напряжения создают реактивный момент сопротивления внутренних сил межатомного взаимодействия внешнему изгибающему моменту.

Вне поля зрения осталась поперечная сила Q , которая в рассматриваемой модели воспринимается шарниром. В реальной балке она стремится перерезать ее, сдвинуть одно сечение относительно другого. Этот фактор в нашем изложении главенствующего значения в процессе изгиба не имеет, и поэтому не будем на нем больше останавливаться.

О чем не подумал Архимед

Итак, в общих чертах мы выяснили, к каким последствиям приводит действие нагрузок вдоль оси стержня и перпендикулярно к ней. Характер распределения напряжений по поперечному сечению балки приводит к малоутешительным выводам: при изгибе прочностные возможности материала балки используются не лучшим образом. Средняя часть сечения оказывается сильно недогруженной. Именно этими соображениями обычно руководствуется конструктор, пытаясь построить сооружение таким образом, чтобы в нем как можно больше элементов работало на растяжение или сжатие, а не на изгиб.

И еще одно уязвимое место у балок. Изгибающий момент растет пропорционально ее длине. Поэтому-то длину балки нельзя увеличивать беспредельно. В этой связи как не вспомнить знаменитого Архимеда (ок. 287—212 до н. э.). Произнося свою легендарную фразу: «Дайте мне место, на которое я мог бы встать, и я сдвину землю», величайший математик и механик Древней Эллады уповал на всемогущую силу рычага, с помощью которого он надеялся совершить эту уникальную операцию. Поскольку во времена Архимеда физическому совершенству уделялось много внимания, то можно предположить, что создать силу в 60 килограммов для учебного не представляло большого труда. Масса Земли вычислена точно, и она равна $5,976 \cdot 10^{24}$ килограммов, т. е. практически $6 \cdot 10^{24}$ килограммов. Значит, Архимед собирался с помощью рычага создать силу (рис. 2), в 10^{23} раз превышающую его собственные возможности. Но ведь нам теперь понятно, что в этом случае изгибающий момент в точке опоры Земли о рычаг должен достигнуть (в условных единицах длины) фантастической величины — $6 \cdot 10^{24}$ килограммов. Однако Архимед ни словом не оговорился, как «конструктивно» представлял себе

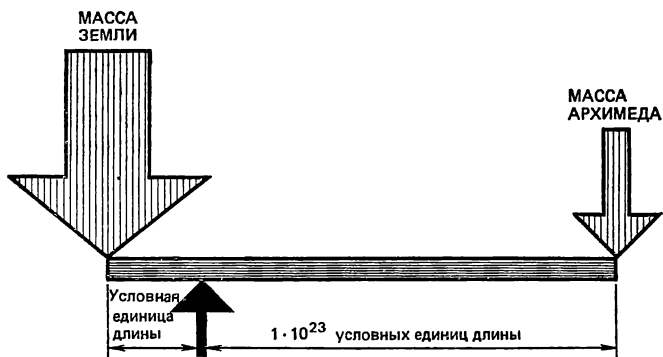


Рис. 2. Рычаг Архимеда

свой рычаг, а точнее, какое поперечное сечение должна была иметь балка, чтобы она смогла выполнить возлагавшиеся на нее надежды.

И вот тут-то мы вплотную подходим к одному из интереснейших свойств, присущих твердым телам. Речь идет об их форме. Оказывается, во многих случаях она решающим образом влияет на качество происходящего процесса и выступает не как внешний формальный признак, а как внутренняя черта, порождающая качество. Общеизвестный пример: асимметрия профиля крыла самолета приводит к возникновению подъемной силы. А благодаря чему ракета преодолевает силу тяжести? Истечение продуктов сгорания топлива в двигателе в одном направлении создает реактивную силу, специальное же профилирование канала выброса газов (сопло) многократно эту силу увеличивает.

Вернемся к проволоке с подвешенным на ней грузом. Обратите внимание, что при определении жесткости на растяжение мы совершенно не учитывали форму площади ее поперечного сечения: сплошная она или пустотелая, а возможно, и весьма замысловатых очертаний, какие часто приходится наблюдать в элементах строительных конструкций. Между тем форма сечения решающим образом влияет на способность конструкции сопротивляться внешним воздействиям: сравнительно легко можно согнуть руками стальной прут, но, несомненно, весьма не просто ту же операцию проделать с тонкостенной трубой, площадь поперечного сечения которой равноцен-

на площади сечения сплошной проволоки. Сопrotивляемость в этом случае многократно возрастает.

Многие примеры из повседневной практики убеждают в том, что эффективнее сопротивляются изгибу элементы конструкций, площади поперечного сечения которых максимально разнесены относительно его центра тяжести. По такому принципу построены контуры рельса, швеллера, двутавра. Именно по этой причине у дерева начинает отмирать сердцевина: материал центральной части, практически выключенный из активной работы, быстрее стареет (на сопротивляемости же дерева ветру, т. е. изгибу от поперечной нагрузки, отсутствие сердцевины отражается очень мало).

Сделаем обобщающий вывод: при изгибе действию внешних нагрузок успешнее сопротивляется балка, границы поперечного сечения которой наилучшим образом разнесены относительно его центра тяжести. Количественно эта особенность сечения характеризуется математической величиной, называемой моментом инерции и обозначаемой обычно латинской буквой I . Существуют и специальные формулы, по которым можно найти момент инерции любого сечения. Однако мы не будем на этом останавливаться. Отметим лишь, что если при растяжении все части сечения вносят в сопротивление действию внешней нагрузки вклады, пропорциональные их площадям, и жесткость сечения пропорциональна совокупной площади всего сечения, то при изгибе, как мы убедились, картина иная. Области поперечного сечения, более удаленные от центра тяжести, вносят более весомый вклад в сопротивление внешним воздействиям. При определении момента инерции их суммируют не как при вычислении площади, а с учетом расположения относительно оси, проходящей через центр тяжести всего сечения. «Вес» каждой площадки в общем моменте инерции сечения определяется коэффициентом, равным квадрату расстояния ее от указанной выше оси. Поэтому становится ясно, почему сгнившая сердцевина ствола дерева почти никак не влияет на его прочность — площадь сердцевины группируется как раз вокруг центра тяжести всего сечения среза дерева.

Момент инерции является функцией линейных размеров и формы площади сечения, а единицей измерения его служит единица длины, например сантиметр, в четвертой степени. Отсюда наглядно видно, как сильно

влияет на величину момента инерции увеличение линейных размеров. И чем больше I , тем большей (при прочих условиях) сопротивляемостью изгибу будет обладать балка в своем «противоборстве» с поперечными силами, тем меньшие возникнут в ней напряжения.

А теперь к конструированию поперечного сечения балки можно подойти с профессиональным «знанием дела»: в районе центра тяжести сечения, где возникают наименьшие напряжения, а следовательно, материал недогружен, должно присутствовать лишь такое его количество, которое необходимо для создания конструкции формы сечения и восприятия поперечной силы.

Как было показано, возникающие при изгибе нормальные напряжения σ вызывают неравномерные деформации продольных волокон, которые зависят, в свою очередь, от величины модуля упругости. Поэтому модуль упругости E , как и при растяжении, остается по-прежнему ответственным за жесткость материала при изгибе. Жесткость сечения данной формы (в этом мы только что убедились) оценивается моментом инерции I . Произведение этих величин по аналогии с растяжением называется жесткостью при изгибе. Чем больше жесткость на изгиб, тем меньше при прочих равных условиях прогнется доска, перекинутая через ручей, и тем более уверенно будет чувствовать себя человек, передвигаясь по ней.

Первый трактат о прочности

Первым, кто попытался поставить на научную основу проблему безопасных размеров элементов конструкций и, в частности, сопротивления балок изгибу, был Галилео Галилей (1564—1642). Всем известно, что Галилей был не только астрономом и физиком, но и механиком. Во время пребывания в качестве узника инквизиции на вилле Арчетри близ Флоренции он написал свою знаменитую книгу «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки». Это первый печатный труд (книга издана в 1638 году в Лейдене), посвященный изучению способности конструкций сопротивляться действию нагрузок, и именно отсюда начался отсчет истории развития механики упругих тел.

Как уже было отмечено выше в книге, Галилей был очень близок к определению сущности напряжения. Свои

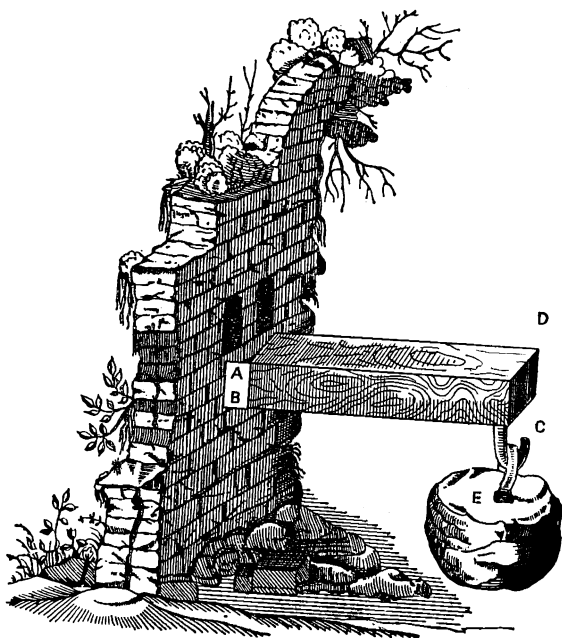


Рис. 3. Испытание консольной балки на изгиб. Рисунок Галилея

взгляды на механику он изложил в виде диалогов. В первом диалоге обсуждается, в частности, проблема прочности геометрически подобных сооружений и указывается, что по мере увеличения абсолютных размеров они будут становиться все более и более слабыми. «С маленькими обелисками,— пишет Галилей,— колоннами и другими твердыми телами мы можем, например, обращаться свободно, наклоняя и поднимая их без риска сломать, в то время как в большем виде эти фигуры разлетались бы на куски и не от чего иного, как от собственного своего веса».

Теорию изгиба балок Галилей излагает во втором диалоге книги. Согласно представлениям Галилея, «сопротивление» распределяется равномерно по поперечному сечению, а поворот сечения происходит относительно оси, проходящей через нижнюю точку *B* сечения *AB*, как показано на рис. 3. Теперь-то мы можем точно сказать, в чем состояла ошибка Галилея. Соответствующий дей-

ствительному распределению напряжений момент в сечении составляет всего одну треть от момента, вычисленного по его теории.

Научный авторитет Галилея был настолько велик, что это ошибочное представление о механизме поворота сечения долго оставалось незыблемым в науке. Эту ошибку повторили такие известные ученые, как Мариотт и Якоб Бернулли. Работа Мариотта была издана в 1686 году, через два года после его смерти, а Якоба Бернулли — в 1705 году. И только лишь Паран в 1713 году и затем Кулон в 1733 году пришли к правильному выводу о характере распределения напряжений по сечению.

Опираясь на свою теорию, Галилей делает, однако, правильное заключение о том, как более эффективно «конструировать» поперечное сечение при изгибе. Опирая балкой прямоугольного поперечного сечения, он задает вопрос: «Почему и во сколько раз брус, или лучше призма, ширина которой больше толщины, окажет больше сопротивления излому, когда сила приложена в направлении ее ширины, чем в том случае, когда она действует в направлении толщины?» И дает на него правильный ответ: «Любая линейка или призма, ширина которой больше толщины, окажет большее сопротивление излому, когда она поставлена на ребро, а не лежит плашмя, и притом во столько раз больше, во сколько ширина больше толщины». К аналогичному заключению мы уже пришли выше.

Во втором диалоге книги содержится много других рассуждений о сопротивляемости балок изгибу, которые вполне соответствуют современным представлениям. В частности, указывается, что труба по сравнению со стержнем сплошного сечения равного веса будет более прочной. Книга Галилея показывает не только стремление автора привести сложившиеся представления о поведении конструкций в единую логическую систему, она знаменует собой рождение новой науки — науки о прочности сооружений.

Коварное сжатие или устойчивость конструкций

Использование физических представлений о строении вещества дает богатый арсенал возможностей для проникновения в тайны рождения прочности конструкций

и их способности сопротивляться внешним воздействиям.

При обсуждении механизма реакции материалов на внешние воздействия мы не останавливались на принципиальном различии между растяжением и сжатием. А между тем поведение материалов, обусловленное особенностями связей межатомного взаимодействия, при растяжении и сжатии проявляется по-разному. Одни материалы — стальные сплавы, например, — как правило, на начальных стадиях деформирования при растяжении и сжатии ведут себя почти одинаково. Поведение других при сжимающих нагрузках практически не имеет ничего общего с поведением при растяжении. Так, один из важнейших строительных материалов — бетон — способен хорошо воспринимать сжимающие усилия. Однако даже при незначительных растягивающих напряжениях в нем возникают трещины. Но если элементы конструкций сделаны из какого-то материала, одинаково сопротивляющегося растяжению и сжатию, то это не означает, что между этими видами нагружения не существует принципиального различия.

Попробуйте разорвать на две части обыкновенную школьную деревянную линейку, растягивая ее за концы. Прочность ее, оказывается, намного больше человеческих возможностей. Зато очень легко можно сломать линейку, взяв ее за концы и изогнув. Это эффект рассмотренного выше поперечного изгиба. А можно поставить линейку вертикально на стол и надавить на нее ладонью. В какой-то момент при не такой уж большой силе нажатия линейка резко потеряет прямолинейную форму, изогнувшись посередине. Рука соответственно опустится, и потребуется небольшое «дожатие», чтобы линейка сломалась.

Попытаемся понять механизм этого явления и объяснить, почему одной рукой удастся сделать то, что намного сложнее достигается двумя руками. Вооружимся обыкновенной металлической линейкой и проведем два немудреных сравнительных опыта. Положим линейку концами на два спичечных коробка. Если линейка достаточно длинная, то она прогнется даже под действием собственной массы. Слегка надавим рукой посередине пролета — линейка еще чуть-чуть прогнется, надавим сильнее — линейка прогнется еще больше. Чем больше сила, тем больше прогиб, и так будет продолжаться до

тех пор, пока прогиб не достигнет такой величины, при которой линейка перестанет выполнять функции балки, коснувшись стола, или пока не сломается, если линейка из хрупкого материала.

Второй эксперимент заключается в сжатии линейки вдоль оси. Попытаемся проследить, что происходит в этом случае. Увеличивая нажатие, мы поначалу не обнаружим никаких видимых изменений, линейка сохраняет прямолинейную форму. Однако при некотором значении силы ситуация резко изменится: линейка сильно прогнется, а рука вследствие этого резко опустится. Попробуйте повторить эксперимент, но только попытайтесь успеть прекратить нажатие в момент изгибания линейки. «Поймать» этот момент вряд ли удастся. Процесс резкого изменения исходного состояния, приводящий, как правило, к разрушению, происходит при сжатии многих элементов конструкций. В научной литературе и инженерной практике он получил название потери устойчивости.

Потеря устойчивости опасна по своему проявлению, так как нагрузки, близкие к критическому состоянию, по внешним признакам обнаружить не представляется возможным. «События» развиваются настолько бурно (это и порождает традиционное представление о загадочности процесса), что практически не остается времени, чтобы принять меры для предотвращения разрушения, приводящего, как правило, к серьезным последствиям.

Однако продолжим эксперимент. Если все больше и больше укорачивать линейку, то обнаружится, что она при определенной длине перестанет отклоняться от прямолинейного направления. Значит, длина существенным образом влияет на поведение стержня. Но на этом тайны сжатого стержня не кончаются. Попытаемся провести еще один, сравнительный, эксперимент. Возьмем карандаш и деревянную линейку, поставим рядом вертикально и одновременно нажмем на них через планку (рис. 4). При увеличении усилия нажатия линейка под действием этой силы старается «уйти» в сторону, в то время как карандаш по-прежнему остается прямым. Несмотря на то что площадь поперечного сечения карандаша меньше площади поперечного сечения линейки, он оказывается более жестким, чем линейка. Но имея одинаковую длину, они отличаются друг от друга формой поперечного сечения. Следовательно, на способность сопротивляться сжатию, кроме площади, влияет еще и форма. И последнее.

Ни у кого не вызовет сомнения, что стальной стержень будет намного эффективнее сопротивляться сжатию, чем равноценный по площади деревянный.

Процесс резкого изгиба стержня, приводящий к искривлению его оси и потере работоспособности, как уже было сказано, принято называть потерей устойчивости. Проблемой разрушения элементов конструкций из-за потери устойчивости впервые заинтересовался Леонард Эйлер (1707—1783). Ему удалось установить зависимость между длиной, площадью и формой поперечного сечения, а также свойствами материала, из которого изготовлен стержень.

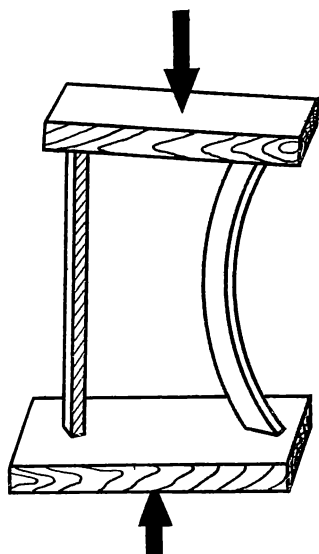


Рис. 4. Устойчивость стержня зависит от формы поперечного сечения

В 1744 году Эйлер опубликовал одну из своих многочисленных работ. В ней он впервые определил наименьшую длину вертикального стержня, при достижении которой он начинает резко изгибаться под действием собственного веса. В числе других задач Эйлер рассмотрел поведение шарнирно закрепленной по концам и нагруженной сжимающими силами стойки. Сегодня формулы Эйлера знает каждый студент машиностроительного института. Выражение для критической силы $P_{кр}$ имеет вид:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EU}{L^2}.$$

Здесь L обозначает длину стержня.

Эта простая по виду формула играет исключительно важную роль в инженерной практике.

Пользуясь решением Эйлера, можно определять критическую силу для стоек, стержней, колонн, панелей и пластин, встречающихся в самых разнообразных конструкциях и сооружениях. Только необходимо внести соответствующие поправочные коэффициенты, сообразуясь

с условиями соединения и закрепления рассматриваемого сжатого элемента в конкретной конструкции.

Теоретические изыскания Эйлера остались незамеченными инженерами-практиками и были отнесены к причудам великого математика, поскольку в те времена тонкостенные конструкции только ждали своего звездного часа. Однако во второй половине XIX века стальные конструкции из балок и пластин получили широкое применение. При их эксплуатации произошел ряд крупных катастроф. Результаты проведенных исследований показали, что во многих случаях причиной разрушения послужил «преждевременный» выход из строя сжатых элементов при сравнительно низком уровне действующих напряжений. Оказалось, что они теряли устойчивость. О явлении потери устойчивости заговорили во весь голос. Вот тут-то и вспомнили о работах Эйлера. С тех пор расчеты на устойчивость конструкций обязательны для всех элементов, работающих на сжатие.

Однако нужно сказать, что в трудах ученого полученные результаты не нашли того четкого прикладного толкования, как это сделано сегодня.

Что же происходит со стержнем в действительности? Если бы эксперимент носил не качественный, а количественный характер (например, посередине линейки был бы установлен чувствительный датчик, соединенный с самописцем), то он с самого начала зафиксировал бы поперечные перемещения. Если бы стержень был идеально прямым, а сила приложена строго по его оси, то происходило бы просто равномерное сжатие аналогично растяжению, до тех пор пока напряжения не достигнут предельно допустимого значения для данного материала. Вот эта кажущаяся прямолинейность исходной формы стержня и создает иллюзию загадочности процесса потери устойчивости.

Однако сделанная оговорка «если бы» дает ключ для объяснения явления: нельзя изготовить идеально прямой стержень, и «если бы» удалось, допустим, сделать его совершенным, то обязательно возникнет какой-то эксцентриситет в приложении нагрузки. В общем, реальные конструкции всегда имеют начальные несовершенства. Таким образом, стержень с ростом нагрузки не остается прямым, вследствие того что неизбежные отклонения его оси от прямой начинают увеличиваться, как только к нему прикладывается осевая сила. Но если стержень изго-

товлен достаточно тщательно, отклонения трудно заметить. Они становятся очень большими, когда нагрузка приближается к значению, определяемому формулой Эйлера. По достижении этой величины нагрузка какое-то время остается практически постоянной. В этот момент мы и наблюдаем изгиб стержня.

Вернемся к формуле Эйлера. Из нее можно почерпнуть еще одну важную информацию. В числителе выражения для критической силы стоит произведение EI , количественно характеризующее, как уже известно, жесткость на изгиб поперечного сечения стержня. И в этом факте нет никаких неожиданностей. Поскольку при сжатии также происходит изгиб, то чем больше жесткость, тем больше критическая сила, тем эффективнее сопротивляется продольному изгибу поперечное сечение. Однако, вводя момент инерции, мы обошли молчанием одно очень важное его свойство. Сожмите линейку, и всегда при всех обстоятельствах она прогнется в направлении, перпендикулярном большей стороне сечения. Отсюда следует очевидный вывод, что в отличие от площади момент инерции очень «чутко» реагирует на то, как «сформировано» сечение. Поэтому-то, если произвести необходимые расчеты, нетрудно убедиться, что момент инерции относительно оси, перпендикулярной высоте сечения линейки, намного больше, чем момент инерции относительно оси, перпендикулярной ее ширине (вспомните линейку при сжатии). Получается, что момент инерции не только «следит» за особенностями сечения, но и предопределяет «нормы» поведения в процессе изгиба.

На основе приведенных рассуждений можно предложить некоторые рекомендации: отдельно стоящую стойку, на которую не накладывается никаких ограничений, целесообразнее с точки зрения экономии материала делать пустотелой, так как при одной и той же площади поперечного сечения момент инерции кольца больше момента инерции сплошного круга. Итак, технология конструирования сжатого стержня как будто бы наметилась. От стержня сплошного сечения надо перейти к пустотелому и за счет уменьшения толщины стенки при неизменной площади сечения поднять до нужного уровня сжимающую силу. Масса стойки не изменяется, а несущая способность значительно увеличивается.

Если сжимается круглый стержень, то направление его изгиба вследствие симметрии сечения равноверо-

ятно, и нельзя предсказать заранее, в каком из них стержень потеряет устойчивость. На «выбор» плоскости изгиба уже будут влиять неучтенные факторы, связанные с отклонениями от заданной формы, возникающие при изготовлении, а также условия закрепления концов стержня.

Теперь остается выяснить, насколько можно уменьшить толщину стойки. Для этого оставим неизменной ее длину, а будем увеличивать диаметр трубы и уменьшать толщину стенки так, чтобы площадь сечения оставалась постоянной. Увеличение диаметра приведет к увеличению жесткости и, следовательно, критической силы сжатия. Естественно, такой процесс не может продолжаться бесконечно. Жесткость сечения в конце концов вырастет настолько, что уже никакие силы не смогут «изогнуть» ось трубы. Однако, выигрывая в одном, обязательно, не привлекая дополнительных ресурсов извне, делаем конструкцию уязвимой в чем-то другом. Не будет исключением и рассматриваемый случай одностороннего изменения жесткости за счет уменьшения толщины трубы и увеличения ее диаметра.

Последовательно увеличивая диаметр и наращивая силу, совершенно неожиданно обнаружим, что в какой-то момент труба проявит свой «характер» и поведет себя еще неизвестным нам образом. В процессе постепенного увеличения диаметра и сопутствующего роста критической силы поверхность трубы вдруг мгновенно покроется мелкими вмятинами и вздутиями. Как и при сжатии стержня, явление изгиба возникает настолько неожиданно и развивается так быстро, что его никак не удастся приостановить, а зафиксировать этапы развития вмятин можно только с помощью сверхскоростной киносъемки. При этом ось трубы останется по-прежнему практически прямолинейной. Характер деформирования убеждает в том, что и это новое явление есть не что иное, как потеря способности сохранять при нагружении первоначальную форму, т. е. и в этом случае речь идет об устойчивости. Но изгиб носит характер локальный, и в этом его отличительная особенность. Стенка оболочки изгибается относительно линии срединной поверхности.

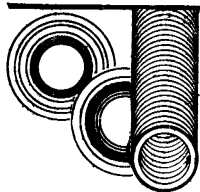
Потерю устойчивости, связанную с изгибом оси, принято называть общей, так как она охватывает систему в целом. Потеря устойчивости стенки оболочки с образованием локальных (хотя и распространяющихся на

всю поверхность) выпучин и вмятин получила название местной устойчивости. Общая потеря устойчивости свойственна объектам, у которых определяющим признаком является один характерный размер. В тонкостенных оболочечных системах вмятины и выпучины, как правило, образуются на поверхности. Если общая потеря устойчивости может проявляться как в стержнях, так и в оболочках, то местная, возникающая из-за тонкостенности системы, — «прерогатива» оболочек или родственных элементов конструкций.

Местная потеря устойчивости может возникать и при изгибе в сжатой части тонкостенной конструкции. Изогнутая металлическая линейка не изменяет форму своего сечения, как бы близко после потери устойчивости не сближались ее концы. Стоит только убрать порождающие изгиб воздействия, и силы упругости восстановят первоначальную форму ее оси. Совсем другой характер поведения наблюдается у пустотелой трубы, изготовленной из того же материала. В процессе продольного изгиба в сжатой зоне (посередине длины) наступит местная потеря устойчивости за счет образования на поверхности складок. При этом если напряжения не достигнут предела упругости, то после снятия нагрузки форма трубы восстановится. Но, как правило, образование вмятин и выпучин приводит к необратимым последствиям. Именно с описанным явлением столкнулись в Англии в середине XIX века при строительстве трубчатого Конвэйского моста.

Испытания железных трубчатых балок (коробчатого сечения) показали, что разрушение начинается не из-за разрыва в растянутой зоне, а неизменно в вогнутой части, где материал работает на сжатие. Один из авторов проекта — Фейрбейрн — констатировал: «В испытаниях обнаружилось интересное явление — многие из них противоречат нашим прежним представлениям о прочности материалов и полностью расходятся со всем, что открылось нам во всей предшествующей экспериментальной работе. Неизменно, почти в каждом из этих испытаний обнаруживалось, что самым слабым местом в трубе оказалась ее верхняя часть, подвергшаяся действию сил, стремившихся ее раздавить».

Это первое запротоколированное проявление местной потери устойчивости — в настоящее время, пожалуй, самый распространенный вид разрушения тонкостенных конструкций, работающих на сжатие.



ФОРМА ПОРОЖДАЕТ ПРОЧНОСТЬ

Среди элементов конструкций, воспринимающих силу тяжести во всевозможных ее проявлениях, балки, несомненно, наиболее распространены. Вспомните перекрытия или оконные проемы. И все же от этой «популярности» стержни, воспринимающие поперечные нагрузки, как силовые элементы конструкций совершеннее не становятся. Даже самые простые расчеты показывают, что если взять обыкновенный квадратный брусок, поперечное сечение которого относится к длине как $1:10$, положить его концы на опоры и на середину бруска воздействовать поперечной силой, то возникающие максимальные напряжения изгиба будут в 15 раз больше, чем при растяжении стержней такой же силой. При этом нужно помнить, что из-за неравномерного распределения напряжений материал в сечении нагружается не полностью.

Изгиб — результат приложения определенной нагрузки. Но есть ли способы, с помощью которых можно добиться, чтобы внешние нагрузки трансформировались в более благоприятные для сечения балки напряжения — напряжения «растяжения — сжатия»?..

От балки к оболочке

Попытаемся получить ответ на этот вопрос, наблюдая за поведением кольца из стальной ленты при нагружении его различным образом распределенными поперечными силами. Впрочем, стальное кольцо можно с успехом заменить бумажным.

Итак, возьмем кольцо и двумя пальцами сожмем его по направлению к центру. В местах приложения диаметрально противоположных сил (под пальцами) кольцо сильно прогнется. Больше нажатие — больше и прогиб, точно так же как и в случае с нагруженной посередине балкой.

Увеличим число действующих сил, надавив на кольцо в четырех точках, равно отстоящих друг от друга. В месте приложения каждой силы по-прежнему появятся вмятины, но можно отметить, что кольцо стало жестче, не таким податливым, как в первом случае; величина вмятины чуть-чуть уменьшается, а для достижения первоначального ее размера, или, как говорят инженеры, прогиба, необходимы большие усилия. Опыт можно продолжить. Например, сжать кольцо в восьми точках. Впрочем, поскольку наши исследования, как мы в этом вскоре убедимся, довольно важны для дальнейших рассуждений, то можно провести и более «чистый» опыт. Несмотря на свою простоту и доступность, он по своей значимости не уступает профессионально поставленному серьезному лабораторному эксперименту.

Идея опыта крайне проста: заменим довольно примитивный способ приложения нагрузок (с помощью пальцев) механическими усилиями, создаваемыми обыкновенной ниткой. Для этого к кольцу нужно прикрепить нитки и, пропустив их наподобие спиц в колесе через центральную втулку, собрать вместе так, чтобы можно было при необходимости реализовать нагружение одновременно в 4, 8, 12 и т. д. равномерно расположенных по окружности точек. Однако в этом эксперименте, несомненно, важнее уловить общие закономерности процесса: с увеличением числа сил уменьшаются возникающие под ними прогибы, равно как и зона их влияния, а главное, значит, и величина возникающих в местах приложения сил моментов. Кольцо же приобретает все большую жесткость.

Теперь осталось сделать решающий шаг к обобщениям. Представим, что количество прикладываемых сил возрастает неограниченно, так что в конце концов нагрузка непрерывно и равномерно распределится по контуру кольца. В результате такого перехода от дискретной к непрерывной модели прогиба, возникающие в каждой точке кольца по его периметру, будут одинаковы. Благодаря непрерывности нагружения и геометрии кольца все его сечения станут равномерно перемещаться в направлении радиусов к центру, и кольцо окажется равномерно сжатым. Следовательно, внешние поперечные усилия, действующие перпендикулярно оси кольца, полностью трансформируются в напряжения сжатия. Если бы нагрузка прикладывалась не снаружи, а изнутри

(также в направлении радиусов), кольцо оказалось бы равномерно растянутым.

Но, может быть, это следствие характера нагружения? Положите достаточно длинную металлическую линейку концами на два спичечных коробка, и вы увидите, как она заметно прогнется, т. е. произойдет все тот же изгиб. А в данном случае нагрузка идеальная с точки зрения равномерности ее распределения — собственная масса. Значит, дело не только в характере распределения нагрузки. Ведь если силы прикладываются в отдельных точках, то кольцо по-прежнему изгибается. Следовательно, сочетание характера нагружения и формы оси стержня, превращающейся в окружность, создает условия, при которых невозможно возникновение изгиба его оси.

Итак, кривизна «во взаимодействии» с особенностями нагружения «творит чудеса». Если согнуть в круг прямую равномерно нагруженную балку, она превращается в сжатый или растянутый криволинейный стержень. Кольцо по сравнению с образовавшей его балкой становится не только жестче, но и прочнее, поскольку при других равных условиях способно выдержать большую величину поперечной равномерно распределенной погонной нагрузки. Для того чтобы подчеркнуть принципиальное отличие таких конструкций от других видов прямолинейных или криволинейных стержней, их называют безмоментными, т. е. не испытывающими изгиба.

Об этом свойстве криволинейных элементов конструкций знали, очевидно, очень давно. Так, ритуал ношения обручальных колец существовал уже в Древнем Египте. По дошедшим до наших времен сведениям, первоначально достоинства обручального кольца связывались не со свойствами металла, из которого оно было изготовлено, а с его прочностью. Круглая форма и порождаемая ею жесткость, отождествлялись с надежностью и бесконечностью брачного союза.

В зависимости от того, какое равномерно распределенное давление действует на кольцо: наружное или внутреннее — его сопротивляемость и конечная деформированная форма оказываются различными. При действии внутренних сил происходит равномерное расширение: диаметр кольца увеличивается прямо пропорционально повышению давления. При наружном давлении кольцо теряет свою первоначальную форму, превращаясь в эл-

липс, и происходит это при нагрузках, значительно меньших, чем те, которые может выдержать кольцо при действии давления с внутренней стороны. Принципиальная разница между внутренним и наружным давлениями состоит в его неодинаковом влиянии на неизбежно присутствующие в любой реальной конструкции общие и местные отклонения от правильной круговой формы. Если внутреннее давление «пытается скрасить» и выправить все огрехи технологии, по возможности восстановив идеальную форму кольца, то внешнее, наоборот, «стремится подчеркнуть» все недостатки, возникшие как неизбежное следствие процесса изготовления, и «развить» их настолько, что это приведет к потере исходной формы. В этом отношении нетрудно проследить полную аналогию между поведением при деформировании сжатого и растянутого стержней, которые также имеют дефекты технологии.

Но все же изолированное кольцо, не связанное с какими-то элементами конкретного сооружения,— конструкция больше познавательная, чем практически реализуемая. Создание равномерной нагрузки на кольцо — это уже проблема, не говоря о применении такой конструкции. Однако из колец, как из кубиков детского конструктора, можно составить самые разнообразные виды оболочечных конструкций. Всем известная цилиндрическая труба, к которой мы будем еще не раз возвращаться,— это набор бесконечного количества состыкованных друг с другом колец.

В начале разговора о балках отмечалось, что большинство перекрытий состоит именно из таких силовых элементов. Конечно, из кольца балку не сконструируешь. Но часть кольца может прекрасно выполнить функцию перекрытия. Ведь перекрытие не обязательно должно быть плоским. С тех пор как камень и кирпич стали основным строительным материалом, купол и арка, построенные на принципе кольца, взяты человеком на вооружение как образцы инженерных решений при сооружении перекрытий помещений, окон и дверей, мостов, акведуков.

Идея арки основана на том, что часть кольца продолжает работать так, будто она находится в системе целого кольца. Зодчие древности хорошо постигли премудрости этой системы и успешно пользовались ими в своих творениях.

Известно, что каменная и кирпичная кладки могут работать только на сжатие. Все арки и своды, очевидно, в полной мере отвечают этим требованиям. Однако окружность — не единственная форма, обеспечивающая безызгибное состояние кривых брусьев. Характер действия нагрузок можно согласовать с геометрической формой оси стержня. Приведем пример: если концы гибкой однородной нити закрепить в двух точках, расстояние между которыми меньше длины нити, то под действием собственной массы она прогнется по так называемой цепной линии. Примерно такую форму принимает цепь, электрические провода. Поверхность, образованная вращением дуги цепной линии вокруг оси симметрии, называется катеноидом.

Продолжая разговор о нити, необходимо отметить ее важную особенность. Обыкновенную швейную нитку не так просто разорвать и невозможно сжать, какие бы ухищрения для этого ни предпринимались. Это свойство успешно используется в элементах конструкций, которые не способны воспринимать сжимающие усилия.

Представим себе, что натягивается не одна отдельно взятая нить, а несколько. Получается жесткая конструкция. Простейшие примеры таких конструкций — гамак для отдыха и внушительных размеров рыболовная сеть. Первоначальное «рабочее» положение гамаку придает собственная масса, окончательно же «конструирует» его форму масса расположившегося в нем отдыхающего. Рыболовному тралу форму задает гидродинамическая сила сопротивления, возникающая при обтекании нитей потоком воды.

Если число нитей в сети увеличивать в обоих направлениях, то она превратится в сплошную ткань, а сама конструкция — в оболочку, только с особыми свойствами («мягкую»). Важнейшее свойство сетчатых нитевых конструкций и мягких оболочек заключается в том, что они не могут сопротивляться сжатию (сминаются без разрушения), зато уникальна их способность менять свою форму в соответствии с характером нагрузки, точнее, с распределением поперечного давления. Об этом еще предстоит подробный разговор.

Если цилиндрическую оболочку разрезать плоскостью, проходящей через диаметр и образующую, и положить одну из половинок на продольные кромки, то получится свод. А теперь ту же половинку положим на четыре

опоры, расположенные по краям оболочки. Характер закрепления оболочки решающим образом скажется на условиях ее работы.

