

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ



ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.Н. ШИХИРИН, В.Ф. ИОНОВА, О.В. ШАЛЬНЕВ,
В.И. КОТЛЯРЕНКО

ЭЛАСТИЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И КОНСТРУКЦИИ

Монография



ИЗДАТЕЛЬСТВО
Иркутского государственного технического университета
2006



УДК 621.8+624.074: 539.37
ББК 22.251
Ш 65

Шихирин В.Н., Ионова В.Ф., Шальнев О.В., Котляренко В.И.
Ш 65 Эластичные механизмы и конструкции. Монография. – Иркутск:
Изд-во ИрГТУ, 2006. – 286 с.

Книга может быть полезна студентам, аспирантам, научным работникам и инженерам, занимающимся конструированием, эксплуатацией эластичных механизмов, аварийно-спасательного и инженерного оборудования и исследованием их свойств.

Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.П. Кольцова

JSBN № 5-8038-0386-3

© Коллектив авторов, 2006
© Иркутский государственный
технический университет, 2006

Мягкие оболочки после 90-х годов почти не упоминались в печати по разным причинам. Одной из них явилась сложность традиционной теории мягких оболочек, основанной на математическом подходе к деформированию поверхности, при условии неравности сплошности рабочей среды.

Смена поколений инженеров-проектировщиков привела к возрождению интереса к данному направлению в технике. Новые подходы к проектным расчетам, моделированию, конструированию потребовали расширения подходов к теории оболочек.

Благодаря любезности руководства ИрГТУ на его территории был организован центр торовых технологий, создается научно-учебная база, привлекаются к работе квалифицированные специалисты из разных отраслей промышленности. Постоянно действующие научно-практические конференции способствуют возрождению и развитию научных школ и уникальных разработок.

Авторы выражают благодарность ректору ИрГТУ доктору технических наук, профессору И.М. Головных, доктору химических наук, профессору С.Н. Евстафьеву, доктору технических наук, профессору В.П. Кольцову, коллективу преподавателей университета за помощь и поддержку в создании этой книги.

Надеюсь на дальнейшее сотрудничество.

*Президент фирмы «Elastoneering»,
Чикаго, США
Валерий Шихирин*

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Глава 1. МЯГКИЕ ДВИЖИТЕЛИ.....	9
1.1. МЯГКИЕ ОБОЛОЧКИ КАК ИНЖЕНЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ.....	10
Этапы развития оболочечных конструкций. • Систематизация мягких оболочек по условиям эксплуатации и назначению. • Влияние вида рабочей среды на конструктивные особенности мягких конструкций. • Надежность и долговечность мягких оболочек. • Проблемы и неопределенности мягких оболочек. • Выводы.	
1.2. МЯГКАЯ ОБОЛОЧКА КАК ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА.....	22
Эксплуатационные свойства мягких оболочек. • Функциональные свойства оболочечных конструкций. • Силовые свойства пневматических конструкций. • Эластичные механизмы. • Мягкая оболочка – элемент эластичных механизмов. • Выводы.	
1.3. ЭЛАСТИЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ КАК ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.....	42
Мягкие защитные конструкции в экстремальных ситуациях. • Мягкие функциональные конструкции. • Эластичные силовые механизмы. • Мягкие опоры и каркасы. • Миниподъемники. • Конструктивные особенности миниподъемников. • Характеристики мягких подъемно-транспортных механизмов. • Выводы.	
1.4. МЯГКИЕ ДВИЖИТЕЛИ.....	68
Природные основы происхождения движения. • Систематизация эластичных движителей. • Движители, приводимые в действие ветром. • Движители, воздействующие на воду. • Эластичные тороидные движители. • Эластичные преобразователи мускульных усилий. • Новая концепция амфибийных транспортных средств нетрадиционной конструкции. • Выводы.	
1.5. МЯГКИЕ ТОРОИДАЛЬНЫЕ ДВИЖИТЕЛИ В ТРАНСПОРТНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ	87
Торовые технологии и эластичная механика. • Обоснование применения. • Принцип действия и свойства тороидального движителя. • Процесс перемещения тороидной опоры над препятствием. • Преимущества мягкого тороидного движителя. • Выводы.	
Глава 2. МЯГКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	95
2.1. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	98
Обоснования для создания интеллектуального материала. • Использование функциональных особенностей полимерных связующих. • Роль текстильных наполнителей. • Функциональные особенности и строение натуральной кожи. • Выводы.	
2.2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	107
Композиционные материалы и компаунды. • Эластичные композиционные материалы. • Резино-ткане-пленочные композиции для аппаратов легкого воздуха. • Мягкие функциональные материалы. • Мягкие конструкционные материалы. • Технические требования к эластичным конструкционным материалам. • Выводы.	
2.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТКАНИ И ИХ СВОЙСТВА.....	119
Свойства технических волокон. • Характеристики нитей (корда). • Ткани в композитах. • Материалы для мягких пневматических конструкций. •	

Особенности использования прочностных свойств армирующих тканей. •	
Выводы.	
2.4. ЭЛАСТОМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ИХ СВОЙСТВА.....	136
Структура эластомеров. • Свойства эластомерных покрытий. • Свойства термо-эластопластов. • Свойства пластомеров. • Свойства полимерных пленок. •	
Выводы.	
2.5. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯГКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СОЕДИНЕНИЙ.....	148
Особенности конструирования мягких композиционных материалов. • Способы изготовления резинотканевых материалов. • Адгезионные композиции. • Способы соединений эластомерных армированных материалов. • Клеевое соединение. • Сварное соединение. • Другие типы конструктивных соединений. • Технические и технологические свойства конфекционных клеев. •	
Выводы.	
Глава 3. ТОРОВАЯ (ТОРОИДНАЯ) ТЕХНОЛОГИЯ.....	166
3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ.....	168
Формообразование методом раскроя. • Формообразование методом каркасирования. • Формообразование методом деформирования. • Формообразование методом закрепления. • Многопролетные строительные сооружения. • Двухслойные оболочечные конструкции. • Трансформированные мягкие оболочки. • Составные геометрические формы. • Оболочки управляемых форм. • Формообразующие конструкции целевого назначения. • Влияние вида рабочей среды на формообразование оболочечных конструкций. • Выводы.	
3.2. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТОРОИДНЫХ ОБОЛОЧЕК.....	195
Систематизация тороидных оболочек. • Классификация форм и конструктивных отличий эластичных тороидных механизмов. • Схемы и задачи устройств и машин с использованием тороидных оболочечных конструкций. • Определение механизма натяжения мягких тороидов. • Определение физических и геометрических параметров тороидных оболочек. • Тополого-геометрический принцип классификации поверхностей раскроя тороидных оболочек. • Выводы.	
3.3. ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЯГКИХ СИЛОВЫХ ОБОЛОЧЕК.....	215
Новый подход к разработке промышленной технологии сборки мягких оболочек. • Основные приемы повышения прочностных характеристик силовых мягких оболочек. • Способы изготовления рукавных тороидных оболочек. • Раскрой и сборка цилиндрических тороидных оболочек. • Раскрой и сборка конических тороидных оболочек. • Выводы.	

Глава 4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛАСТИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ233

4.1. ОСНОВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЯГКИХ ОБОЛОЧЕК.....	238
Физические свойства рабочей среды. • Роль энергетического состояния среды в процессе формообразования мягкой оболочки. • Роль энергетических свойств материала в процессе формообразования мягкой оболочки. • Обоснование расчета главных напряжений мягких оболочек. • Зависимость натяжения мягкой оболочки от соотношения геометрических размеров. • Опре-	

деление условия складкообразования. • Приведение различных форм мягких оболочек к пузырьковой модели. • Выводы	
4.2. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МЯГКИХ ОБОЛОЧЕК.....	256
Исследование влияния геометрических параметров мягкой оболочки на конфигурацию силовых линий напряженности сжатой газовой среды. • Исследование овалов Кассини как математической модели формообразования мягких оболочек. • Построение меридиан деформированной сферы • Анализ кривых деформированной сферы. • Круги Мора как модель одноосного напряженного состояния. • Выводы.	
4.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЭЛАСТИЧНЫХ ТОРОИДНЫХ МЕХАНИЗМОВ.....	270
Разработка методики проектного расчета конического тороида. • Определение предельного натяжения от внутреннего давления. • Определение натяжения от собственной массы. • Определение натяжения от разности плотности рабочей и окружающей среды. • Определение натяжения от температуры окружающей среды. • Определение геометрических параметров тороидных оболочек. • Определение площади поверхности тороидов. • Выводы.	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	279
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	281

ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге изложен многолетний опыт создания и исследования мягких оболочек, эластичных пневматических конструкций, мягких конструкционных материалов и, так называемых, торовых технологий и перспективы их использования в промышленности.

К эластичным механизмам (механизмам с эластичными элементами) относятся мягкие, предварительно напряженные избыточным давлением рабочей среды, оболочечные конструкции. Торовые технологии включают методы проектирования, раскроя и сборки мягких оболочек любых геометрических форм (сфера, цилиндр, тороид).

В книге содержится обзор информации, собранный в различных отраслях промышленности, и систематизация сведений по мягким оболочкам. Рассмотрены различные конструкции эластичных механизмов и торовых технологий, их свойства и конструктивные особенности.

В связи с проявлением повышенного интереса к свойствам эластичных механизмов в последнее время появилась острая необходимость в создании учебной базы эластичных механизмов в строительстве, машиностроении, материаловедении, электронике. Авторы книги, являющиеся научными сотрудниками различных областей науки и техники, что данное издание – это только первая «ласточка» в череде последующих книг и других публикаций, необходимость в которых давно назрела. Выражаем искреннюю надежду, что собранный материал послужит не только справочным и учебным изданием для специалистов, непосредственно занимающихся изготовлением и изобретением мягких пневматических конструкций, но и поставит ряд конкретных теоретических и практических вопросов перед учеными, работающими в смежных отраслях науки.

В современном мире научно-технический прогресс возможен на стыке различных научных сфер: физики, химии, механики, электроники, информатики и техники, где и «располагается» отрасль, занимающаяся изготовлением мягких оболочек. Сначала были аэростаты, потом спасательные средства, затем инженерные конструкции специального назначения.