В первом варианте свод представляет собой неограниченное число арок, с помощью которых при соответствующем закреплении краев можно добиться безмоментной работы перекрытия. В этом случае длина перекрываемой площади ничем не ограничена и определяется только протяженностью пролетов между опорами. Во втором варианте картина резко меняется. С увеличением расстояния между опорами оболочка будет все больше прогибаться до тех пор, пока оно не достигнет предельных размеров. Оболочка в данном случае (если в процессе деформирования не искажается ее контур) работает, как обыкновенная балка. Однако эффективность ее сопротивления изгибу намного выше, чем у такой балки.

Объяснение этому кроется в особенностях строения поперечного сечения, связанных с так называемой «строительной высотой». Если рассечь рассматриваемую оболочку (точнее, половину цилиндра) плоскостью, перпендикулярной ее образующей — пролету балки, то в сечении получится тонкостенная арка, равная полуокружности с толщиной, соответствующей толщине оболочки. Момент инерции образовавшегося сечения будет несравнимо больше момента инерции какого-нибудь профиля такой же площади. Резкое увеличение момента инерции — проявление известного свойства площадей, максимально разнесенных относительно центра тяжести сечения. Таким образом, жесткость, а следовательно, и сопротивляемость изгибу резко возрастают.

Теперь можно сделать некоторые выводы и обобщения: эффективность оболочек связана с их кривизной и тонкостенностью. В этом легко убедиться на простом примере. Возьмите в руки лист бумаги. Плоский, он не выдерживает даже собственной массы и беспомощно прогибается. Теперь слегка согните его. Лист сразу становится жестким, и к нему можно приложить дополнительную нагрузку. Точно так же и оболочка за счет кривизны своей поверхности приобретает пространственную жесткость, что придает ей большую несущую способность, обеспечивает минимальную массу расходуемого материала. Форма оболочки предоставляет богатейшие возмож-

ности «прочностной адаптации» конструкции к сложным внешним воздействиям.

Частным случаем оболочек, как двумерных тел, являются плоские элементы-пластины. У них много общего с оболочками в методах расчета напряженного состояния, определяемого тонкостенностью. Но теряя кривизну, они теряют и все преимущества, связанные с ней. Резкое повышение несущей способности тонкостенных пространственных оболочечных сечений по сравнению с плоскими той же массы дает возможность, по выражению итальянского инженера П. Л. Нерви, говорить о работе «по форме». В этой связи хочется привести слова известного испанского архитектора Эдуардо Торроха: «Лучшим сооружением является то, надежность которого обеспечивается главным образом за счет его формы, а не за счет прочности его материала. Последнее достигается просто, тогда как первое наоборот с большим трудом. В этом заключается прелесть поисков и удовлетворение от открытий». И далее: «Я считаю, что одна только техника и наука не могут предопределить формы конструкций, которые встретятся в будущем, и в дальнейшем самое главное и самое существенное будет принадлежать идее, возникающей в воображении проектировщика».

Однако тонкостенность порождает и еще одно качество, наглядно подтверждая известную истину, что медаль всегда имеет две стороны. Одна сторона «оболочечной» медали: высокая эффективность тонкостенной конструкции, связанная с ее небольшой массой. Но именно в тонкостенности заключается и слабость оболочки. Если форма реализуется в процессе действия растягивающих напряжений, то такая конструкция достаточно перспективна. Материал оболочки растянут, и его прочностные свойства используются полностью.

Совсем по-другому проявляется тонкостенность при сжатии. Внешние силы по-прежнему эффективно трансформируются в постоянные по толщине напряжения. Но вся беда в том, что уровень критических напряжений потери устойчивости для такой оболочки невысок, и определяется он именно ее тонкостенностью — чем тоньше оболочка, тем ниже уровень критических напряжений. Они могут быть во много раз меньше, чем предел прочности материала, все зависит от отношения толщины оболочки к радиусу кривизны. Эффективность примене-

ния тонкостенных оболочек в этом случае может значительно понизиться. Пытаясь избежать этого, проектируемую систему компонуют так, чтобы максимальное количество элементов работало на растяжение. За счет создания специальных типов оболочечных конструкций удастся весьма успешно справляться с проблемами устойчивости тонкостенных систем. К этому вопросу мы еще вернемся.

При рассмотрении оболочек как пространственных систем возникает естественный вопрос: есть ли какое-то отличие в характере распределения напряжений в сечении оболочки по сравнению с балкой? Ведь напряжения в оболочке могут меняться не только по толщине, но и вдоль обеих ее координат. В оболочечных конструкциях равномерное распределение напряжений по поверхности — это частный случай нагружения. В силу необходимости, а также богатой фантазии создателей проектов геометрические размеры и характер нагружения, а следовательно, и напряженно-деформированное состояние оболочек могут меняться самым непредвиденным образом. Это, в свою очередь, определит характер возникающих напряжений и вызываемых ими деформаций как в направлении параллели, так и в направлении меридиана. Поэтому, когда применительно к оболочкам говорят о напряженно-деформированном состоянии, подразумевают в первую очередь характер изменения напряжений и деформаций по поверхности.

Распределение нормальных напряжений по толщине оболочки большим разнообразием не отличается. Это могут быть напряжения, вызванные действием изгибающих моментов и растягивающих или сжимающих усилий. Следует отметить, что в плоскости сечения возникают также касательные напряжения, которые могут действовать как перпендикулярно срединной поверхности, так и параллельно ей. Эти напряжения в сечении приводят к крутящим моментам и сдвигающим усилиям. Однако (как и при рассмотрении изгиба балки) в дальнейших рассуждениях они не являются определяющими. Поэтому ограничимся только упоминанием о существовании этих напряжений.

Для линейно упругого материала тонкой оболочки напряжения изгиба по толщине, как и в балке, распределены линейно, а нейтральная поверхность (аналог нейтральной линии в балке) равноотстоит от наружной

и внутренней поверхностей, ограничивающих оболочку, т. е. срединная поверхность оболочки и есть нейтральная. Напряжения, действующие в точках этой поверхности, могут быть растягивающими или сжимающими. Это позволяет при расчете разделить поле напряжений на напряжения растяжения или сжатия срединной поверхности — мембранные напряжения и напряжения изгиба. Мембранные напряжения свое название получили от мембран, т. е. таких систем, которые не сопротивляются изгибу.

Прежде чем остановиться на особых свойствах оболочек при деформации, заметим, что для тонкостенных конструкций понятие «прочность» с инженерной точки зрения намного шире, чем, к примеру, для стержней. К числу прочностных ограничений относятся недопустимость разрыва материала, образования пластических складок, ограничение прогибов — все зависит от назначения конструкции. Поле напряжений и деформаций оболочки, вообще говоря, оказывается очень сложным, а главное, часто сильно трансформирующимся не только при изменении характера нагрузки, но и при ее увеличении. Поэтому очень важно выделить типы напряженно-деформированных состояний, оценить их «опасность» с ростом нагрузки и, что особенно важно для проектирования, указать пути создания в конструкции благоприятного напряженного состояния или же, наоборот, возможности подавления нежелательных деформаций.

Наиболее простым и благоприятным для конструкции является безызгибное — безмоментное состояние, когда напряжения постоянны по толщине. Такие оболочки, как уже было сказано, называют мембранами или безмоментными. Осуществить «чисто безмоментное» состояние очень трудно — требуются плавность изменения формы срединной поверхности и распределения внешних нагрузок, отсутствие оребрения, особые условия закрепления краев и т. д. В таком состоянии находится разве что теннисный шарик в полете, да и то, если пренебречь силами веса, инерции и аэродинамического сопротивления.

Альтернативным к безмоментному является чисто моментное, т. е. изгибное, состояние. Такая деформация характерна, например, для пластины или части цилиндрической оболочки при нагружении изгибающими моментами, распределенными вдоль прямолинейных кромок (опять же при отсутствии опор, пренебрежении собст-

венной массой и т. п.). Как видим, и это далекая от практики идеализация.

Однако обе упомянутые схемы тем не менее могут оказаться полезными. Например, для упрощения вычислений можно рассчитать порознь напряжения, «порожденные растяжением» и «порожденные изгибом», а потом их суммировать. Правда, такой расчет допустим только для оболочек малого прогиба.

Есть ли у оболочек недостатки?

Законченность оболочечной формы как силовой конструкции проявляется в ее замкнутости: напряжения уравниваются сами себя по всей поверхности. Преимущества столь удачного решения очевидны: отпадает необходимость создания опорных закреплений.

Однако, несмотря на то что замкнутость, порождаемая в результате вращения вокруг оси плавно изменяющейся образующей, является признаком совершенства оболочки, такие решения среди оболочечных построений занимают весьма скромное место. Совершенство формы оболочки оборачивается недостатком, который очень скоро дает о себе знать, стоит только приступить к компоновке всего ансамбля сооружения. Сразу становится очевидно, что сама по себе оболочка существовать не может. Ее необходимо увязать со смежными отсеками и конструкциями, осуществить закрепление.

Вот тут-то и начинаются трудности. Крепление, как правило, производится к площадкам ограниченных размеров или с помощью специальных устройств. Оболочки вращения с вертикальной осью стыкуются со смежными отсеками с помощью предусмотренных для этих целей на боковой поверхности шпангоутов. Оболочечные системы, транспортируемые горизонтально, лежат обычно на особых устройствах. Вспомним, как сложно удержать яйцо в определенном положении. Сделать это можно, только используя специальные ячейки. С помощью различного рода стержневых систем, например ферм, на оболочку корпуса ракеты передаются усилия от двигателей, контейнеров с приборами и т. д. В результате подобных контактов возникают сосредоточенные нагрузки, а они, как известно, порождают моментное напряженное состояние — явление крайне нежелательное.

Однако это не единственное препятствие на пути реализации совершенных конструкций. На замкнутой поверхности оболочки необходимо проделать ходы сообщения — люки. Это также вносит возмущения в напряженное состояние оболочки.

Возмутителями безмоментного напряженно-деформированного состояния при определенных условиях являются силовые элементы (на этом мы остановимся в последующих разделах): стержни и криволинейные брусья, усиливающие оболочку в направлении меридианов и параллелей.

Так, в топливных баках ракет, представляющих собой гладкие цилиндрические или конические оболочки, на определенном расстоянии устанавливаются поперечные, круговые силовые элементы, промежуточные шпангоуты. В полете оболочки топливных баков (а это баки для горючего и окислителя) подвержены действию внутреннего избыточного давления наддува, которое вытесняет компоненты топлива в двигатель, и осевых сжимающих сил, пропорциональных возникающим перегрузкам.

Внутреннее давление стремится разорвать бак и вследствие возникающих в оболочке бака напряжений ужесточает его конструкцию. Осевые сжимающие силы вызывают в конечном итоге потерю устойчивости оболочки бака. Может возникнуть недоуменный вопрос: зачем в этом случае подкреплять оболочку шпангоутами? Ведь они устанавливаются перпендикулярно направлению действия осевых сжимающих сил и, следовательно, не оказывают никакого влияния на повышение несущей способности корпуса бака при осевом сжатии. Но зато шпангоуты могут значительно ухудшить условия его деформирования, так как в тех местах, где они установлены, оболочка не может свободно «раздуваться». В результате вначале прямолинейная образующая бака приобретает волнистое очертание и в полете возникает изгибное напряженное состояние. В конечном итоге бак может принять сегментированную форму типа «червяка».

Вопрос, как видим, не лишен смысла. Действительно, установка шпангоутов — решение вынужденное и не связанное с условиями нагружения емкости в полете. Выдерживая огромные осевые сжимающие нагрузки и большое внутреннее давление, эта же оболочка оказывается беззащитной при транспортировке в горизонтальном положении — в процессе изготовления или после-

дующей наземной эксплуатации. В этом случае нагружение происходит за счет собственной массы, однако усилия направлены не равномерно во все стороны, как при внутреннем давлении, а в одну, что и вызывает изгиб оболочки, приводящий к недопустимому сплющиванию ее контура поперечного сечения.

Для предотвращения такого опасного явления и ставятся шпангоуты. Введение в конструкцию поперечных силовых элементов позволяет обеспечить жесткость бака при транспортировке. Но сыграв свою положительную роль при наземной эксплуатации, они становятся лишними в полете, так как не дают возможности оболочке равномерно деформироваться при действии внутреннего давления.

Для того чтобы исключить это вредное влияние шпангоутов, иногда идут на дополнительные усложнения конструкций, добиваясь изменения в нужный момент условий их работы. При проектировании баков ракеты «Титан» возникла идея плавающих шпангоутов. Суть ее состоит в следующем. Топливный бак ракеты подкреплен продольно-поперечным набором. Когда давления наддува нет, шпангоуты работают как кольца, обеспечивающие поперечную жесткость. При наддуве баков они выключаются из работы. Как показал анализ проектных проработок, применение обычного жесткого закрепления шпангоутов к стрингерам вызвало бы сильный изгиб стрингеров и в результате увеличилась бы масса конструкции бака.

В практике проектирования большой популярностью пользуются сложные оболочки, состоящие из состыкованных между собой различных геометрических форм: цилиндра, конуса, полусферы, сегмента и т. д. Так, вертикальные емкости для хранения жидких и газообразных продуктов имеют вид цилиндрической оболочки, состыкованной с коническими или сфероидальными сегментами — днищами. В местах стыковки, где обвод оболочки претерпевает излом, также возникают моментные напряженные состояния.

Очень часто в качестве оболочечных конструкций используется часть поверхности какой-то формы. Особенно широкое распространение этот прием получил при создании купольных перекрытий. В этом случае возникают трудности при закреплении краев оболочки. Как

правило, перекрытия опираются по периферии на отдельно стоящие опоры или по всему периметру.

Итак, можно назвать возмутителей безмоментного состояния. Это изменение нагрузки, связанное с ее неравномерным распределением по поверхности, нарушение сплошности оболочки, изломы, возникающие при стыковке, всевозможные подкрепления, а также характер закрепления краев оболочки.

Казалось бы, картина малоутешительная: в реальных конструкциях теряются все преимущества оболочки как безмоментной конструкции. Тем не менее это не так. На помощь приходит тонкостенность оболочки, ее необычайная гибкость. Оказывается, сильно изгибное состояние развивается лишь в малой окрестности приложения силы или установки опоры (которая воздействует на конструкцию усилием сосредоточенной опорной реакции). При удалении от зоны возмущения изгибные напряжения быстро затухают и напряженное состояние вновь становится безмоментным. При этом чем тоньше оболочка, т. е. чем она гибче, тем быстрее затухает изгибное состояние. Значит, если зона изгиба опасна, но мала, следует подкрепить оболочку именно в этой зоне. Если оболочка опирается на опоры, надо установить кольцевые накладки, опорные шпангоуты. Когда к баллону присоединяется патрубок трубопровода, необходимо сделать местное утолщение, ужесточить оболочку, выравнять поле напряжений.

Местное усиление при передаче на оболочку сосредоточенного воздействия «делокализует» нагрузку, распределяет ее по большей площади, тем самым возвращая конструкцию к желаемому безмоментному состоянию. Однако значительное утолщение, как уже говорилось, приводит к расширению зоны влияния изгиба, да и сама накладка становится инициатором изгиба. Поэтому зачастую участки оболочки, в которых нарушается однородность конструкции или нагрузки, требуют особого внимания. Очертание накладок и других опорных элементов должны обеспечить минимум напряжений и их равномерность.

Ахиллесовой пятой оболочечных конструкций является свободный край, создающий разрыв на поверхности оболочки и возникающую вследствие этого неоднородность распределения напряжений. Свободный край не-

обходим при создании люков или когда в качестве оболочечной конструкции используется часть ее поверхности. Оболочка, как правило, за счет собственных ресурсов не может справиться с возникающими осложнениями. На помощь приходит конструктор. Если нарушение сплошности материала имеет вид отверстий, возникает концентрация напряжений. В этом случае требуется усиление, или, как говорят, подкрепление краев окантовкой. Точно так же поступают и со свободными краями.

Очень сложные проблемы приходится решать инженерам при увязке и закреплении оболочки в общей системе взаимодействующих конструкций. Одна из таких непростых задач — передача сосредоточенных усилий. В частности, она возникает при компоновке двигателя в силовой конструкции самолета или ракеты. Нагрузка от двигательной установки на стыковочное кольцо — шпангоут оболочки обычно передается с помощью переходного отсека — рамы, представляющей собой стержневую систему. В местах крепления стержней к стыковочному кольцу на оболочку действуют большие сосредоточенные усилия, которые и являются причиной возникновения в оболочке ярко выраженного изгибного напряженного состояния. Много инженерной выдумки требуется при решении этой задачи, чтобы с «наименьшими потерями» избежать опасных последствий местного изгиба. С помощью различного рода усиления в виде накладок, фитингов и других подкрепляющих элементов пытаются «рассредоточить» усилия и тем самым выравнять напряженное состояние, доведя его до безмоментного, равномерно распределенного по сечению оболочки корпуса, к которому крепится рама. Немало хлопот при проектировании большепролетных покрытий вызывают распорные усилия, возникающие в местах крепления оболочек к стенам и фундаменту сооружений. Понятно, что идеально такое закрепление края оболочки, которое не вносит никаких изменений и возмущений в ее напряженное состояние.

Опираясь на опыт древних

Самое большое распространение среди оболочечных систем получили гладкие оболочки, в которых материал равномерно распределен по всему сечению. Толщина гладких оболочек может изменяться в направлении ме-

ридиана и параллели, как непрерывно, так и ступенчато. Гладкие оболочки изготавливаются обычно из листового материала с помощью сварки. Они широко используются для хранения жидких и газообразных продуктов. Артиллерийский ствол — это тоже гладкая оболочка, так же как трубопровод или железнодорожная цистерна.

А каким путем можно добиться наибольшей жесткости сечения гладкой оболочки? Нельзя ли сечение толщины оболочки конструировать так же, как при проектировании различных других систем?

Ответы на эти вопросы получены в процессе изучения оболочечных систем.

Сечение оболочки может меняться как вдоль меридиана, так и вдоль параллели. Следовательно, и жесткостные свойства оболочек в разных направлениях будут различными. В отличие от изотропных структур, свойства которых одинаковы во всех направлениях, такие конструкции называются анизотропными. Анизотропия может быть физической, связанной с особенностями строения кристаллической решетки данного материала. Это естественная анизотропия. Основным строительным материалом, служащий человеку с незапамятных времен, — камень, можно отнести к изотропным материалам. Однако некоторые камни анизотропны. Ярко выраженную анизотропную структуру имеет древнейший строительный материал — дерево.

Но анизотропию можно создать и искусственно, заранее запрограммировав свойства материала в зависимости от вида напряженного состояния. «Мы сможем еще быстрее уйти вперед, — говорил академик А. А. Благонравов, — если будут давать конструкторам не те материалы, которые удастся получить, но те, которых они требуют; когда мы сможем это условие выполнить, наступит эпоха, которую можно будет назвать «веком неограниченного выбора».

И вот в материаловедении появилось необычное слово «композиты», связанное с рождением нового магистрального направления. Понятие «композит» — порождение наших дней, оно появилось около 30 лет назад. Методы создания композитов — это самостоятельная ветвь в науке конструирования материалов.

Когда говорят о композитах, то имеют в виду материалы, составленные из нескольких (двух и более) раз-

личных по своей природе компонентов (фаз) так, что граница между ними ощутима. Каждый компонент имеет свои свойства, свое назначение, а весь композит в целом приобретает новые характеристики, отличные от составляющих его компонентов. Компонент, выполняющий роль силового остова, называют наполнителем, а компонент, соединяющий весь материал в единое целое, — связующим.

«Патент» на создание первых композитов принадлежит великому творцу — природе. Так, дерево — это сложная структура, в которой высокопрочные длинные волокна целлюлозы связаны мягким, податливым лигнином. Такое сочетание придает древесине прочность и гибкость — качества, желанные для элементов многих конструкций. А из чего состоит костная ткань? Она образована волокнистым наполнителем — матрицей — коллагеном, связанным кристаллической массой минеральных веществ (в частности, апатита).

Задолго до того, как с позиции строгой науки были постигнуты секреты прочности построений природы, человек интуитивно додумался до многих инженерных решений. К примеру, возраст технологии производства кирпича исчисляется столетиями. В наши дни при изготовлении саманного кирпича в глину добавляют наполнитель — солому, что предотвращает растрескивание глины при сушке. А вот древнеегипетский документ — жалоба надзирателей руководителю строительных работ: «Для чего ты так поступаешь с рабами твоими? Соломы не дают рабам твоим, а кирпичи, говорят нам, делайте. И вот рабов твоих бьют...» Как видим, в документе содержится свидетельство, позволившее предположить, что путь первых композитов начинается из глубины веков. Достоверно известно, что ацтеки и инки упрочняли керамику растительными волокнами, а чтобы не крошился мягкий алебастр, вводили в него наполнитель — волосы, не подозревая, что создают новый класс материалов.

Материалы с высокопрочным ориентированным наполнителем (армированные композиты) — важнейший и самый распространенный ныне вид композиционных конструкционных материалов, а среди них лидируют стеклопластики. Привычно хрупкое стекло, вытянутое в тончайшую нить, приобретает гибкость и необычайную прочность. Пакет слоев стеклоткани или стеклонити, пропи-

танный синтетической смолой, образует очень легкий высокопрочный материал.

Зачастую конструкция воспринимает сложные нагрузки, действие которых может меняться независимо от расположения волокон. Для создания стеклопластиков равнопрочных в различных направлениях их армируют несколькими слоями волокон с разной ориентацией. Более того, по-разному укладывая нити при намотке наполнителя, можно менять механические свойства материала. Кстати, стеклопластики часто изготавливают не в виде, скажем, листовых заготовок, а сразу в виде законченной конструкции. Например, стальной корпус цистерны обычно сваривают из предварительно согнутых листов. Стеклопластиковая же конструкция «собирается» путем намотки стеклонити слой за слоем на оправку — разъемный цилиндр нужного диаметра — с последующей пропиткой смолой. После затвердевания смолы оправку вынимают, и корпус готов.

Правда, у стеклопластиков есть серьезный недостаток — малая жесткость. Их модуль упругости значительно меньше, чем у стали. Деталь из такого композита хотя и выдерживает определенную нагрузку, но порой недопустимо деформируется. Если, скажем, изготовить из стеклопластика крыло самолета, оно будет легче алюминиевого, не разрушится, но в полете под давлением воздушного напора так сильно изогнется, что самолетом невозможно будет управлять.

К счастью, эта ситуация не безвыходная. Армировать композит можно волокнами и из других материалов: графита, карбида, кремния, бора. Угле- и боропластики выгодно отличаются высокой жесткостью, в несколько раз превосходя сталь по прочности.

Композитные материалы на основе синтетических смол имеют свой недостаток — низкую теплостойкость. Вот если бы соединить прочность композита с теплостойкостью стали... Впрочем, это уже реальность. Более того, разработка композитов с использованием металла в качестве связующего — сейчас одно из направлений создания новых материалов. Сверхпрочные нити воспринимают высокие нагрузки, а стойкая и пластичная матрица, например из титана, не только связывает «арматуру», но и сообщает всему материалу недостающие полезные свойства, заодно изолируя волокна от воздействия агрессивных сред. Правда, такой материал пока дороговат.

Многообещающее направление в создании композитов — армирование специально выращенными нитевидными кристаллами особой чистоты. Свободные от примесей и других дефектов монокристаллы — «усы» обладают удивительной прочностью. Выращивание «усов» — сложнейший, трудоемкий процесс, только еще прокладывающий себе дорогу из лаборатории в промышленность; самые длинные «усы», которые удалось «вырастить», измеряются миллиметрами. Однако оснований для пессимистических прогнозов нет: ведь алюминий, из которого сегодня делают не только космические корабли, но и кухонную посуду, тару для перевозки молока, когда-то наряду с золотом и бриллиантами украшал платья коронованных особ.

Композиты привлекательны для инженера еще и тем, что они дают необычайный простор для творчества. С помощью композитов стало реальным создание материалов с заданными свойствами, а отсюда прямая дорога к проектированию оптимальных конструкций с минимальной массой. Подбирая различные полимерные или металлические связующие, по-разному располагая армирующие волокна, можно получить материал с заданными свойствами, максимально соответствующий потребностям, условиям работы изделия. Можно считать, что в этом случае проектирование конструкции начинается с материала, и все труднее становится провести привычную грань, разделяющую труд технолога-материаловеда и конструктора машины.

Что такое конструктивная анизотропия

В зависимости от количества слоев в поперечном сечении оболочки разделяются на однослойные и многослойные. Число слоев определяется конструктивными особенностями и назначением оболочки. Каждый слой является носителем тех или иных свойств.

В настоящее время чаще используются трехслойные конструкции. Особенности трехслойных оболочек можно рассмотреть на примере балки двутаврового профиля. Если составить вместе несколько таких балок, то их общее сечение будет представлять собой как бы две пластины, в роли которых выступают полки двутавров, на определенном расстоянии соединенные перемычками — стенками двутавров.

Итак, если взять две панели из высокопрочных материалов и соединить их с помощью сравнительно малопрочного легкого заполнителя, то получится трехслойная панель. Следовательно, по своей идее трехслойные конструкции с заполнителем близки к экономичным прокатным профилям: максимальная изгибная жесткость при минимальных весовых затратах. Внешние слои обычно изготавливаются из металла (сталь, алюминиевые сплавы), стеклотекстолита, фанеры и др. Возможно и различное сочетание материалов, например, один слой из металла, а другой из стеклотекстолита и т. д. В качестве заполнителей используются пенопластические массы и другие подобные легкие материалы, а также различные ребристые конструкции: сотовые, складчатые, гофрированные и др. Соединяя между собой внешние слои конструкции, заполнитель обеспечивает их совместную работу и препятствует потере устойчивости слоев при сжатии и сдвиге.

Трехслойные конструкции с заполнителем из пенопластов позволяют получать большую изгибную жесткость. Трехслойные оболочки гофрированной конструкции обычно изготавливают из алюминиевых сплавов или из нержавеющей стали. Они состоят из двух слоев гладкой обшивки, соединенных при помощи сварки или склейки слоем гофра. Гофры бывают трапециевидные, синусоидальные, омегаобразные и др.

Высокой эффективностью обладают трехслойные гофрированные конструкции. Они применяются, например, на американских ракетах «Сатурн», «Центавр», «Атлас». Эти гофрированные обшивки состоят из стальных листов толщиной 0,2 миллиметра с промежуточным гофрированным слоем толщиной 0,05 миллиметра с сечением пилообразной формы. Каждый элемент продольного гофра гофрирован еще и в поперечном направлении. Трехслойный лист толщиной 4 миллиметра эквивалентен по массе сплошному стальному листу толщиной 0,535 миллиметра. Такая конструкция имеет жесткость на изгиб в продольном направлении, в 140 раз превышающую жесткость сплошного равноценного по массе листа.

Все большее применение находят конструкции, в которых в качестве заполнителя используются соты. Наиболее рациональны соты с шестигранной формой ячеек. Они используются в конструкциях обтекателей, перегородо-

док — там, где требуется легкая, но жесткая конструкция. Например, кабина космонавтов космического аппарата «Аполлон» изготовлена из панелей сотовой конструкции толщиной 12,7 миллиметра и толщиной наружных листов 2,28 миллиметра. Материал — нержавеющая сталь, листы с сотами соединяются при помощи сварки. Корпус двигательного отсека также состоит из оболочки сотовой конструкции. Толщина панелей 51 миллиметр, а наружного и внутреннего листов — 1,27 миллиметра. Соты и внешние листы изготовлены из алюминиевого сплава.

Если элементы конструкции работают на растяжение, преимущество трехслойных конструкций теряется: они эффективны там, где требуется обеспечить жесткость на изгиб.

Особое место в тонкостенных системах занимают подкрепленные оболочки. Современный воздушный лайнер вызывает невольное восхищение законченностью форм, идеально ровной, сверкающей на солнце поверхностью. Но если снять декоративную обшивку фюзеляжа, то взору предстанет сложное переплетение продольных и поперечных элементов, о наличии которых можно только догадываться по еле различаемым снаружи следам от заклепок. Слегка искривленные стержни, расположенные в направлении оси фюзеляжа, и круговые или криволинейные, простирающиеся в поперечном направлении, образуют жесткий каркас, к которому прикрепляются алюминиевые листы. Все это обеспечивает великолепные аэродинамические свойства корпуса самолета при обтекании его воздушным потоком и необходимую жесткость и прочность, гарантирующие надежность при эксплуатации самолета.

Конструкции, сочетающие в себе двухмерные элементы — собственно оболочки и одномерные элементы — силовой набор, называют подкрепленными или ребристыми. Продольные и поперечные ребра могут располагаться как изнутри, так и снаружи. Все определяется назначением оболочки.

По такому принципу конструируются отсеки корпусов ракет. Продольный и поперечный наборы традиционно имеют так называемые сухие отсеки, служащие для размещения двигателей, приборов и аппаратуры; переходные, играющие вспомогательную роль, соединяют в единое целое функциональные отсеки. Поперечные подкреп-

ления обязательны в корпусе подводной лодки. И современный океанский лайнер-супергигант и римское парусное судно, равно как и обыкновенная гребная шлюпка,— все они относятся к одному и тому же типу оболочечных систем с продольными и поперечными ребрами.

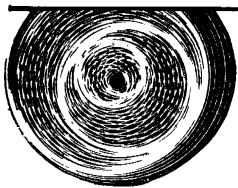
Среди подкрепленных конструкций последними были названы корпуса лодок и кораблей. Однако именно они являлись родоначальниками класса подкрепленных оболочек. Обсуждаемый принцип силового корпуса был заложен уже в конструкцию египетских парусно-гребных судов. Из кораблестроительной техники берет свое начало и терминология подкрепленных оболочек, дифференцирующая силовые элементы. Продольные слегка искривленные или прямолинейные меридиональные ребра называются стрингерами. Когда необходимо передать большие сосредоточенные осевые усилия или значительные поперечные нагрузки, продольные элементы выполняются в виде балок с мощным поперечным сечением. Они резко выделяются по площади среди всех остальных стрингеров и практически играют роль самостоятельных балок. Особое назначение таких элементов в авиационных конструкциях подчеркнуто в их названии — лонжерон. Поперечные, перпендикулярные продольной оси оболочки, криволинейные или, чаще, круговые ребра называются шпангоутами. Собственно оболочку, выполняющую формообразующую и силовую роль, принято именовать довольно буднично — обшивка. Соединение отдельных отсеков в единую конструкцию производится с помощью болтов или сварки. Различают промежуточные и стыковочные шпангоуты. Стыковочные шпангоуты, кроме силовых функций, выполняют и технологические, связанные с условиями как сборки, так и последующей эксплуатации.

Об эффективности применения подкрепленных оболочек можно судить по отношению критических напряжений потери устойчивости стрингерной оболочки к пределу текучести материала, из которого она изготовлена,— $\sigma_{кр}/\sigma_T$. Для гладких неподкрепленных оболочек это отношение составляет 0,1—0,2. В оболочке стрингерной конструкции, эквивалентной по весу гладкой оболочке, удастся достигнуть уровня критических напряжений, соответствующих отношению критических напряжений к пределу текучести порядка 0,4—0,5.

Одной из наиболее эффективных конструкций, работающих на осевое сжатие, является гофрированный от-

сек, в котором гофры расположены в направлении действия силы. В этом случае критические напряжения соответствуют отношению $\sigma_{кр}/\sigma_t = 0,7—0,8$. В последнее время традиционные гладкие оболочки, например баки ракет, стали делать подкрепленными. Так в ракете «Титан» отсек диаметром 3 м состоит из 20 отформованных панелей, изготовленных штамповкой и вытяжкой на прессе.

Подкрепленные ребристые оболочки в современных конструкциях находят самое широкое применение.



АЛГЕБРА ПОВЕРЯЕТСЯ ГАРМОНИЕЙ

Воплощение инженерных замыслов начинается с проектных прикидок, прорисовок и всесторонних расчетов. Этот начальный и вместе с тем важный этап в биографии будущей конструкции завершается созданием чертежей, которые вместе с сопровождающими их обязательными расчетами служат способом передачи технических идей, мыслей и принятых решений. Рождение чертежей — наиболее ответственный момент становления будущей конструкции. И никакие последующие самые изощренные технологические приемы «не излечат» конструкцию от недугов, если они заложены при ее проектировании.

Реальный объект и его расчетная схема

Основу прочности любого инженерного творения составляет скелет конструкции, состоящий из элементарных геометрических форм прямолинейных и криволинейных стержней, пластин и оболочек, наделенных свойствами жесткости. Именно скелет определяет способность того или иного объекта сопротивляться действию внешних нагрузок, а поэтому с ним связана расчетная схема.

Особую роль играют методы расчета на прочность, основанные на теоретических разработках. При выполнении расчетов на прочность важно уметь выразить структуру и свойства конструкции на языке математики.

Реальная конструкция всегда чрезвычайно сложна, и учет всех ее особенностей практически невозможен из-за их неисчерпаемости. Переход от реальной конструкции к расчетной схеме неизменно сопровождается упрощениями, принятием гипотез, достаточно достоверно отражающих на языке математики поведение объекта в процессе нагружения. В этом процессе, естественно, что-то теряется, а чем-то приходится просто пожертвовать,

конструкция упрощается, отбрасывается все второстепенное и сохраняются ее главные, определяющие несущую способность показатели.

Совершенство расчетной схемы зависит от глубины проникновения в реальную работу объекта. Умение удачно выбрать расчетную схему, увидев за внешними очертаниями действительную «игру» сил, и определяет в первую очередь мастерство инженера, талант проектанта. Расчет на прочность заключается в уточнении и совершенствовании расчетных схем и методов решения соответствующих им математических задач.

Приступая к разработке новой конструкции, необходимо определить в рассматриваемом объекте самое главное и решить поставленную задачу, используя минимально необходимый математический аппарат. Об этом очень хорошо сказал отец русской авиации Н. Е. Жуковский: «Задача ученого составлять такие уравнения, которые можно проинтегрировать». Роль расчетов на современном этапе развития техники необыкновенно возросла. Разработкой и развитием методов анализа прочности оболочечных конструкций занимается раздел механики деформированного твердого тела, получивший название «Теория оболочек».

Становление теории оболочек и ее приложений — пример плодотворной взаимосвязи науки и практики в эпоху научно-технической революции. Прогрессивное развитие ряда передовых отраслей техники — ракетно-, авиа- и судостроения — привело к созданию и совершенствованию эффективных методов расчета оболочечных конструкций. А это, в свою очередь, позволяет шире использовать оболочки как легкие, прочные и технологичные, словом, эффективные конструктивные решения. Однако развитие теории не всегда происходит просто и гладко, как может показаться с первого взгляда. О том, насколько порой тернист путь к истине, свидетельствует приводимая ниже история.

Как теория пришла к практике

Одной из центральных проблем в науке об устойчивости тонкостенных оболочечных конструкций волею судеб стала проблема осевого сжатия цилиндрической оболочки, так как именно для этого случая нагружения наиболее полно проявилось несоответствие теоретических

результатов расчета и данных, получаемых при испытаниях. Следует отметить, что методы расчета создавались практически в наше время и процесс их совершенствования и уточнения продолжается сегодня.

Поиск научной истины в этой важной инженерной проблеме во многом показателен. В нем, как в увлекательном повествовании, было все: обнадеживающие решения, заблуждения, разочарования, тупиковые и даже комические ситуации. Такое положение продолжалось на протяжении нескольких десятилетий. В определенном смысле проблема устойчивости тонких упругих оболочек оказалась одной из наиболее интересных в теории упругости, бросившей вызов исследователям. Отшумело немало бурных споров, опубликовано огромное количество научных трудов, прежде чем было достигнуто удовлетворительное понимание многих аспектов устойчивости оболочечных конструкций, наконец, расставлены все акценты.

Впервые задача устойчивости тонких оболочек, находящихся в условиях равномерного осевого сжатия, была решена практически одновременно Лоренцем в 1908 году и нашим соотечественником С. П. Тимошенко в 1910 году. Ими была выведена, как ее называют, классическая формула для критических напряжений осевого сжатия круговой цилиндрической оболочки

$$\sigma_{кр} = 0,605E \frac{h}{R}.$$

По прикладной значимости приведенная формула занимает центральное место в решении проблемы устойчивости оболочек, так как она очень проста и удобна.