Начиная с 60-х годов прошлого столетия инженер-исследователь Р.З. Кожевников предложил ряд изобретений, основанных на использовании тороидных мягких оболочек.

Появление высокопрочных, высококомодульных, податливых деформациям синтетических материалов позволило создать группу эластичных механизмов и пневмодвижителей, а также развить целое направление тороидных устройств и технологий. Оказалось, что подобные конструкции применимы в самых различных областях и имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными механизмами, в частности, экономичное энергопотребление, экологическая чистота, малый вес, простота обслуживания и удобство эксплуатации.

Мягкие оболочки – это и биологически и химически стойкие защитные устройства (чехлы, ограждения, упаковка) и торовые целевые механизмы с максимальным числом степеней свободы перемещения (конические, цилиндрические,

тороидные движители), и двухступенчатые мягкие силовые приводы и эластичные механизмы (подъемники, пневмоподвески, элементы робототехники), и т. д.

Однако мягкие оболочки длительное время были дополнением к металлическим конструкциям и выполняли в основном вспомогательные функции. Поэтому конструирование машин и механизмов на основе мягких оболочек требует нового подхода для расчета и моделирования эластичных устройств, принципиально отличающихся от традиционных. Требуется разработка и дополнение к теории механизмов и машин в части механических систем на основе мягких оболочек.

В настоящее время известны: в строительной отрасли – надувные воздушноопорные, пневмокаркасные, тентовые здания и сооружения; в судостроении – паруса, мягкие емкости, эластичные переборки и др. Широко распространены они и как аварийно-спасательное оборудование домкраты, батуты, спасательные плоты, надувные лодки и т.д.

Промышленный «бум» надувных сооружений и пневмоконструкций, а соответственно и сопутствующая ему конкуренция фирм, начавшиеся в 70-х годах, привели к кризису. Некоторые предприниматели из-за некомпетентности не смогли решать конструктивные и технологические проблемы совершенно незнакомого вида сооружений, не сумели обеспечить ни должного качества своей продукции, ни должного уровня эксплуатации. Это, а также ряд частных неопределенностей в проектировании привели развитие этого замечательного технического направления к глубокой депрессии [23].

И вот спустя почти четверть века интерес к пневмоконструированию, похоже, возрождается вновь.

Глава 1. МЯГКИЕ ДВИЖИТЕЛИ

Тенденции современного развития техники направлены на увеличение удельных нагрузок, снижение габаритных и весовых характеристик, расширение функциональных возможностей, повышение надежности выпускаемой продукции на базе новых информационных технологий. Благодаря созданию высококомодульных высокопрочных волоконных материалов оказались возможными новые подходы к решению актуальных вопросов инженерного проектирования. Использование физических свойств такого доступного строительного материала, как воздух или вода, открыли доступ к созданию перспективных проектов на стыке наук: физики, химии, механики, кибернетики. Таким проектом явились предварительно напряженные мягкие оболочечные конструкции.

В результате варьирования предварительным натяжением, избыточным давлением и объемом такие конструкции способны противодействовать внешним силовым нагрузкам и другим воздействующим факторам окружающей среды, совершать механическую работу.

Эксплуатационные свойства этих конструкций зависят от вида рабочей среды, прочностных свойств конструкционного материала, формы оболочки, соотношения габаритных размеров, исполнительных и контрольных механизмов. В процессе эксплуатации такие оболочки выдерживают механические, физические, химические и биологические нагрузки, от которых зависят прочностные свойства и герметичность конструкционного материала. Они могут эксплуатироваться при длительных и кратковременных внешних воздействиях; в статических, квазистатических и динамических режимах нагружения; в условиях сосредоточенной и распределенной, осесимметричной и несоосно приложенной внешней сжимающей нагрузки. Однако мягким является материал, имеющий незначительную изгибную жесткость и способный сопротивляться лишь растягивающим нагрузкам [37].

Отсюда, тонкостенные оболочечные конструкции, материал которых не воспринимает изгиба, сжатия и кручения, – относятся к мягким.

Ответственной за силовые свойства мягких конструкций является упругая текучая, предварительно напряженная, рабочая среда. Разрывная прочность армирующей тканевой основы ограничивает величину рабочего давления. За стойкость к воздействию агрессивной окружающей среды отвечает полимерное покрытие армирующей ткани.

Изготавливаются такие конструкции из резинокордных, резинотканевых материалов, армированных и эластомерных пленок.

В зависимости от требований эксплуатации, типа материалов, вида нагружения применяются соответствующие технологии изготовления мягких инженерных конструкций.

1.1. МЯГКИЕ ОБОЛОЧКИ КАК ИНЖЕНЕРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Оболочка – одна из самых распространенных в природе конструкций. Одно-клеточные и многоклеточные организмы окружает пленка-оболочка. Тело человека и животного заключено в оболочку – кожу. Мускулы – это пучек волокон, заключенных в пленку. Вены – кровеносные сосуды, по которым движется кровь, разгоняемая сердцем.

В защитных оболочках находится Земля, Солнечная система, Галактика. Вихревые потоки газов и жидкости, например, атмосферные циклоны диаметром до нескольких тысяч километров, тоже заключены в невидимые оболочки – силовые поля с равнонапряженными поверхностями – потенциалами.

Важно и то, что в структуре материала этих оболочек находятся информационные и энергетические связи (например, силы межмолекулярного взаимодействия), «датчики и исполнительные механизмы», невидимые центры обработки информации (биолокация), которые не только поддерживают жизнь этих явлений (статика), но и обеспечивают их оптимальное перемещение в окружающем пространстве (динамика) с минимальными затратами энергии.

По-видимому, одним из решений поставленной задачи может стать раздел классической механики – эластичная механика, в основу которой положены природные механизмы.

Например, в принципе действия перистальтики заложена координация с высоким коэффициентом полезного действия, работы мышц пищеварительного тракта живого организма [59, 68].

Такие глобальные природные явления, как течения, волны, ветер, перепад давлений в атмосфере и океане, – результат систематических взаимодействий физических полей, управляемых или координируемых в граничных условиях теми же оболочками.

Этапы развития оболочечных конструкций

По аналогии с природой основным конструктивным элементом эластичных машин или механизмов является эластичная оболочка, заполненная упругой (рабочей) средой, которая под воздействием внешних или внутренних сил постоянно и непрерывно ищет условие энергетического равновесия или равнонапряженного состояния.

Мягкими модельными равнонапряженными сферами являются мыльные пузыри, с помощью которых можно смоделировать любую геометрическую форму, по крайней мере, осесимметричные оболочечные конструкции, а также представить механизм взаимодействия сжатой рабочей среды с замыкающей ее оболочкой и внешними формоизменяющими нагрузками [37].

Что касается свойств воздуха как рабочей среды, то одним из его важных свойств является сжимаемость (или объемная упругость) – изменение объема под действием внешних сил всего заполненного пространства.

Потребность в сжатом воздухе появилась одновременно с выплавкой металлов в древние времена, когда для его получения был придуман один из первых эла-

стичных механизмов – кузнечный мех с ручным приводом. Затем появились поршневые насосы, музыкальные машины типа органа, с кожаными мехами, причем привод осуществлялся не только вручную, но и от водяного колеса.

В первом веке до нашей эры в трактате «Пневматика» греческий инженер и ученый Герон Александрийский описал различные механизмы, приводимые в движение нагретым или сжатым воздухом, а название этого труда стало названием отрасли техники, связанной с использованием сжатого и разреженного воздуха [17].

В последние десятилетия сжатый воздух широко используется в приборостроении для автоматического регулирования контрольных и исполнительных механизмов (в релейной аппаратуре, пневмодатчиках и регуляторах, робототехнике). Например, искусственное сердце – насос с пневмоприводом – оболочечный элемент, который также относится к эластичным механизмам.

Исторически установлено, что до появления электропривода развитие промышленности, строительства и транспорта осуществлялось с широким применением пневмоприводов возвратно-поступательного и вращательного движения с элементами эластичной механики.

С развитием промышленного производства синтетических химических волокон в мировой практике появились качественно новые возможности пневмоконструирования, сначала в строительстве и на транспорте, а затем в других инженерных отраслях. Так называемые пневматические конструкции, основным элементом которых являются оболочки из герметичных материалов высокой удельной прочности, предварительно напряженной избыточным давлением воздуха, обладают упругостью и несущей способностью. Наряду с компактностью и простотой эксплуатации они позволяют решать многие задачи классической механики.

Мягкая (эластичная) конструкция – армированная оболочка заданных размеров и раскройной формы, стенки которой ограничены двумя поверхностями, расстояние между которыми мало по сравнению с остальными размерами, способная воспринимать только растягивающие натяжения под избыточным рабочим давлением, сопротивляться силовым сжимающим нагрузкам и совершать механическую работу [23].

Пневматические конструкции, многообразные по форме и назначению, объединяются общими признаками и требованиями к свойствам конструкционных материалов. У них есть собственная закономерность формообразования, механизма силового взаимодействия, принципов функционирования и оригинальность в эксплуатации. Подобные конструкции обладают комплексом свойств конструкционного материала (прочность, герметичность, эластичность, агрессивностойкость), а также рабочей среды (плотность, текучесть, упругость). В зависимости от сложности решения поставленных задач, различна их оснащенность комплектующими контрольно-исполнительными приборами, от механических клапанов до современной электроники.

При проектировании традиционно выделяются две группы задач исследования: формообразование оболочек под воздействиями внешних нагрузок и предельные состояния под нагрузкой (потери несущей способности и прочности).

«Пневматические конструкции не имеют ни предшественников, ни традиций. В них все ново – и материалы, и принципы функционирования, и характер эксплуатации. Мало того, как строительный объект они не укладываются в привычные представления об инженерных сооружениях, о произведениях строительного, архитектурного искусства» [23].

К строительным пневмоконструкциям относятся, например: воздухоопорные, пневмокаркасные, тентовые промышленные здания и рекреационные сооружения. Это – наливные плотины и акведуки; строительное и монтажное оборудование; аэростаты для сборки металлических куполов, возведения железобетонных сводов, монтажа мостовых пролетов и подводных сооружений.