В формуле используются уже известные нам параметры, характеризующие не только материал, но и геометрию оболочки.

Однако первые же экспериментальные исследования показали значительное (в 3 и более раза) расхождение результатов расчетов по формуле с фактическими данными, получаемыми в опытах на сжатие. Решение этой задачи продолжалось с переменным успехом: периоды затишья, характеризующие уменьшение интереса к проблеме, чередовались с бурными всплесками активности научной деятельности. Было выяснено, что формула правильно отражает качественное влияние параметров оболочки и ее материала на несущую способность. Вся «борьба» разгорелась вокруг коэффициента 0,605, кото-

рый обычно называют коэффициентом устойчивости и обозначают буквой K .

Многочисленные эксперименты, проводившиеся с конструкциями из различных материалов, показывали очень низкие, но достаточно стабильные значения коэффициента устойчивости в диапазоне $0,1—0,25$. И только в отдельных случаях значение K достигало $0,3—0,35$.

Между тем по мере уточнений теоретические исследования давали все более низкие значения коэффициента K . Вначале это выглядело обнадеживающе, так как казалось, что наконец-то теория приблизится к практике. Уточненные коэффициенты включались в справочники как руководство для расчетчиков. Однако в некоторых решениях были получены даже отрицательные значения критических сжимающих нагрузок. Получилось, что теория обогнала практику и, вовремя не остановившись, перешагнула через барьер допустимого.

Столь обескураживающие результаты и общее неудовлетворительное состояние важной инженерной проблемы расчета оболочек на устойчивость послужили предметом многочисленных дискуссий, целью которых было найти ключ к разгадке тайны непокорного коэффициента устойчивости. Показательно, что во время одного из представительных форумов, на котором обсуждалась проблема устойчивости при осевом сжатии, собравшимся был продемонстрирован график, остроумно отражавший тенденцию уточнения решения, выражавшуюся в катастрофическом падении значения коэффициента устойчивости, по мере того как к нему подключались все новые исследователи.

Поворотным моментом в исследовании устойчивости оболочек при осевом сжатии явились экспериментальные результаты американского ученого Теннисона, опубликованные в 1963 году, которые, пожалуй, впервые наметили выход из создавшегося тупика. Испытывая изготовленные с высокой точностью оболочки из фотоупругой пластмассы, Теннисон получил величину коэффициента устойчивости, близкую к классическому значению, и тем самым подтвердил состоятельность решения Лоренца — Тимошенко. Дальнейшие теоретические исследования, учитывающие влияние самых различных факторов, которые могли повлиять на «сближение» расчетных и экспериментальных данных, способствовали окончательному решению проблемы.

Что же показали испытания, проведенные и другими экспериментаторами на оболочках, изготовленных из другого материала и по другим технологиям? Выяснилось, что важнейшее значение на несущую способность оказывает качество изготовления оболочек.

Для того чтобы придать этому тезису логическое завершение, вернемся почти на 250 лет назад к исследованиям Эйлера. Изучая проблему устойчивости, Эйлер рассматривал идеально прямой и упругий сжатый стержень и изучал его поведение по отношению к поперечным возмущениям по мере роста осевой силы. Момент, когда стержень, выведенный из равномерного прямолинейного состояния, не мог в него вернуться после устранения возмущающей силы, а его прогибы начинали неограниченно расти, принимался за критическое состояние, соответствующее потере устойчивости. Получаемые по формуле Эйлера результаты экспериментов, проводившихся на различных стержнях из различных материалов, совпадали с опытными данными. Отсюда можно сделать вывод о незначительном влиянии технологии изготовления на значение критической нагрузки.

Лоренц и Тимошенко получили решение на основе идей, заложенных в трудах Эйлера. Ученые рассматривали идеально ровную цилиндрическую оболочку и исследовали ее устойчивость к поперечным возмущениям при нагружении продольной силой. Вследствие этого получалась предельная сила, которую можно достигнуть при сжатии оболочки. Между тем реальные оболочки в отличие от теоретических далеки от совершенства. Поэтому напряженное состояние цилиндрической оболочки из-за несовершенств поверхности отличается от безмоментного. Оказалось, что по сравнению со сжатым стержнем оболочка намного чувствительнее к начальным отклонениям поверхности от идеальной формы.

Исходные, заложенные при изготовлении искажения являются причиной возникновения изгибного состояния даже при малых уровнях нагрузок. Всесторонние исследования показали, что это один из определяющих, но не единственный фактор, приводящий к расхождению теории и практики. При учете геометрических несовершенств и сопутствующих им других отклонений, в частности физических неоднородностей материала, условий закрепления торцов оболочки и характера приложения нагрузки, данные конкретного эксперимента и результаты расчета

хорошо согласуются. Так была «поверена алгебра гармонией».

А значение критической нагрузки, получаемое по классической формуле Лоренца — Тимошенко, остается тем идеалом, к которому необходимо стремиться при создании реальных конструкций минимальной массы.

Заканчивая обсуждение проблемы устойчивости, нельзя обойти молчанием интересный исторический факт, дошедший до нас благодаря «каменной живописи». На развалинах стен одного древнеегипетского храма сохранилось детальное изображение организации работ по транспортировке водным путем из Аравии в Египет монолитных каменных обелисков весьма внушительных размеров — $3 \times 3 \times 30$ м. Такие увесистые камни перевозились на специальных баржах. Корпус судна представлял собой сложную тонкостенную оболочку, что свидетельствует о высоком уровне строительного мастерства древних.

Во время плавания корпус корабля изгибается под действием массы грузов и собственной конструкции, вооружения, механизмов и архимедовой выталкивающей силы, определяемой давлением воды на корпус, т. е. корабль изгибается наподобие балки.

Естественно, масса корабля и сила плавучести взаимно уравновешены. Но по длине корпуса они распределены неравномерно, что и вызывает его изгиб. При плавании на волнении масса корабля остается постоянной, а эпюра распределения сил давления воды меняется вдоль корпуса все время, так как погруженный в воду объем корабля зависит от расположения волн по длине корпуса. Если корабль находится на подошве волны (во впадине), корпус изгибается как двухопорная балка, опирающаяся на носу и на корме судна (рис. 5). На вершине волны корпус испытывает изгиб, уподобляясь двум консольным балкам, уравновешивающим друг друга в сечении, приходящемся на вершину волны (рис. 6).

Транспортируемый груз располагался в средней части баржи. В этом случае, если судно находилось на подошве волны, оно сильно изгибалось, что могло привести к потере устойчивости оболочки корпуса. Такое явление, несомненно, предвидели древние строители, так как баржа над палубой была усилена мощной надстройкой — прямоугольным шпренгелем, состоящим из пакета брусьев, наминающих спрямленную арку, подкрепленную по длине судна рядом вертикальных стоек. Сам шпренгель крепил-

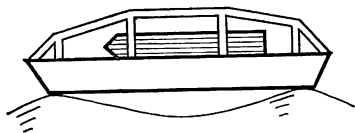


Рис. 5. Судно над впадиной

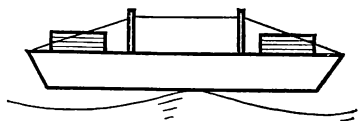


Рис. 6. Судно на гребне волны

ся к носовой и кормовой частям судна и вследствие этого воспринимал на себя в виде сжимающих сил изгиб корпуса.

Сейчас имеются методы, позволяющие достаточно точно учесть гидростатическую нагрузку снизу, рассчитать усилия в оболочке баржи и в шпренгеле, а значит, и подобрать сечение, т. е., попросту говоря, рассчитать всю систему на устойчивость. Как с этим справлялись древние строители — останется, очевидно, одной из загадок в истории техники. Несомненная уникальность самого сооружения и его внушительные размеры позволяют предположить, что кораблестроители древности знали методы, хотя бы приближавшиеся к современным. Вероятно, это были различного рода правила, выработанные опытом и практикой и переходившие от учителя к ученику.

Главная баржа буксировалась по морю целой флотилией более мелких гребных судов. В отличие от транспортируемого сухогруза в гребном судне средняя часть оставалась свободной, так как предназначалась для гребцов и командования. Грузы же размещались на носу и на корме. И древние строители предвидели возможность изгиба оболочки судна на гребне волны, напоминающего изгиб двух консольных балок, нагруженных по краям — носу и корме. Для компенсации изгиба корпуса было предусмотрено подкрепление сверху шпренгелем. Но если в первом варианте он работал на сжатие и представлял собой мощный монолит из брусьев, то в этом случае шпренгель работал на растяжение и состоял из гибкого, прочного каната (сплетенного из женских волос), который опирался также на вертикальные стойки и закреплялся на носу и корме корабля.

Как нашли лишние запасы

Если инженер, ответственный за прочность конструкций (есть такая должность), анализируя силовую схему, по каким-то причинам не может произвести ее точный

расчет, он из двух возможных вариантов выбирает тот, который обеспечивает наиболее надежную работу проектируемого объекта, т. е. большую прочность. Отсюда и берет свое начало известная в инженерных кругах формулировка: «в запас прочности предполагаем...», которую часто произносят при обсуждении результатов расчетов на прочность. Она определяет прежде всего несовершенство расчетной схемы и ту излишнюю массу, которую порождает это несовершенство.

В науке о прочности, как и в любой области прикладного знания, понятие «полный» и «достоверный» сугубо относительны. Эквивалентом «бесконечной удаленности абсолютного знания» здесь является огромное множество и случайное распределение факторов, влияющих на прочность данного изделия. Прочность конструкции — от гвоздя до космической ракеты — типичный пример вероятностно определяемого понятия. Правильно было бы сказать: «достоверное (с вероятностью 95 %)» значение «усилия разрушения». Совершенствование методов расчета на прочность повышает достоверность (например, с 95 до 95,5 %) предсказания параметров несущей способности, но цифра 100 % принципиально недостижима. Последние проценты даются с не меньшими усилиями, чем доли секунды в мировых спортивных рекордах.

Поэтому создание новых расчетных схем порой приводит к коренному изменению во взглядах на поведение конструкции в процессе нагружения и, как следствие, к снижению их материалоемкости, т. е. улучшению проектных характеристик. В этом заключается одно из важных направлений поиска конструктивных решений на качественно новом уровне. Приводимый ниже пример наглядно убедит в сказанном.

Составные емкости для хранения жидких и газообразных продуктов конструктивно выполняются в виде цилиндрических оболочек и днищ, представляющих собой сферические сегменты или замкнутые в вершине конические оболочки. Емкости устанавливаются в вертикальном положении. Следовательно, при нагружении вся система будет деформироваться симметрично относительно вертикальной оси. Для рассматриваемого случая не имеет значения, подкреплены баки промежуточными шпангоутами (и стрингерами) или нет.

В месте стыковки цилиндрической оболочки или, как ее иногда называют, обечайки и днища предусматрива-

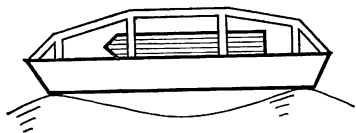


Рис. 5. Судно над впадиной

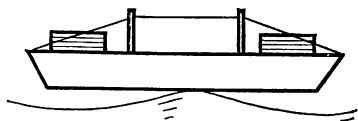


Рис. 6. Судно на гребне волны

ся к носовой и кормовой частям судна и вследствие этого воспринимал на себя в виде сжимающих сил изгиб корпуса.

Сейчас имеются методы, позволяющие достаточно точно учесть гидростатическую нагрузку снизу, рассчитать усилия в оболочке баржи и в шпренгеле, а значит, и подобрать сечение, т. е., попросту говоря, рассчитать всю систему на устойчивость. Как с этим справлялись древние строители — останется, очевидно, одной из загадок в истории техники. Несомненная уникальность самого сооружения и его внушительные размеры позволяют предположить, что кораблестроители древности знали методы, хотя бы приближавшиеся к современным. Вероятно, это были различного рода правила, выработанные опытом и практикой и переходившие от учителя к ученику.

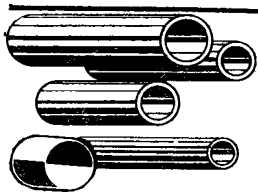
Главная баржа буксировалась по морю целой флотилией более мелких гребных судов. В отличие от транспортируемого сухогруза в гребном судне средняя часть оставалась свободной, так как предназначалась для гребцов и командования. Грузы же размещались на носу и на корме. И древние строители предвидели возможность изгиба оболочки судна на гребне волны, напоминающего изгиб двух консольных балок, нагруженных по краям — носу и корме. Для компенсации изгиба корпуса было предусмотрено подкрепление сверху шпренгелем. Но если в первом варианте он работал на сжатие и представлял собой мощный монолит из брусьев, то в этом случае шпренгель работал на растяжение и состоял из гибкого, прочного каната (сплетенного из женских волос), который опирался также на вертикальные стойки и закреплялся на носу и корме корабля.

Как нашли лишние запасы

Если инженер, ответственный за прочность конструкций (есть такая должность), анализируя силовую схему, по каким-то причинам не может произвести ее точный

собственную» нагрузку и передают ее в виде радиальных усилий на распорный шпангоут, но и «активно» помогают ему сопротивляться действию «порожденных» ими усилий, выполняя роль поддерживающего упругого основания при совместном деформировании.

В результате теоретических и экспериментальных исследований было доказано, что в реальных условиях деформирования всей системы площади распорных шпангоутов должны быть намного меньше, чем это следует из формулы для изолированного кольца. Как показали расчеты, требуемая площадь шпангоута может быть очень небольшой. В этом случае конфигурацию распорного шпангоута определяют из чисто конструктивных соображений.



САМЫЕ ПОПУЛЯРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

В природе встречается множество разнообразных форм, в основу которых положены идеи оболочечных структур. Наметившаяся устойчивая тенденция создания промышленных конструкций на основе заимствования решений у живой природы открывает необозримые горизонты для конструирования в будущем. Среди всех видов оболочечных конструкций, взятых на вооружение природой и человеком, две являются уникальными. Форма поверхности одной из них во всех отношениях самая простая, над разгадкой же тайн другой поверхности еще продолжают работать ученые. Первая одинаково распространена и в природе, и в технике, а по масштабам использования, несомненно, побила все рекорды. Вторая играет важную роль главным образом в биологических процессах, при воспроизводстве потомства одного из отрядов живых организмов, которые в равной степени одинаково уютно чувствуют себя на земле, на воде и в воздухе. Речь идет об оболочках, имеющих форму цилиндрической поверхности и птичьего яйца

Цилиндрическая оболочка или просто труба

Благодарное человечество старается увековечивать замечательные вехи своего пути к вершинам знания, сооружая памятники, монументы, мемориальные комплексы. Так, в поселке Павлово установлен памятник собаке. Появилось сообщение, что в области Гарц (ФРГ) состоялось открытие еще одного, уникального в своем роде памятника. Надпись на громадном гранитном камне гласит: «Здесь в году 1748 впервые был посажен картофель». А вот скромная дрозофила — основной объект исследований генетиков всего мира еще ждет своей очереди. О ней мы упомянули не случайно. Под микроско-

пом безобидное создание природы являет собой конструктивное совершенство, состоящее из сложнейших оболочечных построений. А вся-то длина дрозофилы едва достигает 3,5 миллиметра.

Цилиндрическая оболочка — на сегодня единственно приемлемая форма, используемая для разных целей в технике и быту. Она широко применяется при создании корпусов ракет, железнодорожных цистерн, хранилищ для нефте- и газопродуктов и т. д. В ней удачно сочетаются простота, компактность и почти идеальная технологичность, позволяющая получать изделия обычным свертыванием исходных листовых заготовок. Поэтому раскрой материала и последующий процесс изготовления конструктивной формы требует минимума технологических ухищрений.

Несомненно, что наступил звездный час конструкций из оболочек, которые играют важную роль в развитии техники. И возможно, когда-нибудь именно цилиндрическая оболочка станет главным претендентом на пьедестал.

Какой длины может быть оболочка?

Любой предмет окружающего мира человек воспринимает по-разному. Взгляните на бескрайние поля колосистой пшеницы, чуть-чуть раскачивающейся и переливающейся золотистыми оттенками в лучах яркого солнца. Художника поразит в первую очередь неповторимая палитра красок, композитор остановится, заколдованный одному ему ведомыми чарующими звуками мелодии, хлебороб услышит ароматный запах возвращенного его руками хлеба.

Однако вряд ли кто задумается об «инженерном совершенстве» хлебного поля, о том, что перед ним огромное количество сложнейших цилиндрических оболочечных конструкций. Известно, что на 1 квадратном метре может произрастать 500—600 стеблей высотой вместе с колосом до 1,2 метра. Если все стебли соединить, получится полукилометровая труба. На 1 гектаре соответственно «вырастает» 5 тысяч километров труб. И наконец, из стеблей, произрастающих на квадратном километре, можно составить «трубопровод» длиной 500 тысяч километров, т. е. превышающий расстояние от Земли до Луны!

В создании индустриальных оболочек человек успешно конкурирует с природой. Из Азии в Европу протянулись стальные магистрали труб газопровода Уренгой — Помары — Ужгород. Об уникальности этой «цилиндрической оболочки» диаметром 1420 миллиметров, имеющей рабочее давление 75 атмосфер, говорят следующие данные: общая протяженность газотранспортного комплекса составляет около 20 тысяч километров. Газопровод начинается в суровом сибирском Приполярье, где зимой морозы достигают -50°C . Около 120 километров трассы уложено по вечной мерзлоте, без малого 1000 километров приходится на заболоченную тундру и тайгу. Газопровод пересекает крупнейшие реки — Обь, Каму, Волгу, Дон, Днепр. В связи с этим следует заметить, что для трубопроводов цилиндрические формы, очевидно, единственно возможные при непрерывной транспортировке жидких и газообразных продуктов. А сантехнические и водопроводные магистрали в гражданском и промышленном строительстве! Не боясь впасть в крайность, можно смело утверждать, что большинство технологических процессов в самых различных областях производства, будь то металлургия, химия, машиностроение, сельское хозяйство, немыслимо без использования цилиндрических оболочечных конструкций.

Из истории водопровода

Снабжение водой больших городов было и остается сложной технической проблемой. Вот почему строительство водопроводных систем с древнейших времен связано с созданием уникальных гидротехнических сооружений. Одним из известных памятников инженерного искусства, слава о котором пережила века, является знаменитый водопровод, «сработанный еще рабами Рима». По дошедшим сведениям для отдельных участков магистралей римского водопровода использовались трубы, изготовленные из свинцовых листов, сваренных продольными швами. Десять линий общей длиной 404 километра с поперечным сечением водопровода больше 7,5 квадратного метра снабжали живительной влагой Вечный город. Небезынтересна и такая деталь: древние римские строители ввели стандартизацию свинцовых труб по диаметру и поперечному сечению, предвосхитив, таким образом, каноны развития будущей техники. Это позволило сделать

значительные упрощения при расчете и проектировании водопроводной сети. Кстати, совсем недавно на берегу реки Арно возле Флоренции обнаружена древняя римская вилла, относящаяся ко II веку. Все помещения этой виллы обогревались при помощи замысловатой системы труб, заполняемых паром.

Сведения о многих древнейших трубопроводах дошли до наших дней. Так, китайский подземный водопровод в провинции Хэнань, возраст которого оценивается в 2400 лет, имел длину 2 километра и связывал реку с древним городом. Обнаруженный недавно в болгарском городе Стара Загора античный трубопровод примечателен в первую очередь не возрастом, исчисляемым восемнадцатую веками, а тем, что до сих пор дает чистую питьевую воду. Глиняные трубы и водохранилища, построенные во II веке, лежат большей частью глубоко в земле, прекрасно сохранились и не имеют следов ремонта. Совсем недавно в знаменитом дворце Ширваншахов в Баку раскопан водопровод (XIV—XV вв.), по которому вода подавалась по гончарным трубам. Но, пожалуй, наиболее выдающимся инженерным творением древности является пергамский напорный водопровод, который по своим техническим характеристикам во многом соответствует современным трубопроводам высокого давления.

В 180 году до н. э. покровитель искусств и наук, основоположник знаменитой библиотеки пергамский царь Эвмен II (197—159 гг. до н. э.) повелел соорудить водопровод, ставший одной из выдающихся инженерных коммуникаций своего времени. Сборный бассейн и отстойник питьевой воды находились на горе Аргиос-Георгиос. В бассейн вода поступала с Мадарских гор, расположенных в 60 километрах, по трем линиям труб, изготовленных из обожженной глины. От отстойника водопровод длиной 3 километра спускался сначала вниз, а потом вновь поднимался вверх, так что перепад высот составлял 200 метров. Следовательно, за счет столба жидкости рабочее давление в системе водопровода достигало даже по современным понятиям огромной величины — 20 атмосфер. Естественно, обычные гончарные трубы не могли выдержать таких нагрузок, да в то время неизвестны были и материалы, из которых можно было бы сделать нужной прочности трубы. Предполагают, что древние гидростроители использовали очень хитроумную технологию, чтобы привести в исполнение волю своего повели-

теля: отлитые, по-видимому, из бронзы, метровые трубы укладывали в просверленные камни. Дошедшие до наших дней камни с отверстиями обозначают трассу водопровода. Большинство же камней расколото, очевидно, кто-то таким способом извлекал в более поздние времена ценные бронзовые трубы.

Как рассчитать трубу на прочность

Использование цилиндрических оболочек в технике, как правило, связано с нагружением их в процессе эксплуатации внутренним избыточным давлением. Очевидно, в силу осесимметричности контура поперечного сечения резервуара именно этот вид нагружения наиболее рациональный, так как в оболочке реализуется безмоментное напряженное состояние, а следовательно, и наиболее полно используется материал конструкции. С указанной симметрией связан и характер разрушения цилиндрической оболочки при достижении предельного значения внутреннего давления.

Большинству из нас не раз приходилось видеть, как в сильные холода разрывает водопроводные трубы. Знаний, которыми мы располагаем, вполне достаточно, чтобы теоретически обосновать причины разрушения. На рис. 7, а представлен простейший цилиндрический резервуар, закрытый с торцов двумя полусферами. Рассечем его двумя плоскостями. Одна из них проходит через ось симметрии емкости, а другая перпендикулярна ей (рис. 8). Рассмотрим последовательно каждую из полуоболочек. Влияние отброшенной части необходимо заменить напряжениями. Следует выяснить, какие усилия по месту воображаемого разреза нужно приложить, чтобы оставшаяся часть работала как цельная оболочка.

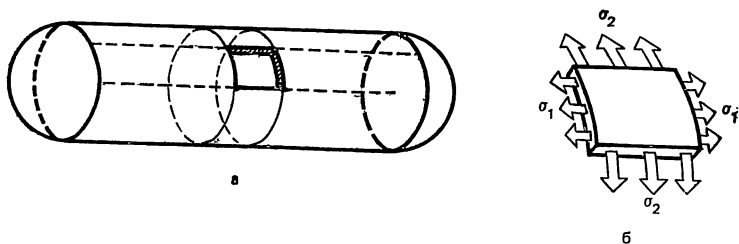


Рис. 7. Цилиндрический резервуар а и напряжения в его стенках б

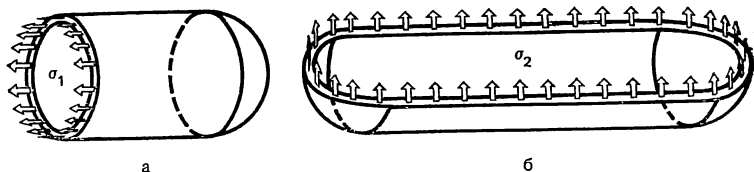


Рис. 8. Продольные *a* и окружные *б* напряжения в цилиндрической оболочке

Конкретизируем размеры конструкции, обозначив через R , L и h соответственно радиус, длину и толщину резервуара, а внутреннее давление — через g .

Для определения напряжений, возникающих в сечениях, перпендикулярных оси цилиндра, рассмотрим равновесное состояние полуоболочки, изображенной на рис. 8, *a*.

Внутреннее давление стремится оторвать одну половину от другой с усилием $T_1 = q\pi R^2$.

Это наглядно демонстрируется рис. 9. В стенке оболочки возникнут равномерно распределенные напряжения σ_1 , которые определяют результирующее усилие $N_1 = \sigma_1 \cdot 2\pi R h$.

Из условия равновесия рассматриваемой полуоболочки следует, что $T_1 = N_1$ или $q\pi R^2 = \sigma_1 \cdot 2\pi R h$.

Из этого равенства находим величину возникающих напряжений

$$\sigma_1 = \frac{qR}{2h}. \quad (1)$$

Рассмотрим равновесное состояние полуоболочки, отсеченной плоскостью, проходящей через ось симметрии (рис. 8, *б*). Усилие T_2 (рис. 10), стремящееся оторвать

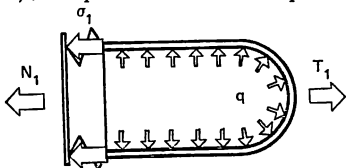


Рис. 9. Условие равновесия при определении продольных напряжений

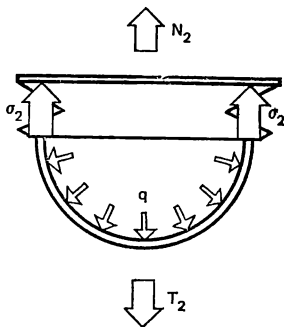


Рис. 10. Условие равновесия при определении окружных напряжений

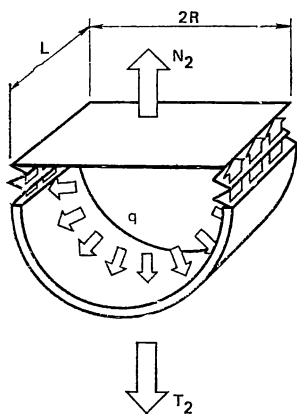


Рис. 11. Как определить силу, разрывающую оболочку в направлении образующей

одну полуоболочку от другой, определяется произведением давления q на площадь диаметального сечения $2RL$, т. е. $T_2 = q2RL$.

В справедливости сказанного легко убедиться, если вместо полуоболочки рассмотреть ее аналог (рис. 11), в котором действие отображенной части имитируется прямоугольной плитой площадью $2RL$, связанной с полуоболочкой упругой герметичной связью.

Напряжения в стенке сосуда определяют уравнивающее усилие N_2 , заменяющее действие отброшенной части $N_2 = \sigma_2 2Lh$.

При определении усилий T_2 и N_2 не принимались во внимание торцевые участки, ограниченные полусферами. Однако из-за этого строгость проводимых выкладок не нарушается, поскольку заранее размеры не были оговорены. Предполагается, что длина оболочки (как и длина трубопровода) произвольна, и всегда с достаточной степенью точности можно выделить среднюю часть резервуара, для которой справедливы приведенные зависимости. Все же особенности, связанные с деформированием в зонах, прилегающих к днищам, должны быть учтены при проведении специальных более сложных расчетов.

Условия равновесия системы, показанной на рис. 10, будут выполняться, очевидно, если $T_2 = N_2$, а следовательно, $q \cdot 2RL = \sigma_2 \cdot 2Lh$, откуда без труда находим действующие напряжения

$$\sigma_2 = \frac{qR}{h}. \quad (2)$$

Из полученных формул следует, что возникающие напряжения не зависят от длины цилиндрической оболочки, что не противоречит представлениям о деформировании трубопровода под нагрузкой и сделанным на этом основании исходным предпосылкам. Главный же результат проведенного исследования заключается в том,

что в стенке цилиндрического резервуара возникают напряжения, действующие в двух взаимно перпендикулярных направлениях: в кольцевых σ_1 и в меридиональных σ_2 . Такое напряженное состояние принято называть двухосным или плоским.

Если теперь мысленно представить элемент оболочки, выделенный двумя меридиональными и двумя параллельными сечениями (см. рис. 7, а), то он будет напряжен так, как показано на рис. 7, б. Строго говоря, на стенки оболочки действуют усилия и в направлении, перпендикулярном к поверхности, однако их величина в R/h раз меньше, чем наибольшие напряжения σ_1 и σ_2 . А это значит, что напряжения σ_3 можно не принимать во внимание при расчетах на прочность. Из сравнения выражений для σ_1 и σ_2 следует, что кольцевые напряжения в стенке цилиндрического резервуара в 2 раза больше меридиональных. Поэтому можно с полной уверенностью утверждать, что разрушение трубопровода произойдет строго вдоль меридиана, причем равновозможно в любом (наиболее слабом в этом направлении) сечении.

Кстати, заметим, что кольцевые напряжения σ_2 превосходно проявляют себя и при варке, например, сосисок или сосисок. Стоит только незадачливой домашней хозяйке засидеться у телевизора, как они лопаются вдоль всей длины (и никогда не поперек). Это лишний раз наглядно демонстрирует правомерность сделанных заключений: под действием давления от разбухающей массы формообразующая шкурка-оболочка лопается в точном соответствии с теорией.

Выведенные формулы в равной степени справедливы при расчете не только магистралей водопроводов и газопроводов, но и при выборе толщины стенки топливного бака ракеты, цистерны для хранения нефтепродуктов и всех других цилиндрических систем, нагруженных равномерным внутренним давлением.

Формулы для напряжений применяются в инженерных расчетах при определении толщины как простейших, так и сложных конструкций. Выражения для кольцевого и меридионального напряжений можно найти в любой специальной литературе по теории расчета на прочность оболочечных конструкций, где они выводятся из самых общих зависимостей.

И еще одно замечание. Пользуясь полученными формулами, читатель может без труда определить, при каком

значении q произошел, например, разрыв внутренним давлением цилиндрического резервуара или трубы. Для этого достаточно, зная радиус и толщину оболочки, а также величину предела прочности материала, из которого изготовлена конструкция, подставить их в формулу (1) и вычислить величину предельного давления q .

Следует помнить, что в зависимости от особенностей конструкций в цилиндрической оболочке может возникать и одноосное напряженное состояние. Так, в стенках вертикального резервуара для хранения жидкости действуют только кольцевые напряжения σ_2 , пропорциональные высоте столба жидкости, если вести отсчет от уровня ее свободной поверхности, а весь вес жидкости воспринимается днищем и передается на фундамент, т. е. в этом случае $\sigma_1 = 0$. В трубопроводах, по которым движется газ, может наблюдаться аналогичная картина. Отмеченная особенность не вносит никаких изменений в методику определения требуемой толщины оболочки. Ведь разрушения могут вызвать только кольцевые напряжения.

На основании полученных расчетных зависимостей можно легко определить напряжения, возникающие в сечении сферической оболочки, нагруженной внутренним давлением. В самом деле, днища резервуара могут быть без труда преобразованы в сферу, т. е. напряжения в любом сечении сферы будут такими же, как и напряжения в сечении цилиндрической оболочки, перпендикулярном ее оси. Таким образом, в сферическом резервуаре напряжения во всех сечениях одинаковы и в 2 раза меньше максимальных напряжений, возникающих в цилиндрической оболочке.

Новый вид транспорта

Современная транспортная система — это железнодорожный, автомобильный, морской, речной и воздушный виды транспорта, это магистральные нефте- и газопроводы. Разветвленная сеть транспортных артерий вдоль и поперек пересекает моря и континенты. И тем не менее, несмотря на мощную транспортную систему, грузы не всегда бесперебойно и своевременно доставляются потребителям.

Все транспортные средства — поезда, пароходы, самолеты и автомобили — имеют один существенный недо-

статок: они сопровождают груз, движутся вместе с ним. А что если сделать так, чтобы перемещался только сам груз? Ученые пришли к выводу, что одним из перспективных видов высокопроизводительной непрерывной транспортировки является трубопроводный транспорт.

Транспортировка грузов по трубам не связана с магистралями, не перегружает их, не зависит от капризов погоды, не знает сбоев в расписании, в общем, работает автономно и независимо, как метрополитен. К тому же пути для них можно прокладывать на бросовых и неудобных землях. Это заманчиво. Конечно, пока еще трудно себе представить, что все сырьевые ресурсы и концентраты за тысячи километров доставляются не в привычных железнодорожных вагонах, а по трубам. Однако доказано, что не только грузы, но и большие объемы воды для орошения также выгоднее подавать по трубам, а не по каналам. Эффективна и перевозка пассажиров в движущихся по трубам поездах.

Трубопроводный транспорт имеет хотя и не продолжительную в масштабах развития цивилизации, но уже богатую событиями историю. Сегодня трудно себе представить, что даже в прошлом веке нефть к местам переработки перевозили в бочках и бурдюках. Бесконечным потоком тянулись от промыслов караваны арб и телег. Немалые потери сопровождали такую транспортировку: нефть выплескивалась по пути, окрашивая весь путь в черный цвет. Теоретическое обоснование трубопроводный транспорт получил в трудах гениального русского ученого-химика Д. И. Менделеева. В 1878 году талантливый инженер и впоследствии почетный академик В. Г. Шухов реализовал эти идеи, построив в окрестностях Баку первый нефтепровод. Как скромно он выглядит на фоне современных гигантов: длина всего 8,5 километра, а диаметр 76 миллиметров.

А сегодня уже можно говорить о единой нефтепроводной системе: магистральные трубопроводы соединяют основные нефтепромысловые районы с нефтеперерабатывающими заводами страны. На большие расстояния по трубам транспортируются также этилен и аммиак.

Конструктивные решения трубопроводного транспорта могут быть самыми различными, но основа одна — цилиндрическая оболочка, труба, по которой непрерывным потоком или с определенным интервалом движутся транспортируемые грузы.

На сегодняшний день наибольшее предпочтение отдается контейнерному пневмотранспорту, имеющему вид цилиндрической трубы. Влекомые потоком воздуха, создаваемым специальными воздуходувными агрегатами, по трубам плавно движутся одиночные или объединенные в составы контейнеры с грузом. Контейнеры перемещаются с помощью колес, покрытых слоем резины. Это позволяет снизить износ труб и обеспечивает бесшумность хода. Исследования показали, что наиболее выгодная с точки зрения энергозатрат скорость передвижения такого транспорта равна 40—45 километрам в час. При этом перепад давления, создающий движущую силу на горизонтальных участках, должен составлять всего лишь 0,15 атмосфер.

Контейнерный пневмотранспорт предназначен для доставки сыпучих материалов, мелких штучных грузов, перевозимых навалом, бытовых отходов и различных грузов в таре. Преимущества его очевидны: независимость от климатических условий, сравнительно малая удельная энергоемкость, возможность полной механизации и автоматизации, надежность эксплуатации и, конечно, возможность прокладки труб по земле, под землей и на опорах.

Транспортные трубопроводные контейнерные системы для перевозки больших масс грузов изготавливаются из стальных труб большого диаметра с продольным швом. В дальнейшем для этих целей предполагается использовать и железобетонные трубы. Для перевозки мелких легких грузов в системах внутризаводского транспорта можно использовать стеклянные, пластмассовые, стеклопластиковые трубы и трубы из тонколистового металла. Первые очереди пневмотранспортных систем работают в Грузии. В Ленинграде завершается строительство первой в стране опытной пневмосистемы для транспортировки бытовых отходов. Разработаны генеральные схемы санитарной очистки Москвы и Баку с помощью пневмотранспорта.

Трубопроводные контейнерные поезда целесообразно использовать для перевозок на небольшие расстояния — порядка 50—60 километров. Для транспортировки больших объемов угля, рудных концентратов и других сырьевых ресурсов на многие тысячи километров более перспективным является гидротранспорт. Разработан проект первого опытного трубопровода из Кузбасса в Но-

восибирск. Предполагается смешивать уголь с водой, в пропорции один к одному и в виде пульпы перекачивать насосами по трубопроводу. Выдвинуты предложения о создании мощной гидросистемы протяженностью более 4000 километров и производительностью 50—60 миллионов тонн угля в год.

В США создается проект трубопровода для транспортировки угля от штата Колорадо до Западного побережья. Уголь, упакованный в пластиковые контейнеры длиной 458 сантиметров, будет транспортироваться по трубе диаметром 90 сантиметров, заполненной соленой водой.

Пока что это все опытные магистрали. Однако, очевидно, со временем транспортировка грузов по трубам станет таким же обычным видом перевозок, как железная дорога и автомобиль. По подземным трубопроводам поплывут сотни миллионов тонн различных грузов, и прежде всего угля, руды, строительных материалов, апатитов и др.

На дне реки

Сегодня трудно даже перечислить все области, где находят применение цилиндрические оболочки. География их использования расширяется с каждым днем. И порой чем необычнее решение, тем эффективнее оказывается применение оболочек.

Характеризуя стройку века — Байкало-Амурскую магистраль, говорят, что это мосты, соединенные рельсами. Действительно, по числу мостов (как и по многим другим параметрам) магистраль поставила своеобразный рекорд: за десять лет построено более 2200 мостовых переходов разной длины. Почти на каждые полтора километра трассы приходится в среднем один мост. А сооружение мостов — сложная инженерная проблема. И в первую очередь возведение опор и фундаментов под опоры, устанавливаемых на большой глубине, гораздо ниже дна реки. Для этого делается специальный кессон — ограждающая конструкция, служащая для образования свободного от воды рабочего пространства.

Избавиться от сложного малопроизводительного, опасного и вредного для здоровья труда в кессоне удалось с помощью оригинального решения, связанного с использованием оболочек. Представьте, как на дно реки вертикально опускаются длинные и широкие трубы, стенки

которых выполнены из железобетона. Под воздействием вибраций они вбиваются в грунт на необходимую глубину. Затем верхняя часть трубы бетонируется, в результате чего получается толстая массивная плита. На нее и устанавливают опору. Этот способ успешно использовался при возведении мостов на реках со слабым течением и достаточно мягким грунтом. При строительстве моста-гиганта через Амур около Комсомольска при быстром течении реки оболочки вбивали в скальный грунт. Для таких тяжелых условий была разработана особая технология. С помощью специальных устройств труба врезалась в скалу. После этого в ее внутреннюю полость опускали трубобур, который создавал выемку в скальном дне реки. Затем эта выемка заполнялась бетоном, в результате оболочка и скальный грунт начинали работать совместно, составляя единое целое. Позднее подобным образом были поставлены свай-оболочки на дно Зеи, Олекмы, Амгуни.

И на дне океана

Поиски новых месторождений полезных ископаемых потребовали создания не только привычных трубопроводов, но и вертикальных транспортных магистралей, например при освоении богатств Мирового океана.

Работы по освоению кладовых Посейдона только набирают темпы. Вот какую картину с позиций сегодняшних представлений можно будет наблюдать в недалеком будущем. За тысячи километров от берега под палящими лучами тропического солнца по водной глади океана медленно передвигается необычный корабль. Посредине вышка, напоминающая подъемник. К корпусу корабля под вышкой прикреплена труба, из которой непрерывной струей льется вода, с пятикилометровой глубины выносящая вместе с пеной округлые черно-бурого цвета комки величиной со средний картофель. Комки оседают на сетке приемного грохота и скатываются в трюм, а дальше их транспортируют на берег для последующей переработки. Гигантский понтон — это плавучий рудник. А добываемые со дна океана комки, называемые конкрециями, — это железо-марганцевая руда. Кстати, следует специально оговориться, что добычу железо-марганцевых конкреций намечается производить не ради самого железа,

как это вроде бы следует из названия, а для получения цветных дефицитных металлов — никеля, меди, марганца, кобальта и, возможно, некоторых других.

Разрабатываются различные проекты для подъема конкреций. Среди гидротранспортных способов добычи одним из перспективных представляется трубопроводный способ. Представьте, что с корабля через специальный люк на несколько километров до дна океана опущена стальная или синтетическая труба метрового диаметра. С помощью этой трубы и должны собираться скопления руды. А на 1 квадратном метре их может залегать до 10—20 килограммов. Рекордная плотность конкреций, обнаруженная на сегодня, 30—40 килограммов. Но руда сама по себе наверху не окажется. Решение напрашивается вполне логичное: поскольку добыча происходит в воде, то естественно и воспользоваться водой как средством транспортировки. В частности, можно поднимать конкреции с помощью эрлифтов — гидроподъемников, в которых движение потока воды, увлекающей полезные ископаемые по трубопроводу, создается пузырьками воздуха, нагнетаемого компрессором.

Условия, в которых будет работать трубопровод, не имеют аналогов в практике строительства транспортных магистралей. Ведь давление на глубине исчисляется сотнями атмосфер. Уникальность описываемого трубопровода заключается еще и в том, что он все время перемещается в водной толще со скоростью около полуметра в секунду.

Однако эрлифтные установки имеют один очень существенный недостаток — низкий коэффициент полезного действия. Он не превышает коэффициент полезного действия паровоза. Поиски путей повышения эффективности установки привели, в частности, к созданию проекта гидроподъемника, состоящего из двух (один в другом) вертикальных трубопроводов. Один из трубопроводов основной. В его нижней части собирающее устройство. Второй, подающий, коммуникационный, трубопровод нижним свободным концом вмонтирован в основной и служит для нагнетания в него плавающих пористых частиц или стеклянных шариков, с помощью которых и создается восходящий поток в основном трубопроводе. Глубина «подводного рудника» такой установки определяется прочностью на сжатие частиц легкого материала, а его производительность возрастает на порядок.

На родине знаменитого идадьго

В истории часто встречаются случайности или неожиданные повороты. Так, ничем не примечательная гористая полупустынная местность, каковой она была во все времена, вдруг стала всемирно известной благодаря перу великого Сервантеса, создавшего печальный образ странствующего рыцаря Дон-Кихота Ламанчского. Сервантес оказался провидцем. О родине Дон-Кихота вспомнили почти через четыре века. Поводом для этого послужило интересное событие: воплощение нового технического решения, имеющего прямое отношение к тем ветряным мельницам, с которыми сражался благородный идадьго, произошло также в Ламанче. Именно в этом районе Испании была построена первая солнечно-ветровая электростанция, работающая по принципу преобразования солнечной и ветровой энергии в электрическую. Сама по себе идея не нова. Еще полвека назад, изучая закономерности движения воздушных масс под действием температуры и влажности, ученые пришли к выводу: аналогичные процессы можно создавать искусственно. Однако реализация этой идеи стала возможной только в наши дни.

Что же представляет собой такой инженерный комплекс? Солнечно-ветровая электростанция состоит из трех установок: парника, трубы и ветрового колеса. Технологический процесс производства электроэнергии довольно прост. На некотором расстоянии от поверхности земли размещается прозрачная пленка, под которой за счет солнечной энергии создается парниковый эффект. Нагретый в замкнутом объеме воздух устремляется через отверстие в крыше парника в высокую трубу — «камин». Внутри трубы на расстоянии 10 метров от земли установлено ветровое колесо — турбина, которая, вращаясь в воздушном потоке, приводит в движение генератор. Тяга в трубе, а следовательно, и скорость вращения вентилятора тем больше, чем выше труба и соответственно значительнее перепад температур внизу иверху.

При проектировании и строительстве солнечно-ветровой электростанции пришлось решать сложный комплекс технических проблем, искать компромисс между противоречивыми требованиями. Во-первых, высота. Тут критерий один: чем выше труба, тем лучше. Однако в любом случае необходимо обеспечить гарантированный

запас ее устойчивости на опрокидывание ветром и надежную теплоизоляцию. Чтобы не создавать помех на пути движения воздушного потока из-под крыши-пленки, труба в идеальном варианте должна висеть в воздухе. Решая в комплексе эти проблемы, инженеры выбрали в качестве «камина» металлическую трубу диаметром 10 метров и высотой 200 метров. Несмотря на то что она в 20 раз легче аналогичной конструкции из бетона, вес ее весьма внушительный — 250 тонн.

Крепление вертикальной оболочки, обеспечивающее минимальные аэродинамические потери при движении воздуха, выросло в самостоятельную проблему. Трубу «посадили» на опорное кольцо и «подняли» над землей с помощью восьми тонких стальных труб. От опрокидывания порывами ветра сооружение прочно удерживает система стальных растяжек. Внутренняя стенка «камина» для уменьшения сил трения воздуха о ее поверхность сделана идеально гладкой. Все механизмы привода ветряного двигателя к генератору для устранения помех на пути воздушного потока закрыты аэродинамическими обтекателями. Наибольшую мощность новое детище инженерной мысли набирает к полудню. После захода солнца ее функционирование обеспечивается за счет тепла, накопленного в земле «парника», которого хватает до самого утра.

Пока подобные установки носят экспериментальный характер. Идет отработка оптимальных режимов, проверка новых технических решений, испытание материалов. Очень важно, что производство электроэнергии по новой технологии экономически выгодно, а источники питания практически неисчерпаемы. Солнечно-ветровые электростанции могут существенно стабилизировать получение электроэнергии от гидроэлектростанций, расположенных в жарких пустынных местах: летом, когда уровень рек и водохранилищ резко падает, они могут компенсировать возникающий дефицит. Недалеко то время, когда границы пустынь и степей украсят устремленные в небо километровые гиганты — «камины». Гармонируя с окружающей природой, они будут символизировать новый этап наступления человека на пустыню.

Новое качество трубы

Для того чтобы лучше понять проблемы, возникающие при добыче из недр жидких и газообразных продуктов, познакомимся с конструкцией буровых установок.

Все начинается с бурения скважины, в которую опускается набор обсадных труб размерами 114—508 миллиметров. Первую трубу размером до 508 миллиметров, чтобы создать направление скважине, опускают на глубину 20 метров, затем последовательно вставляют трубу-кондуктор на 200-метровую глубину, техническую колонну на глубину 1500 метров и эксплуатационную колонну на глубину 3500 метров и более. Пространство между скважиной и трубами заливается цементным раствором. На поверхность нефть поступает по эксплуатационной колонне самотеком за счет повышенного давления на глубине. Когда запасы начинают иссякать и давления на глубине не хватает, для принудительного забора нефти внутрь эксплуатационной колонны опускают насосно-компрессорные трубы, с помощью которых и продолжается жизнь скважины. Таковы общие принципы добычи.

Теперь становится совершенно ясно, что значат трубы для нефтяников. Недавно в одном из журналов была опубликована статья, посвященная этой злободневной проблеме. Показательно ее начало: «Буровая без труб — совершенно никчемное сооружение, пользы от которой не больше, чем от мыльного пузыря».

Буровая, т. е. то, что мы воспринимаем как лес нефтяных вышек, над поверхностью земли поднимается на 50 метров, глубина залегания нефтяных пластов, разрабатываемых сегодня, достигает 2—5 километров, а длина стандартной трубы, используемой при бурении, 10—12 метров. Высота бурильной вышки позволяет осуществлять сборку секций всего лишь из трех труб, которые называются свечами. Трудно себе представить, насколько трудоемок и сложен процесс сборки колонны в несколько километров из труб длиной 12 метров. В то же время инструмент, с помощью которого проходят скважину, — долото, опускаясь все ниже, естественно, тупится, и его нужно периодически менять. Для организации принудительного процесса выкачивания нефти необходимо также производить смену эксплуатационной колонны на насосно-компрессорную магистраль. И вот начинается изнурительный процесс подъема трубы с последо-

вательным разбором ее на свечи, а затем все происходит в обратном порядке — методично собирают только что разобранные свечи в единую трубу... И эта процедура повторяется не один раз. Львиная доля трудоемкости работ на промыслах связана с опусканием и подъемом труб.

К готовой скважине предъявляются жесткие требования. Как обсадная, так и насосно-компрессорные трубы должны быть обязательно герметичными, для того чтобы предотвратить, с одной стороны, попадание породы в скважину, а с другой — вытекание нефти из эксплуатационной трубы. Кроме того, они должны быть достаточно прочными, способными выдержать вес всей колонны. Единственным способом сборки труб в настоящее время является резьбовое соединение. Поэтому создание совершенных высоконадежных резьбовых соединений стало центральной проблемой. Прочность и герметичность резьбовых соединений — это на сегодня проблема номер один в нефтяной промышленности. Ведь часто бывает и так: трубы при подъеме-спуске обрываются и затыкают скважину на глубине, например, 2 километров. Попробуй достать ее, иной раз легче начать бурить новую скважину, чем пытаться поднять упавшую колонну.

Давние мечты нефтяников связаны с гибкими трубами. И усилий в этом направлении предпринимается очень много. Только за последние 20 лет в мире зарегистрировано 600 изобретений различных конструкций шлангов. Но у всех труб-шлангов один и тот же недостаток. Они работают хорошо на внутреннее избыточное давление. А в скважине никуда не денешься от внешнего давления, создаваемого породой, которое очень легко сминает оболочку-шланг, подобно тому как можно сжать пальцами соломинку. Однако это не одно слабое место. Дело в том, что шланг проектируется из расчета эксплуатации в горизонтальном положении. Если же шланг окажется в подвешенном состоянии, то он может порваться даже под действием собственного веса. Попытки упрочнить шланг с помощью каркасных нитей, расположенных вдоль, привели к ужесточению шланга, который по гибкости приблизился к металлической трубе. Но был создан и сверхпрочный гибкий универсальный шланг.

Как зарубежная, так и отечественная промышленность изготавливали шланги, в которых силовые нити располагались под одним и тем же углом к оси — 55°. Это

оптимальный угол навивки, но только в условиях внутреннего давления. И ученые пошли по другому пути — решили использовать свойства исходных конструктивных материалов. Если в зависимости от расположения армирующих слоев менять угол навивки силовых нитей, учитывая диаметр армирующих пучков, их взаимное расположение, чередовать определенным образом пучки и слои заполнителя, то можно добиться желаемого комплекса свойств.

Гармоничное использование всех характеристик исходных материалов в наиболее разумном их сочетании позволило создать новое качество конструкции.

Гибкие трубы могут коренным образом изменить всю технологию бурения, эксплуатации и промывки нефтяных скважин. Вместо многодневной изнурительной работы по свинчиванию и развинчиванию труб достаточно нажать на пусковую кнопку, и шланг максимум за час сматывается или наматывается на барабан.

Сейчас по металлоемкости нефтяное и газовое хозяйства занимают одно из первых мест среди всех отраслей. С введением шлангов с нефтепромыслов навсегда исчезнут вышки как дорогие и устаревшие сооружения.

И еще одна перспектива. Все больше нефти добывается в открытом море. В этом случае выгоднее перекачивать ее (и газ) по трубопроводам. Стальная труба очень боится провисаний и требует специально подготовленного выверенного ложа. В этих условиях гибкий трубопровод будет просто незаменим.

Сколько загадок у птичьего яйца

Перед архитекторами и проектировщиками здания театра в столице Сенегала Дакаре была поставлена задача: создать зрительный зал, принципиально отличающийся от традиционных сооружений подобного типа. Внутри помещения не должно было быть не только колонн, но и декоративных опор. По замыслу авторов здание предполагалось выполнить в виде огромной тонкостенной железобетонной оболочки, опирающейся на специальный фундамент. Когда провели расчеты, то выяснилось, что при заложенных в проект размерах конструкция не в состоянии нести заданную нагрузку. Между тем сравнение с естественной формой живой природы — скорлупой яйца, которую напоминало будущее здание,

показало, что яичная скорлупа выдерживает (естественно, пропорционально ее размерам) соответствующие нагрузки. Для разгадки тайны и объяснения обнаруженного несоответствия пришлось заняться тщательным изучением строения оболочки яйца. Было установлено, что секрет прочности связан с тонкой и эластичной пленкой, делающей известковую скорлупу оболочки яйца конструкцией с предварительным напряжением. Своим открытием строители не преминули воспользоваться при сооружении здания театра, заменив материал на двухслойную оболочку, состоящую из жесткой «скорлупы» и предварительно напряженной, растягивающейся внутренней мембраны, выполненной в виде системы решеток.

Следует заметить, что форма театра в Дакаре не копирует скорлупу яйца, представляя собой нечто среднее между ней и скорлупой кедрового ореха. Благодаря этому усовершенствованию удалось удачно сочетать конструкцию здания и его функциональное назначение.

На примере перекрытия театра в Дакаре видно, что в отдельных случаях конструктивные особенности конкретной природной формы, а также ее геометрия (если она соответствует всему комплексу требований, предъявляемых к сооружению), претерпев небольшую корректировку, могут успешно использоваться при проектировании того или иного объекта, что значительно повышает его функциональные, а также художественно-эстетические качества.

Начиная разговор об одной из интереснейших конструкций природы, следует отметить, что скорлупа птичьего яйца среди биологических структур занимает особое место и, несомненно, является одной из самых совершенных многофункциональных биологических оболочечных форм, уникальным консервантом жизни и продуктов жизнеобеспечения. Недаром крылатое латинское выражение «ab ovo» гласит, что все имеет свое начало, подобно тому как жизнь возникает из яйца.

Диапазон известных конструкций этого типа необычайно широк: от крохотных яиц колибри (большой диаметр 10 мм и малый — 8 мм) до огромных (соответственно 340 мм и 250 мм) у недавно вымершего мадагаскарского страуса эпиорниса. Из ныне существующих птиц крупные яйца «несут» африканские страусы (150×120 мм). Не менее впечатляюща и статистика их мас-

сы: от 500 миллиграммов у колибри до 10,5 килограмма у эпиорниса и 1,5 килограмма у африканского страуса.

Геометрия и строение яйца на первый взгляд довольно несложны, однако эта простота обманчива. Недаром говорят: «Все гениальное — просто». Так и внешне простое яйцо является уникальным созданием природы и до сих пор хранит множество тайн и секретов, которые еще предстоит разгадать.

Как сейчас выяснено, форму куриного яйца можно описать довольно сложными математическими уравнениями. Однако формулы — это лишь попытка с помощью языка математики выразить тектонику яйца. Они не дают ключа к разгадке биологических «технологий», реализуемых в яйце, не могут помочь выяснить причины образования его специфической формы и ответить на вопрос, почему яйцо имеет именно такую форму, а не другую. А ведь далеко не у всех птиц они похожи на куриные. Почти сферическую форму имеют яйца пингвина и коршуна, ближе к конусу у кулика и тонкоклювой кайры. Более того, даже среди одного и того же вида птиц яйца имеют различную форму. У кур, например, «возрастной ценз» сказывается на увеличении округлости их продукции. Еще в древние времена Аристотель выдвигал гипотезу о том, что форма яйца зависит от половой принадлежности находящегося внутри эмбриона.

В начале прошлого века была предложена гипотеза, согласно которой контур скорлупы отражает форму тела птицы, развивающейся из яйца. Сторонники естественного отбора утверждают, что форма яиц связана со способностью выживания в конкретных условиях обитания. Именно поэтому, считают они, яйца некоторых птиц, гнездящихся на уступах скал, имеют форму, близкую к грушевидной. Если такое яйцо слегка толкнуть, то оно не покатится по прямой, траектория его движения будет круговой и, следовательно, будет меньше шансов упасть с площадки на скале от порыва ветра или нечаянного толчка неповоротливой птицы.

Кстати, форма яиц в свое время доставила много хлопот при их упаковке. Механизация работ на птицефабриках до недавнего времени кончалась на участке сортировки. Укладка же в ячейки тары осуществлялась вручную. Дело в том, что яйцо оказалось с норовом, механизировать эту операцию никак не удавалось: яйца не хотели двигаться к сортировочному механизму в строгом

порядке, например, вперед заостренной частью, а без этого невозможно было создать конструкцию мягкого чувствительного захвата для последующей плотной упаковки. Свое слово сказала наблюдательность изобретателя. Было подмечено, что яйцо обладает интересным свойством (о котором, судя по вышеприведенным соображениям, птица «хорошо осведомлена»): по наклонной поверхности оно катится всегда по дуге и, подобно бумерангу, возвращается почти на старое место. Кроме того, так как в яйце центр тяжести смещен в сторону острого конца, оно всегда сворачивает в его направлении. После того как это поняли, все остальное, как говорится, было делом техники: создать автомат для укладки яиц не представляло труда.

Форма яйца, несомненно, мышечного происхождения. Если бы оно не подвергалось действию внешних сил, когда в процессе развития оно еще эластично, то, естественно, форма яйца тяготела бы к сферической. Заостренность одного конца и округлость другого, несомненно, связаны с асимметрией сил, которые действуют на яйцо во время его движения по яйцеводу, однако механизм этого воздействия до сих пор не выяснен.

Яйцо имеет сложную оболочечную иерархию, включающую в себя скорлупу с двумя подскорлуповыми, белковой и желтковой, оболочками. На одном конце яйца подскорлуповая оболочка расслаивается, образуя воздушную камеру-пугу, которую мы видим, когда вскрываем яйцо с тупого конца. Подскорлуповые оболочки принадлежат к числу немногих биологических мембран, подчиняющихся закону Гука. Упругие свойства мембран проявляются до деформаций порядка 24%, когда происходит разрыв пленки. В этом отношении они намного совершеннее конструкционных материалов. Упругость пленки — ее способность растягиваться и пружинить — повышает надежность скорлупы и предохраняет ее от разрушения.

В свою очередь яичная скорлупа — тоже многослойная оболочка со строго дифференцированными функциями каждого из слоев. Структура скорлупы включает в себя (рис. 12): наружную жесткую оболочку 1, известковые губчатые слои 2 и 3 с уменьшающейся плотностью к внутренней поверхности скорлупы, легкий «плетеный» слой из каротиновых нитей 4, плотный плетеный слой с

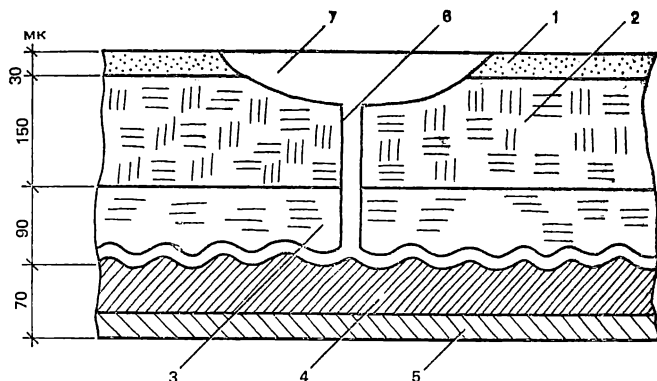


Рис. 12. Строение скорлупы яйца

гладкой внутренней поверхностью 5, поры 6 и «кратеры» 7, распределенные по всей скорлупе яйца.

Скорлупа и внутренние оболочки обеспечивают механическую прочность, гидроизоляцию, защиту от проникновения влаги внутрь и вывод лишней воды изнутри, предохраняют эмбрион от микробов, аккумулируют кислород. У скорлупы высокая степень избирательности. Она пропускает пары, газы, питательные вещества лишь в нужном направлении, благодаря чему строго регулируется температура и влажность живого содержимого. Даже при резком изменении температуры скорлупа сохраняет свои свойства и не растрескивается. И все эти достоинства — у оболочки, толщина которой составляет всего лишь 0,02—0,1 миллиметра. Поистине удивительный пример «солидарности» и «взаимопонимания», объединенных общностью выполняемых конструктивными элементами задач, являет собой многослойная структура оболочки яйца. Плотность скорлупы зависит также от направленности тепловых потоков при создании условий для развития зародыша: тепло от несущки распространяется в глубь яйца, и соответственно плотность наружных слоев скорлупы больше, а внутренних — меньше.

Яичную скорлупу как многослойную конструкцию иногда сравнивают со слоеным пирогом. Но это сравнение не совсем точное. Особенности скорлупы — это не просто сумма свойств ее отдельных слоев. Ее отличительные черты проявляются на более высоком уровне — многослойная конструкция порождает принципиально новые свой-

ства, которые не присущи ни одному из слоев. И в этом заключается ее пока не достигнутый человеком уровень конструктивного совершенства.

Много интересного предстоит еще познать, изучая комплекс прочностных качеств яйца. Помимо того, что яйцо — это предварительно напряженная оболочка, оно, как установлено, представляет собой конструкцию со строго запрограммированными свойствами. Например, механические характеристики скорлупы не везде одинаковы и зависят, в частности, от климатических условий; она лучше всего сопротивляется действию сжимающих усилий, направление которых совпадает с большим диаметром яйца. Высокая же механическая прочность оболочки кроется в совместной работе сжатой жесткой скорлупы и эластичной пленки. С округлой формой скорлупы связывают еще одно очень важное свойство.

Все оболочки, и мягкие, и жесткие, как прекрасные консерванты зародышей птиц и продуктов жизнеобеспечения — монолитные, безлюковые конструкции. Функции люков для регуляции обмена, способствующего поддержанию внутри необходимых условий существования, передаются всей поверхности и осуществляются за счет строения стенок самих оболочек. Выполнив свое основное назначение по обеспечению необходимых условий для осуществления обменных процессов, гарантирующих «хранение» и развитие зародыша, и надежно защитив содержимое от внешних воздействий, скорлупа не создает дополнительных трудностей цыпленку. «Оформившись» как биологический объект и использовав все заготовленные провианты, он покидает свое первое жилище, где протекало утробное развитие, и вступает в самостоятельную жизнь.

Но появление «люка» — это и конец существования оболочки как функциональной системы. Вот тут-то и выясняется, что округлая форма скорлупы яйца такова, что ее трудно разрушить снаружи, но сравнительно легко это осуществить изнутри. В пользу хорошей сопротивляемости яичной скорлупы к воздействию самых нежелательных для оболочечных конструкций нагрузок — локальных и динамических воздействий, говорит повседневный житейский опыт. Не всякий лоб в состоянии выдержать те усилия, которые необходимо приложить для того, чтобы разбить куриное яйцо. А скорлупа яйца страуса разрушается при нагрузке около 120 килограммов. О необыкновенной

прочности их говорит такой факт: египетские грифы, пища которых, как известно, не отличается изысканностью, собираясь полакомиться вкусным блюдом, разбивают страусиные яйца, кидая на них с высоты увесистые камни.

Поскольку мы невольно приблизились к вопросам кулинарного искусства, полезно заметить, что процесс варки яиц — довольно сложная, но научно обоснованная технология, которой посвящены пространные трактаты. До недавнего времени труднее обстояло дело с очисткой яиц, сваренных вкрутую, на предприятиях общественного питания. Производилась она вручную и при массовом производстве была весьма трудоемкой. Аппарат-рекордсмен, осуществляющий эту процедуру с 2 тысячами яиц в час, был удостоен золотой медали на Международной выставке оригинальных изобретений в Женеве. Очистка яиц ведется в нескольких камерах с водой, в которых жидкость под давлением раздавливает и смывает скорлупу.

С проблемой формы птичьего яйца связано целое направление в архитектуре. Начало ее освоения теряется в веках. Великий зодчий эпохи Возрождения итальянец Ф. Брунеллески, конструируя купол Флорентийского собора, взял за основу скорлупу птичьего яйца. В форме скорлупы яйца, поставленного на естественный постамент, выполнен проект виллы в США, принцип конструкции скорлупы использован в описанном покрытии театра в Дакаре.

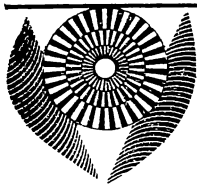
Впервые в СССР тектоника яйца была заимствована при строительстве Московского планетария в 1929 году. Поверхность железобетонного купола, имевшего в то время самые большие размеры в СССР, снаружи была покрыта стальным листом и внешне напоминала скорлупу яйца. Вздвигающаяся вверх блестящая оболочка подчеркивала художественную законченность всего здания, а вместе с подвешенным внутри экраном-полусферой создавала иллюзию грандиозности космических масштабов и неповторимой красоты звездного неба, чем неизменно вызывала восторженные эмоции у зрителей.

Весьма заманчиво птичье яйцо и как прообраз строительного материала будущего. В скорлупе яйца удачно сочетаются запрограммированные конструктивные и изолирующие качества, а это и есть тот идеал, к которому стремятся проектировщики. Какие неограниченные перс-

пективы откроются в строительстве, если появятся легкие и прочные материалы, способные предохранять от зимней стужи и солнечной жары, регулировать количество поступающего свежего воздуха! Простейший практический вывод напрашивается сам собой: в помещениях исчезнет необходимость в форточках и кондиционерах, а это уже прямая дорога к созданию совершенных творений с широким диапазоном разделительных функциональных и силовых возможностей.

Разгадывая одну за другой тайны яйца, человек черпает новые крупницы знаний, постигает не только совершенство форм и непревзойденных структур материалов, но и открывает новые явления, новые высоты совершенства биологических конструкций. Поставить их себе на службу — задача будущего.

Но не распознав до конца феномен яйца, ученые уже сегодня пытаются внести свои коррективы в его строение. По предложению Международного комитета по стандартизации яиц (есть, оказывается, и такая организация) ученые занялись проблемой повышения сопротивляемости скорлупы внешним воздействиям, так как большое количество яиц разбивается на пути к потребителю. Имеются и конкретные предложения. По мнению японских ученых, в воду, которую пьют куры, необходимо добавлять двууглекислую соду, уменьшив одновременно количество соли в их пище. Утверждается, что эти меры приведут к увеличению толщины скорлупы на 20 процентов.



ПАТЕНТЫ ПРИРОДЫ

Оболочки как конструктивное решение не являются изобретением цивилизации. Патент полностью и безраздельно принадлежит природе. Тысячелетиями она создавала свои творения, воплотив в их конструкциях идеи простоты, прочности и эстетического совершенства. И среди них можно назвать множество самых разнообразных оболочечных форм. Оболочки были первыми конструкциями, заимствованными человеком из окружающего его мира. Именно природой были подсказаны формы, по образу и подобию которых наши далекие предки создавали «инженерные» сооружения для перекрытия жилищ, для хранения и транспортировки жидкостей и сыпучих продуктов. Так, человек пришел к мысли о бурдюке, парусе. Из природы взята идея воинского шлема и многое-многое другое. Вот почему любой исчерпывающий анализ инженерных решений, являющихся коллективным достижением научной, конструкторской и технологической мысли, без рассмотрения естественных построений живой и неживой природы не может дать полного представления о тех возможностях, которые таят в себе оболочечные конструкции.

В процессе зарождения и развития жизни на Земле природа создала конструктивные решения для обеспечения существования биологических организмов в реальных условиях среды. Возможно, первыми такими конструкциями были капельки воды. Роль ограждения капелек от окружающей среды выполняло поверхностное натяжение. Как знать, может быть с этого и началась история оболочек.

Естественные формы оболочек — продукт эволюции жизни в течение 2 миллиардов лет. Примеры их можно приводить бесконечно: панцирь черепахи, под мощной защитой которого она передвигается «черепашым» шагом; обитатели моря, облаченные в «броню» раковин; ко-

жица самых разнообразных плодов, сохраняющая их неповторимый аромат и вкусовые качества; стебли растений, например бамбука, злаковых; клетка живого организма. Только простое перечисление составило бы многотомный труд, а подробное описание — поучительную многотомную энциклопедию разгаданных и ждущих своего объяснения тайн природы, яркого свидетельства неограниченных возможностей для творческой деятельности человека.

Часто можно наблюдать, как сквозь толщу асфальтового слоя, взрывая его, пробиваются к свету нежные ярко-зеленые ростки. Или, например, альпийские подснежники разрушают достаточно толстую корку льда, сковывающего землю. Откуда же у этих еще неокрепших побегов такая гигантская сила? Ведь человеку, чтобы вскрыть асфальт, приходится прибегать к помощи отбойного пневматического молотка, а перед слабыми, пробуждающимися к жизни стебельками прочная асфальтовая броня пасует. Разве это не загадка природы? Конечно, загадка, но ничего сверхъестественного в этом нет.

Еще в глубокой древности, на заре развития цивилизации человек поставил себе на службу эти могучие силы растительного организма. В каменоломнях Древнего Египта за полторы тысячи лет до нашей эры для добычи огромных глыб гранита использовали оригинальный способ. Вначале на поверхности монолита делалась разметка размеров откалываемого куска. Для этого наносилась специальная канавка, которая в дальнейшем выполняла роль концентратора напряжений, обеспечивающего заданные размеры откалываемой части. Затем вдоль этой канавки на определенных расстояниях долбили глубокие отверстия, в которые вбивались сухие деревянные клинья. После этого канавки заливались водой. Впитав влагу, дерево разбухало и раскалывало глыбу вдоль заданной линии. Так, в частности, был изготовлен обелиск из красного гранита — игла Клеопатры.

В наши дни аналогичным способом производят заготовку скальных пород. Только в качестве работающего тела используется обыкновенная вода. Технология практически не изменилась: остается направляющая канавка и отверстия, в которые заливают воду. Но вода сможет показать свою настоящую силу только зимой, с наступлением холодов. Поэтому система срабатывает не сразу. Ее работоспособность зависит от времени года.

Замерзая зимой, вода расширяется и разрушает монолит, легко откалывая огромные глыбы. Конечно же, там, где круглый год лето, модернизированный способ не может применяться.

Чтобы понять, откуда и как нежные побеги приобретают такую могущественную силу, следует хотя бы в общих чертах познакомиться с основой всего растительного и животного мира — живой клеткой. Главными элементами клетки являются ядро, протоплазма и оболочка. В XIX веке с помощью микроскопа было выяснено, что форму клетке придает оболочка. Оболочка — сложная конструкция, которая у растений состоит из клетчатки, высокомолекулярного сахара, а у животных — в основном из липидов. Современник знаменитого Р. Гука, открывшего клетку в 1665 году, врач Н. Грю считал, что стенки клеток представляют собой переплетение волокон, похожее на текстильную ткань. Отсюда и ведет свое летосчисление научный термин «ткань».

Наблюдая за работой клетки, убеждаешься, насколько разумно она «сконструирована» природой. Действительно, принцип наилучшего использования материала заложен в основу основ биологического объекта — клетки, материал которой работает только на растяжение, т. е. используется самым эффективным образом. Именно внутреннее давление определяет упругость листьев и ту пробойную силу, которая взламывает асфальт и лед. Когда увядший листок помещают в воду и он восстанавливает свою форму, в его тканях увеличивается давление. В обычных условиях внутриклеточное давление колеблется от 5 до 10 атмосфер, в отдельных случаях достигает поистине гигантских значений — более 100 атмосфер. Установлено, что давление внутри живой клетки сахарной свеклы около 50 атмосфер, а внутриклеточного сока пустынных растений — порядка 200 атмосфер. Попутно заметим, что давление в 5—10 атмосфер для многих современных тонкостенных оболочечных систем является предельно допустимым.

Но каким образом возникают такие гигантские усилия? В технике давление создается за счет сжатия. И это требует больших затрат энергии и весьма сложных механических устройств. Природа же изобрела более простой, но эффективный по энергозатратам метод, основанный на свойствах полупроницаемых мембран. Речь идет об

осмосе, т. е. диффузии вещества через мембрану, разделяющую два раствора разной концентрации.

Если в мешочек насыпать соль и опустить его в воду, то в зависимости от плотности фильтра соль и вода будут взаимодействовать по-разному. Можно подобрать такой фильтр, который будет пропускать внутрь молекулы воды и не выпускать наружу более крупные ионы соли. Это так называемый полупроницаемый фильтр. Концентрированный солевой раствор, образующийся в мешочке, обладает способностью притягивать воду, таким образом, молекулы воды проникают внутрь фильтра. Но в обратном направлении раствор не проходит. Так, постепенно наполняясь, мешочек раздувается, и в нем возникает избыточное гидростатическое давление. Причем чем выше концентрация, тем больше давление.

Подобные мешочки-вакуоли с солевыми растворами находятся в протоплазме растительной клетки. Внутри вакуоли живая протоплазма растительных клеток удерживает растворенные в воде вещества — соли, антоцианы, танины, сахара. Как только клетка оказывается в воде, содержащиеся в ней растворы начинают энергично впитывать молекулы воды, поступающие в клетку через полупроницаемые мембраны. Так, благодаря осмосу клетки приобретают упругость, являя собой примеры совершеннейших пневматических оболочек.

Рассматривая функциональные способности мембран клетки, нельзя не отметить ее высокое свойство избирательности. В качестве примера можно взять молекулы глюкозы, которые весьма быстро, как показывает опыт, способны проникнуть в клетку. Но это происходит только в том случае, если речь идет о глюкозе, полученной из винограда или других растений. Если же синтезировать глюкозу искусственным путем, в клетку проникает только половина ее молекул.