В результате предварительного натяжения поверхности пневматическим, гидравлическим или механическим способами оболочечные конструкции способны сопротивляться внешним силовым воздействиям (снеговым нагрузкам, ветровому напору, распределенной или сосредоточенной силовой нагрузке).

После снятия предельных деформирующих нагрузок они восстанавливают первоначальную форму и несущую способность, потеря которой сопровождается деформированием поверхности с образованием складки. Управление величиной избыточного давления и объема рабочей среды (жидкости или газа) позволяют создавать различные виды пневмокаркасов, пневмоподъемников, манипуляторов, пневмодвижителей.

Благодаря минимальной массе и транспортному объему, простоте эксплуатации и скорости приведения в рабочее состояние, такие конструкции незаменимы в экстремальных условиях, особенно там, где использование традиционного оборудования невозможно или затруднено. Из-за малой собственной толщины в нерабочем (исходном) состоянии эти оболочки могут закладываться в незначительные зазоры под грузом для его подъема и перемещения (раздвигания), например, при спасательных работах по расчистке завалов от землетрясения. Придание амфибийных свойств некоторым видам наземного транспорта, повышение остойчивости, плавучести грузовым плавсредствам, защита судов при швартовке – достигаются при использовании мягких надувных баллонов. Обеспечение положительной плавучести подводных аппаратов, подъем с глубины затонувших объектов, монтаж и прокладка подводных коммуникаций – это задачи эластичных механизмов [23].

Таким образом, пневмоконструкция – эластичный механизм, состоящий из мягкой оболочки, сжатого рабочего газа, систем: газонаполнения (газогенератора, газопроводящих магистралей, коллекторов); контрольно-исполнительных приборов для программного обеспечения автоматического управления их работоспособности.

Систематизация мягких оболочек по условиям эксплуатации и назначению

С учетом эксплуатационных условий, технических требований, а также принципа мобильности любые конструкции могут содержать такие систематизирующие признаки, как назначение, характер совершаемой полезной работы, конструктивные особенности.

Пневматические конструкции могут использоваться практически в любых условиях эксплуатации. Области использования для них являются энергетика, транспорт, строительная индустрия, добывающие отрасли, новые технологии, информационная, индустрия развлечений и отдыха, аварийно-спасательное оборудование, средства спасения, медицина катастроф [37] (табл. 1.1).

Их эксплуатационные свойства зависят от конструкционных особенностей, вида рабочей среды, требуемой степени защиты и надежности.

По условиям эксплуатации эти конструкции делятся на защитные, несущие, силовые оболочки и мягкие движители. Степень защиты таких конструкций должна возрастать по мере накопления эксплуатационных воздействующих факторов (механических, физических, химических, биологических) и характера совершаемой работы.

Напряженные (тенты, резервуары, мягкие контейнеры) и ненапряженные (чехлы, покрывала) конструкции, предназначенные для защиты или ограждения объектов или полезного груза от воздействия окружающей или агрессивной среды, относятся к защитным. В результате предварительного натяжения поверхности у защитных конструкций появляется несущая способность, сопротивление внешним силовым воздействиям. Например, таким как снеговая нагрузка, ветровой напор, гидронапор, распределенная или сосредоточенная силовая нагрузка.

Несущие – низконапряженные (сохраняющие заданную форму) пневмоконструкции предназначены для обеспечения условий эксплуатации при наличии внешних сжимающих нагрузок. Каркасы, опоры, экраны, ограждения – обеспечивают устойчивое механическое и физическое равновесие системы в экстремальных условиях действия окружающей среды, работоспособность конструкционного материала и соединительных швов под воздействием нагружающих факторов.

Силовые – это высоконапряженные мягкие конструкции, предназначенные для преобразования энергии сжатого газа и совершения работы по перемещению деформированной внешней нагрузкой поверхности оболочки в заданном направлении. Эти конструкции обладают повышенной потенциальной энергией рабочей среды, прочностью, стойкостью к циклическим нагрузкам и защитными свойствами материала оболочки. Мягкие движители представляют собой пневматические силовые механизмы управляемой формы, способные в заданных условиях преобразовывать работу сил давления сжатой рабочей среды в поступательное или вращательное перемещение нагружающей ее системы. Условия эксплуатации эластичных механизмов очень широки: подводные, подземные, наземные, надводные, воздушные, космические, инопланетные.

Таблица 1.1

Условная схема использования эластичных механизмов в различных областях и условиях эксплуатации

Область эксплуатации	Условия эксплуатации							
	Подземные	Подводные	Наземные	Надводные	Воздушные	Космос	Инопланетные	
1	2	3	4	5	6	7	8	
Энергетика	Газгольдеры, газо-, гидрогенераторы,	Приливные ЭС, трубы, затворы	Ветровые ЭС, трубы, ограждения	Волновые ЭС, гидронапорные сооружения, затворы, платформы	Аэростатические ЭС, элементы движителей, платформы	Спутники, отражатели, корпуса, каркасы	Газогенераторы, отражатели, корпуса, каркасы СБ	
Транспорт	Гусеничные, колесные, пневмопривод	Погружаемые емкости, понтоны, корпуса ПС	Амфибии, ТСВП, протодуктопроводы, саморазгружающиеся оболочки	ПС, корпуса, амфибии, пневмодвижители, поплавки	Аэростаты, шары, корпуса, наддувное крыло, парашюты	Элементы станций, ТС	ТС, укрытия, амортизаторы, корпуса, каркасы	
Строительство	Опалубки, домкраты, протдуктопроводы, каркасы	Камеры, пеходы, емкости, понтоны, каркасы, опоры	ВОС, ПКС, пневмоопалубки, емкости, трубоводы, проводы, подъемники	ВОС, ПКС, поплавки, емкости, буи, ограждения, подъемники, погружатели	Аэрокраны, ограждения, протдуктопроводы	Автономные сооружения, переходы, хранилища	ПКС, переходы, контейнеры, хранилища, подъемники, каркасы	
Добывающие производств	Гидроамортизаторы, пуштообразователи, перемычки, крепи	Подъемники, трубопроводы, грузозахваты, хранилища, платформы	Вскрышные оболочки, подъемники, МР, крепи, опоры	Платформы, погрузчики, хранилища, укрытия, транспортеры,	Аэростаты, элементы СБ, шары, антенны	МР, газгольдеры, ловушки	Подъемники, грузозахваты, хранилища, корпуса, каркасы, укрытия	

1	2	3	4	5	6	7	8
Новые технологии	Опалубка, крепи, за-глушки, тру-бопроводы, резервуары,	Обитаемые камеры, пере-ходы, емкости, продуктопро-воды, храни-лища	Подъемники, перегружате-ли, укрытия, хранилища, перемещаю-щие, предо-храняющие	Платформы, элементы ЭС, ТС, ВОС, на-дувные ПС	Элементы до-заправочных систем, грузо-захваты, Аэростаты-краны	Оболочки световодов, манипулято-ры, пере-грузатели	Пневматические строительные конструкции, эле-менты ТС, ЭС, рукава, грузоа-хваты, хранилища
Инфор-мация	Пневмопро-воды, ограж-дения, пере-мычки	Погружаемые буи, огражде-ния	Объемная реклама, ан-тенны, ограж-дения	Буи, боны, ограждения, отражатели	Шары-зонды, теплостаты,	Пассивные спутники. отражатели, зонды	Зонды, корпуса, ПКС, огражде-ния, отражатели
Аварий-но-спаса-тельные средства	Домкраты, пластыри, за-глушки, опо-ры, бандажи	Подъемники, жилеты, пояса, понтоны	Подъемники, опоры, за-глушки, кон-тейнеры, бан-дажи	Плоты, лодки, понтоны, тра-пы, жилеты, костюмы	Дельтапланы, парашюты, баллонеты, шасси на ВП	Амортизато-ры, мягкие шарниры	Элементы систем мягкой посадки, контейнеры, хра-нилища
Меди-цина ка-тастроф	Укрытия, но-силки, чехлы	Компенсато-ры, барокаме-ры, гидрокос-тюмы	Носилки, укры-тия, бандажи-шины, противо-шоковая одежда	Бандажи, кон-тейнеры, кос-тюмы, ТС	Парапланы	Контейне-ры, укупор-ка, мебель	Мобильные гос-питали, укры-тия, ангары
Рекреа-ция	Трапы, тенты, мебель, ат-тракционы, тренажеры	Переходы, па-вильоны, до-ма, аттракцио-ны	Декорации, па-укрытия, па-вильоны, ат-тракционы, реклама,	Аттракционы, укрытия, ТС, реклама, деко-рации	Парашюты, дельтапланы, теплостаты	Тренажеры, мебель, иг-рушки	Ограждения, ук-рытия, хранили-ща, мобильные госпитали

Примечание. ЭС – электростанции; СБ – солнечные батареи; ВОС – воздухоопорные сооружения; ПКС – пневмокаркасные сооружения; ТС – транспортные средства; ВП – воздушная подушка; МР – мягкие резервуары; ПС – плавающие.

Областями использования для них являются энергетика, транспорт, строительная индустрия, добывающие отрасли, новые технологии, информация, индустрия развлечений и отдыха, аварийно-спасательное оборудование, средства спасения, медицина катастроф и др.

Влияние вида рабочей среды на конструктивные особенности мягких конструкций

Рабочая среда в пневматических конструкциях предназначена для предварительного поверхностного натяжения замкнутой мягкой оболочки и придания ей заданных геометрических и физических характеристик. В мягких силовых оболочках упругая среда (сжимаемый газ) и несжимаемая жидкость используются для преобразования работы давления в механическую работу, придания им дополнительных функциональных свойств.

В качестве рабочей среды также используют аэростатический или гидростатический напор (аппараты на воздушной подушке, наливные плотины), и механический способ натяжения (сыпучие твердые вещества, песок, зерно) и другие, которые предназначены для предварительного натяжения незамкнутых (тентовых) оболочек.

Пневмоконструкции могут иметь иные системы газонаполнения, например, быстроприводящиеся газогенераторы химического действия (автомобильные подушки безопасности). Кроме газов легче воздуха (аэростаты), подогретого воздуха (шары-тепlostаты), в качестве рабочих используются различные газы (азот, углекислый газ, пропан), газовые смеси, продукты горения (выхлопные газы), продукты химических газогенераторов. Нагретая вода, пар, смеси жидкостей с воздухом, аэрозоли, суспензии, взвеси (пенопластовых крошек в воде), жидкие продукты химических производств – также являются источником предварительного натяжения поверхности оболочки [59].

Энергоисточниками могут быть насосы, компрессоры, газогенераторы (химические, пороховые), двигатели внутреннего сгорания, вентиляторы (нагнетательные, вытяжные), магистральные газо- и водопроводы. Мягкие оболочки наполняют рабочим газом также от баллонов со сжатым газом, от кислотных газогенераторов и др.

Так, например, в аппаратах легче воздуха (аэростаты, тепlostаты) различных форм, материалов, конструкций и назначения используется в качестве рабочей среды газ с плотностью, меньшей чем у воздуха. Подобные конструкции обладают подъемной силой и используются в народном хозяйстве, спасательных службах гражданской обороны, наружной рекламе [60].

Примером силовых конструкций динамического действия являются кранцевые устройства, предназначенные для предохранения от повреждений соприкасающихся при нормальной эксплуатации плавучих средств. По виду рабочей среды они разделяются на пневматические, гидравлические и гидропневматические. По способу восприятия энергии кранцы делятся на амортизирующие, демпфирующие и комбинированные [37].

Надувные спасательные плоты, например, автоматически наполняются сжатым газом, поступающим из баллона емкостью 5-8 л через систему газораспределения. Каждая секция камеры плавучести снабжена впускным, предохранительным и выпускным клапанами и клапаном для подкачки от ручного меха. Поперечная распорка, дуги, пиллерс надуваются через камеры плавучести. Не возвратные клапаны предупреждают утечку воздуха. Днище обычно надувают вручную. Рабочее давление газа в надувных плотках 0,12 – 0,16 кгс/см². Основное назначение газа – обеспечение плавучести, дополнительное – каркасирование тента [18].

Кроме степени сжатия рабочая среда различается по степени доступности, цене, характеристикам источника рабочей среды (производительность, максимальное избыточное давление, возможность контроля и управления расходом среды).

Таким образом, рабочая среда, от которой зависит энергоемкость, силовые качества, длительность ресурса пневмоконструкций, как правило, должна обладать доступностью, быстротой приведения в исполнение. Ее функциональные (упругие, силовые) свойства влияют на конструкцию оболочки, зависят от источника расхода рабочей среды, системы газонаполнения и контрольно-исполнительных приборов.

Надежность и долговечность мягких оболочек

Показатели и конструктивные особенности пневматических конструкций зависят от конкретных условий эксплуатации и задаются видом нагрузки, характером совершаемой работы, величиной рабочего давления, долговечностью, сроками эксплуатации и хранения. Основные эксплуатационные свойства этих конструкций задаются на стадии проектирования при выборе материалов и способов сборки.

Свойства материалов для мягких оболочек оцениваются прочностными параметрами. Разрывная прочность материала – это растягивающее усилие, вызывающее разрыв образца, приведенное к его погонной ширине. Растяжение материала в момент разрыва характеризуется относительным удлинением. Для резиноканевых материалов, с ярко выраженными анизотропными свойствами разрывная прочность и относительное удлинение в разных направлениях (по основе и утку) различны и зависят от структуры текстиля.

Другим прочностным показателем материала является прочность на раздир. Это нагрузка, вызывающая разрушение (раздирание) стандартного надрезанного образца при растяжении его в разные стороны от надреза, является важной для эксплуатации в условиях циклических воздействий, а также определяет ремонтпригодность изделия.

Прочность связи между защитным (резиновым) покрытием и армирующей (тканевой) основой – это усилие, необходимое для отслоения, приведенное к погонной ширине образца, определяет надежность соединительных (клеевых, сварных) швов.

В специальных случаях необходимо учитывать такие характеристики материалов, как износостойкость, прочность при циклических нагрузениях среды, стойкость к проколам, герметичность. Этим требованиям современные материалы в определенной степени удовлетворяют. Однако вопросы долговечности материалов, а значит и конструкций, зависят от срока службы полимерного покрытия и являются достаточно важными. Современные материалы мягких оболочек являются или материалами (серийными) общего назначения, или специальными материалами, предназначенными, в том числе, для длительной эксплуатации.

Наиболее распространенным покрытием материалов первой группы являются синтетические каучуки, пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ) или хлорсульфированный полиэтилен (хайпалон). Для создания большей долговечности материалов успешно используются фторсодержащие полимеры (тефлон, ширфилл, фэбрасорб) [9].

Требования к материалам при проектировании оболочечных конструкций учитываются в степенях защиты при формировании тактико-технических требований к изделиям и устанавливаются в основном с помощью эмпирических коэффициентов полезного действия [87].

Основными факторами, определяющими прочность, например клеевого соединения материалов, при сборке оболочек являются: соотношение модулей сдвига соединяемых материалов и клеевой прослойки, технологические свойства материалов и клея, форма соединяемых деталей, а также человеческий фактор, влияющий на стабильность свойств соединения и в целом на надежность конструкции.

Для оценки технического уровня конструкции целесообразно пользоваться относительными показателями качества, суммарные значения которых позволяют вводить количественные оценки эффективности конструкций [23].

Таким образом, эффективность и надежность эластичных механизмов зависит от уровня рабочих давлений, прочностных свойств конструкционных материалов и стыков, условий эксплуатации (отсутствие локальных напряжений, агрессивного влияния окружающей среды).

Проблемы и неопределенности мягких оболочек

На примере надувных строительных элементов и конструкций можно проследить общие проблемы пневмоконструирования.

Несущие пневматические строительные конструкции обычно делятся на две совершенно самостоятельные группы: воздущонесомые и воздухоопорные. Функциональное различие между ними заключается в том, что первые являются сравнительно небольшими конструктивными элементами (балками, стойками, арками, панелями), тогда как вторые настолько велики, что представляют собой здания, сооружения. Их эксплуатационное различие в рабочем давлении полезного пространства. Воздущонесомые – тентовые конструкции, смонтированные на надувном каркасе. Рабочее давление под тентом – атмосферное. Воз-

духоопорные – замкнутые, «лежащие» на воздушной подушке, давление в которой избыточное, незначительно превышающее атмосферное для компенсации массы самой оболочки.

Воздухонесомые (пневмостержневые, пневмопанельные) сооружения заметного распространения не получили из-за следующих недостатков. Экономическая целесообразность пролетов таких конструкций ограничена – не более 12 – 15 м. Энергетически сложно обеспечение постоянства достаточно высокого давления в несущих каркасах при недостаточной герметичности стыков и материала.

Это все приводит к завышению их стоимости в 3 – 4 раза по сравнению с воздухоопорными сооружениями.

Рассматривая многочисленные примеры применения пневматических сооружений, можно прийти к выводу, что между формой и их назначением отсутствует сколько-нибудь определенная взаимосвязь. Пневматические конструкции необычных форм появляются, как правило, лишь в тех случаях, когда они используются не просто для перекрытия каких-то помещений, но и для других целей – например, в качестве рекламных экспонатов на выставках. Следовательно, теоретическое многообразие возможных форм пневматических конструкций ограничено практически исключительно простейшими геометрическими формами [23].

Для решения проблемы перекрытия больших пролетов пневматические конструкции, например, только по удельной прочности являются наиболее перспективными, так как они единственные из строительных конструкций сохраняют вес 1 м² материала с ростом пролета. Однако оболочки больших пролетов достигли своих пределов. Дальнейший их рост требует использования сверхпрочных материалов (основного материала, усиливающих элементов, разгружающих канатов) [23].

Другой немало важной проблемой оболочечных конструкций являются энергетические характеристики. Теплотехнические показатели воздухоопорных оболочек очень невысоки. Тонкие оболочки не в состоянии обеспечить такой уровень термического сопротивления. Кроме того, большие поверхности таких сооружений подвергаются воздействию окружающей среды: солнечной радиации, озоновому старению, кислотным осадкам и тому подобному. Свойства обычных материалов должны соответствовать требованиям отражения, поглощения и пропускания солнечной энергии. Это связано как со специальными свойствами тентовых материалов, так и с усложнением конструкции, например, введением второго защитного слоя оболочки.

Проблемы надежности и безопасности пневматических конструкций связаны не только с прочностью и несущей способностью ограждающих конструкций, но и надежностью энергоснабжения (непрерывностью подачи воздуха в нужных объемах и нужного давления). Некоторая неопределенность в отношении пожарной опасности является одним из факторов, сдерживающих распространение пневматических конструкций.

Следует отметить, что привычные категории пожарной безопасности (группа возгораемости, предел и степень огнестойкости) невозможно оценить традиционными показателями. А причиной отказа такой конструкции является разгерметизация и потеря формы. Проблемы пожарной защиты связаны с набором опытных данных о причинах и последствиях экстремальной ситуации, опытно-теоретического исследования модели пожара.

Изучение случаев разрушения воздухоопорных сооружений показывает, что их причиной является не разрыв оболочки, а ее раздир. При этом место начала раздира не совпадает, как правило, ни с одним из мест наибольших растягивающих усилий, найденных в результате расчета. То есть модель разрушения оболочки, основанная на концентрации натяжений в области максимальных радиусов кривизны, не соответствует статистике, не учитывается методами расчетов. В теории мягких оболочек сложилась следующая ситуация: математическая теория не без основания доказывает некорректность и даже несостоятельность элементарной теории, но не дает при этом решения практических задач; неточность формул элементарной теории покрываются достаточно высокими коэффициентами запаса из-за неопределенности нагрузок, непостоянства физико-механических свойств материала, не совсем достоверной расчетной схемы [23].

Попытка получить аналитическое решение может оказаться успешной лишь при самой простой геометрической форме оболочки (цилиндр, сфера), при использовании очень упрощенной системы уравнений и при простейших видах нагружения. Следовательно, область применимости аналитических методов расчета является крайне ограниченной. Единственно приемлемыми оказываются численные методы [23].