При подробном изучении этого странного на первый взгляд явления оказалось, что молекулы глюкозы встречаются двух конфигураций — «левая» и «правая», которые зеркально отображают одна другую. А клетка пропускает в себя только «левую» глюкозу, которая синтезируется в природе. При химическом синтезе глюкозы получают и «левая» и «правая» конфигурация молекул, поэтому половина молекул («правые») остается вне клетки. Именно такая высокоорганизованная избирательная способность клетки используется при лечении сахарного

диабета. Под действием инсулина клеточные мембраны пропускают сахар, но только природный. «Правый» сахар искусственного происхождения клетка не пропустит, хотя он по химическому составу ничем не отличается от природного. Таким образом, мембрана — своеобразный страж клетки. Эту функцию она выполняет благодаря большому количеству пор на ее поверхности. Поры придают мембране вид своеобразного сита. В клетке человека большинство пор мембраны имеет диаметр около 8 Å. Однако в ткани почек поры имеют больший диаметр, так как их клетки служат для фильтрации и вывода из организма шлаков.

Избирательные способности мембраны клетки — далеко не единственный пример ее совершенства. Несмотря на то что толщину мембраны иногда составляют 2—3 молекулы, по своим механическим свойствам мембрана характеризуется очень высокой прочностью на разрыв, гибкостью и устойчивостью. Немаловажную роль играет суммарная поверхность мембран. Например, печень крысы весит всего лишь 6 граммов, а площадь всех ее клеточных мембран составляет несколько сот квадратных метров.

Мембраны играют большую роль в жизни клеток. Находясь в непрерывном движении, они исчезают, распадаются, вновь образуются, пульсируют. И вся эта деятельность не бесполезна. Она направлена на установление контакта между клетками, передачу информации между ними. Благодаря мембранам клетка обладает удивительной способностью — узнавать из бесчисленного множества других клеток себе подобных. Кроме сказанного, мембраны различных клеток выполняют строго регламентированные для них функции. Например, мембраны нервных клеток специализируются на передаче электрических импульсов. Мембраны клеток скелетных мышц участвуют в их сокращении и расслаблении и т. д.

Все перечисленные, а также многие другие функции клетки выполняются бесперебойно и четко, а это говорит о том, что она имеет почти идеальную управляющую систему. Причем в нашем организме более чем 100 000 000 000 000 — сто триллионов клеток. А такой гигант, как слон, состоит из 6,5 квадриллиона клеток. Эти цифры весьма убедительно демонстрируют, какое фантастическое количество совершеннейших «оболочек» требуется для построения живого организма. Однако че-

ловеку пока еще не удалось достигнуть такой высокой организации «труда» и управления процессами, какую демонстрирует клетка — эта мельчайшая живая частица.

Многие современные достижения в создании оболочечных систем, приводящие, казалось бы, к принципиально новым решениям, на самом деле уже давно существуют в природе. Так, например, широко разветвленная сеть нефтяных и газовых трубопроводов, насчитывающая сравнительно непродолжительную историю существования, оказывается, имеет прототип, давно успешно и надежно функционирующий в самом человеке. Еще Рене Декарт (1596—1650) говорил: «Нет ничего более плодотворного, чем попытка познать самого себя». Показательно, что Декарт к функционированию человеческого организма подходил с «оболочечных» позиций. Он писал: «...вены — это трубки, которые проводят кровь всех частей тела к сердцу, где она служит для питания его теплоты. Желудок и кишки являются другими, больших размеров трубками, усеянными множеством мелких отверстий, по которым пищевой сок втекает в вены, несущие его прямо в сердце. Артерии тоже являются трубками, по которым согретая и разреженная в сердце кровь проходит во все остальные части тела, принося им теплоту и материал питания».

Нет смысла обсуждать уровень существовавших в те времена представлений об устройстве и функционировании человеческого организма. Приведенная цитата любопытна в том смысле, что уже на первых этапах познания тайн человеческого организма ученые восхищались совершенством, а также отлаженностью и четкостью работы организма в целом и каждой его составной части.

Чтобы понять особенности функционирования биологических систем жизнеобеспечения и оценить их величайшее конструктивное совершенство как самонастраивающихся объектов, необходимо совершить небольшой дополнительный экскурс в механику материалов и познакомиться с одной весьма важной характеристикой. Рассматривая поведение элементов конструкций, нагруженных растягивающими или сжимающими силами, мы не остановились на весьма любопытном обстоятельстве: увеличение длины стержня сопровождается уменьшением его поперечных размеров. В этом легко убедиться, растягивая обыкновенный резиновый жгут. При сжатии

уменьшение длины сопровождается увеличением размеров сечения.

Оба явления объясняются способностью материала упруго деформироваться и восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки. Это свойство упругих тел было обнаружено французским ученым Пуассоном (1781—1840). Он не только указал на свойство твердых тел деформироваться как в продольном, так и в поперечном направлении, но и установил, что отношение поперечной деформации к продольному удлинению для каждого материала в пределах упругих деформаций является постоянной величиной. Это отношение стали называть коэффициентом Пуассона.

Но окружное напряжение в цилиндрической оболочке вдвое больше осевого напряжения, следовательно, деформации, согласно приведенной формулировке закона Гука, должны подчиняться той же пропорции: окружная деформация должна быть вдвое больше осевой. В таком случае простейшие расчеты убеждают, что даже небольшому увеличению или уменьшению диаметра будет соответствовать значительное осевое удлинение или укорочение. Но тогда можно предположить, что и в человеческом организме длина сосудов под нагрузкой сильно увеличится, а это будет мешать его нормальному функционированию. С помощью коэффициента Пуассона можно объяснить, почему этого не происходит.

Если в продольном направлении оболочки действуют напряжения σ_1 , то удлинение в этом направлении ϵ_1 , согласно закону Гука, будет происходить в соответствии с формулой $\epsilon_1 = \sigma_1 / E$. Но одновременно оболочка испытывает деформации ϵ_2 в поперечном направлении. Тогда коэффициент Пуассона ν есть величина $\nu = \epsilon_2 / \epsilon_1$.

Следовательно, если элемент цилиндрической оболочки нагружается в двух направлениях, то деформации будут определяться как суммарный результат действия обоих напряжений. При одновременном действии напряжений σ_1 и σ_2 деформации в направлении действия σ_1 будут

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \nu \sigma_2}{E}.$$

В этом выражении учтено (знак «минус» перед вторым членом), что напряжения σ_2 вызывают уменьшение деформаций в направлении σ_1 .

Вспомнив, чему равны для цилиндрической оболочки напряжения σ_1 и σ_2 , находим

$$\varepsilon_1 = \frac{qR}{2hE} (1 - 2\nu).$$

Для большинства материалов, используемых в технике, коэффициент Пуассона соответствует 0,3—0,35. Для биологических конструкций значение коэффициента Пуассона несколько выше — 0,5. Если подставить это значение в полученное выражение для ε_1 , то легко видеть, что продольные деформации будут незначительными.

Очень совершенна и рациональна «сосудистая система» растений, снабжающая их водой. По стволам деревьев живительная влага должна быть поднята на десятки метров и донесена до каждого листа. О масштабности производимой растениями работы легко убедиться на собственном опыте.

Представьте, что в доме по каким-то причинам не работает водопровод, а вам для хозяйственных нужд требуется не менее 20 ведер воды, которую придется поднять на 5-й этаж. Двадцать раз поднявшись с полным ведром воды, вы доставите домой всего лишь 200 литров воды на высоту около 15 метров. Самочувствие после подобной непривычной нагрузки обсуждать не стоит. А ведь примерно такое количество работы производит береза в погожий день.

Теперь о некоторых рекордах.

Самое высокое дерево в США — калифорнийская секвойя — имеет высоту порядка 119 метров, австралийский эвкалипт достигает 110 метров, а по некоторым данным, даже 170 метров. В последнем случае самые нижние ветки находятся на уровне 100 метров над поверхностью земли.

А вот еще любопытные факты, свидетельствующие о том, что в зависимости от условий обитания «система водоснабжения» претерпевает существенные изменения, приспособляясь к окружающим условиям и особенностям самого растения. Так, минимальных размеров ствол достигает к 14 часам пополудни, когда происходит максимальное испарение. Ночью же, когда потребность во влаге минимальна, диаметр ствола наибольший.

С разной скоростью происходит и движение воды вверх по стволу. У хвойных деревьев скорость «доставки» влаги составляет 1—2 метра в час. Низкорослые расте-

ния «сумели создать» водопроводящие «сосуды» больших размеров и не преминули с успехом воспользоваться этим. Вода по стволу таких растений движется намного быстрее, достигая, например, у ржи 40—50 метров в час.

Еще не менее показательные данные. Летом через листья буковой рощи площадью 100×100 метров (примерно 400 деревьев) и высотой 25—30 метров в сутки испаряется около 200 тонн воды, что соответствует емкости крупной автоцистерны. Как же работает эта уникальная «система водоснабжения»? (Известно, что за счет создания предельно возможного разрежения — вакуума — можно поднять воду не более чем на 10 метров. Ни один из существующих вакуумных насосов не в состоянии поднять воду выше.)

«Трубопроводящая» система растений состоит из множества микроскопических размеров (диаметр не превышает нескольких тысячных долей миллиметра) трубочек — капилляров. Из-за непрерывного испарения с поверхности листьев происходит интенсивный отток воды. Для поддержания жизнедеятельности подсос влаги должен быть постоянным и непрерывным. Энергию для осуществления этого процесса дает Солнце, а совершенная конструкция строения растений делает его автоматическим. Не «изобрети» природа уникальные мельчайшие трубочки — капилляры, высота растений едва ли могла достигнуть 10-метровой высоты.

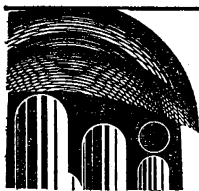
В некоторых случаях аналогия между инженерными сооружениями и естественными формами живой природы достигает удивительного, почти неправдоподобного соответствия. Так что, казалось бы, общего между железобетонной дымовой трубой и одним из видов пухоноса из семейства осоковых? Однако попытаемся провести некоторую аналогию. Как стебель растения, так и заводская труба — пустотелые конструкции. В первом случае — воздухоносная полость, во втором — дымоотвод. А назначение их одно — обеспечение циркуляции воздуха. Одинаковы и действующие нагрузки: собственный вес и сила, создаваемая воздушным потоком. Самая интересная аналогия обнаруживается при рассмотрении поперечного среза стебля и поперечного сечения заводской трубы. Кроме центрального отверстия, в стенке трубы и стебле имеются дополнительные, меньшие по размерам продольные каналы. Наблюдается сходство и в принципах конструирования материала. Основная мас-

са трубы — бетон, армированный в продольном направлении стальными стержнями. Мягкие ткани растения также усилены идущими в вертикальном направлении парными пучками волокон, выполняющими механическую роль. И стальные стержни, и волокна расположены ближе к внешнему контуру сечения. Роль кожицы растения в трубе выполняет спиральная обмотка.

Как видим, стебель растения сконструирован по всем законам науки о прочности. В круглой пустотелой форме учтено действие любого направления ветра и, следовательно, сопротивляемость по отношению к любому нагружению, а также соблюден принцип наиболее рационального и экономичного распределения материала по сечению: подкрепляющие силовые элементы размещены там, где они будут использованы наиболее эффективно.

Однако, отдавая дань инженерной прозорливости, следует все же отметить, что по своей приспособляемости к окружающей среде пустотелые стебли значительно превосходят заводские трубы. В верхней части стебля у основания колоска, где диаметр меньше, стебель имеет не трубчатую, а сплошную структуру. Внизу, где возникают максимальные изгибающие моменты, стебель также сплошной. И это очень важно. Если бы стебель был весь пустотелый, то при «полегании» от сильных ветров в его стенке возникали бы поперечные надломы или продольные трещины, приводящие к необратимым последствиям. Сплошная структура стебля позволяет ему после прекращения действия ветра вернуться в вертикальное положение.

В поведении стебля при сильном изгибе отчетливо проявляется способность живой природы умело обходить пиковые ситуации, связанные с внезапно возрастающими кратковременными нагрузками, без дополнительного расходования материала.



КУПОЛ НАД ГОРОДОМ

С тех пор как человек понял, что пещера не самый комфортабельный вид жилища, и принялся осваивать бескрайние просторы, открывшиеся его взору, он осознал и необходимость ограждения своего бытия от окружающей среды. Крыша над головой стала обязательным условием внепещерного и цивилизованного существования. Постигая искусство возведения различного рода сооружений, наши предки столкнулись с одной из важнейших проблем строительства — созданием перекрытий. Так было в далеком прошлом, так обстоит дело и в наши дни.

Высотные прямоугольные коробки современных зданий поражают своей масштабностью. Многократное превышение одного размера (высоты) над двумя другими — шириной и длиной производит большое впечатление. Небоскребы наглядно убеждают, как выросли возможности строительной индустрии. Становятся понятными трудности, которые пришлось преодолеть при возведении этих сооружений, выдерживающих не только разнообразные капризы природы: ветер, дождь и снег, но и собственную массу. Не менее удивительны конструкции зданий с большой площадью перекрытий. Ажурная вязь невесомых куполов вряд ли кого оставит равнодушным. Кажется, они пришли в современный город из восточных легенд. Архитектурная законченность форм и художественная выразительность всего ансамбля заставляют забыть об уникальности этих сооружений, о тех трудностях, которые пришлось преодолеть при их создании.

Большепролетные конструкции — одна из основных особенностей современных промышленных и гражданских объектов, разнообразных залов и зрительных помещений, павильонов, ангаров, аэропортов, рынков и т. п.

Давайте вспомним, что представляет собой конструкция обычного здания с плоским перекрытием. Это балоч-

но-стоечная система, в которой горизонтальные балки-перекрытия опираются на вертикальные стойки-опоры. И так с верхнего этажа до нижнего.

Стремление перекрывать большие территории без промежуточных опор приводит к увеличению пролетов балок между вертикальными стойками. Возможности широко распространенных плоских ограждений, основанных на несущем каркасе балочно-стоечной конструкции, ограничены. Использование таких традиционных решений не только приводит к неоправданным затратам материалов, но и создает тупиковые ситуации при проектировании. В этом случае большая часть материала расходуется непосредственно на конструкции, которые передают внешнюю нагрузку — ветер, снег и собственный вес сооружения на вертикальные стойки. Так как плоские перекрытия работают на изгиб, то их масса очень быстро растет с увеличением ограждаемого пролета и становится основной нагрузкой, определяющей в конечном итоге несущую способность сооружения. Причем с увеличением расстояния между опорами масса балок растет такими опережающими темпами, что практически они начинают разрушаться даже от действия собственной массы.

Сооружение современных большепролетных перекрытий стало возможным благодаря тонкостенным пространственным конструкциям, отличающимся от балочно-стоечных тем, что в них нет разделения на ограждающие и несущие элементы. Усилия распределяются по всему сечению, и, следовательно, материал конструкции рационально используется в работе. Совершенство купольных форм перекрытий родилось не сразу — это длительный многовековой процесс, в основе которого лежали искусство, наблюдательность, научный поиск, порой неудачи, а также успехи в материаловедении и технологии производства материалов.

Большепролетные купольные покрытия известны человечеству с древнейших времен. Они использовались строителями Месопотамии, Сирии, Ирана, Японии. Выдающийся памятник строительного искусства Пантеон в Вечном городе, возведенный в честь богов Олимпа, был перекрыт сферическим куполом с пролетом 43,3 метра. Однако с точки зрения современных представлений это покрытие толстостенное и неэкономичное. Отношение толщины древних сводов к длине перекрываемого пролета составляет примерно $1/12$ — $1/15$. В римском Пантеоне

оно было доведено до $\frac{1}{30}$ в верхней части купола, где толщина равнялась 1,5 метра, и до $\frac{1}{17}$ в области опор, что соответствует толщине свода 2,5 метра.

Положение в строительстве перекрытий не менялось на протяжении нескольких веков. Рекорд, принадлежавший полусферическому кессонированному куполу Пантеона в Риме, сооруженному в первой четверти II века, продержался 18 столетий! Даже в прошлом веке толщина кирпичных сводов равнялась $\frac{1}{15}$ — $\frac{1}{30}$ пролета, а кирпичных куполов — $\frac{1}{25}$ — $\frac{1}{50}$. Это объясняется тем, что до недавнего времени основным строительным материалом для возведения перекрытий был камень и кирпич.

Для того чтобы дать объяснение строительно-архитектурным концепциям прошлого, рассмотрим напряженное состояние, характерное для подобного рода сооружений. Если купол находится в наиболее выгодных условиях, т. е. в безмоментном напряженном состоянии, то под действием собственной массы и осесимметричных внешних нагрузок в меридиональном направлении естественно возникают только сжимающие напряжения, а кольцевые могут меняться от сжимающих в верхней части купола до растягивающих в нижней. Пересечение оболочки плоскостью, параллельной основанию, на уровне которого происходит изменение знака напряжений, принято называть швом перехода. Как показывают расчеты, шов перехода при нагружении сферического купола собственным весом соответствует центральному углу $51^{\circ} 49'$, а при равномерно распределенной на горизонтальную проекцию нагрузке, создаваемой массой, например, снега, — 45° .

Основной недостаток кирпичной кладки связан с плохой сопротивляемостью ее на разрыв. Под действием растягивающих напряжений при очень низком их уровне кладка разрушается по швам. Таким образом, в процессе возведения покрытий из камня и кирпича форма их должна быть такой, чтобы во всех сечениях конструкции возникали только сжимающие напряжения. По этой причине на протяжении многих веков архитекторы и строители старались избегать появления растяжения в элементах конструкций, так как при их возникновении постройки, а это были в основном церковные соборы, рушились.

Подлинно революционную роль в строительстве большепролетных куполов сыграл железобетон. С появлением материала, одинаково хорошо сопротивляющегося

сжатию и растяжению, т. е. сохранившего преимущества традиционных материалов и освободившегося от их недостатков, открылись огромные перспективы для возведения большепролетных перекрытий на принципиально новой основе. Каменный купол собора святого Петра в Риме и оболочка железобетонного покрытия производственного здания в Йене (ГДР), построенного в 30-х годах нашего столетия, имеют одинаковый диаметр — около 40 метров. Но как велика разница между ними! Если толщина каменного купола собора 3 метра, то толщина оболочки здания в Йене — всего 6 сантиметров.

Рекорд римского Пантеона был побит в 1912 году, когда во Вроцлаве построили зал «Столетия» с куполом из монолитного железобетона и радиально-кольцевой сеткой ребер. Купол во Вроцлаве примечателен не только как этапное сооружение, пролет которого превысил пролет Пантеона в Риме, но и как разительный скачок в развитии инженерного искусства, ознаменовавший создание большепролетной пространственной структуры на основе нового строительного материала — железобетона. В то же время необходимо отметить, что это здание демонстрирует единство качественно новой конструкции покрытия, являющегося шагом вперед от массивных куполов к тонкостенным конструкциям, и общего ансамбля сооружения, как бы оставшегося в плену традиций прошлого.

Новое направление, начало которому было положено во Вроцлаве, стало бурно развиваться. Значительным событием, свидетельствующим о больших достижениях строительной науки и практики, явилось сооружение в 1934 году гладкого тонкостенного купола театра в Новосибирске. Для своего времени этот купол, пролет которого равнялся 55,5 метра при толщине 8 сантиметров, был самой большой оболочкой вращения. Гладкий купол Новосибирского театра и по сей день уникален по отношению толщины оболочки к ее пролету. У современных перекрытий, выполненных из железобетона, отношение толщины оболочки к длине пролета достигает, как правило, именно этой величины — $1/650$ — $1/750$.

Известный американский специалист в области проектирования куполов Б. Фуллер сказал: «Если вы хотите установить степень совершенства конструкции здания, взвесьте его». За показатель совершенства купола, при прочих равных условиях, можно принять массу квадрат-

ного метра покрытия. С этих позиций купол святого Петра в Риме очень тяжел: его масса 10 000 тонн, а 1 квадратный метр имеет массу 8000 килограммов. Недалеко ушел от него и купол зала «Столетия» (соответственно 6340 т и 1900 кг/м²). Как видим, рекордсмен начала века был еще достаточно несовершенен. Многогранный купол пролетом 76 метров для рынка в Лейпциге, построенный в 1930 году, выгодно отличался по этому показателю. При массе 2160 тонн масса квадратного метра составила 476 килограммов. А вот покрытие аудитории Варнера в Андерсоне (США), выполненное в виде монолитного гладкого железобетонного купола с шаровой поверхностью пролетом 82 метра, весит всего 1359 тонн, и, следовательно, на квадратный метр приходится 256 килограммов.

При конструировании покрытия важно выбрать не только его форму, но и конструкцию опор, которые обеспечат наименьший уровень напряжений в любом сечении. Эта проблема аналогична задаче с распорным шпангоутом в конструкциях баков.

Меридиональные усилия, действующие вдоль края купола (рис. 13), дают две составляющие — вертикальную и горизонтальную. Первая воспринимается основанием, на котором покоится купол. Для восприятия горизонтальной составляющей, всегда имеющей характер распора, используется кольцо. Под действием распорных усилий кольцо растягивается. Кольцевые усилия, как уже отмечалось, могут менять знак по меридиану — от сжимающих к растягивающим по мере приближения к краю. Наличие шва перехода оказывается благоприятным в том отношении, что знак кольцевых напряжений будет совпадать со знаком напряжений в опорном кольце. При этом необходимо так подобрать размеры кольца, чтобы удлинение последнего равнялось удлинению края оболочки, за счет чего и будут реализованы условия безмоментного напряженного состояния.

С этой точки зрения очень невыгодна поверхность, не имеющая зоны перехода, когда кольцевые напряжения всюду сжимающие. К таким поверхностям относятся полые сферические купола. Несмотря на трудности возведения, они широко использовались в странах мусульманской религии и в Византии для строительства церквей и соборов. Не менее популярны они и в наши дни. И вызвано это как эстетическими, так и функциональными

соображениями. С архитектурной точки зрения здание, покрытое высоким куполом, не всегда удачно вписывается в современный городской пейзаж из-за своей излишней монументальности, в то время как пологий свод не является столь давящим. Кроме того при отношении высоты здания к диаметру как 1:2 (покрытие полусферой) внутренний объем помещения слишком велик, и это

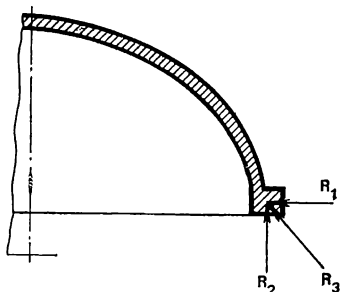


Рис. 13. Реакции, возникающие на краю оболочки

вызывает неоправданные расходы на его отопление, проведение опалубочных работ, на материалы, создает затруднения при бетонировании центральной части свода. Выгоднее пологие сферы. Но в таком куполе, как уже было сказано, возникают только сжимающие кольцевые усилия. При этом деформации распорного кольца и края купола не совпадают и кольцо препятствует перемещению края купола, что в конечном итоге приводит к появлению опасного моментного состояния.

В византийской архитектуре наклонная реакция, возникающая на опорах пологого сферического купола, воспринималась специальными устройствами — контрфорсами, которые передавали горизонтальные реакции на грунт. В 1957 году архитектор П. Л. Нерви спроектировал в Риме стадион для олимпийских игр, в котором купол был армирован внутри диагональными пересекающимися ребрами и опирался на контрфорсы. Однако такое конструктивное решение является очень дорогостоящим.

Безмоментная работа оболочки может быть гарантирована соответствующим устройством опор, допускающих свободу радиальных и угловых перемещений. Усилия же, передаваемые куполом на опорный контур, в этом случае должны совпадать по направлению с касательной к меридиану оболочки. Так, для обеспечения свободы перемещений края оболочки купола Новосибирского театра под действием температуры и усадки бетона между опорным кольцом купола и круговой балкой, на которую он опирается, проложены два слоя оцинкованной стали, густо смазанной тавотом.

Существенный недостаток куполов, связанный с усилением сверх меры края оболочки, а также стен и колонн, на которые опирается этот край, не остался незамеченным пытливым умом изобретателя. Как это часто случается, «увидеть» новое решение мешала укоренившаяся косность, которая в виде груза сложившихся представлений и традиций направляла мысль по заранее известному руслу — оболочка должна кончатся колоннами и стенами.

Но почему не использовать принцип, по которому издревле сооружали свои жилища кочевники: вообще ликвидировать боковые стены, колонны и связующие конструкции и передать все эти функции оболочке, которая будет одновременно и крышей, и стенами? Затяжки же, воспринимающие горизонтальные усилия, убираются под землю на уровень подошвы фундамента, где они никому не мешают. Такой представляется изобретателям конструкция современного «шатра» — оболочки.

Наряду с железобетонными покрытиями в практике современного строительства широкое распространение получили металлические конструкции. Преимущество строительных металлических конструкций связано в первую очередь со сборностью, легкостью и простотой монтажа. Их можно быстро демонтировать, перевозить в другое место и вновь осуществлять монтаж. Важное достоинство металлоконструкций заключается также в возможности с высокой точностью реализовать проектную форму покрытия, что в свою очередь повышает надежность расчета, сложность которого зависит от формы оболочки. Металлоконструкции можно изготавливать способом поточного производства, а большое разнообразие вариантов конструктивных решений дает возможность формирования архитектурных композиций, способствующих созданию оригинальных и полноценных зданий гражданского и промышленного назначения.

В зависимости от конструктивного решения металлические покрытия принято разделять на ребристые, сетчатые, тонкостенные и трансформирующиеся купола.

Широкие перспективы открывает использование в строительстве куполов из легких сплавов, в первую очередь алюминиевых. Их отличает высокая удельная прочность, коррозионная стойкость. Алюминиевые сплавы незаменимы при возведении покрытий в условиях Севера. В связи с отдаленностью мест строительства легкость

конструкций играет важную роль, так как значительно сокращаются затраты на воздушные перевозки и монтаж, для которого не требуется сложное оборудование. И что особенно важно, в условиях низких температур алюминиевые сплавы в отличие от стали и других материалов не теряют своих прочностных свойств.

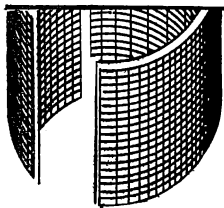
При совмещении в перекрытии несущих и ограждающих функций листы алюминия должны иметь определенную жесткость, позволяющую конструкции воспринимать без разрушения сжимающие усилия. Увеличение момента инерции листа достигается за счет его профилирования, подкрепления ребрами, приклейки к листу жесткого утеплителя, т. е. создания трехслойных, а также предварительно напряженных (растянутых) конструкций.

О высокой эффективности использования алюминия для перекрытия больших площадей свидетельствует купол в городе Лонгвью (штат Техас, США). Покрытие в форме сферической оболочки выполнено из штампованного алюминия. Пролет купола в основании 91,5 метра, стрела подъема 25,9 метра, толщина листов 3,18 миллиметра. Следовательно, характерное отношение толщины к пролету всего $1/28000$. Расход металла — 22,6 килограмма на квадратный метр. Вся оболочка собрана из 1200 алюминиевых панелей, которым для обеспечения жесткости придана гофрированная форма. Следует отметить, что монокупольные композиции в форме шарового сегмента на замкнутом основании, как правило, выглядят несколько тяжеловесно. Эта особенность является лучшим подтверждением ошибочности иногда бытующего мнения, будто удачное конструктивное решение всегда совершенно и в эстетическом отношении.

Одна из основных функций перекрытия — защита от атмосферных воздействий. Но ведь не каждый день падает снег или льет дождь. Кроме того, если позволяют климатические условия, намного приятнее сидеть в зрительном зале под открытым небом, вдыхая аромат свежего воздуха и зелени. Или, представьте, крупный цех машиностроительного завода, в котором рабочие в ясный погожий день трудятся под открытым небом. Организация производства под небесным сводом не потребует усиленной принудительной вентиляции, значительно уменьшит уровень шума. Все это, несомненно, приведет к оздоровлению производственного процесса. Так возникла идея мобильных трансформирующихся покрытий. В конструк-

циях трансформируемых покрытий находит выражение стремление преодолеть противоречие между традиционными статичными конструкциями и динамикой нашей жизни. Трансформируемые конструкции позволяют решать проблему улучшения микроклимата помещений.

В недалеком будущем для организации промышленного производства или зрелищных мероприятий будут сооружаться гигантские по современным представлениям перекрытия в несколько сот метров. Они станут такими же обычными, как зонт в ненастный день. Архитекторы всего мира давно вынашивают мысль о создании прозрачных куполов над городами. Строительство городов под «крышей», как считают, позволит не только создать более благоприятный микроклимат, но и, что не менее важно, сократит расходы энергии на обогрев домов.



ПРОЧНОСТЬ ПОВЫШАЕТСЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Все материалы по-разному сопротивляются растяжению-сжатию. Наибольший эффект, естественно, достигается тогда, когда в конструкции учтены эти особенности. На этом принципе основана идея предварительно напряженных конструкций.

От бочки к железобетону

Как техническое решение предварительно напряженные системы были известны до нашей эры. Так, еще древние греки строили боевые галеры. Они сооружались из коротких досок. Такие корпуса не отличались большой жесткостью, легко прогибались и в результате давали течь. Греческие строители нашли остроумное решение проблемы. С помощью специального приспособления в той мере, в какой это было нужно для придания необходимой прочности, корпус стягивался канатом, проходившим снаружи вокруг всего корабля (чуть ниже палубы). Подобный предварительно напряженный корпус при столкновении (таран в те времена был основой тактики морского боя) с судном противника выдерживал большие нагрузки и создавал необходимые условия безопасности в открытом море. В этой связи интересна одна деталь. Чтобы вывести из строя корабль противника, следовало просто разрубить напряженный канат.

Случаю было удобно распорядиться так, что у истоков рождения широко популярных сейчас предварительно напряженных конструкций, сыгравших революционную роль в строительстве, оказались не аналитический ум ученого или изобретательная фантазия инженера, а практическая деятельность обыкновенного садовника, движимого чисто коммерческими целями.

Француз Монье разводил пальмы. Однажды представилась возможность произвести операцию — отправить партию южных экзотических растений на острова туманного Альбиона. Денег на кадки для пальм не хватало. Предприимчивый садовник слепил их из оказавшегося под рукой цемента. Однако прок от этого получился небольшой. Тяжелые посудины были к тому же еще и не прочными: корни развивающихся пальм легко разрывали цементные стенки. В садовнике пробудились способности экспериментатора. Он упрочнил кадки железными обручами. Но, к сожалению, это не помогло. Увлеченный поиском, Монье прикрепил к обручам продольные железные прутья. Получившаяся железная клетка выполнила свою роль — кадки выдержали испытания. Но их эстетический вид был далек от совершенства. И тогда садовник сделал последний решительный шаг на пути к рождению нового материала: он смазал кадку все тем же бетоном. Изобретение состоялось. Кадки получились гладкими и очень прочными. Осталось довести идею до совершенства. Чтобы облегчить конструкцию да и цемента расходовать поменьше, Монье стал утончать стенки, пока не достиг необходимого рационального соотношения. Так с 1867 года начала отсчет история железобетона — бетона, армированного стальными прутьями.

Основная идея предварительного напряжения сводится к созданию начальных деформаций, которые с учетом последующего перераспределения усилий при нагружении или расширяют возможный для данного вида нагружения диапазон использования диаграммы деформирования (растяжение — сжатие) материала конструкции или за счет наложения дополнительных ограничений на перемещения приводят к увеличению жесткости конструкции. Использование предварительного напряжения позволяет повышать эффективность конструкции за счет увеличения несущей способности и жесткости или за счет экономии материала, идущего на ее изготовление при сохранении исходной прочности.

Экономическая эффективность предварительно напряженных железобетонных конструкций достигается благодаря применению высокопрочной арматуры, которая существенно выгоднее горячекатаной, так как ее удельная стоимость (определяется отношением цены к пределу прочности материала) снижается с увеличением прочности арматуры. Однако применение высокопроч-

ной арматуры без предварительного напряжения нецелесообразно. Простая замена материала с более высоким пределом прочности не влияет на качество бетона. Образование трещин, лишаящих конструкцию необходимых эксплуатационных качеств, будет по-прежнему ее ахиллесовой пятой. За счет предварительного натяжения, создающего в бетоне значительные сжимающие напряжения в тех зонах, которые в процессе эксплуатации будут испытывать растяжение, удастся получить принципиально более высокий уровень качества материала.

Предварительное напряжение создает лента

Одним из направлений создания предварительного напряжения является навивка с натягом гибкого элемента на боковую поверхность. Наибольшее распространение этот способ получил при создании листовых металлических конструкций в виде цилиндрических оболочек. На сегодня это, пожалуй, единственный путь создания равнопрочной конструкции цилиндрической оболочки (если не рассматривать чисто стеклопластиковые), которая работает на внутреннее избыточное давление. Суть равнопрочной конструкции заключается в следующем: так как в кольцевом направлении цилиндрическая емкость под действием давления имеет напряжение в 2 раза большее, чем в осевом, то этот «природный» недостаток можно устранить соответствующими конструктивными мерами, например, усилив оболочку в кольцевом направлении. Желаемого результата можно добиться, наматывая на боковую поверхность ленту или нить, которая будет упрочнять оболочку только в направлении кольца. Используя такой способ, можно, если не учитывать дополнительную массу намотки, уменьшить массу исходной оболочки в 2 раза.

Механизм работы конструкции с натягом определяется жесткостными свойствами металла и навивки. Внутренняя оболочка обычно изготавливается из достаточно пластичных листовых материалов — стальных, алюминиевых и титановых сплавов. В качестве обмотки используется высокопрочная стальная проволока или лента, а также стеклонить. Поскольку модули упругости основного металла и навивки различны, то за счет натяга, создающего в оболочке предварительное сжатие, а в самой навивке растяжение, добиваются такого положения,

Француз Монье разводил пальмы. Однажды представилась возможность произвести операцию — отправить партию южных экзотических растений на острова туманного Альбиона. Денег на кадки для пальм не хватало. Предприимчивый садовник слепил их из оказавшегося под рукой цемента. Однако прок от этого получился небольшой. Тяжелые посудины были к тому же еще и не прочными: корни развивающихся пальм легко разрывали цементные стенки. В садовнике пробудились способности экспериментатора. Он упрочнил кадки железными обручами. Но, к сожалению, это не помогло. Увлеченный поиском, Монье прикрепил к обручам продольные железные прутья. Получившаяся железная клетка выполнила свою роль — кадки выдержали испытания. Но их эстетический вид был далек от совершенства. И тогда садовник сделал последний решительный шаг на пути к рождению нового материала: он смазал кадку все тем же бетоном. Изобретение состоялось. Кадки получились гладкими и очень прочными. Осталось довести идею до совершенства. Чтобы облегчить конструкцию да и цемента расходовать поменьше, Монье стал утончать стенки, пока не достиг необходимого рационального соотношения. Так с 1867 года начала отсчет история железобетона — бетона, армированного стальными прутьями.

Основная идея предварительного напряжения сводится к созданию начальных деформаций, которые с учетом последующего перераспределения усилий при нагружении или расширяют возможный для данного вида нагружения диапазон использования диаграммы деформирования (растяжение — сжатие) материала конструкции или за счет наложения дополнительных ограничений на перемещения приводят к увеличению жесткости конструкции. Использование предварительного напряжения позволяет повышать эффективность конструкции за счет увеличения несущей способности и жесткости или за счет экономии материала, идущего на ее изготовление при сохранении исходной прочности.

Экономическая эффективность предварительно напряженных железобетонных конструкций достигается благодаря применению высокопрочной арматуры, которая существенно выгоднее горячекатаной, так как ее удельная стоимость (определяется отношением цены к пределу прочности материала) снижается с увеличением прочности арматуры. Однако применение высокопроч-

с помощью специальных механизмов обматывается высокопрочной проволокой.