Пневмоконструирование встречает на пути развития своего направления определенные трудности как экономического, так и энергетического характера, однако наблюдается и непрерывный рост общего объема применения надувных конструкций. Примером тому является гидротехническое строительство, энергетика, сельскохозяйственная мелиорация, защита от стихийных бедствий и охрана окружающей среды. Улучшение товарного вида, цветовой гаммы материала сделали незаменимыми надувные рекреационные сооружения сезонного типа. И здесь большую роль сыграли конструкционные материалы с ПВХ покрытием, обладающие богатой цветовой гаммой, светопрозрачностью, светостойкостью, способностью сохранять товарный вид в условиях длительного хранения.

В результате анализа эксплуатационных характеристик надувных строительных конструкций установлены некоторые проблемы, решения которых должны в целом повысить эффективность эластичных механизмов.

Систематизация опыта разработки и проектирования мягких конструкций позволяет ввести упрощенные методы их инженерного расчета с использованием методов моделирования. Связь технологических вопросов с экономическими позволяет прогнозировать пути повышения эффективности использования мягких оболочек, прочностных свойств материала, силовых свойств оболочек с

различной геометрической формой. Это позволяет решать уникальные инженерные задачи, повышать качество и надежность. Анализ функциональных свойств мягких оболочек позволит подвести эти эластичные механизмы к общему анализу и синтезу теории механизмов и машин.

Таким образом, интерес к мягким оболочкам как инженерным конструкциям сохранен. В настоящее время достаточно полно изучено их использование в строительной отрасли, транспортном строительстве. Появляются новые машиностроительные технологии с применением силовых мягких оболочек. Пневмоконструирование как направление инженерного проектирования является весьма перспективным и интересным.

Выводы

Пневмоконструкция – это эластичный механизм, состоящий из мягкой оболочки, сжатого рабочего газа, систем: газонаполнения (газогенератора, газопроводящих магистралей, коллекторов); контрольно-исполнительных приборов для программного обеспечения автоматического управления их работоспособности.

Условия эксплуатации эластичных механизмов могут быть самые различные: подводные, подземные, наземные, надводные, воздушные, космические, инопланетные. Области использования для них являются энергетика, транспорт, строительная индустрия, добывающие отрасли, новые технологии, информационная, индустрия развлечений и отдыха, аварийно-спасательное оборудование, средства спасения, медицина катастроф и др.

Рабочая среда, от которой зависит энергоемкость, силовые качества, длительность ресурса пневмоконструкций, как правило, должна обладать доступностью, быстротой приведения в исполнение. Ее функциональные (упругие, силовые) свойства, влияют на конструкцию оболочки, зависят от источника расхода рабочей среды, системы газонаполнения и контрольно-исполнительных приборов. Эффективность и надежность эластичных механизмов зависят от уровня рабочих давлений, прочностных свойств конструкционных материалов и стыков, условий эксплуатации (отсутствие локальных напряжений, агрессивного влияния окружающей среды).

Пневмоконструкции встречают на пути развития своего направления определенные трудности как экономического, так и энергетического характера, однако наблюдается и непрерывный рост общего объема их применения. Примером тому являются: гидротехническое строительство, энергетика, сельскохозяйственная мелиорация, аварийно-спасательное оборудование.

Таким образом, интерес к мягким оболочкам как инженерным конструкциям сохранен. В настоящее время достаточно полно изучено их использование в строительной отрасли, транспортном строительстве. Появляются новые машиностроительные технологии с применением силовых мягких оболочек. Пневмоконструирование как направление инженерного проектирования является весьма перспективным и интересным.

1.2. МЯГКАЯ ОБОЛОЧКА КАК ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА

Эксплуатационные свойства мягких оболочек

С понятием «оболочка» связаны представления о воздушных формах, ассоциирующихся с невесомостью. По аналогии с природой рукотворная мягкая оболочка, заполненная сжатой рабочей средой, под воздействием внешних или внутренних сил постоянно и непрерывно самоопределяется, принимает форму наиболее рационального условия энергетического равновесия и является основным конструктивным элементом эластичных механизмов и машин.

«Оболочки» объединяют также представление о тонкостенности, то есть расстоянии между внешней и внутренней поверхностями, которое чрезмерно мало по сравнению с другими размерами оболочки. Толщиной оболочки принято пренебрегать, как незначимой величиной. Поэтому картина напряжения таких оболочек воспринимается как двухосная, то есть плоская.

Мягкая оболочка в исходном состоянии не имеет собственной формы. В рабочем положении она приводится минимальным избыточным (лапласовским) давлением. В статике под действием внешних каркасирующих и деформирующих нагрузок оболочка принимает новые геометрические параметры, которые в динамике меняют свои значения. Работа давления сжатого газа преобразуется в перемещение напряженной внешней нагрузкой поверхности оболочки, сдерживающей увеличение объема рабочей среды.

Степень напряжения мягкой оболочки зависит от величины внутреннего давления и площади поверхности. Защитные свойства определяются специальными заданными свойствами армирующего материала и эластичного покрытия. Сопротивление деформированию зависит от площади и формы поверхности оболочки, величины давления рабочей среды, модуля упругости армирующего материала.

Мягкие оболочечные конструкции получили широкое применение практически в любых отраслях техники, строительства и транспорта благодаря своим уникальным свойствам: многофункциональность, мобильность, быстрота монтажа и демонтажа, простота эксплуатации в различных условиях, в том числе экстремальных, защитные, силовые, движительные. Они обладают комплексом свойств конструкционного материала: прочностью, герметичностью, эластичностью, агрессивностойкостью, а также свойствами рабочей среды: плотностью, текучестью, упругостью [59].

В процессе эксплуатации мягкие оболочки подвергаются воздействию механических, физических, химических и биологических факторов, влияющих на их прочностные свойства и герметичность.

Виды воздействующих факторов, влияющих на свойства мягких оболочек в экстремальных условиях эксплуатации, приведены в табл. 1.2.

Виды агрессивных сред и чрезвычайных условий эксплуатации мягких оболочек

Виды условий	Воздействующие факторы
Механические	Растяжение, сжатие, изгиб, кручение, разрыв, удар, прокол
Физические	Температура, излучение, старение, вибрация, разряд, шум, осадки
Химические	Растворители, кислоты, щелочи, нефтепродукты, масло, вода, газ
Биологические	Грызуны, насекомые, водоросли, бактерии, микроорганизмы

Исходя из условий нагружения рабочие режимы могут быть статические и динамические, длительного и кратковременного воздействия нагружающих факторов.

В зависимости от требований эксплуатации, типа материалов, величины и интенсивности нагружения применяются соответствующие технологии их изготовления: формование, конфекционная сборка клеевым, сварным, прошитым швом, а также их комбинациями.

Эксплуатационные свойства мягких оболочек зависят от таких конструктивных особенностей, как соотношение размеров, форма оболочки, способ закрепления на опоре, способ снятия растягивающих натяжений и конструкции силовых разгружающих элементов.

Замкнутая оболочка после потери продольной устойчивости приобретает волнистую поверхность со складками на границах растянутых областей. Поэтому в зависимости от соотношения геометрических размеров оболочки подразделяются на бесскладчатые и складчатые. Для складчатого состояния принято условие одноосного напряжения мягких оболочек.

Незамкнутые оболочки, в зависимости от способа натяжения, могут преобразовываться в различные конструкции. Оболочка, напряженная потоком воздуха, относится к парусным (парашютным) конструкциям. Оболочка, сдерживающая гидростатический напор, – мягкая плотина (затвор). Распор от действия сыпучего груза сдерживает мягкая перегородка (переборка). Оболочки, напряженные механическим способом, относятся к тентовым. Систематизация мягких оболочек по конструктивным признакам приведена в табл. 1.3.

В результате предварительного натяжения поверхности пневматическим, гидравлическим или механическим способами оболочечные конструкции способны сопротивляться внешним силовым воздействиям (снеговым нагрузкам, ветровому напору, гидронапору, распределенной или сосредоточенной силовой нагрузке). Регулирование внутреннего избыточного давления и объема рабочей

Систематизация мягких оболочечных конструкций

Мягкие оболочечные конструкции							
замкнутые		незамкнутые					
пнев- мати- чес- кие	гидрав- лические	встав- ные	полу- же- сткие	арми- ро- ван- ные	напор- ные	рас- тяну- тые	свобод- ные
осесимметричные несимметричные составные комбинированные		камер- ные	кар- каси- ро- ван- ные	рукав- ные	парусные парашют- ные кошель- ковые лоточные	тенто- вые	полот- нища пере- борки

среды в их полости позволяет совершать работу по перемещению грузов на заданную высоту.

Автоматическое регулирование давления в различных полостях конструкций управляемой формы дает возможность создавать новые виды пневматических механизмов из эластичных материалов.

По энергетическим свойствам мягкие оболочки можно разделить на защитные, силовые и движительные конструкции.

Защитные оболочки предназначены для ограждения человека и полезного груза от воздействия окружающей среды.

Силовые конструкции, преобразующие энергию сжатой рабочей среды, условно подразделяются на низко- и высоконапорные.

Еще до появления электропривода развитие промышленности, строительства и транспорта осуществлялось с широким применением мягких оболочек в пневмоприводах возвратно-поступательного и вращательного движения.

Многокамерные пневмоконструкции управляемой формы – сильфоны, ласты, надувные гусеницы и колеса; бегущие обшивки поплавков; коаксиальные пневмошарниры и перистальтические приводные мягкие механизмы – это движительные оболочечные конструкции, работающие в динамических режимах.

Таким образом, мягкая оболочка обладает потенциальной энергией растяжения, а пневмоконструкции являются энергетическими системами, преобразующими работы растяжения, давления и объема в работу перемещения, например, сопротивления сжимающих внешних нагрузок. В то же время ни одна из фундаментальных наук не рассматривает мягкие оболочечные конструкции как механизмы.

Функциональные свойства оболочечных конструкций

Мягкие оболочечные конструкции являются многофункциональными. Функциональные различия их зависят от назначения, способов соединений в энергетическую систему, технологических возможностей и ассоциативного мышления конструктора, объединяющего способы конструирования, изготовления, условий использования и получения максимальной эффективности от применения этой системы.

По условиям эксплуатации требуется, чтобы пневмоконструкции стремились к идеальным техническим свойствам: абсолютной прочности, нерастяжимости, минимальным массе и объему в походном положении, стойкости к физическим, химическим, биологическим воздействиям и психофизиологическим условиям. Они должны приводиться в действие в минимально короткое время и функционировать в заданных условиях максимально длительный срок.

По технологическим возможностям оболочечные конструкции обладают работоспособностью при условии значительных перемещений под нагрузкой только при предварительном напряжении силовой оболочки. Поэтому все сопрягаемые элементы должны соответствовать прочностным и деформационным характеристикам конструкционных материалов, а соединительные элементы не должны ухудшать механических свойств основного материала. В условиях эксплуатации пневмоконструкций окружающей средой являются атмосферный газ или вода. Рабочими являются как внутренняя, так и внешняя поверхность мягкой оболочки. Следовательно, оболочка как разделитель внешней и внутренней сред должна учитывать их свойства.

Внешними нагружающими силовыми факторами являются распределенная или сосредоточенная сжимающая нагрузка, внутренними – распределенное по площади внутренней поверхности мягкой оболочки растягивающее избыточное давление рабочей среды.

К защитным относятся средства спасения и защиты: чехлы, упаковка, тенты, перемычки, укрытия и сооружения, элементы ограждения транспортных средств и защитные средства человека.

Аварийные средства спасения предназначены для сохранения жизни человека и оказания помощи пострадавшим, например, пневмоинструменты, коллективные средства спасения, эвакуации и защиты, надувные спуско-посадочные устройства (лотки, трапы, рукава, трубы): плоты, батуты, лодки, тенты и др. К индивидуальным защитным и спасательным средствам относятся, например, изолирующие костюмы, спецодежда, предохранительные приспособления (спасательные жилеты, щитки, коврики, экраны).

Для осуществления спасательных работ во время стихийных бедствий или техногенных катастроф приняты на вооружение портативные силовые эластомерные спасательные инструменты (домкраты, заглушки, пневмопластыри, бандажки), входящие в состав мобильных аварийно-спасательных отрядов. Они также относятся к простейшим силовым (функциональным) механизмам.

Защитные средства различаются по агрессивостойкости, по конструкции, по характеру применения и типу материала.

Классификация средств защиты приведена в табл. 1.4.

При проведении аварийно-спасательных работ перед спасательными подразделениями стоят следующие задачи: спасение человеческих жизней (разбор завалов, поиск пострадавших, оказание оперативной помощи, обеспечение эвакуации пострадавших, обеспечение жизнедеятельности эвакуированных); борьба за живучесть транспорта; временная консервация аварийных объектов; восстановление функционирования пострадавших укрытий и сооружений.

Эти и подобные задачи могут быть решены с помощью пневмоконструкций различного назначения, составляющих их структурных элементов. Чем сложнее система управления и контроля пневмоприводом, тем сложнее их функциональное назначение.

Так, например, пневмоподвески в автомобилях, осуществляющие упругую связь рамы или кузова с колесами, представляют собой силовые мягкие баллоны, заполненные сжатым воздухом. Во многих современных автомобилях регулируемые подвески управляются микропроцессорами, следят не только за стабилизацией положения кузова, но и меняют частоту колебаний, улучшают плавность хода, устойчивость и управляемость автомобиля.

В последнее время в легковых автомобилях применяются подушки безопасности, использующие энергию сжатого газа, наполняющего оболочку в считанные доли секунды.

Эластичные механизмы, как система, состоят из мягкой или оболочечной пневмоконструкции, имеют комплекс энергетических и контрольно - исполнительных механизмов, предназначенных для обеспечения функционирования всей системы. Как механическая система, пневмоконструкция содержит герметичный силовой баллон (оболочку) из эластичного армированного материала и различных силовых и технологических элементов (стяжек, поясов, стыков, каркасов и тому подобное) для крепления и формообразования оболочки.

Мягкая оболочка состоит из резинотканевых деталей заданной конфигурации, собранных в заданном порядке и установленным методом сборки и снабженных технологическими комплектующими деталями (штуцерами, клапанами, фланцами и тому подобное).

Мягкие конструкционные материалы, в свою очередь, также влияют на функциональные свойства оболочек. Велика роль физико-механических и специальных свойств волокон и нитей, технических тканей (теплостойкость, токопроводимость) и эластичных покрытий (негорючесть, агрессивостойкость) в формировании функциональных свойств мягких оболочек.

По технологическим возможностям эластичные механизмы обладают работоспособностью только при предварительном напряжении силовой оболочки, при условии значительных перемещений под нагрузкой.

Эластомерные оболочечные защитные средства

Назначение	Типы конструкций
1. Рекреационное имущество	Туристическое снаряжение, спортивное имущество, аттракционы, элементы интерьера, камуфляж, игрушки
2. Медицинское снаряжение	Иммобилизационные носилки, терапевтическое оборудование, ортопедический инвентарь, мебель, резервуары, емкости
3. Средства индивидуальной защиты	Герметизирующие устройства, изолирующие костюмы: шланговые, скафандры, гидрокостюмы, водолазные рубахи компенсирующие костюмы, спецодежда, жилеты, накидки, тенты, фартуки, экраны, мешки, коврики, щитки, виброизоляторы
4. Мягкая упаковка	Контейнеры, накопители, чехлы, пакеты, бинты, прокладки

Поэтому все сопрягаемые элементы должны соответствовать прочностным и деформационным характеристикам конструкционных материалов, а соединительные элементы не должны ухудшать механических свойств основного материала.

В соответствии с эксплуатационными требованиями эластичные пневмоконструкции должны стремиться обладать такими идеальными техническими свойствами как абсолютная прочность, нерастяжимость; минимальная масса и объем в уложенном (походном) положении; стойкость к физическим (температура, облучение), химическим (агрессивность среды), биологическим (стойкость к биовредителям, микроорганизмам) и психофизиологическим факторам эксплуатации. Эластичные механизмы должны приводиться в действие в минимально короткое время и функционировать в заданных условиях максимально длительный срок.

Таким образом, функциональные свойства оболочечных конструкций как эластичных механизмов зависят от специальных требований к исходному сырью и материалам на стадии проектирования; требований к комплектующим и конструктивным элементам на стадии изготовления; требованиям к их оснащению приводной и контрольно-исполнительной технике в процессе эксплуатации.

Силовые свойства пневматических конструкций

Оболочечная конструкция из мягких материалов, у которой изменение равновесного энергетического состояния сопровождается совершением механической работы, относится к силовым пневмоконструкциям.

Работу может совершать натяжение ее поверхности или растяжение с перемещением сопряженных с ней силовых элементов, или противодействие силовым воздействиям на оболочку внешних объектов. Общим элементом существующих в природе и технике подобных конструкций является предварительно напряженная эластичная воздухо- или водонепроницаемая легкая оболочка из прочных пленочных или армированных мягких материалов.

Предварительно напряженная оболочечная конструкция приобретает несущую способность только при условии натяжения ее поверхности избыточным давлением упругой рабочей среды. При отсутствии силового действия сжатой рабочей среды такая оболочка может обладать только защитными свойствами. После снятия предельных нагрузок она восстанавливает свою первоначальную форму без разрушения.

По сопротивлению внешним воздействующим нагрузкам силовые пневмоконструкции подразделяются на низконапорные и высоконапорные эластичные механизмы. Они работоспособны в области так называемых лапласовых избыточных давлений (0,01–1,0) МПа, относящихся к уровню низких. Принято считать, что такое давление необходимо для преодоления усилия формообразования (изгиба) и компенсации собственного веса оболочки [16].

Силовые оболочечные конструкции получили широкое распространение практически в любых областях техники, строительства и транспорта благодаря своим уникальным свойствам мобильности, простоте монтажа и демонтажа, эксплуатации в различных условиях, в том числе экстремальных, выполнения функций динамических машин.

Например, современным работающим на совершенно новых принципах тенденциям в архитектуре и строительстве вполне отвечают пневматические сооружения, которые являются легчайшими из всех конструкций, созданных человеком за всю его историю.

Традиционно тектонику строительного сооружения определяют те элементы, которые осуществляют передачу усилий от одной части конструкции к другой. В отличие от классической вертикальной системы, определяемой гравитацией, эти сооружения обеспечиваются условиями существования пневматической формы. Поэтому основным условием их существования является замкнутый объем; основным общим элементом ее конструкции является оболочка; рабочим элементом является сжимаемый газ (воздух), источник избыточного давления – компрессор, вентилятор.

В зависимости от функционального назначения пневматические конструкции имеют и другие важные конструктивные элементы: входы, анкерные устройства, силовые пояса, вентиляторные и отопительные установки, усиливающие канаты, диафрагмы, растяжки, соединительные и монтажные швы [58].

Наперекор статичным (деревянными, бетонными или стальными) пневматические конструкции – механическая система, где, без каждого из составных элементов, сооружение не несет заданных функций. Без электроэнергии – бездействуют вентиляторы, компрессоры; отсутствует избыточное давление, распор;

оболочка не может принять рабочую форму; сооружение – выполнять определенное назначение [4, 45].

Надувные оболочечные строительные конструкции различаются, в основном, геометрической формой, а также конструктивными элементами, используемыми для сохранения стабильности формы, обеспечения несущей способности, надежности конструкции.

Несущим элементом всех этих пневматических конструкций по существу является сжатый воздух, поэтому их исполнение должно предусматривать минимальные утечки воздуха и возможность его компенсации. Для создания необходимого внутреннего давления в воздухоопорных оболочках используют преимущественно центробежные вентиляторы, а в замкнутых оболочках (арках) – компрессоры. Для обеспечения бесперебойности работы вентиляторов и стабильности конструкции предусмотрено использование аварийных генераторов, обычно с двигателями внутреннего сгорания.

Мягкая оболочка – основной элемент воздухоопорного сооружения. Она состоит из собственно оболочки с опорным контуром и ряда входящих в ее состав деталей: тентов шлюзов с переходниками, мягких воздухопроводов или патрубков для их подсоединения, мягких обратных и вентиляционных клапанов, узлов крепления силовых элементов и оборудования [22].