Заметим, что влияние навивки как технологической операции на несущую способность оболочек неоднозначно. С одной стороны, предварительное напряжение создает сжимающие усилия, как бы эквивалентные действию внешнего избыточного давления. Эти усилия могут привести к потере устойчивости даже в процессе изготовления, чем, собственно, и определяется возможный допустимый их уровень. Поэтому усилие предварительного натяжения нельзя увеличивать беспредельно. Но, с другой стороны, именно предварительное «заневоливание» очень эффективно для оболочек, нагруженных наружным избыточным давлением. Рассматриваемый вариант предварительного напряжения интересен тем, что в процессе работы на устойчивость при нагружении радиальным внешним давлением в оболочке возникают напряжения того же знака, что и предварительные напряжения. Казалось бы, вызывая деформации одного знака с деформациями от нагрузки, натяг должен ухудшать работу конструкции.

Однако жесткие натянутые нити на боковой поверхности, играющие роль упругого основания для оболочки, ограничивают ее деформации от центра кривизны. Следовательно, на перемещения оболочки наружу накладываются жесткие ограничения. Эффект стеснения деформаций за счет обжатия настолько сильный, что приводит к значительному повышению несущей способности.

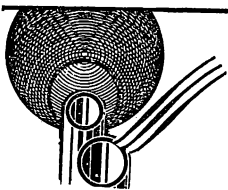
Что такое комбинированное нагружение

Рассмотренные «классические» решения, в которых предварительное напряжение создается с помощью специальных технологических операций и конструктивных мероприятий, имеют один существенный недостаток: предварительное усилие, заложенное в конструкцию один раз, продолжает присутствовать на всех этапах ее дальнейшей эксплуатации. Более совершенными являются конструкции, в которых предварительное напряжение возникает только в тот момент, когда появляется необходимость. Это конструкции, подвергающиеся одновременно действию нескольких различных по характеру усилий, т. е. комбинированному нагружению.

Если нагрузки действуют независимо друг от друга, то из их различных комбинаций могут возникнуть как неблагоприятные сочетания, когда одна как бы усугубляет влияние другой, так и благоприятные, когда действие их может частично взаимно компенсироваться. Последний случай как раз и следует использовать для повышения несущей способности конструкций. Здесь важен порядок приложения нагрузок. С позиций предварительного напряжения то усилие, которое улучшает работу оболочки, является начальным напряжением по отношению к наиболее неблагоприятному расчетному и, следовательно, должно опережать его по времени приложения.

В качестве примера рассмотрим работу топливного бака ракеты. В полете основная нагрузка на оболочку связана с осевыми сжимающими силами и внутренним избыточным давлением. Осевые силы определяются траекторией полета и произведением массы вышерасположенных узлов и перегрузки в данный момент полета. Внутреннее избыточное давление в баке необходимо для поддержания определенного напора в системе питания. Но давление одновременно создает и осевые растягивающие силы в оболочке бака, а следовательно, может разгружать оболочку бака от сжимающих усилий. Для того чтобы эффект разгрузки от внутреннего давления был наиболее существенным, его следует выбирать не только исходя из условий обеспечения давления в магистралях, но и учитывая облегчение условий работы оболочки. Нарастание же давления должно всего лишь опережать прирост осевых сил.

И последнее. Строгая и величественная серебристая игла Останкинской телебашни — это оболочка с сильно развитым основанием. Одна из технических находок, обеспечивающих ей особую прочность, — 150 стальных канатов, протянутых внутри ствола под бетонной оболочкой. Они-то и делают сооружение предварительно напряженной конструкцией и обеспечивают необходимую гибкость и прочность.



ВОЗДУХ СОЗДАЕТ КОНСТРУКЦИЮ

«Дом из воздуха», «Воздух вместо железобетона», «Строит воздух» — подобные полные таинственности заголовки, будоража воображение, лет 10—20 назад часто встречались на страницах печати. И сегодня поток статей, в которых неизменно присутствует «воздух», очень велик. Это уже не сенсации, и тем не менее каждое новое оболочечное сооружение, основанное на использовании воздуха, поражает воображение. Воздух, являющийся необходимым условием существования всего живого на Земле, становится материалом, из которого «изготавливаются» несущие элементы конструкций зданий, подъемников, плотин, опалубки. Таковы основные профессии воздуха только в строительстве. Всего несколько десятилетий назад дух захватило бы от такой смелой фантазии. Сейчас же это реальный факт, воплощенный в конкретных сооружениях. Мечта и действительность в век научно-технической революции всегда рядом.

А какие огромные перспективы! Запасы воздуха бесконечны. Для его добычи не надо углубляться в недра земли, строить шахты или возводить города в открытом море. Природа решила и проблемы его хранения. Что может быть разумнее в век экономии!

Оболочечные сооружения, о которых идет речь, получили название пневматических и относятся к особому классу конструкций — мягких оболочек.

Мягкими принято называть оболочки, изготовленные из материалов, имеющих практически нулевую жесткость на изгиб и сдвиг. Такие материалы не способны сопротивляться сжатию. Зато они имеют высокие прочные показатели при работе на растяжение. И это лучшая аттестация их высокой удельной прочности, позволяющей блестяще решать проблему материалоемкости. Мягкая оболочка не имеет собственной формы в исходном состоянии. В рабочее положение она приводится за счет предварительного натяжения.

Один из совершеннейших образцов пневматических конструкций — биологическая клетка. Этот принцип широко используется в конструкциях живых организмов. Природа как бы постоянно подсказывает человеку, по какому пути должно развиваться конструирование рукотворных оболочек. И человек не преминул взять их на вооружение. С незапамятных времен он использует пузыри и шкуры животных в качестве емкостей-бурдюков и средств передвижения на воде — лодок и плотов. Во время военных походов римские legionеры отдыхали на надувных матрацах, изготовленных из кожи. За тысячелетия до нашей эры наши древние предки остроумно использовали преимущество мягких оболочек для доставки грузов в своих челночных рейсах. В верховьях Тигра и Евфрата из шкур животных изготавливались надувные лодки и плоты, на которых грузы спускались вниз по течению. Вместе с товарами обычно перевозились также мулы и ослы. После прибытия к месту назначения воздух из шкур выпускали, шкуры сворачивали и возвращали обратно на спинах вьючных животных.

К надувным конструкциям проявлял интерес великий ученый и инженер эпохи Возрождения Леонардо да Винчи (1452—1519). Об этом свидетельствует итальянский историк искусств Дж. Вазари: «Изготовив особенную восковую массу, он делал из нее... тончайших наполненных воздухом животных, которых заставлял надуваться и взлетать вверх...»

Пневматические конструкции помогли человеку впервые преодолеть силу земного притяжения и открыть эру практического воздухоплавания. Первое в истории техники инженерное пневматическое сооружение запатентовано в конце прошлого века. Об этом событии было сообщено в «Журнале новейших изобретений и открытий» за 1896 год: «Выдающийся интерес представляют аэробалки, изобретенные Сумовским».

Мягкие оболочки должны быть прочными и воздухо-непроницаемыми. Этим требованиям удовлетворяют комбинированные материалы, сочетающие прочность тканей и воздухо-непроницаемость пленок. Так родились пленочные материалы, армированные текстилем, или ткани, на которые наложены слои полимеров в виде пленок и пасты. Эти два родственные материала называются соответственно армированными пленками и импрегнированными (покрытыми полимерами) тканями. Кроме того, имеется

ряд дополнительных требований: стойкость к воздействию среды (солнечной радиации, влажности, морозов и т. д.), механическим повреждениям, негорючесть и др. Ну и, конечно, важными показателями являются стойкость и возможность промышленного производства.

Изготовление пневмоконструкций в широких масштабах не могло опередить развитие химии полимеров, ибо реализация пневматических конструкций стала возможна лишь после того, как синтетические волокна и смолы стали изготавливать в массовых количествах.

Как же работают мягкие оболочки? Основной принцип формообразования связан со стремлением конструкции под действием внутреннего давления принять такую форму, которая соответствует наибольшему объему. В материале оболочки возникают растягивающие напряжения, образующие вместе с воздухом самоуравновешенную систему, в которой формообразующая оболочка растянута, а находящийся внутри воздух сжат. Величина избыточного давления определяется с учетом того, чтобы в оболочке или мембране при любых внешних воздействиях и нагрузках возникали только растягивающие напряжения. Таким образом, внутреннее давление порождает необходимую жесткость.

По конструктивному решению пневматические сооружения классифицируются на воздухоопорные и воздухонесомые.

Воздухоопорные оболочки незамкнуты. Реактивные усилия воздуха воспринимаются основанием, на котором закреплена оболочка. В этом случае мягкая оболочка, образно говоря, опирается на ограничиваемый ею объем воздуха, «лежит» на нем, как на упругом основании и работает по принципу паруса. В отличие от обычных сооружений, которые давят на основание своей тяжестью, она как бы стремится оторваться от земли. Ведь подъемная сила, создаваемая наполняющим оболочку воздухом, в десятки раз превышает ее собственную массу. Воздух, заполняющий оболочку, сжат лишь в той небольшой степени, которая необходима для поддержания формы при действии внешних нагрузок.

Воздухонесомыми конструкциями называются мягкие замкнутые оболочки, работоспособность которых обеспечивается за счет давления (от десятых долей до целых атмосфер) в их полости. Воздухонесомые конструкции в

виде стоек, балок, арок, панелей способны сопротивляться сжатию и изгибу.

Разновидностью надувных конструкций являются комбинированные пневматические сооружения, в состав которых входят оболочки, наделенные свойствами как воздухоопорных, так и воздуходнесомых.

С точки зрения расхода материала пневматические конструкции вне конкуренции. Отношение толщины ограждающей оболочки к перекрываемому пролету доходит до $1/100\,000$. В таких конструкциях воздух держит все сооружение. Если «взвесить», по Р. Фуллеру, промышленное здание и ввести условное понятие объемной массы сооружения, то на 1 кубический метр здания из железобетона приходится около 250 килограммов массы, а для сооружения воздухоопорного типа этот показатель (кг/м^3) будет соответственно равен всего лишь 0,6—1,0.

Подсчитано, что на перевозку строительных материалов ежегодно расходуется более 1 миллиарда рублей. Принципиальный ответ на вопрос об эффективности перевозки мягких оболочек может дать сам читатель. Для этого не требуется специальных знаний и проведения расчетов. Вспомним об обычном пожарном шланге. Насколько компактен он в собранном виде и как неизмеримо выросли бы трудности при транспортировке шланга в рабочем состоянии! Транспортабельность воздухоопорных зданий можно характеризовать отношением строительного объема здания к его объему в транспортном состоянии. Если для промышленного здания из железобетона этот показатель равен 3, то для здания воздухоопорного типа он будет 1500—2500.

Наиболее важное направление использования пневматических конструкций на данном этапе связано со строительством цехов, складских помещений, гаражей и ангаров, а также сооружений из большепролетных оболочек для хранения различного рода оборудования и продукции.

Важные преимущества пневматических оболочек связаны и с их мобильностью. Воздухоопорные здания доставляются на место установки полностью укомплектованными. Монтажные работы независимо от высоты сооружаемого объекта производятся на уровне пола и занимают несколько часов. Все это способствует многократности использования пневматических оболочек, что особенно важно для «кочующих» сооружений, например

складов для хранения сельскохозяйственной продукции на полях и железнодорожных станциях, спортивных и зрелищных сооружений летнего типа, перекрываемых на зиму оболочками, бытовых и складских помещений строительных организаций и т. д.

Пневмоопорные оболочки могут существовать только при условии избыточного давления под оболочкой. И несмотря на то что величина этого давления весьма незначительна и измеряется сотыми и тысячными долями атмосферы (что никак не отражается на самочувствии находящихся в помещении людей), именно в этом заключается один из главных недостатков пневматических оболочек. Для нормального функционирования сооружений, кроме воздухонагревательных установок, необходимы средства шлюзования, обеспечивающие герметичность. Пневматические оболочки легко «ранимы», боятся удара острым предметом, прикосновения языка пламени. Ну и, наконец, долговечность их обычно не превышает 10 лет и определяется сроком службы материала оболочки.

Внешняя простота пневматических конструкций создает иллюзорность легкости и доступности их проектирования и изготовления. Именно такой упрощенный подход и явился причиной отдельных неудач, когда без достаточного опыта и знаний брались за проектирование сооружений. Формы пневматических оболочек довольно разнообразны, но не произвольны. Если, например, в соответствии с замыслами архитектора вылепить макет оболочки, а затем по этому макету осуществить раскрой из полосок материала, то получившийся «баллон» при наполнении его воздухом не обязательно повторит формы оригинала. «Характер» оболочки проявится в том, что, стремясь ограничить наибольший объем, она местами сморщится, а местами «выпучится» наружу. При заданных внешних нагрузках и определенном избыточном давлении мягкая оболочка принимает единственно возможную равновесную форму. Поскольку в процессе эксплуатации внешние нагрузки не постоянны, разнообразны по проявлениям, искусство проектировщика заключается в поиске таких форм оболочек, при которых все нежелательные изменения формы — в виде складок, морщин и перекосов при всех вариантах нагружения будут проявляться в наименьшей степени.

Интересное направление в конструировании пневматических сооружений — трансформирующиеся оболочки,

способные изменять форму за счет регулирования уровня избыточного давления воздуха и особенностей закрепления. Так родилась новая разновидность пневмоконструкций — воздухоуправляемые оболочки. На ЭКСПО-70 (Осака, Япония) было воздвигнуто самое высокое пневматическое сооружение в мире — «Башня Мицун». Башня постоянно подвергалась опасности атаки тайфунов. В зависимости от метеобстановки она могла быстро менять высоту от 32 до 50 метров. На этой же выставке было установлено пять теневых зонтиков диаметром 30, 20 и 15 метров, которые раскрывались лишь при появлении солнца.

Нельзя не отметить особенности архитектуры воздухопорных зданий. Как и всякий принципиально новый вид сооружений, основанный на нестандартных конструктивных решениях, пневматические оболочки имеют характерный «почерк». Последний определяется физическими и геометрическими особенностями мягких построений, наполненных воздухом. Для тектоники мягких оболочек как художественного выражения конструкции свойственны такие отличительные черты: крупные, выпуклые и большей частью единые объемы, отсутствие плоских поверхностей и угловатых форм, а также членение общих объемов на более мелкие в результате перегибов поверхностей канатами, тросовыми сетями, диафрагмами или точечными оттяжками.

Создавая «воздушные» конструкции, важно знать пределы, в которых можно реализовать творческий полет мысли проектанта. В конструкциях подобного вида природа сама выступает в роли строгого контролера и автоматически исправляет ошибки архитектора или конструктора. Но после этих «корректировок» сооружение проигрывает как во внешнем виде, так и в силовом отношении.

Стремление оградить сельское хозяйство от капризов природы привело к широкому развитию оросительных систем. И вот оказалось, что конструкции из мягких оболочек позволяют успешно решать проблему водоснабжения засушливых районов с помощью высокоэффективных мягких плотин и затворов-автоматов. В качестве заполнителя в этих сооружениях естественнее и проще использовать воду. Именно так и поступают на практике. Встречаются и комбинированные конструкции

типа вода — воздух, а также воздушные. Так вода «оспаривает» строительные позиции у воздуха.

Принципиальные схемы работы плотин, как и у рассмотренных выше надувных сооружений, строятся по замкнутой и открытой схемам.

Применительно к плотинам со всей очевидностью проявляется необычайная мобильность оболочек. В самом деле, при создании прудов и водоемов на основе мягких оболочек легко исправить ошибки, неточности и просчеты геологических изысканий. Представьте, вдруг обнаруживается, что ложе воздвигнутого водохранилища обладает повышенной фильтрацией и вода вследствие этого не может долго сохраняться. Следовательно, целесообразность капиталовложений неоправданна. В этом случае при применении плотин из мягких оболочек не представляет большого труда ликвидировать пруд в одном месте и воздвигнуть его в другом.

Пневматические оболочки начинают конкурировать с традиционными металлическими емкостями для хранения газообразных продуктов. Заслуживает внимания пример уже реализованного такого решения. При гниении бытовых канализационных отходов в больших количествах выделяется газ метан. Ученые пришли к выводу, что его можно использовать для отопления домов, в газовых плитах и даже вместо бензина в автомобильных двигателях. Емкость, в которой хранится газ, изготавливается из двух слоев высокопрочной ткани, усиленной полихлорвиниловой пленкой. В пространство между слоями закачивается воздух. Внутренняя стенка, прогибаясь под действием воздуха, вытесняет метан в трубу, по которой он поступает для непосредственного использования.

Пневматические оболочки имеют необозримые перспективы. Даже с позиции сегодняшнего дня очень трудно предсказать все возможные области их использования. Существуют проекты, судя по которым можно ожидать самые непредвиденные решения в будущем. Расскажем о двух совершенно неожиданных поворотах изобретательской мысли.

Идея одного из них возникла на основе изучения «конструкционных» особенностей хобота слона. Слон выполняет, как известно, очень тяжелую работу — валит лес, перетаскивает очищенные от веток стволы и аккуратно складывает бревна в штабеля. На современной индустриальной стройке аналогичная работа производится

мощными подъемными кранами и различными транспортными устройствами. Сравнительная оценка возможностей хобота слона и подъемного крана во многих отношениях явно не в пользу создания инженерной мысли. Сросшаяся верхняя губа и хобот — это мобильный гибкий силовой и исполнительный механизм.

Подъемный кран, выполняющий более простые операции, состоит из ферменных металлических конструкций: башен и стрел, редукторов, поворотных кругов и многого другого. Кроме того, требуется прокладка рельсовых путей. И еще один существенный недостаток. Вся кинематика — карданные валы, муфты, редукторы, цепные и рычажные передачи — это не только большой расход металла, прошедшего сложную механическую обработку, это движущиеся детали, поглощающие немало энергии.

К решению сложнейшей технической проблемы — созданию гибких силовых исполнительных органов — механических хоботов, пожалуй, ближе всего на сегодня подошли изобретатели. Представим себе длинный гибкий гофрированный шланг, секции которого отделены друг от друга жесткими перегородками. В свою очередь, каждая секция — самостоятельная конструкция, имеющая внутри перегородки и различного рода связи в виде канатов, лент, мембран, ограничивающих перемещения в различных направлениях. Каждая камера имеет систему впускных и выпускных клапанов. Жесткость мягкой конструкции, как обычно в пневматических оболочках, обеспечивается за счет внутреннего давления. Все камеры закольцовываются в единую систему и автоматически управляются с пульта по заданной программе. За счет различных комбинаций давлений в камерах секциям можно придавать необходимую форму. Совокупность форм всех секций обеспечит требуемое рабочее положение механизму в целом. Изменяя давление в камерах, «заставляют» исполнительный орган перемещаться, выполнять действия по переносу и подъему грузов.

Развивая дальше идею «механического хобота», можно представить такую конструкцию: исполнительный орган (очевидно, не один) располагается на специальной платформе, тоже мягкой системе. К платформе, в свою очередь, прикрепляются механические хоботы, выполняющие роль опорной системы. В корпусе такого монстра разместится «мозговой центр» — электронно-вычисли-

тельная машина, гидравлические или пневматические системы, силовые установки, пульт управления датчиками и т. д. С помощью ног-щупалец робот сможет передвигаться по любой местности. Таким представляется один из вариантов силовых манипуляторов — гигантских механических «рук», приближающихся по своему совершенству к природным аналогам.

Если это направление получит развитие, появится новый класс конструкций, гибких и мобильных, в которых металлоемкость сведется к минимуму. Их применение повлечет за собой высвобождение рабочей силы. Все операции сможет осуществлять один человек. Исчезнет необходимость в грузчиках, стропальщиках и т. д. Судно, например, причаливая к порту в штормовую погоду, выбросит щупальца, которые, обвившись вокруг береговых приспособлений, надежно удержат его у пирса. Грузоподъемному устройству на пневматических опорах будут не страшны любые непроходимые для обычного транспорта преграды. Поскольку конструкция основана на использовании пневматики, можно сконструировать различного рода «присоски», которые будут осуществлять подъем различных грузов.

На выставке в Японии демонстрировались «баботы», огромные надувные куклы, способные производить различные движения руками с помощью проходящих внутри тросов. Руки приводятся в движение датчиками, получающими команду от встроенной электронной аппаратуры. Необычное название «бабот» образовано от слов «баллон» и «робот».

Мягкие оболочки найдут применение и в решении экологической проблемы. Тенденция покорения заоблачных далей характерна не только для зданий и телетрансляционных башен. Растут в высоту и заводские трубы: чем дальше от земли окажутся отходы производства (в виде газов), тем меньше последствия их вредного влияния на окружающую местность. Среди современных дымовых труб есть поистине уникальные сооружения, высота которых достигает нескольких сотен метров. При этом стенки труб должны обладать высокой газоплотностью, а все сооружение обеспечивать надежную долговременную работу в условиях действия высоких температур и агрессивных веществ отводящихся газов.

Можно и дальше наращивать высоту, принципиальных технологических затруднений не возникнет, но в этом случае во весь рост встает проблема экономической целесообразности: стоимость строительства труб пропорциональна кубу их высоты. Это обстоятельство подчас сдерживает рост мощностей промышленных объектов. А нельзя ли вообще обойтись без них при решении проблемы отвода газов и снижения концентрации вредных веществ, в частности, организовать непрерывную их транспортировку в верхние слои атмосферы в контейнерах?

Оказывается, можно, и причем самым неожиданным способом. Такой проект уже запатентован. В качестве контейнеров для доставки вредных газов на безопасные высоты можно использовать аэростатические оболочки, выполненные, например, в виде сильфона. Кстати, для осуществления этой операции не потребуется дополнительной энергии. Горячие газы, наполнив оболочку, увлекут ее в такие дали, которые не доступны никакой самой гигантской трубе. На большой высоте вредные окислы под действием ультрафиолетовых лучей нейтрализуются, а количество опустившихся на землю не превысит предельно допустимой концентрации. Но как быть, если необходимо транспортировать в верхние слои атмосферы и тяжелые газы? Об этом тоже позаботились: в каждой аэростатической оболочке предусматривается герметичный отсек, заполняемый гелием, он-то и создаст необходимую подъемную силу. Так у дымовых труб появились конкуренты.

Не отстают в своих проектах и архитекторы. Они уже видят как осознанную реальность города с любым запрограммированным микроклиматом, создаваемым под надувными куполами, перекрывающими большие территории. И, не останавливаясь на этом, обсуждают поистине фантастические проекты. Сейчас ученые предостерегают наиболее горячие изобретательские головы от увлечения «прожектками» превращения Арктики и Сахары с помощью пневмооболочек в райские уголки земного шара. Но, как знать, может, эти «прожекты» со временем станут реальной действительностью?

Еще не получили в полной мере развитие пневматические напряженные конструкции на земле, а пытливому уму инженера уже тесно в ее пределах. В фолиантах патентных библиотек много разнообразных и остроумных проектов освоения космического пространства с помощью

надувных конструкций. Как поступить, если придется осваивать иные миры и планеты, лишенные кислорода? Оказывается, принципиальное решение проблемы уже есть. Под пневматическими куполами на транскосмических станциях можно организовать производство кислорода, используя в качестве промышленных установок для этих целей водорослевые плантации. А как решить проблему защиты человека от космического излучения? Ведь с помощью ракетно-космических систем только легчайшие конструкции можно транспортировать в космос на любые, в том числе и световые, расстояния и производить там их монтаж. С этих позиций пневматические конструкции имеют два важнейших преимущества: минимальный транспортный объем и малый вес. В частности, представляются весьма перспективными пневматические конструкции в виде сферы как вариант наиболее рационально напряженной конструкции с несколькими слоями, обеспечивающими ее надежность в случае пробоя метеоритами.

Пневматические конструкции — очевидно, наиболее легкие из всех, созданных интуицией и разумом человека за всю историю развития инженерной мысли. Высказывается мнение, что с момента изобретения автомобильной шины пневматические конструкции — самые выдающиеся конструктивные решения с использованием воздуха и что со временем они займут такое же место в строительстве будущего, как пневмобаллоны в колесном транспорте. Ведь как знать, смог бы автомобиль, не будучи «вооруженным» пневматическими колесами, вырваться из плена ям и ухабов неасфальтированных дорог начала XX века?

Ренессанс паруса

Кто не мастерил в детстве парусные кораблики? С помощью первых в своей жизни моделей мы начинаем познавать тайны конструирования, стараясь сделать их более красивыми, ходкими и устойчивыми. Идея использования дешевой неиссякаемой энергии ветра возникла у человека с незапамятных времен, и связана она в первую очередь со старым, как наш мир, парусом, являющимся наравне с колесом одним из самых выдающихся изобретений человека.

Вначале моря и океаны для первобытного человека были враждебной стихией. Населявшие побережье пле-

мена занимались лишь сбором даров моря, выброшенных из морской пучины на берег. Шли века, и океанский горизонт повернулся к человеку «лицом». Если первым инженерным сооружением для преодоления преграды на суше был ствол дерева, перекинутый через ров, то и свое первое путешествие по воде человек совершил также на бревне. Сначала, очевидно, робко попробовал плыть на одном бревне, потом, воодушевленный успехом, связал несколько бревен вместе. А соорудив плот, прикрепил к нему на вертикальной стойке шкуру зверя и стал передвигаться по водной глади, уяснив в результате эксперимента, что это весьма полезное сооружение и его с успехом можно поставить себе на службу. И с тех пор, научившись использовать силу ветра, «попавшего в ловушку», люди, движимые самыми разными заботами, стали бороздить моря и океаны, открывать новые страны и острова.

Среди всех источников энергии, освоенных нашими предками, ветер и мускульная сила — самые древние. Конечно, сейчас невозможно заглянуть в тайны веков, чтобы удовлетворить любознательность, связанную с возникновением первых технических средств передвижения. Но совершенно ясно, что парус был первым немускульным средством передвижения, во все времена господствовал на воде и с успехом использовался также и на суше при путешествии по заснеженным просторам. Кстати, небезынтересно знать, что рождением первого колесного средства передвижения, не использующего энергию живого существа, человечество также обязано парусу. Первым «автомобилем» можно считать ветряную повозку голландского ученого С. Стевина (1600 г.). Насколько быстро передвигался парусник на колесах, доподлинно не известно, но, как свидетельствует один исторический источник, при хорошем ветре скорость его якобы достигала 34 километров в час.

По своим механическим особенностям парус есть не что иное, как мягкая оболочка. Становясь преградой на пути ветра, полотнище «наполняется» давлением набегающего потока, надувается и приобретает необходимую жесткость. Так энергия воздушной массы преобразуется в энергию движения судна. Если направление ветра перпендикулярно плоскости паруса, то ветер оказывает непосредственное давление. При косом обтекании паруса возникает аэродинамическая сила.

Парус можно рассматривать как воздухоопорную мягкую надувную конструкцию со всеми вытекающими отсюда последствиями — эффективную, легкую, прочную, безмоментную и... всецело находящуюся в зависимости от прихоти бога Эола. Вспомним, какую унылую беспомощную картину представляет парус в штилевую погоду. Именно по этой причине он не смог устоять и сдал свои позиции под натиском новых видов механической энергии.

Наступил век машин. Исчезли парусники, и с ними, как будто навсегда, были преданы забвению фоки, гроты, бизань-мачты, замысловатая вязь бесчисленных тросов и строгая геометрия рей. Казалось, в век космической эры парусу уготована скромная роль служения науке и спорту. На судах самых разнообразных конструкций, изготовленных из экзотических материалов, наиболее близких к моделируемым условиям древнейших времен, отважные путешественники наших дней, проявляя необыкновенное мужество, успешно доказывают, что европейцы побывали в Америке и совершили кругосветное путешествие задолго до того, как научились увековечивать память о своих открытиях в вахтенных журналах и государственных реестрах. Так, в мае 1984 года пять аргентинских смельчаков стартовали на плоту из гигантских эквадорских деревьев. Связав девять бревен (диаметр 65 сантиметров, длина 13 метров) самодельными канатами и установив парус, без руля (как предполагают участники экспедиции, 3 с половиной тысячи лет назад мореплаватели им не пользовались), они на этом сооружении, названном «Атлантис», преодолели за 50 дней 3543 морские мили и без приключений причалили к берегам Венесуэлы.

Представим себя на отдыхе у моря, по которому стремительно скользят горделивые красавицы яхты. И вдруг на горизонте, не подверженный действию больших морских волн, показался современный, огромных размеров белоснежный лайнер, корпус которого сделан из прочных сталей, соединенных самым прогрессивным методом — сваркой, пришедшей на смену традиционной клепке. А над ним, как и в добрую старину, лес мачт с белоснежными парусами, упруго натянутыми свежим бризом. Это не кадры из фильма о делах минувших дней, а наша реальность.

Сегодня ученые усиленно заняты поиском путей получения дешевой энергии. Во многих странах работают си-

стемы-накопители и преобразователи солнечной энергии, делаются попытки использовать тепло огненных «внутренностей» Земли. Не забыли и об энергии ветра. Вспомнили, как успешно поставило ее себе на службу человечество в древние времена. Вновь становятся популярными ветряные двигатели. Дошла очередь и до паруса. На первый взгляд кажется странным, что в век, когда в качестве движущей силы все чаще используются атомные энергетические установки, вдруг опять появился парус. Но это только на первый взгляд.

Всесторонние оценки привели инженеров к убеждению об экономической эффективности «комбинированных» кораблей, которые в безветренную погоду приводятся в движение современными двигателями, а когда дует ветер, с помощью паруса превращают впустую растрчиваемую энергию стихии в движущую силу. Кстати, в этом решении нет ничего принципиально нового. Ведь еще отважные викинги задолго до Колумба преодолевали коварные воды Атлантики в своих путешествиях из Европы в Америку и обратно, используя не только энергию ветра, но и мускульную энергию. Их каравеллы были оснащены и парусами, и веслами. Не пренебрегали парусами и древние римляне, остроносые быстроходные корабли которых приводились в движение мускульной силой гребцов, закованных в кандалы. Попутный ветер помогал судну увеличивать быстроходность.

В связи с этим уместно также отметить, что при переходе на движущую силу паровой машины морские суда в свое время долго еще сохраняли паруса. Паруса и тогда использовались при попутных ветрах, а также при частых неисправностях котлов и машин. Но двигатели скоро достигли определенного уровня совершенства, который гарантировал их надежную работу во время плавания, и от услуг паруса отказались полностью.

Страницы газет и журналов все чаще пестрят заголовками: «Плюс парус», «Парусами управляет компьютер», «Океания» поднимает паруса» и, наконец, пожалуй, самый меткий и точный — «Симбиоз эпох». Возврат к эпохе клиперов, безраздельно господствовавших в былые века на просторах морей и океанов, объясняется не ностальгией по экзотике, а чисто прагматическими целями. Нехватка энергии заставляет использовать все возможные ресурсы. И ставятся паруса не на маленьких судах, а на судах водоизмещением в десятки тысяч тонн.

Современный парус работает на принципиально новой основе в сравнении с его устаревшими собратьями. Подъемом и спуском парусов на корабле команда не занимается. Усовершенствованный парус наших дней управляется компьютером. Процессы подъема и спуска полностью механизированы, учет направления и скорости ветра производится автоматически, а управление дистанционное. Вычислительная машина осуществляет контроль за оптимальным режимом работы.

Но если лайнер под парусом — неожиданный поворот к прошлому в развитии техники века космических скоростей, то самолет «под парусом» — это совершенно новое слово в практике воздухоплавания. И тем не менее опыт использования паруса есть и в этой области. Австралийский летчик на летательном аппарате из стекловолокна, названном «сейлплан» — самолет под парусом, за 8 дней пересек этот континент. «Сейлплан» снабжен мотором, который работает при старте и подъеме до высоты 600 метров, а дальше самолет, подхваченный мощным течением воздушных потоков, летит «под парусом».

Парус очень быстро восстанавливает свои былые утраченные позиции. Но с его помощью можно покорять не только водные просторы «планеты людей». Поиски новых способов передвижения по вселенским дорогам привели к мысли о космических кораблях, паруса которых наполнялись бы солнечной энергией непрерывно испускаемых короной Солнца электрически заряженных частиц — корпускул. Это предложение было впервые высказано К. Э. Циолковским еще в 1920 году.

Идея космических парусников основана на доказанной в 1900 году русским физиком П. Н. Лебедевым способности света оказывать давление на тела. Известно, например, что на Земле в полдень излучение Солнца давит на 1 квадратный метр идеально отражающей поверхности с силой $4,6 \cdot 10^{-5}$ ньютона. Это равносильно тому, что на квадратный километр идеально полированного алюминия приходится сила 0,5 килограмма. Как будто не такая уж большая сила. Ведь недаром же, для того чтобы обнаружить эффект давления света, П. Н. Лебедеву пришлось использовать сверхчувствительные методы измерений. Но у солнечного излучения есть две важные особенности: во-первых, по мере приближения к Солнцу оно увеличивается, а во-вторых, и это самое главное, действует постоянно. Поскольку же условия космического

путешествия принципиально отличаются от движения под парусом по поверхности воды, то полученное аппаратом, пусть малое, но постоянное в течение длительного времени, ускорение приводит в конце концов к тому, что скорость передвижения достигает сотен тысяч километров в час.

Солнечные паруса конструктивно мыслятся двух видов. Один вариант представляет собой максимально облегченный каркас квадратной формы, выполненный из легких сплавов, на который натянут сверхлегкий пластик, покрытый лакированным алюминием. Обеспечение маневрирования корабля достигается изменением ориентации паруса специальной системой контроля и стабилизации. Идея другой конструкции основывается на использовании центробежной силы, возникающей при вращении аппарата. Такой аппарат напоминает гигантский цветок подсолнуха: вокруг центральной части аппарата развернуты подобно лопастям вертолета лепестки — ленты из алюминизированного пластика микронной толщины. Необходимая жесткость лепестков паруса достигается за счет центробежной силы, возникающей в результате вращения аппарата. Чем быстрее вращение, тем сильнее натянуты полотна паруса. Каждый лепесток вращается также вокруг своей продольной оси наподобие лопасти винта с изменяющимся углом атаки. Положение корабля и разворот его относительно Солнца контролируются с Земли. За счет этого сила тяги, создаваемая солнечным ветром, может использоваться не только для ускорения, но и для замедления движения космолета.

Естественно, что запуск аппарата в рабочем виде с Земли невозможен. На помощь приходят мягкие оболочки: лепестки в сложенном виде занимают сравнительно мало места. После перехода с околоземной орбиты на гелиоцентрическую аппарат раскручивается до скоростей, при которых происходит раскрытие парусов. Процесс формирования паруса прост и надежен. Одно из важнейших преимуществ космического паруса как двигателя заключается в том, что он использует постоянно действующую неиссякаемую и даровую энергию Солнца, всегда гарантирующую натяжение парусов. Если этим проектам будет сопутствовать успех, то в недалеком будущем по бескрайним, наполненным солнечной энергией просторам Вселенной поплывут межпланетные корабли.

В описанных «солнечных двигателях» используется

давление света, создаваемое частицами видимого спектра области электромагнитных колебаний. Но ведь в солнечном излучении содержится очень широкий спектр электромагнитных колебаний. А нельзя ли и их поставить себе на службу? Оказалось, можно, если проявить выдумку. В частности, сейчас обсуждается проблема создания парусов, надутых «ветром» электромагнитных колебаний сверхвысоких частот (СВЧ).

Идея нового направления возникла при исследовании закономерностей рассеивания и дифракции электромагнитных волн. Ученым удалось обнаружить условия, при которых частота падающих электромагнитных волн совпадает с собственной частотой колебаний поверхности преграды. В частности, было найдено, какой волной нужно облучать незамкнутый экран (например, небольшой цилиндр со щелью), чтобы взаимодействие произошло резонансным образом, т. е. были найдены условия, при которых частота волны совпадает с собственной частотой колебаний цилиндра. В результате возникает резонансный режим, который и приводит к тому, что сила давления на поверхность тела возрастает в сотни и тысячи раз.

Конструктивные воплощения идеи могут быть самыми разнообразными, но физическая сущность остается одна — резонансное взаимодействие поверхности с электромагнитным излучением. При этом очень важно, что существуют резонансы, для которых длина волны соизмерима с размерами препятствия. А отсюда следует закономерный вывод: паруса могут быть миниатюрных размеров. Конкурентоспособность такого космического двигателя не вызывает сомнений. Вместо огромных в сотни метров полотнищ «солнечного паруса» всего лишь считанные сантиметры «паруса СВЧ». И еще очень важное свойство нового паруса: он с равным успехом может двигаться «по ветру» и «против ветра». Этот эффект даже получил свое имя: «отрицательное электродинамическое сопротивление».

Но где же взять источник сверхвысоких частот? Оказывается, для этого надо сначала преобразовать в нужные частоты солнечную энергию, а затем с помощью специальной системы передавать ее на корабль. Причем эту операцию выгоднее производить не на земле, а в космосе. На такую солнечную космическую электростанцию не будет влиять смена дня и ночи. Небольшие размеры паруса, мощные тяговые усилия дают основа-

ние предполагать, что космические корабли, приводимые в движение СВЧ-парусами, поплывут в межпланетные путешествия уже в ближайшие десятилетия.

Такова история возвышения, забвения и воскрешения, подобно мифической птице Феникс, одного из выдающихся изобретений человека — мягкой оболочки — паруса. Его еще рано сдавать в архив, Одиссея паруса — вечного странника — на этом не кончается. В какие формы предстоит трансформироваться идее ловушки для энергии ветра и какую услугу окажет она человеку, будучи реализованной в конкретных конструкциях, покажет будущее.

От неуправляемого купола к «планирующей оболочке»

Своим рождением парус обязан ветру. В этом его основное достоинство и основной недостаток. Создать напор набегающего воздуха и наполнить им свою конструкцию парус не в состоянии, каким бы современным устройством он ни отличался.

Поэтому океанские дороги древних прокладывались в направлении преобладающих передвижений воздушных масс и находились в строгой зависимости от сезонных условий. Так, например, существует точка зрения, что переселение с островов Малайского архипелага носило многоэтапный характер: сначала был колонизирован остров Шри-Ланка, далее Мальдивские и Сейшельские острова и только потом — Мадагаскар. Почти весь путь мигрантов находился в пределах действия муссонов. В сезоны зимних муссонов суда авангарда плыли на запад в разведку. Высадившись на какой-то остров, индонезийские разведчики дожидались летнего муссона и возвращались обратно к своему флоту. С наступлением следующей зимы, «наполнив» паруса зимним муссоном, весь флот перебазировался на открытый разведчиками остров.

Но для того чтобы «надуть» парус потоком воздуха, необязательно перемещение воздушной массы. Необходимо, чтобы возникала относительная скорость передвижения между парусом и воздухом. Именно эта идея — суметь «создать» в безветренной атмосфере воздушный поток и использовать его, но уже не как движущую, а как тормозящую силу, заложена в основу конструкции, родственной парусу, — парашюта. История его началась в последней четверти XVIII века. В 1784 году, т.е. через

год после запуска первых аэростатов братьев Монгольфье и профессора Шарля, французский физик С. Ленорман сконструировал аппарат, состоящий из матерчатого купола и строп, свой аппарат он назвал парашютом (французское слово *parachute* произошло от сочетания греческого *para* — «против» и французского *chute* — «падение»).

Сегодня парашют — юбиляр. И встречает он его в расцвете известности. И несмотря на то что услугами парашюта непосредственно пользуются в основном только «избранные» — спортсмены и десантники, наверное, по популярности он стоит на одном из первых мест. Чтобы убедиться в этом, спросите любого, знает ли он о существовании парашюта. И, вне всякого сомнения, получите утвердительный ответ.

За двухсотлетнюю историю парашют стал совершенным средством для безопасного спуска в сопротивляющейся среде, причем он с успехом используется и непосредственно на Земле, и далеко за пределами своей земной стихии — в космическом пространстве. Потому-то так многолики функции современного парашюта. Его становление нельзя оторвать от развития авиации и космонавтики, где парашют играет незаменимую роль для спасения людей, безопасного приземления грузов, беспилотных и пилотируемых космических кораблей, обеспечения заданной скорости снижения научной аппаратуры при исследовании атмосферы планет Солнечной системы. В последнее время парашют с успехом используется для уменьшения скорости самолета при посадке, торможения гоночных автомобилей, а также для торможения морских кораблей перед причаливанием, т. е. во всех тех случаях, когда надо погасить энергию, приобретенную движущимся телом, и снизить до безопасного уровня его скорость при перемещении в сопротивляющейся среде.

Парашютистом номер один в истории человечества стал французский воздухоплаватель Жак Гарнер, который в 1797 году впервые прыгнул с воздушного шара. А пионером среди представительниц прекрасного пола, отважившейся ощутить неповторимость свободного падения, была его племянница Елизавета Гарнер.

Конструкция парашюта представляется достаточно простой: купол и стропы. Но эта простота довольно обманчивая. С точки зрения решений, заложенных в его силовую схему, парашют — одна из совершенных безыз-

гибных оболочечных конструкций. И в этом легко убедиться. Однако вначале несколько общих данных о куполе как обязательном элементе любой парашютной системы.

Купола имеют различную форму: круглую, прямоугольную, сферическую, коническую и др. Площадь его может меняться в самых широких пределах и составлять от одной сотой до нескольких тысяч квадратных метров. Для безопасного спуска человека достаточна площадь купола в 40—50 квадратных метров. Форма купола влияет в основном только на аэродинамические качества: коэффициент сопротивления, время наполнения, устойчивость при снижении. Эксплуатационные же характеристики парашюта — прочность, надежность, долговечность зависят не только от формы, но и от площади купола, особенностей раскроя ткани и ее прочностных качеств.

Устройство купола рассмотрим на примере нейтрального, т. е. неуправляемого, парашюта. Купол его изготавливают из парашютного полотна, обладающего высокой прочностью, высокой воздухонепроницаемостью, термостойкостью и, что обязательно для подобного вида конструкций, малой удельной прочностью. Купол неуправляемого парашюта имеет круглую форму и разделен на четыре сектора, каждый из которых сострочен швами «в замок» из пяти трапециевидных полотнищ прямого кроя, образуемых радиусами, ограничивающими секторы, и хордами окружности.

С внешней стороны на купол нашит усилительный каркас из капроновой ленты. По контуру наружного края купол подкреплен еще капроновой лентой. В каркасе в местах стыка с усилительной лентой предусмотрены петли, с помощью которых осуществляется крепление высокопрочных капроновых строп к куполу. В нижней части стропы привязываются к четырем свободным концам подвесной системы парашюта. Давление по поверхности купола распределяется неравномерно и зависит от угла между направлением скорости движения парашюта, т. е. набегающего потока воздуха, и перпендикуляром к поверхности купола. Чем меньше этот угол, тем больше давление. Отсюда следует, что центральная часть купола более напряжена. Для уменьшения неравномерности распределения усилий в центральной части купола вырезано полюсное отверстие. Чтобы усилить

край выреза и придать ему соответствующую форму, полюсное отверстие, как и наружный край, также подкреплено капроновой лентой. Таковы основы «скелета» силовой системы парашюта,

Как только купол раскроется и наполнится воздухом, он растянет и силовой каркас, работающий совместно с куполом. Под действием массы груза, находящегося под парашютом, выпрямятся и натянутся, уравнивая всю систему, также и стропы. При этом они стремятся стянуть к центру ленту, обрамляющую нижнюю кромку купола. Воздушный поток же, наоборот, наполняя чашу купола, растягивает нашитую на него ленту. В противоборстве растягивающих усилий, испытываемых лентой купола под действием воздушного потока, и сжимающих усилий, возникающих в той же ленте, но уже от действия строп, перевес оказывается на стороне первых. Это все в некотором смысле положительно сказывается на работе оболочки купола, поскольку стропы, вызывая усилия противоположного знака, несколько облегчают нагружение края купола. Так, из мягких тканей, компактно уложенных в ранец-контейнер, возникает достаточно жесткий каркас из капроновых лент и напряженный купол с вырезом, представляющие пространственную идеальную систему, в которой нет сжатых звеньев.

Таким образом, парашют — это аэродинамический спускаемый аппарат, все элементы которого подчинены одной цели — погашение скорости движущегося объекта и единой идее — реализация легкой высоконадежной конструкции, работающей только на растяжение. Это, несомненно, большое достижение конструкторской мысли. Современное направление в развитии парашютизма связано с идеей использования аэродинамических характеристик купола для организации управляемого полета.

Хорошо известно, что принципиальное решение нельзя получить в рамках старых представлений и подходов. История развития парашюта не опровергает эту очевидную истину. Именно с этих позиций мы и подойдем к рассмотрению получившего в последнее время интенсивное развитие нового класса управляемых парашютов, названных планирующими оболочками. Сейчас вы сами убедитесь в плодотворности идей, заложенных в их конструкцию.

Идея летающего крыла предельно проста, хотя додумались до нее сравнительно недавно. Его можно легко сконструировать в часы досуга и попытаться даже запустить, подобно летающему воздушному змею. Возьмем два прямоугольных полотнища и соединим их по одной из кромок. Перпендикулярно этой кромке вставим ряд перегородок, представляющих собой сильно вытянутые треугольники, и также соединим их по длинным сторонам с обоими полотнищами. В куполе эти перегородки по аналогии с крылом самолета называются нервюрами. Теперь к нижнему полотнищу прикрепим вдоль каждой перегородки на равном расстоянии ряд нитей. Итак, все готово к эксперименту. Соберите нити в два узла. В одном из них должны быть нити, прикрепленные к задней кромке, а в другом — все прочие. Осталось выпустить модель в поток ветра. Под действием набегающего потока полотнища раскроются и камеры между ними наполнятся воздухом, придав конструкции предусмотренную заранее форму. Модель будет парить в воздухе, а с помощью нитей, прикрепленных к задней кромке, искривляя профиль сечения по потоку, можно управлять положением ее в пространстве.

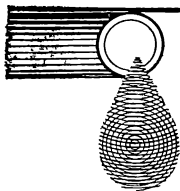
А теперь легко провести аналогию и назвать все элементы своими именами. Верхняя и нижняя поверхность — не что иное, как слегка искривленные оболочечные конструкции, поперечные перегородки, как уже указывалось, — нервюры, а в целом профиль сечения такого парашюта — типичный профиль крыла самолета. Поэтому-то новая конструкция управляемого парашюта, в основу которого заложены аэродинамические свойства профиля Жуковского, и получила авиационное название — «крыло». Крепление парашюта и управление им в полете осуществляются, как и обычно, с помощью строп. Маневры куполом производятся благодаря изменению угла атаки.

Среди пневматических конструкций парашют типа крыла занимает особое место. Он примечателен во многих отношениях и существенно отличается от всех известных ранее типов парашютов, имеющих преимущественно круглую форму. Растянутая давлением система из мягких тканей удачно сочетает в себе свойства воздухоопорных и воздуховесомых конструкций. Именно на этой комбинации и основано нестандартное решение: создавая форму, давление не только обеспечивает жесткость кон-

струкции, но и порождает новое свойство формы — аэродинамическое качество, возникающее за счет использования скорости набегающего потока воздуха.

Нельзя обойти молчанием и высокую гибкость формы этого парашюта как инструмента создания подъемной силы. В крыле самолета изменение угла атаки, обеспечивающее увеличение его качества — подъемной силы, осуществляется за счет введения новых конструктивных элементов: предкрылков и закрылков, которые приводятся в движение сложной механизацией. В «мягком» крыле можно очень просто менять аэродинамические качества профиля крыла и легко управлять им с помощью строп, т. е. получать новое свойство за счет внутренних возможностей конструкции. Нет необходимости подробно обсуждать особенности силовой схемы крыла парашюта. В нем, так же как и в любой доведенной до совершенства конструкции из мягких оболочек, нет элементов, работающих на сжатие.

Рассказ о парашюте-крыле будет неполным, если не отметить, что управление таким парашютом в планирующем спуске настолько эффективно, что оказались побиты все абсолютные рекорды при прыжках спортсменов на точность приземления. Выполняя прыжок с высоты 1000 метров, можно без особого труда носками или пяткой ступни поразить мишень величиной с трехкопеечную монету, лежащую на площадке приземления. Еще недавно парашютисты и мечтать не могли о таких достижениях. Ведь действительно стало возможным приземляться на острие иглки.



В ПОИСКАХ ИДЕАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Удовлетворение запросов развивающейся стремительными темпами техники требует добычи в невиданных до сих пор масштабах сырьевых и энергетических ресурсов. Человечество еще только начало задумываться над фактом ограниченности и исчерпаемости природных кладовых, когда с лица земли стали исчезать «железные» горы, иссякать нефтяные фонтаны и карьеры, а между тем необходимость добычи всех видов сырья увеличивается и увеличивается. Период безмятежного пребывания человека на правах владельца неисчерпаемых богатств земных ресурсов, к сожалению, подошел к концу. Все чаще приходится читать о мрачных перспективах на будущее. И хотя ни один из этих малоутешительных прогнозов еще не сбылся, а, наоборот, открываются все новые и новые горизонты, позволяющие предотвратить сырьевой голод, тем не менее экономия и бережливость стали альтернативным подходом к решению всех задач современности. Однако не только настоятельное требование бережливого отношения к природным ресурсам диктует необходимость снижения материалоемкости конструкций. Для многих инженерных конструкций условия минимальной массы в сочетании с высокой удельной прочностью являются определяющим требованием при проектировании. Все это заставляет по-новому взглянуть на проектирование и технологические процессы изготовления конструкций.

Человек выходит из дома

Кто из нас не наблюдал, как строители одновременно с возведением нового жилого дома заботливо прокладывают тротуары, а пешеходы игнорируют их и сами выбирают наиболее приемлемые направления сообщений, протаптывают дорожки по вскопанной земле газонов,

срезают углы, находят кратчайшие расстояния, но никак не желают пользоваться услугами асфальтированных магистралей, четко регламентирующих движение в соответствии с общей планировкой по прямоугольным контурам. На этом примере можно наглядно увидеть, как проявляется принцип наименьшего действия, когда из всех возможных вариантов реализуются только те действия, которые требуют минимальной затраты энергии. Этим принципом руководствуется и инженер, решая задачи, связанные с выбором наилучшей конструкции.

Рассмотрим рядовой вопрос, с которым встречаются инженеры, специализирующиеся в области расчета на прочность тонкостенных подкрепленных оболочек: необходимо спроектировать подкрепленную стрингерами цилиндрическую оболочку, нагруженную осевыми сжимающими силами. В задании указано количество продольных элементов, например десять, которые следует выбирать из сортамента, содержащего десять наименований профилей. Исходя из этих требований, одновременно и ограничений, формально необходимо рассмотреть 10^{10} вариантов оболочек, которые можно составить из заданного количества профилей, чтобы выбрать оболочку наименьшей массы.

Предположим далее, что несущая способность рассматриваемой оболочки определяется в результате достаточно простого расчета, который современная электронно-вычислительная машина производит всего за 0,32 секунды. Заметим попутно, что расчет на прочность конструкции средней сложности требует 3—5 секунд при использовании ЭВМ средней мощности. Тогда для полного анализа всех возможных вариантов вычислительная машина должна работать непрерывно $0,32 \cdot 10^{10}$ секунд. А поскольку астрономический год состоит из $0,31536 \cdot 10^8$ секунд, то легко убедиться, что на необходимые вычисления потребуется чуть больше 100 лет, то есть, чтобы отыскать нужную среди возможных конструкцию, инженеры должны из поколения в поколение передавать эстафету расчета, не допуская при этом ни единой поломки, ни единой секунды простоя ЭВМ.

В действительности, конечно же, ситуация выглядит не так безысходно, как может показаться неискушенному в вопросах конструирования читателю. Формулируя задачу, инженер обязательно учитывает массу различных обстоятельств, облегчающих анализ и позво-

ляющих уменьшить число подлежащих рассмотрению вариантов. Определенные упрощения могут быть вызваны особенностями приложения нагрузки, многие комбинации при рассмотрении оказываются явно конструктивно несостоятельными.

Все это позволяет значительно сократить область поиска возможных решений. И тем не менее, хотя объем предполагаемой работы намного уменьшится, число вариантов (если даже от «вековых» масштабов перейти к «годовым») будет настолько велико, что только на их рассмотрение потребуется времени больше, чем для создания проекта и для последующего изготовления конструкции. А самое главное, несмотря на предпринимаемые усилия, нет никакой гарантии, что наилучший проект окажется среди рассматриваемых.

Таким образом, сами по себе электронно-вычислительные машины не могут быть панацеей при выборе оптимального варианта, так как простой перебор вариантов по своей сути слепой поиск. Необходим математический аппарат, основанный на обобщении закономерностей рассматриваемых процессов, абстрагированный от частных, базирующийся на общих фундаментальных законах, по которым развивается природа, позволяющий отказаться от бездумных переборов вариантов и вести научно обоснованный анализ, так называемый «направленный поиск». И такой аппарат был создан в наши дни. В математике возникли новые бурно развивающиеся направления: теория оптимального управления и методы математического программирования.

Иоганн Бернулли формулирует задачу

Было бы большим заблуждением считать, что новые направления в математике появились на «необжитой целине». Первые камни в их основание были заложены выдающимися учеными XVI века: создателями дифференциального и интегрального исчисления И. Ньютоном и Г. Лейбницем (1646—1716) и основоположниками вариационного исчисления П. Ферма (1601—1665) и И. Бернулли (1667—1748). Методы решения экстремальных задач лучше всего иллюстрирует знаменитая задача И. Бернулли о линии наискорейшего спуска — брахистохроме. По словам Лейбница, она «своей красотой привлекла его к себе, как яблоко привлекло Еву».

«В вертикальной плоскости даны две точки A и B (рис. 14). Определить путь AMB , спускаясь по которому под влиянием собственной тяжести, тело M , начав двигаться из точки A , дойдет до другой точки B в кратчайшее время. Для того чтобы вызвать интерес со стороны любителей подобных вопросов и побудить их охотнее предпринять попытку разрешения указанной задачи, довожу до сведения, что эта задача не сводится к пустой

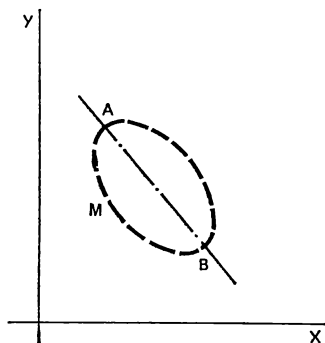


Рис. 14. Задача И. Бернулли о линии наискорейшего спуска

умственной спекуляции, лишенной какого бы то ни было практического значения, как это может кому-либо показаться. В действительности она представляет очень большой практический интерес, притом кроме механики, также и для других дисциплин, что может всем показаться неправдоподобным. Между прочим (указываю это с целью предупредить возможное неправильное суждение), хотя прямая AB и является кратчайшей линией между крайними точками A и B , тем не менее тело проходит ее не в кратчайшее время, и существует кривая AMB , хорошо известная геометрам. Я назову эту линию, если по истечении текущего года никто другой ее не назовет».

Вряд ли кого оставит равнодушным предельная простота логики мышления, выразительность, с которой поставил перед коллегами новую задачу выдающийся ученый, предоставив им возможность проверить свои способности и пережить чувства первооткрывателя.

Поставленная проблема была успешно решена известными математиками Я. Бернулли, Г. Лейбницем, И. Ньютоном и Г. Лопиталем. Оказалось, что линией быстрейшего ската является математическая кривая — циклоида.

С тех пор стало интенсивно развиваться одно из важнейших направлений математики, сыгравшее исключительную роль в развитии механики, — вариационное исчисление.

Но в чем же отличие вариационного исчисления от определения максимума и минимума функций, с кото-

рыми знакомят в школьных курсах математики? В задачах о наибольших и наименьших значениях функций отыскиваются точки, в которых она принимает экстремальные значения. Так, в вышеприведенной задаче о брахистохроне для любого из возможных вариантов движения шарика по фиксированному желобу можно определить момент, соответствующий достижению наибольшей скорости.

Задача же вариационного исчисления сводится к отысканию среди всех возможных путей движения такого, который обеспечивает минимальное время, затрачиваемое на все «путешествие» из пункта A в пункт B . Иными словами, функция, характеризующая разыскиваемую линию ската, задается не на каком-то отрезке, как в задаче об отыскании экстремумов, а на множестве траекторий, ведущих из точки A в точку B . Множество это весьма сложное, и его очень трудно представить графически. Чтобы обойти эти препятствия и наглядно представить задачу, в математике используется следующий прием. Условливаются каждую траекторию, ведущую из A в B , определять «точкой» некоторого сложного специального «пространства». Таким образом, каждой точке, взятой во введенном абстрагированном «пространстве», соответствует некоторое число, обозначающее время движения по конкретной траектории из пункта A в пункт B . В тех случаях, когда необходимо рассматривать такие сложные «пространства», математики вместо слова «функция» используют термин «функционал».

Аналогичная задача формулируется при выборе оптимальной траектории перелета самолета из пункта A в пункт B . Время набора высоты, полета и спуска определяет траекторию (функцию) полета. Совокупность же всех возможных траекторий составляет функционал, заданный на некотором «пространстве», точками которого являются эти траектории.

В приведенных примерах ясно просматривается специфика сформулированных проблем. Каждая из трех постановок допускает бесчисленное множество вариантов решений, из которых искомым является только одно, обеспечивающее удовлетворение требований задачи. Через какой «фильтр» надо пропустить все возможные решения, чтобы «задержать» одно-единственное — искомое?

От вариационного исчисления к оптимальному проектированию

Сравним задачи о движении шарика по желобу и о перелете самолета. На первый взгляд они идентичны, так как в обоих случаях необходимо найти траекторию движения, обеспечивающую минимальное время, требуемое для определения расстояния. Но при более пристальном рассмотрении в этих задачах обнаруживается весьма существенное различие.

В задаче о линии быстреего спуска отсутствуют какие-либо ограничения. Совсем по-иному обстоит дело в задаче с самолетом, совершающим перелет по заданному маршруту. Самолет — это конструкция, возможности которой существенно ограничены. В частности, скорость его определяется максимальной тягой двигателя, ограничены потолок высоты полета, время набора высоты, перегрузки, которые могут испытывать люди, и т. д.

Аналогичная ситуация возникает и в задаче о проектировании оболочки минимальной массы. Рассматривая различные варианты закона изменения толщины, необходимо помнить, что в конструкцию закладываются конкретные материалы. Поэтому возникающие напряжения должны быть строго регламентированы и не превосходить допустимых. В то же время конструкция оболочки должна удовлетворять требованиям устойчивости. Минимальное и максимальное значения толщины необходимо согласовать с технологическими и конструктивными особенностями изготовления. Желая создать прочную и «невесомую» оболочку, конструктор всегда должен помнить, что он ограничен довольно строгими рамками технологии, иначе его изделие придется ценить на вес золота.

Итак, подведем итоги. Наилучшее решение отыскивается в результате изменения одного или нескольких параметров, с помощью которых можно управлять рассматриваемым процессом. В постановке задачи Бернулли в этом смысле отсутствуют какие-либо ограничения. В двух других задачах область изменения параметров определяется конкретными границами. И вот тут-то и проявляется одна из главных особенностей: искомое решение может быть получено только при значениях параметров управления, лежащих на границе области,

в которой они определены. На языке математики это означает, что если, например, тяга двигателя самолета будет максимальной в течение некоторого времени, то траектория, по которой происходит полет, является не внутренней, а крайней «точкой пространства» допустимых траекторий. Таких крайних точек может оказаться достаточно много, но именно на них в большинстве случаев функционал достигает экстремального значения. Аппарат же классического вариационного исчисления в этом случае, как правило, оказывается бессильным, так как в нем не рассматриваются границы пространства, а отыскиваются экстремумы в его внутренней области. Так, при решении технических задач возникла новая математическая проблема — создание методов решения вариационных задач, с помощью которых можно находить наибольшие и наименьшие значения функционалов в случаях, когда они достигаются при предельных значениях параметров управления, т. е. на границе заданного пространства. Методы, позволяющие решать такие задачи, принято относить к неклассическому вариационному исчислению.

Процесс оптимизации начинается с построения математической модели создаваемой конструкции и разработки способа ее «прямого» расчета (например, расчет оболочки на прочность). Вслед за этим необходимо выяснить, каким свойством должен обладать будущий проект, т. е. определить функцию цели или критерий качества. В этой роли могут выступать самые разнообразные требования — прочность, технологичность, долговечность, стоимость, материалоемкость, надежность и т. д. Далее, возникает задача выбора расчетных переменных (в дискретной постановке) или управляющей функции (в непрерывной постановке). Так, если при проектировании оболочки минимальной массы считать ее конфигурацию заданной, то управляющей функцией будет ее толщина. Однако очевидно, что толщина оболочки, как только что было сказано, не может изменяться произвольно, т. е. на параметры управляющей функции должны быть наложены ограничения. Таким образом, формулировка задачи теории оптимального проектирования включает в себя целевую функцию, параметры управления и ограничения на проектные параметры. Связь между ними осуществляется на основе выбранной математической модели.

В свете сказанного становится понятным определение оптимизации как науки о распределении «дефицитных ресурсов» (в самом широком смысле слова). Одна из основных трудностей, возникающая при оптимальном проектировании, заключается в переводе конкретной инженерной задачи на язык теории оптимальных процессов или математического программирования.

Центральным моментом оптимального проектирования конструкций является выбор критерия качества, который и определяет цель дальнейшего поиска. Ответственность этого момента очевидна.

Среди многочисленных требований, предъявляемых к конструкциям, особое место занимает критерий весового совершенства, отражающий тенденцию снижения ее материалоемкости и поэтому близкий по своему содержанию и к экономической категории. В ряде случаев критерий минимума массы — решающий показатель при определении способности конструкции выполнять свои функции. Речь идет прежде всего об авиации и космонавтике. Однако в последнее время критерий минимума массы — традиционная прерогатива не только летательных аппаратов. Проблема снижения материалоемкости конструкций занимает сегодня стержневое место в развитии машиностроения.

При комплексном проектировании приходится учитывать многообразные, подчас противоречивые, требования. Среди критериев качества можно назвать конструкторско-технологический (обеспечение прочности, устойчивости, жесткости, долговечности), функциональный (конструкция должна качественно выполнять свое назначение), производственно-технический (изготовление должно вестись максимально отработанными и быстрыми методами), а также экономический и социальный. Задача состоит не столько в простом учете противоречивых требований, сколько в оптимальном их удовлетворении. Оказывается, можно найти такие соотношения между критериями качества (или, как говорят математики, построить область возможных изменений параметров), для которых уже нельзя улучшить один критерий, не ухудшив другого. Это так называемая область неулучшаемых значений частных критериев — область Парето. Считается, что когда эта область построена, то она в каком-то смысле является решением многокритериальной задачи.

И последнее. С позиций оптимального проектирования поиск наилучшего решения на основе перебора и сравнения нескольких возможных решений относится к вариантному проектированию. Тогда на основе всех предыдущих рассуждений невольно возникает вопрос: неужели все инженерные решения, полученные в результате вариантного проектирования (т. е. почти вся практика «дооптимизационного периода»), крайне несовершенны? К счастью, это не так.

Глубокое понимание механики происходящих процессов, внимательное изучение и овладение опытом, накопленным на протяжении многих поколений (в том числе и природы) и опирающимся на огромные достижения науки, творческий подход к решению проблемы и феномен интуиции — все это предопределило развитие современных направлений в практике конструирования и позволило создать на их основе прекрасные образцы инженерного искусства. Достижения конструкторской мысли общеизвестны и не требуют рекламы.

Вернемся к оболочке, нагруженной равномерным внешним давлением с переменной вдоль образующей толщиной. Ее характерные параметры — толщина и давление изменяются без скачков и разрывов, и поэтому их поведение можно описать непрерывными функциями, (случай системы с распределенными параметрами). Задачи, в которых изменение параметров можно описать непрерывными функциями, решаются с помощью совершенных аналитических методов, основанных на дифференциальном и классическом вариационном исчислении. Возможности этих методов были значительно расширены с появлением методов теории оптимального управления, основанных на блестящем открытии советских математиков — принципе максимума Понтрягина. Трудности решения задач заключаются в математическом описании исследуемого объекта.

В рассматриваемом случае роль параметра управления играет толщина оболочки. Заметим, что многие задачи оптимального проектирования упругих тонкостенных оболочек формулируются как задачи выбора распределения толщин по их длине. Названные методы относятся к числу точных, и в этом их особая ценность. К сожалению, пока в терминах теории оптимального управления удастся сформулировать очень ограниченный класс задач.

Стоит ли игра свеч?

Прежде чем подвергнуть экзамену на «качество» и вскрыть недостатки конструкций, созданных на основе традиционных методов простого перебора, вернемся к закону изменения толщины оболочки минимальной массы. Предполагается, что по краям она усилена шпангоутами и нагружена равномерным внешним давлением. Толщина такой оболочки, естественно, должна увеличиваться к середине пролета. Но как, по какому закону она должна изменяться, чтобы можно было получить максимальную экономию материала? В результате проведенных расчетов удалось установить, что толщина оболочки минимального веса от краев к середине изменяется незначительно, но достаточно резко увеличивается в средней части. Такой вывод получен в результате точного математического расчета.

А как на практике создать такую конструкцию? Изготовить оболочку из металла на основе современной технологии можно только обработкой на токарном станке или путем сварки из очень маленьких колец разной толщины. Но о каком качестве можно говорить, если оболочка имеет огромное количество сварных швов! Естественно, такая конструкция не отвечала бы критерию технологичности.

Конечно, единичные экземпляры оболочек из металла с плавным изменением толщины изготовить можно. Для этого необходима толстостенная исходная заготовка, большую часть металла которой придется перевести, естественно, в стружку и затратить массу времени на токарную обработку. Были попытки изготовления небольших оболочек, толщина стенок которых менялась скачкообразно. Ступенчатая оболочка напоминает в сечении по образующей пакет листов автомобильной рессоры. Проведенные экспериментальные исследования показали, что ступенчатая оболочка, выдерживающая такую же нагрузку, как оболочка постоянной толщины, значительно легче последней. Однако это только опытные образцы. Изготовление из металла оболочек, диаметр которых достигает нескольких метров, весьма проблематично. Как же достигнуть желаемого облегчения конструкции при промышленном производстве?

Давайте вернемся к исходным позициям и посмотрим, что представляют собой такие конструкции в тра-

диционном исполнении. Корпус оболочки, нагруженной по условиям эксплуатации внешним давлением (а это может быть и глубоководный аппарат, и спускаемый космический объект, и любая труба), подкрепляется рядом мощных силовых шпангоутов. Между ними располагаются более слабые — промежуточные. Понятно, что мощные шпангоуты — торцовые, они должны быть такими же, как и в оболочке переменной толщины. Слабые шпангоуты — промежуточные — как раз и выполняют роль необходимого существенного утолщения оболочки посередине пролета. Следовательно, конструкция с дискретными усилениями, давно используемая при проектировании оболочек, по идее очень близка к оптимальному варианту, полученному на основе самых совершенных расчетных методов. А о простоте технологии изготовления таких оболочек и говорить не приходится. В этом случае соединение шпангоутов и обшивки осуществляется, как уже отмечалось, с помощью заклепок или сварных швов. Эти процессы очень хорошо отработаны в практике современного машиностроения. Иногда между торцовыми шпангоутами устанавливается не один, а несколько промежуточных, при этом более сильные располагают ближе к центру оболочки.

С позиций оптимального проектирования большой интерес представляют оболочки, подкрепленные в продольном и поперечном направлениях. Вариантное проектирование подкрепленных оболочек заключается в подборе рационального соотношения между толщиной оболочки и геометрическими параметрами сечения стрингеров. Поиск непрерывных законов распределения материала в таких конструкциях, работающих на сжатие, вряд ли целесообразен. И это вполне объяснимо, поскольку, как уже указывалось, реализация таких конструкций с позиций современных технологий очень проблематична. Для уменьшения массы стрингерных оболочек могут с успехом применяться вафельные конструкции. В этом случае оптимизации подлежат толщина обшивки, размеры клетки, высота продольных и поперечных элементов.

Многочисленные теоретические разработки, полученные с помощью самых современных вычислительных методов, показали, что оптимальные проекты для подкрепленных оболочек предусматривают уменьшение массы конструкции на 7—10 % по сравнению с конструк-

циями, создаваемыми на основе рационального проектирования. Но что скрывается за этой экономией? Прежде всего возникают дополнительные технологические трудности, так как может потребоваться разработка профилей новых сечений, но для этого необходимо создание новых стандартов, оборудования для производства профилей и многое другое, что в конечном итоге сведет на нет ожидаемую экономию. Но, пожалуй, даже не это самое главное в рассматриваемом вопросе. Возникает весьма деликатная ситуация.

При определении размеров оболочек, в том числе и оптимальных, в модель уже заложены какие-то погрешности. Оказалось, что точность самих методов расчета на прочность, на основе которых проводится оптимизация, также лежит в пределах тех же 7—10 процентов, что и получаемый эффект от оптимизации. Так стоит ли, как говорится, игра свеч?

Но не будем столь категоричны в своих суждениях: окончательный приговор вынесут совершенствование технологии, производства и методов расчетов на прочность.

Какая форма у капли

В задачах оптимизации оболочечных конструкций гладкие оболочки занимают особое место. Давайте рассмотрим простейшую задачу. Речь идет о создании оболочек для хранения газообразных продуктов, потребность в которых в связи с увеличением роли газа в топливной энергетике растет с каждым днем. Постараемся обойтись без сложных математических методов и вообще без вычислений.

Итак, необходимо спроектировать емкость минимальной массы для хранения заданного объема газа. Поскольку давление газа действует равномерно во всех направлениях, значит и емкость должна быть полностью симметричной. Полная симметрия, как известно, характерна для сферы. Это и есть оптимальная форма емкости, в которую можно поместить максимальный объем газа при минимальной поверхности самой емкости, а следовательно, и при минимальной массе строительного материала. Эта особенность сферы, нагруженной внутренним давлением, уже обсуждалась выше, как пример безмоментной конструкции. Полная симметрия конструкции и

нагрузки определяет тот предел совершенства, к которому обычно стремятся при проектировании.

Ну а если усложнить задачу? Возьмем не газ, а жидкость, давление которой на стенки сосуда в силу закона тяжести меняется по линейному принципу. Какая оптимальная геометрия сосуда будет в этом случае? Оказывается, подобная поверхность существует в природе, и каждый из нас ее наблюдал не раз. Это форма капли воды, в которой в роли оболочки выступает поверхностное натяжение, а нагрузкой является давление высоты столба капли жидкости.

Нет необходимости подчеркивать, что форма капли очень чувствительна к изменению внешних воздействий. Какие разнообразные очертания она принимает в зависимости от условий, в которых находится в данный момент: падающая капля, лежащая на горизонтальной поверхности, движущаяся по наклонной плоскости? Способность жидкости принимать разную форму в своем роде уникальная. Остается только сожалеть, что природа, сделав первый шаг к созданию естественных ограждающих оболочечных устройств, основанных на необычном свойстве поверхности жидкости, не поднялась на следующую высоту и не научилась регулировать «толщину стенки» — величину поверхностного натяжения в зависимости от размеров капли.

То, что не удалось природе, попытались реализовать в своих конструкциях инженеры. Усилия в оболочке зависят от ее геометрии и внешней нагрузки. Нельзя ли для хранения жидкости сделать резервуар такой формы, чтобы в оболочке возникали только растягивающие напряжения и во всех сечениях они были бы одинаковы? Ведь при прочих равных условиях материал такой оболочки нагружается равномерно, т. е. это будет безмоментная оболочка равного сопротивления. Сказанное дает возможность предположить, что она окажется и самой легкой в рассматриваемом классе.

На основании точных расчетов определили, какую форму должен иметь в этом случае меридиан (очевидно, что параллельное сечение оболочки будет круговое). Вычертили его, и оказалось, что форма меридиана в точности совпадает с очертаниями покоящейся капли жидкости. Такой результат и следовало ожидать, если учесть, что поверхностное натяжение жидкости постоянно, а давление внутри капли изменяется по гидростати-

ческому закону. Теоретические изыскания подтвердили закономерность, наблюдаемую в природе, и инженеры не преминули воспользоваться обнаруженным фактом на практике. Так появился новый вид сосудов для хранения жидких продуктов, в которых реализована идея снижения материалоемкости,— это сосуды каплевидной формы.