Для решения специальных вопросов эксплуатации конструкции надувных сооружений могут выполняться комбинированными: воздухоопорными с пневматическим каркасом или частично открытым внутренним пространством на жестком каркасе. Для расширения функционального назначения пневматические строительные конструкции изготавливаются трансформируемыми, снабженными подъемной и перемещаемой механической системой. Для решения климатических вопросов (обогрев внутреннего пространства) сооружение может иметь двух- и трехслойное оболочечное покрытие.

Воздухоопорные здания относятся к наиболее безопасным строительным конструкциям. Потеря ими несущей способности не сопровождается катастрофическими последствиями, так как любые деформации немедленно восстанавливаются после ликвидации причины их возникновения.

Надежность эксплуатации пневматических сооружений как эластичной механической системы обеспечивается герметичностью оболочки, рабочим давлением воздуха, стабильностью работы вентиляторных и энергетических установок и аварийными энергоресурсами.

Гибкими звеньями системы являются конструктивные элементы: входы, анкерные устройства, силовые пояса, усиливающие канаты, диафрагмы, растяжки, соединительные и монтажные швы.

Следует отметить, что пневматические строительные конструкции получили применение в наземных, подземных, подводных сооружениях. Используются подобные сооружения в космических и межпланетных проектах. Благодаря усилиям пионеров пневмоконструирования эти строительные конструкции в настоящий момент являются наиболее реальными и достаточно изученными направлениями в прикладных строительных науках [22, 45].

Силовые свойства оболочечных конструкций нашли свое воплощение в разнообразных эластомерных силовых спасательных конструкциях (мягких домкратов, заглушек, бандажей, пневмопластырей), опорах, каркасах, опалубках и других приспособлениях, использующих упругую силу сжатого газа.

Таким образом, задавая различные по величине параметры и свойства структурных составляющих, в том числе: упругость предварительное напряжение сжатой рабочей среды; стойкость к агрессивным действиям окружающей среды, энергию активации эластомерного покрытия армированного материала; соотношение размеров, геометрическую форму пневмоконструкции, можно варьировать защитными, механическими, силовыми и энергетическими свойствами эластичного механизма.

Эластичные механизмы

Мягкие пневмоконструкции являются предварительно напряженными (избыточным давлением газа) мягкими оболочечными (каркасируемыми) конструкциями из податливых (несжимаемых) материалов.

Вопросы изучения напряженного состояния подобных оболочек известны в литературе под различными направлениями: статика и динамика мягких анизотропных оболочек [20]; динамика формообразования и напряженно-деформированного состояния парашюта [4].

Однако следует отметить, что попытки применения начальных условий, используемых в традиционной теории тонких оболочек, а также желание упростить решение прикладных задач при моделировании мягких оболочек, сталкиваются с масштабными факторами, устанавливающими величины погрешностей расчета, малыми величинами которых необоснованно пренебрегают. Так, например, исключается влияние рабочей среды на формообразование поверхности оболочки. В то время как характерные размеры частиц среды и расстояния между ними в условиях низких лапласовых давлений являются значимыми, при взаимодействии рабочей среды и мягкой оболочки модель механики сплошной среды является достаточно общей. Учет влияния внутренней энергии среды возможен лишь на основе законов молекулярной механики в масштабах межмолекулярных расстояний.

Рассматривая начальные условия безмоментной теории тонких оболочек, следует обратить внимание на неперемещаемое условие определенной начальной геометрической формы, относительно которой определяются перемещения. Природой формообразования тонких оболочек из жестких материалов явилась собственная жесткость конструкции, что неприменимо для мягких, предварительно напряженных оболочечных конструкций.

Следовательно, в основу механизма формообразования необходимо закладывать условие равновесия системы, состоящей из взаимодействующих оболочки и рабочей среды. А так как в основе этого равновесия лежит уравнение Лапласа, то оно должно отражать энергетическую сущность такого взаимодействия. При этом давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической модели сле-

дует рассматривать как действие центральных сил, действующих на внутреннюю поверхность замыкающей оболочки, то есть взаимодействующих сфер равного напряжения, вписанных в реальную оболочку.

Механика мягкой оболочки, или тонкостенной оболочки их несжимаемых материалов, является разделом прикладной механики и устанавливает закономерность взаимодействия частей и элементов механизмов и машин, содержащих мягкие оболочки или их элементы.

Эластичные механизмы делятся конструктивно на замкнутые, полужесткие, тентовые, мембранные и их комбинации.

Механизмами называются системы, предназначенные для преобразования движения тел с изменением во времени их относительного положения или расстояния между фиксированными точками звеньев, элементов.

Взаимодействие этих материальных точек (частиц, тел), вызывающее изменение их движения или препятствующее изменению их взаимного положения, называется механическим взаимодействием.

Механизмы делятся на простые (однозвенные) и многозвенные. Звеном эластичного механизма является одно или несколько неподвижно соединенных твердых тел (рабочая среда), входящих в состав механизма. Соединение двух соприкасающихся звеньев (сжатый газ – оболочка), допускающее их относительное движение (деформацию формы), образует кинематическую пару.

Совокупность поверхностей, линий и точек звена, по которым оно может соприкоснуться с другим звеном, называется элементом кинематической пары (элементом оболочки). В зависимости от характера соприкосновения звеньев кинематическая пара может быть низшей или высшей. Низшая соприкасается по поверхности оболочки, в то время как высшая по линии или в точке.

Кинематические пары различают: по геометрической форме звеньев (сферические, цилиндрические, конические, торовые, плоскостные и другие), по характеру относительного движения (вращательные, поступательные, вращательно – поступательные), а также по числу степеней свободы. Система звеньев, связанных между собой кинематическими парами образует кинематическую цепь.

Мягкие оболочки – однозвенный эластичный механизм. Например, в зависимости от размеров пластины или геометрических параметров оболочки в конкретных условиях можно учитывать или не учитывать жесткость связей мембраны в определенных направлениях. В отличие от жестких, в зависимости от способа закрепления, кинематические пары эластичных механизмов могут одновременно представлять низшие и высшие [45].

Так, например, на рис. 1.1 представлены сферические ($a - m$), цилиндрические ($n - n$), торовые (p, c) силовые оболочки, различно закрепленные на плоскости. Можно рассматривать соотношение нагружающих внешних и внутренних сил этих оболочек как простых эластичных механизмов.

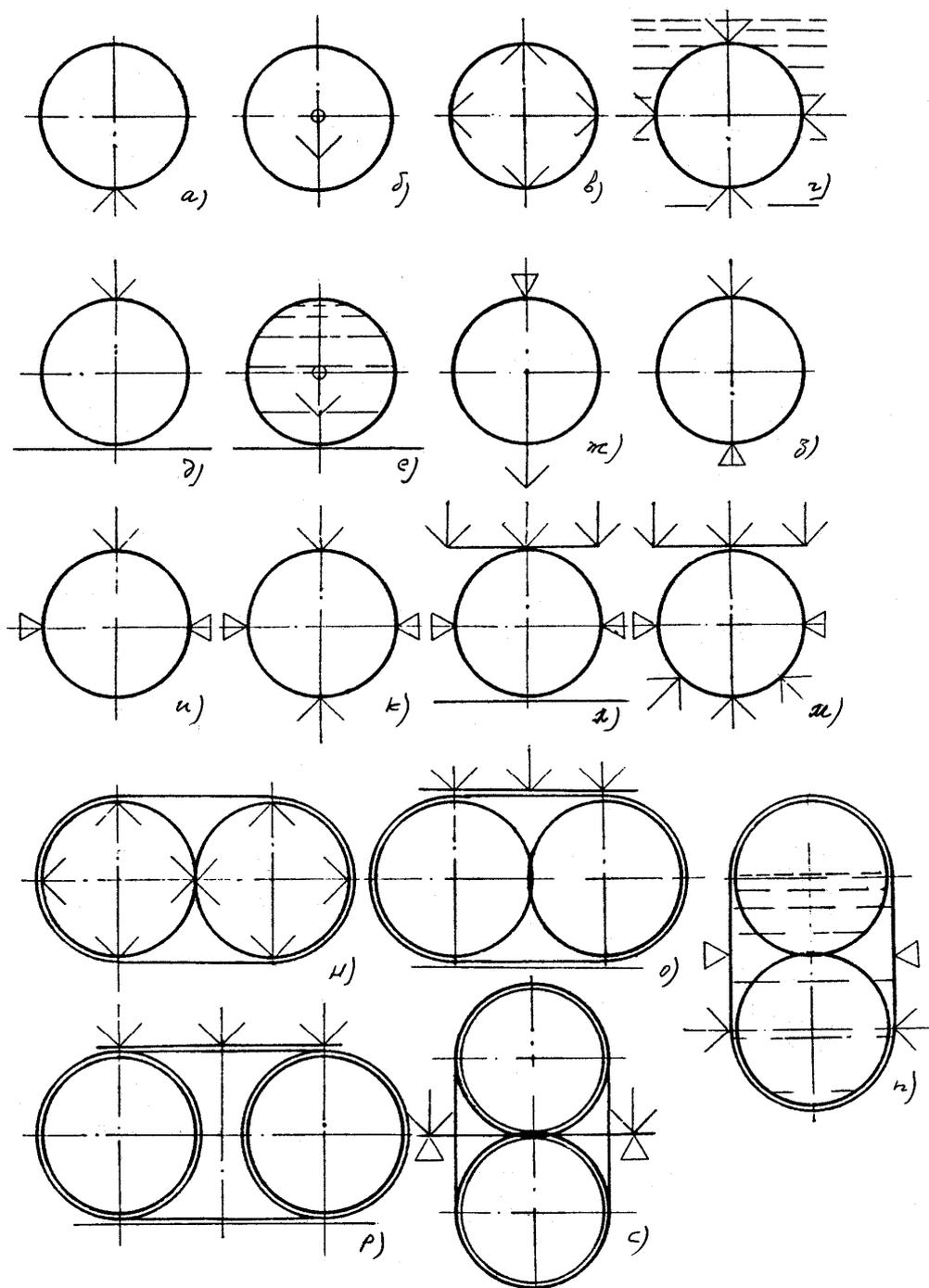


Рис. 1.1. Простейшие эластичные механизмы:

сферические: а – летающие, б – плавающие, в – распирающие, г – запирающие, д – опорные, е – каркасирующие, ж – пульсирующие, з – амортизирующие, и – компенсирующие, к – ограждающие, л – несущие, м – подъемные; *цилиндрические:* н – распорные, о – подъемные, п – рамортизирующие; *торовые:* р – опорные, с – перемещающие

Тогда легко определить механизм энергетического равновесия у свободно висящих (плавающих), свободно лежащих (однозвенных), закрепленных в точке, по образующей (двухзвенные), по плоскости (трех- и двухзвенные), простейших сферических и составных цилиндрических и торовых оболочек.