Но в практике строительства хранилищ для жидких продуктов наибольшее распространение получили цилиндрические резервуары с вертикальной осью. Возникающие в стенках оболочки кольцевые напряжения в отличие от сосуда каплеобразной формы не будут постоянны вдоль меридиана. Они изменяются в строгом соответствии с гидростатическим давлением по линейному закону от нуля на уровне верхнего зеркала жидкости до максимума у днища. В этом случае половина толщины оболочки оказывается явным балластом. Следовательно, в безмоментной части резервуара стенку можно сделать переменной толщины, т. е. равнопрочной. Мы не зря оговорились «в безмоментной части», поскольку днище, стесняя радиальные перемещения оболочки, будет играть роль возмутителя спокойствия и в результате возникнет моментное напряженное состояние — так называемый краевой эффект.

Идея подчинения формы поверхности оболочки характеру изменения давления созданием безмоментных каплевидных оболочек минимального веса не исчерпала себя, а получила развитие в решении ряда новых задач. Так, совсем недавно было найдено в замкнутом виде уравнение меридиана оболочек вращения постоянной толщины и было показано, что под действием равномерного внешнего давления (при соответствующих условиях закрепления по концам) строго без изгиба деформируется не только сферическая и круговая цилиндрическая оболочки.

Обнаруженные оболочки, названные безызгибными, образуют бесконечное семейство, включающее в себя естественно, сферу и цилиндр. На их основе можно конструировать безмоментные емкости, нагруженные внешним или внутренним давлением, самого сложного очертания. Возникающие небольшие изгибные эффекты в местах сопряжения оболочек между собой и закрепления торцов могут быть легко компенсированы за счет соответствующих конструктивных мер. Использование

таких оболочек открывает широкие перспективы при проектировании прочных корпусов подводных аппаратов, нагруженных давлением жидкости или газа.

Во всех рассуждениях об оптимальных проектах понятия минимального веса и равнопрочности, как правило, соседствуют рядом. Говоря о равнопрочной оболочке, мы одновременно невольно связываем ее с конструкцией наименьшего веса, и наоборот. Понятия как будто бы и родственные, во всяком случае так они ассоциируются в нашем представлении, но далеко не адекватные, а тем более не могут быть взаимообусловлены друг другом. Получается, что конструкция безмоментной равнонапряженной оболочки обладает и минимальной массой. Однако в составных конструкциях равнонапряженное состояние не означает, что она имеет минимальную массу. В то же время конструкция с минимальной массой не обязательно равнонапряженная. Результаты исследований убедили, что для оболочек сплошной формы не всегда можно спроектировать равнопрочную конструкцию. В то же время конструкцию минимальной массы теоретически удастся обосновать всегда.

Так было доказано, что равнопрочный сосуд с плоским днищем, нагруженный внутренним давлением, тяжелее, чем оболочка минимальной массы. Примером неравнопрочной конструкции, имеющей минимальную массу, является подкрепленная оболочка оптимального проекта. Минимум ее массы определяется из условий устойчивости от внешнего давления, но, естественно, она не будет равнопрочной с точки зрения напряженного состояния. Только в простейших случаях нагружения оболочка будет системой равнопрочной с минимальной массой. Это и есть сфера, нагруженная внутренним равномерным давлением, и каплеобразная форма, тектоника которой подчинена характеру нарастания гидростатического давления. Конечно, эти формы идеальны, если учитывать материалоемкость конструкций. Но свойство равнопрочности имеет две стороны: с одной, она определяет совершенство проектируемой конструкции, а с другой?

Равнопрочность конструкции: за и против

Любая конструкция подвергается обстоятельным расчетам на прочность, гарантирующим ее надежную работоспособность. И тем не менее вследствие каких-то

непредвиденных случайностей, хотя и очень редко, разрушения конструкций все же происходят.

Американский поэт прошлого века Оливер Уэндел Холмс (1809—1894) в стихотворной форме описал историю создания равнопрочного фаэтона:

Дьячок не без смекалки был
И образован был прилично,
А по причине той решил
Он сделать фаэтон «логичным».

Прошло сто лет с поры былой.
Подгнила бричка средне,
А в ней епископ пожилой
Отправился к обедне...

«Где, стал быть, тонко, молвил он,
Там рвется, это точно.
А потому мой фаэтон
Быть должен равнопрочным...»

Но вот круги в глазах пошли
У старого прелата.
И оказался вдруг в пыли
Епископ скуповатый.

Немало миль тот экипаж
Набегал по дорогам.
Он лошадь пережил и аж
Дьячка, притом namного.

Едва не растерял мозги
В паденьи непривычном —
Возок распался на куски!
Логично? Да, логично!

Приходится только удивляться, с какой поразительной прозорливостью художник слова XIX века предвосхитил уязвимые места еще не родившегося научного направления, связанного с оптимальным проектированием. Он пришел к неожиданному выводу во времена, когда мало кто задумывался об экономии материала, да и сами размеры конструкций вполне укладывались в сложившиеся представления о пропорциях сооружений. Современные ведущие специалисты в области оптимального проектирования воздают должное поэту прошлого.

Можно привести примеры конструкций, страдающих недугом равнопрочного фаэтона. С разрушающимися оболочками приходится встречаться довольно часто. Вспомним, с каким шумом разрывается на части обыкновенный детский воздушный шарик, стенки которого натянуты наполняющим его воздухом. И никакие ухищрения не вернут ему рабочую форму.

А вот и не безобидный пример. У магистральных трубопроводов есть «больное» место: транспортируемый по ним под давлением газ, как джинн, загнанный в бутылку, стремится вырваться наружу. И когда давление газа достигает предельного значения, в стенке трубы, если в ней имеются естественные дефекты, может образоваться хрупкая трещина, особенно на морозе, при котором металл теряет вязкость. Возникшая трещина распространяется со сверхзвуковой скоростью на многие

километры, «разворачивая» трубопровод вдоль образующей. Происходит это потому, что металл разрушается быстрее, чем успевает упасть давление. Земля, которой засыпана труба, взлетает вверх, как при взрыве. Однако этот «фейерверк» очень дорого обходится государству.

Причина такого катастрофического по своим последствиям разрушения в том, что по отношению к кольцевым напряжениям магистраль трубопровода на всем ее протяжении — конструкция равнопрочная. И здесь, казалось бы, положительное качество невольно оборачивается пороком. На пути трещины создают различного рода ловушки или препятствия; например, на равном расстоянии друг от друга приваривают кольца. Но такое решение фактически приводит к созданию новой конструкции трубопровода.

Один из наметившихся перспективных путей борьбы с лавинообразным развитием трещины при хрупком разрушении связан с насильственным отклонением ее от магистрального направления вдоль образующей. Суть метода заключается в следующем. Если в упругой изотропной стальной пластине путем локальной термообработки создать закаленный слой, то в его окрестностях за счет увеличения объема кристаллической решетки возникает поле значительных структурных сжимающих напряжений.

Вот эту-то зону сжимающих напряжений и используют в качестве ловушки на пути распространяющейся трещины. Когда вершина трещины попадает в такую специально подготовленную область сжатия, то за счет противодействия предварительных сжимающих напряжений в ловушке интенсивность напряжений в вершине трещины значительно снизится, и это приведет к замедлению ее роста. Но «пробивная сила» трещины настолько велика, что если она «атакует» преграду — закаленный слой под углом, близким к прямому, то она в состоянии такую преграду пробить и развиваться дальше. Задача заключается в выборе угла, под которым необходимо расположить закаленный слой к образующей цилиндрической оболочки, чтобы, встретившись с преградой, трещина «подчинилась» ей и, свернув от магистрального, распространялась в нужном направлении. Но подобное решение, повышая надежность трубопровода, не устраняет причину — склонность материала к хрупкому разрушению.

Принципиально новое решение связано с изменением конструкции стенки. Ученые и практики предложили технологию создания трубы способом навивки стальной рулонной ленты толщиной в несколько миллиметров. Дело в том, что сталь такой толщины имеет более низкую критическую температуру перехода в хрупкое состояние. Навивкой ленты можно создавать многослойные трубы, в которых разрушение локализуется в одном-двух слоях, и дальнейшее лавинообразное распространение трещины прекращается.

Шпангоут на экране дисплея

Шпангоуты — один из видов силовых элементов конструкций, и используются они необычайно широко. Однако наиболее сложный и законченный вид шпангоут имеет в конструкции самолета. Они устанавливаются по длине фюзеляжа, и практически каждый из них — это новая конструкция, которая зависит от условий нагружения и от особенностей остального силового комплекса самолета. Так, например, с помощью шпангоутов осуществляется крепление таких элементов самолета, как крылья, которые передают на фюзеляж сосредоточенные усилия. Для обеспечения необходимой жесткости и прочности конструкции фюзеляжа в местах крепления крыльев устанавливаются наиболее мощные шпангоуты.

Конструирование максимально облегченных шпангоутов — неизменно твердый орешек при проектировании. Анализ системы «оболочка — шпангоут» показывает, что напряженно-деформированное состояние неоднородно. Большие напряжения и перемещения возникают в местах приложения нагрузок, а удаленные участки шпангоута слабо напряжены. Использование в качестве шпангоута профилей с постоянным сечением приводит к неоправданному завышению его массы. Значительный весовой выигрыш может быть достигнут за счет перераспределения материала по сечениям шпангоута.

Конструктору обычно задается внешний контур шпангоута, определяемый аэродинамическими обводами корпуса самолета, а также сообщаются усилия, действующие со стороны смежных контактирующих элементов. Заранее выбирается и материал, из которого он будет изготовлен.

Таким образом, в задаче как будто бы известно все. Необходимо лишь найти наилучшее распределение жесткости шпангоута в окружном направлении. И тем не менее это очень сложная задача, доставляющая всегда много хлопот проектантам, и решается она в конце концов приближенно. Вот, например, как выглядит одна из «технологий» проектирования шпангоутов.

На основании предварительно проведенных расчетов из оптически активного материала — оргстекла — изготавливают модель шпангоута первого приближения. Модель устанавливают в специальное устройство, с помощью которого имитируют реальные действующие усилия. Нагруженную внешними нагрузками модель просвечивают в поляризованном свете, проецируют на экран и фотографируют. В результате получают фотографии с изображением системы замысловатых полос, форма и расположение которых характеризуют напряженное состояние модели, возникающее вследствие нагружения. Фотографии расшифровывают и находят величины возникающих напряжений. Обнаружив участки, в которых материал нагружен меньше, их облегчают, уменьшая площадь сечения. Там же, где, наоборот, возникают очаги концентрации напряжений и возможно разрушение (помните, как дьячок конструировал свой фаэтон: «где, стал быть, тонко,— молвил он,— там рвется, это точно»), усиливают сечение, увеличивая его площадь. Процедура доводки повторяется несколько раз, пока процесс не стабилизируется и шпангоут не окажется нагружен достаточно равномерно.

Однако даже такой сложный комбинированный подход с многократными итерациями не дает гарантии, что найденное конструктивное решение оптимально. Ведь приступая к поиску, мы уже заранее навязываем конструкции норму поведения, так как задаем исходную форму, применительно к которой и продолжается дальнейший поиск наилучшей конфигурации шпангоута. Кроме того, не следует забывать, что многое зависит от качества модели, а также от того, насколько удачно осуществлялась «доводка».

Целенаправленный поиск наилучшего варианта можно переложить на плечи электронно-вычислительной машины («математический эксперимент»). Электронно-вычислительная машина просчитывает все возможные варианты, сама производит анализ напряженно-дефор-

мированного состояния шпангоута в зависимости от изменения его геометрии. Кроме того, она «подсказывает» себе, как более разумно поступить: в каком сечении шпангоута и как изменить размеры, чтобы уровень напряжений не превышал допустимых для данного материала, чтобы деформации не превышали нормы, а масса конструкции на каждом этапе расчета непрерывно уменьшалась.

Весьма существенно ограничение по деформации. Ведь в процессе нагружения форма конструкции может претерпеть такие изменения, что это скажется, например, на аэродинамических качествах самолета. Если в первом случае при рациональном вариантном подходе успех в большей мере зависит от индивидуальных качеств исполнителя, то при «математическом эксперименте» объективное решение зависит от уровня совершенства алгоритма.

Но не все совершенно и в технологии «машинного» проектирования, так как электронно-вычислительная машина выдает решение в виде цифровой информации.

На принципиально новой основе можно осуществить проектирование, если использовать специальное математическое обеспечение. Это также блоки алгоритмов, которые преобразовывают цифровую информацию электронно-вычислительной машины в графическую, выводимую на конечном этапе на экран дисплея или даже сразу на бумагу в виде чертежа. В результате неизмеримо сокращается время, затрачиваемое на проектирование новой конструкции. Дисплей значительно расширяет возможности программиста, так как позволяет исправлять допущенные ошибки, проверять различные варианты, обращаться к библиотечным подпрограммам и т. д. «Поиграл» на клавишах электронно-вычислительной машины — и получишь готовый чертеж, обоснованный математически и оформленный в конкретные геометрические очертания. Данная схема оптимального проектирования механических систем имеет свое название — система автоматического проектирования, или сокращенно — САПР. Использование системы автоматического проектирования позволяет более широко вести поиск оптимальных решений. В самом деле, при оптимизации формы шпангоута мы все время находились в прокрустовом ложе исходной силовой схемы. На основе САПР можно осуществлять двойную оптимизацию при проектирова-

нии: выбирать наилучшую конструктивно-силовую схему и одновременно определять для нее оптимальное распределение материала.

За счет перераспределения материала можно значительно уменьшить массу шпангоута, а также и деформации оболочки. Правда, масса шпангоутов, как правило, не является определяющей в общей массе конструкции оболочечной системы. Поэтому удельный вес полученной экономии материала не будет столь значителен. И тем не менее «копейка рубль бережет».

ЭВМ «против» люков

Практически каждая оболочечная конструкция имеет различного рода геометрические и силовые неоднородности, люки, опоры, фитинги, накладки, кронштейны, сосредоточенные усилия, неравномерные давления и т. д. Это разнообразные местные подкрепления, предназначенные для восприятия локальных нагрузок или для восстановления, например, прочности связей корпуса. Об этом подробно говорилось выше.

Никого не удивит сейчас цистерной для перевозки жидких продуктов, удобно «расположившейся» на железнодорожной платформе. Как должное воспринимаются мощные ракеты-носители, демонстрируемые во время военных парадов на Красной площади в Москве. Но вряд ли кто-нибудь специально задумывался, как закрепляется такая оболочечная система на тележке. И цистерна, и ракета-носитель покоятся на специальных опорных устройствах — ложементах, выполненных по форме поперечного сечения оболочки. Опираясь на жесткий ложемент, оболочка деформируется и на определенных участках может даже отходить от него. Это, в свою очередь, приводит к возникновению неравномерных контактных усилий и соответствующего нежелательного изгибного напряженно-деформированного состояния оболочки.

При конструировании опорных устройств важно определить материал и геометрические размеры ложемента — ширину и высоту сечения, а также угол охвата транспортируемого объекта. В общем, задача может считаться решенной, если будет найден закон изменения жесткости ложемента по его длине.

Задача о взаимодействии оболочки с ложементом

необычайно сложна. Решение этой комплексной проблемы: определение напряженно-деформированного состояния системы «оболочка — ложемент» и создание на его основе наилучшей формы опорного устройства удалось получить только в соответствии с теорией оптимизации конструкций и с помощью ЭВМ.

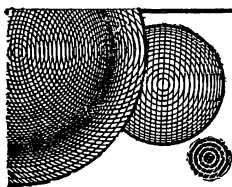
При проектировании оболочечных систем приходится решать еще одну очень не простую проблему: создание люков. Из-за люков в тонкостенных конструкциях возникает концентрация напряжений. И тем не менее без них обойтись невозможно. Представьте себе самолет, в котором нет ни иллюминаторов, ни дверей.

При традиционном проектировании учитывается концентрация напряжений в районе люка и предусматривается необходимое усиление конструкции в этом месте, или, как принято говорить, отверстие «окантовывается». Существуют и более простые рекомендации, выработанные практикой: «сколько площади оболочки вырезано под люк, столько ее нужно добавить в виде окантовки». Ясно, что это довольно рутинный подход. Эту задачу можно решить по-новому, более творчески на основе оптимального проектирования. При этом возникают и принципиально новые вопросы. Какую форму должно иметь отверстие, чтобы напряжения на его контуре имели минимальное значение? Если задана конфигурация отверстия, то какой формы должно быть подкрепление, чтобы его масса была минимальной? Как следует распределить подкрепляющий материал возле отверстия, чтобы напряженное состояние было эквивалентно оболочке без отверстия? Задана масса материала для подкрепления отверстия, как распорядиться ей, чтобы напряжения на контуре отверстия были минимальны?

Мы уже рассказывали, как удалось создать гибкую трубу за счет разного расположения армирующих слоев. Вспомним, что оболочки тем и отличаются от стержней и балок, что в них напряжения изменяются по поверхности и различны в разных направлениях. Определив с помощью расчета на прочность напряженно-деформированное состояние оболочки, удастся построить поля напряжений по ее поверхности. Анализируя получившуюся картину распределения напряжений, можно выяснить, в каких направлениях требуется большая прочность материала, а в каких меньшая. Так, для ци-

линдра мы нашли два таких направления — меридиональное и кольцевое.

Если в распоряжении конструктора имеется конкретный сплав, он сможет изменять только толщину оболочки. Но как сделать цилиндр в два раза тоньше в направлении образующей, а не в поперечном направлении? Создать такую конструкцию на основе использования композиционных материалов довольно легко. Но это наиболее простой случай. Можно продвинуться в рассуждениях и дальше. Вспомним, что представляет собой кокон тутового шелкопряда. А теперь предположим, что оболочка получается намоткой стеклонити на специальной оправке и последующей полимеризацией связующим. Остается только найти оптимальные углы расположения нитей, которые определяются на основе анализа напряженно-деформированного состояния. Естественно, что в процессе намотки углы расположения нитей должны меняться. Решить эту комплексную задачу можно, используя методы оптимального проектирования. В этом случае варьируется как геометрия оболочки, так и строение самого материала (углы наклона армирующих волокон, процент армирования, модули упругости слоев). Критерий здесь не определяется только минимумом массы, оптимум ищется по весостойкостному показателю, так как стоимость армирующих волокон может быть намного больше стоимости связующих.



ЕСТЬ ЛИ ПРЕДЕЛ РЕКОРДАМ?

Стремление использовать оболочки для перекрытия все больших площадей рождает постоянно обновляющиеся рекорды. Однако абсолютное достижение на земле в этом отношении нельзя превзойти. И это, несомненно, самый древний среди всех возможных рекордов. Дата его установления совпадает со временем рождения нашей планеты, а творцом является Природа. Речь идет о земной коре.

Твердая оболочка земной коры — литосфера (от греч. слов «литос» — камень и «сфера» — шар) — состоит из различных каменных образований: гранитов, базальтов, известняков, сланцев, песчаников, а также других горных пород и продуктов их разрушения. Литосфера имеет переменную толщину.

По современным представлениям литосфера состоит из трех слоев: верхнего (осадочного), среднего (гранитного) и нижнего (базальтового). Толщина оболочки литосферы меняется от 15 до 70 километров и ограничена сверху атмосферой и гидросферой, а снизу так называемой поверхностью сейсмических разделов Мохоровичича. Существование этой поверхности связано со скоростью распространения упругих колебаний, которые в земной коре имеют величину 6,3 километра в секунду, а миновав литосферу, резко увеличивают скорость своего движения до 7,8 километра в секунду. Это явление скачкообразного изменения скорости сейсмических волн при выходе из базальтового слоя отмечается почти повсеместно. Очевидно, в подошве земной коры существует какая-то поверхность раздела, ниже которой залегают совершенно другие породы.

Первым это обнаружил в 1909 году на Балканах югославский ученый Андрей Мохоровичич, в честь которого сфера раздела и была названа поверхностью Мохоровичича, или границей Мохо,

Таким образом, земная кора с точки зрения строительной механики оболочек — тонкостенная конструкция переменной толщины, для которой отношение радиуса к толщине колеблется в пределах примерно от 100 до 400. И сходство на этом не кончается. Самое удивительное заключается в способности земной коры при нагружении вести себя аналогично строительным конструкциям.

Первые попытки применить теоретические основы науки о прочности — аппарат теории упругости — для объяснения поведения земной коры при морских приливах и отливах были предприняты еще в прошлом веке. Вот что писал по этому поводу в статье «Деформации упругой сферы в связи с вопросом строения Земли», опубликованной в 1910 году, наш соотечественник академик Л. С. Лейбензон: «Вопрос о строении Земли находится в тесной связи с задачей о деформации упругой тяготеющей сферы силами, потенциал которых разлагается в ряд пространственных сферических гармонических функций, причем условия даны на поверхности сферы». И далее он продолжал: «Великому английскому ученому Томсону принадлежит первая капитальная работа в этом направлении... В 1863 г. ... в результате своих исследований Томсон пришел к известному выводу: Земля сопротивляется приливной деформации так, как если бы она имела твердость стали».

Выше уже говорилось, что оболочечные системы способны хорошо воспринимать равномерно распределенные нагрузки, а сосредоточенные силы вызывают большие прогибы в зоне их приложения. Точно так же ведет себя и земная кора. Это наглядно проявляется в процессе создания больших водохранилищ.

При строительстве на реке Замбези в Африке в 1959—1963 годах крупнейшего в мире водохранилища площадью 6,5 тысячи квадратных километров и объемом 170 миллиардов кубических метров в процессе заполнения водоема было зарегистрировано движение земной коры. Высокоточные специальные геодезические измерения показали, что около берега нового водоема земная поверхность прогнулась на 13 сантиметров. Даже на расстоянии 50—100 километров были отмечены прогибы, достигавшие нескольких сантиметров. Под водохранилищем же и вблизи него стали возникать слабые и умеренной силы землетрясения. Такие же явления отмечались при заполнении водоемов в США на реке Колорадо,

на западе Индии и т. д. В нашей стране прогибание земной коры наблюдалось при создании Красноярского и Братского водохранилищ. Установлено, что чем выше столб накапливаемой жидкости, тем больше и прогибание.

Состояние оболочки земной коры непрерывно изменяется во времени. Всем известно о грозно накатывающихся на океанские берега огромных приливных волн, вызванных лунным притяжением. Но, оказывается, приливы и отливы происходят и в литосфере. Из-за приливов и отливов два раза в сутки почва в Москве поднимается и опускается ни много ни мало, а на целых... полметра. Кстати, по современным воззрениям землетрясения происходят вследствие того, что в жесткой оболочке Земли, литосфере, возникают и быстро распространяются гигантские трещины. А это уже область новой интенсивно развивающейся науки — механики разрушения.

Вот к какому выводу пришли недавно швейцарские ученые: площадь их страны уменьшается, а знаменитым Альпам не дает покоя слава величайших вершин мира, и они продолжают расти. Согласно проведенным наблюдениям расстояние между северной и южной границами Швейцарии в год уменьшается на 3 миллиметра, а за тот же период вершины Альпийских гор успевают подрасти на 1,5 миллиметра. Объяснение этому парадоксу дается довольно простое. Земная кора состоит из огромных блоков-плит, находящихся в постоянном движении. Наползая друг на друга на стыках, плиты вызывают различные природные аномалии типа цунами, землетрясения, изменения ландшафта. Швейцария оказалась расположенной на стыке двух плит: африканской и европейской. Африканская плита, двигаясь со скоростью 6—11 миллиметров в год, и оказывается виновницей территориальных потерь альпийского государства.

Путешествует и древний Урал. Медленно, но неуклонно, со скоростью 3—5 сантиметров в год он приближается к Западной Европе. За 200 миллионов лет, а именно таков возраст Уральских гор, они переместились с востока на запад на несколько сот километров.

Известно также, что в ряде районов происходят вертикальные смещения поверхности Земли, приводящие к образованию впадин, достигающих нескольких километров.

Многие законы деформирования оболочки Земли в настоящее время остаются еще загадкой для ученых. Высказываются предположения, что к решению задачи можно будет подойти с позиции общей теории тонкостенных оболочек с учетом, естественно, механических свойств земной коры. Так, образование впадин без явных на то причин, возможно, происходит вследствие ее сжатия под действием гравитационных сил, аналогично потере устойчивости сферической оболочки, нагруженной внешним давлением. В этой связи интересно отметить, что при подготовке проекта экспедиции на Луну американские ученые разработали метод расчета свободно опирающегося экваториального сегмента, нагруженного собственным весом. Полученные результаты использовались при расчете на устойчивость элемента пластмассовой оболочки, подкрепленной перекрестным ортогональным силовым набором, с помощью которой моделировалось поведение поверхности Луны во время посадки космического аппарата.

Ниже поверхности Мохоровичича располагается следующая оболочка Земли, которая называется мантией. Толщина ее немного меньше 2900 километров. На этом расстоянии прослеживается отчетливая граница раздела, наподобие поверхности Мохоровичича. Ниже этой границы лежит ядро Земли. Условия, в которых оболочка мантии существует на протяжении всей истории Земли, уникальны по температурным режимам и превосходят все известные до сих пор в природе и технике. В верхней зоне мантии температура достигает 1700°, а на границе ядра — около 2500 °С.

Оболочечное строение имеет и спутница Земли — Луна, а также Марс. Слоистое строение имеют и другие планеты земной группы. Связано это с процессом образования планет, заключающимся в дифференциации материала при формировании оболочек и ядра.

И все же если посмотреть на оболочки с более общих позиций, включая в это понятие только геометрическое содержание, то гигантская «конструкция» земной коры (литосферы) не является абсолютным рекордом естественных оболочечных построений, известных человеку.

Поверхность Земли окружена тонкой газообразной оболочкой — атмосферой, состоящей из азота, кислорода и небольшого количества аргона, водяных паров (по-гречески «атмос» — пар), двуокиси углерода и некоторых

других газов. Газовая оболочка Земли — чрезвычайно изменчивая система, находящаяся под воздействием многих факторов земного и космического происхождения. Точку верхней границы оболочки атмосферы указать нельзя, так как плотность воздуха непрерывно убывает с высотой, приближаясь к плотности материи, заполняющей межпланетное пространство. Поэтому о толщине газообразной оболочки можно говорить лишь условно. Однако с точки зрения «конструкции» оболочечных систем важно, что атмосфера имеет ярко выраженное слоистое строение. В настоящее время выделяют три слоя: тропосфера (ее граница на уровне экватора 16—18 километров, в полярных широтах 7—10 километров, содержит более 70 % всей массы атмосферы), стратосфера (простирается от тропосферы до высот порядка 80 километров, содержит 20 % общей массы атмосферы) и ионосфера (ее масса менее 0,5 % всей массы атмосферы). Каждая из этих оболочек характеризуется своими физическими особенностями, определяемыми в первую очередь взаимодействием между частицами газов, их образующих, и поступающим в атмосферу излучением.

Газообразные оболочки — это особый вид оболочечных построений весьма малой удельной плотности, к которым нельзя подходить с позиций общепринятых гипотез, апробированных при расчетах на прочность твердых тел. Сегодня наука о прочности не занимается разработкой теоретических основ расчета таких построений. Но как знать, может быть, в самом недалеком будущем придется научиться рассчитывать условия существования газообразных оболочек. Возможно, они будут необходимы человеку при посещении других планет.

Гидросфера и атмосфера — внешние оболочки Земли. Вместе с литосферой это широко известная триада сфер-оболочек. Но, рассматривая оболочечные системы нашей планеты, нельзя обойти молчанием самую главную оболочку, в которой творит великий мастер — природа. Эта оболочка — биосфера, представляющая собой пространство, в котором осуществляются процессы органической жизни («биос» по-гречески — жизнь). Биосфера охватывает атмосферу (и в первую очередь ее нижние слои), гидросферу и верхнюю часть литосферы.

Если достижения ракетно-космической техники позволили не только детально изучить строение земных оболочек, но и, вырвавшись за их пределы, приступить

с помощью автоматических межпланетных станций к изучению подобных построений на далеких планетах Солнечной системы, то успехи в исследовании многослойных оболочечных структур Земли, по которым мы «ходим», значительно скромнее. Пока что все познания в этой области носят косвенный характер. Они получены на основании измерений распространения волн и соответствующих расчетов.

Так, один из главных методов изучения земной коры — исследование распространения колебаний, состоящих из продольных и поперечных волн, возникающих при землетрясениях. В каждом типе породы эти колебания распространяются с определенной скоростью, свойственной именно этой породе. Вычислив скорости на основании записей сейсмических станций, геофизики делают предположения о том, какие породы залегают в недоступных пока глубинах. Не ограничиваясь теми катаклизмами, которые происходят в природе, геофизики сами воспроизводят небольшие землетрясения, а также не упускают возможности воспользоваться данными, получаемыми при подземных взрывах.

Прямой эксперимент — штурм глубин с помощью проходки сверхглубоких скважин (а такие скважины бурятся, и самая глубокая из них — у нас в стране на Кольском полуострове) — требует решения многих сложнейших проблем: из каких материалов изготавливать породоразрушающий инструмент, как вести промывку породы на такой глубине, как и чем крепить стенки скважины? Трубы-оболочки из металла, безусловно, не выдержат даже собственную массу, а ведь они еще должны противостоять огромному давлению и высокой температуре. Выдвигается предложение о строительстве гигантских шахт, что даст возможность получать данные не по тонкому столбику керна, приносимого скважиной из глубин, а в натуре изучать обнаженные пласты Земли.

Другое направление проникновения в тайны Земли связано с созданием управляемых подземных кораблей. Такие геологические «подземные спутники» будут прокладывать себе путь, скорее всего, с помощью направленных струй расплавленной плазмы. Как показывают расчеты, на основе этого принципа подземные корабли могут продвигаться со скоростью до 50 метров в час.

Данные, полученные путем прямых замеров, дадут

важнейший материал для изучения свойств литосферы. Аппарат расчета напряженно-деформированного состояния и прогнозирования поведения земной коры будет способствовать развитию теории оболочечных систем.

И все же обсуждавшиеся выше «оболочечные рекорды» Земли, возможно, будут превзойдены гением Человека. В этой связи остановимся на одной из проблем экологии.

Как оградить себя от вредных влияний «отходов технического прогресса» и космических проявлений? Наиболее пытливые умы уже сегодня работают над проблемами будущего. В частности, есть сведения, что рассматривался проект поистине вселенских масштабов. Если возникнет необходимость регулировать «качество» атмосферы, изолировать планету от вредного влияния космоса, то с помощью искусственных спутников якобы можно будет создать на орбите специальную конструкцию мягкой оболочки и облачить в нее Землю.

«Активные» материалы и «активные» оболочки

Высокопрочные и стойкие сплавы, неметаллы и композиты и эффективные оболочечные системы из них — это сегодняшний и завтрашний день техники. А какие новые открытия в этой области сулит человечеству будущее? Гадать трудно. Тем не менее уже сегодня прослеживаются генеральные направления в развитии конструкций будущего. Оказавшись в начале этого пути, человек, как и всегда, обращается за советом к природе. Речь в первую очередь идет о дерзкой даже по сегодняшним меркам идее создания так называемых активных материалов. Какой же смысл вкладывается в понятие «активный»?

Все привычные материалы реагируют на нагрузку одинаково: больше сила — больше напряжение в нем. Недогруженные элементы остаются ненапряженным балластом: материал в отличие от живого организма остается безучастным к тому, в каких условиях работают все части конструкции. А ведь скелет человека чутко реагирует на действующие на него нагрузки. В костной ткани два типа клеток: одни разрушают, удаляют постоянно ненагруженные участки, другие наращивают, укрепляют кость в направлении наибольших напряжений. Опе-

ративное перераспределение материала сообразно изменяющимся условиям эксплуатации пока остается мечтой инженеров. Как за счет внутренних сил придать активность материалу — вопрос будущего. Быть может, будет создан материал, способный поглощать энергию от специального источника пропорционально своей нагруженности — именно так работают мышцы, резко увеличивающие потребление кислорода и питательных веществ под нагрузкой.

На принципе увеличения жесткости в нужном месте можно было бы проектировать корпус самолета. В зависимости от выполняемых маневров менялась бы и конструкция его силовых элементов. Построенные на этой основе сооружения могли бы иметь минимальные размеры. Такому сооружению не будут страшны ураганы и шторм. Конструкции не потребуются большие запасы прочности. Прочность их увеличится или уменьшится, когда в этом появится необходимость. Идея «подпитки» ждет своего звездного часа. К примеру, в оболочке кожуха корпуса доменной печи или фюзеляже и крыльях самолета можно разместить специальные датчики, реагирующие на появление недопустимо больших деформаций или прогибов, температур и вибраций. Специальная портативная электронно-вычислительная машина будет обрабатывать поступающие от датчиков сигналы и оперативно выдавать команды. По этим командам приводятся в действие исполнительные органы, включающие и выключающие из работы дополнительные элементы жесткости и закрепления, с помощью которых снимаются возникающие экстремальные ситуации.

Быть может, будет найден путь глобальной «технологической оптимизации» конструкции путем удаления излишков материала из недонапряженных ее частей.

Словом, у ученых и инженеров работы хватает. «Поверяя алгебру гармонией» — подкрепляя расчетом и подтверждая опытом свои самые смелые замыслы, не забывая учиться у природы и опираясь на мощь современной технологии, конструкторы и материаловеды решают такие задачи, которые еще вчера были уделом фантастов. И это вполне логично, ведь фантазия потому и рождается, что человек, познавая окружающий мир, раздвигает горизонты поиска.

ЛИТЕРАТУРА

- Балабух Л. И. и др. Основы строительной механики ракет.— М.: 1969.
- Бергельсон Л. Д. Мембраны, молекулы, клетки.— М.: 1982.
- Болтянский В. Г. Математика и оптимальное управление.— М.: 1968.
- Величко Е. А. и др. За рудой в глубины океана.— М.: 1980.
- Гордон Дж. Конструкции, или почему не ломаются вещи.— М.: 1980.
- Ермолов В. В. Воздухоопорные здания и сооружения.— М.: 1980.
- Коуэн Генри Дж. Строительная наука XIX—XX вв.— М.: 1982.
- Лебедев Ю. С. Архитектура и бионика.— М.: 1971.
- Лебедев Ю. С. Дом — улитка и другие.— М.: 1983.
- Либерман Е. А. Живая клетка.— М.: 1982.
- Литинецкий И. Б. Бионика.— М.: 1976.
- Патура Ф. Растения — гениальные инженеры природы.— М.: 1979.
- Рейтман М. И., Шапиро Г. С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел.— М.: 1976.
- Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов.— М.: 1957.
- Тонкостенные оболочечные конструкции.— М.: 1980.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
На главной выставке страны (Вместо введения)	5
Что такое оболочка	7
Почему не разрушаются конструкции	11
Форма порождает прочность	38
Алгебра поверяется гармонией	60
Самые популярные конструкции	70
Патенты природы	96
Купол над городом	106
Прочность повышается предварительным напряжением	115
Воздух создает конструкцию	121
В поисках идеальной конструкции	144
Есть ли предел рекордам?	167
Литература	175

Научно-популярное издание

ЛЕВ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ АНДРЕЕВ

В МИРЕ ОБОЛОЧЕК

(От живой клетки до космического корабля)

Главный отраслевой редактор *В. П. Демьянов*

Редактор *В. М. Климачева*

Мл. редактор *Н. П. Терехина*

Художник *А. А. Смирнов*

Худож. редактор *М. А. Бабичева*

Техн. редактор *О. А. Найдёнова*

Корректор *Н. Д. Мелещкина*

ИБ № 7734

Сдано в набор 07.04.86. Подписано к печати 16.10.86. А — 04408. Формат бумаги 84×108¹/₂. Бумага тип. № 1. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 9,24. Усл. кр.-отт. 9,56. Уч.-изд. л. 9,41. Тираж 70 000 экз. Заказ 6-3523 Цена 35 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 867725.

Отпечатано с матриц Киевской книжной фабрики на Головном предприятии республиканского производственного объединения «Полиграфкнига», 252057, г. Киев, Довженко, 3.