Все оболочки имеют разные степени свободы перемещения и могут выполнять различные функции (рис.1.2).

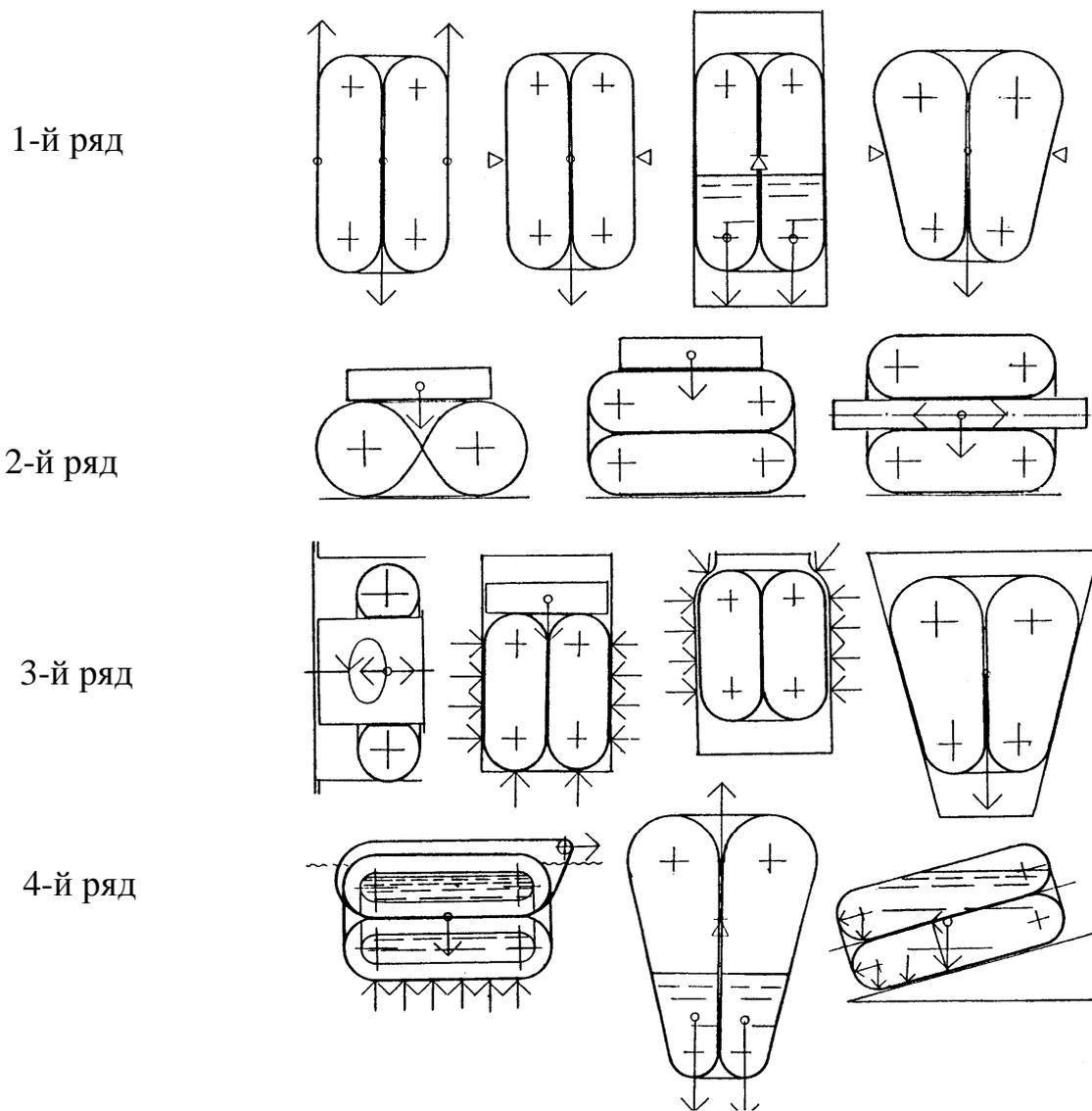


Рис. 1.2. Эластичные тороидные механизмы:

1-й ряд – перемещающие, выворачивающие, подъемные, разжимающие, 2-й ряд – транспортирующие, приводящие, центрирующие, 3-й ряд – запирающие, развальцовывающие, зажимающие, поплавковые, 4-й ряд – буйковые, перемещающие, разгружающие

Свободно висящий воздушный шар или пузырек в водной среде, обладающий подъемной силой, может быть использован в качестве подъемника.

Свободно лежащая, предварительно напряженная мягкая оболочка (d, e, o, p) в силу упругости рабочей среды, обладает способностью деформироваться под действием внешней сжимающей нагрузки и тем самым выполнять функцию мягкой опоры (амортизатора). Однако, не имея узлов крепления на опорной поверхности, такая оболочка обладает подвижностью (перекатывается) под действием смещения центра приложения внешней нагрузки, играет роль катка.

Закрепленные в точке сферические опоры под действием внешних сжимающих сил и внутреннего давления обладают большими перемещениями поверхности и могут быть использованы в качестве манипулятора. Зафиксированные по образующим и по плоскости опоры сферические пневмоконструкции могут выполнять роль силовых элементов подъемника, кантователя, заглушки, пластыря, а также простейших: рычага, клина, пробки, домкрата и других традиционных механизмов.

Цилиндрическая мягкая оболочка (рис. 1.1, 1.2), закрепленная на плоскостях, осуществляет перемещение воздействующей нагрузки вверх и вбок (в первом случае) и только вверх (во втором). Такая мягкая оболочка несет функции опоры, подъемника и кантователя (разгружающего механизма).

Цилиндрическая и торовая оболочки как составные, состоящие из ряда сфер равного напряжения, также могут выполнять роль силовых механизмов, обладая совокупностью дополнительных преимуществ (степеней свободы перемещения). Подобными функциями обладают и другие мягкие оболочки.

По функциональному назначению различают следующие эластичные механизмы: рычажные, клиновые, опорные, каркасирующие, подъемные, разгружающие, заглушающие, поплавковые, пульсирующие, волновые.

Способ крепления может придавать мягкой оболочке одновременно функции звеньев (рычаги первого и второго рода), деталей (баллон, диафрагма, клин, сильфон, пружина, опора и другое), простых механизмов (домкрат, запор, поршень и другое), приводов; движителей, манипуляторов и тому подобное.

Следует различать эластичные механизмы с несжимаемой рабочей средой (жидкостью) – жесткой связью (механическим натяжением) и сжимаемой (газом) упругой или гибкой связью. Многокамерные оболочки управляемой формы, сильфоны, ласты, надувные гусеницы и колеса; бегущие обшивки поплавков; коаксиальные пневмошарниры и перистальтические механизмы – это уже приводные мягкие движители сложной конструкции, работающие в динамических режимах.

Эластичные механизмы, снабженные электронной системой контроля и управления, – это уже роботы и манипуляторы.

Таким образом, функциональные требования и задачи традиционных механизмов могут быть решены с помощью пневмоконструкций различного назначения, обладающих комплексом свойств составляющих элементов.

Прочность и растяжение армирующей основы, герметичность, эластичность и агрессивостойкость эластомерного покрытия, склеиваемость и свариваемость адгезионных соединений, максимальный объем при минимальной поверхности мягкой оболочки, технологичность раскроя при минимальной себестоимости являются элементами конструирования и назначения эластичных механизмов. Автоматическое управление и контроль с помощью высокотехнологических систем, например, интеллектуальных материалов – это уже биоробототехника или кибернетика.

Мягкая оболочка – элемент эластичных механизмов

В условиях эксплуатации окружающей средой мягких оболочек являются вода и воздух, рабочей средой – жидкость или газ. Внешними нагружающими факторами являются распределенная или сосредоточенная сжимающая нагрузка. Воздействующими внутренними нагрузками является распределенное по площади поверхности мягкой оболочки растягивающее избыточное давление рабочей среды. Рабочими являются как внутренняя, так и внешняя поверхность мягкой оболочки.

Важной эксплуатационной характеристикой оболочечных конструкций является также число степеней свободы перемещения системы в пространстве, которое зависит от способа их крепления.

Так, например, свободная оболочка (мыльный пузырь) в пространстве обладает шестью степенями свободы: тремя независимыми поступательными движениями вдоль трех осей координат и тремя вращательными движениями вокруг этих осей.

В зависимости от способа закрепления элементарные оболочки делятся на свободные (висящие, лежащие), закрепленные (в точке, по образующей, на плоскости, по опорному контуру). Способ их закрепления влияет как на формирование мягкой оболочки, так и на их функциональные свойства.

Так как исследование движения какой-либо части машины рассматривается совместно с ограничивающей ее движения частью, рассмотрим стержневую систему как моделирующую мягкую оболочку.

Взаимосвязь частей пневмоконструкции и ограничивающей ее внешней системы осуществляется через предварительно напряженную оболочку. По физической природе система *рабочий газ – оболочка – нагружающая среда* есть бесступенчатый кинематический механизм. Следовательно, можно представить, например, окружность в виде замкнутого четырехзвенника в плоскости сечения сферических осей.

Звенья кинематических пар цепи, в виду подвижности материала в местах соединения стержней, можно обозначить через подвижный шарнир, а количество неподвижных звеньев определяется степенью закрепления.

Отсюда, пространственная стержневая модель сферы может быть представлена стержневым октаэдром (рис.1.3а).

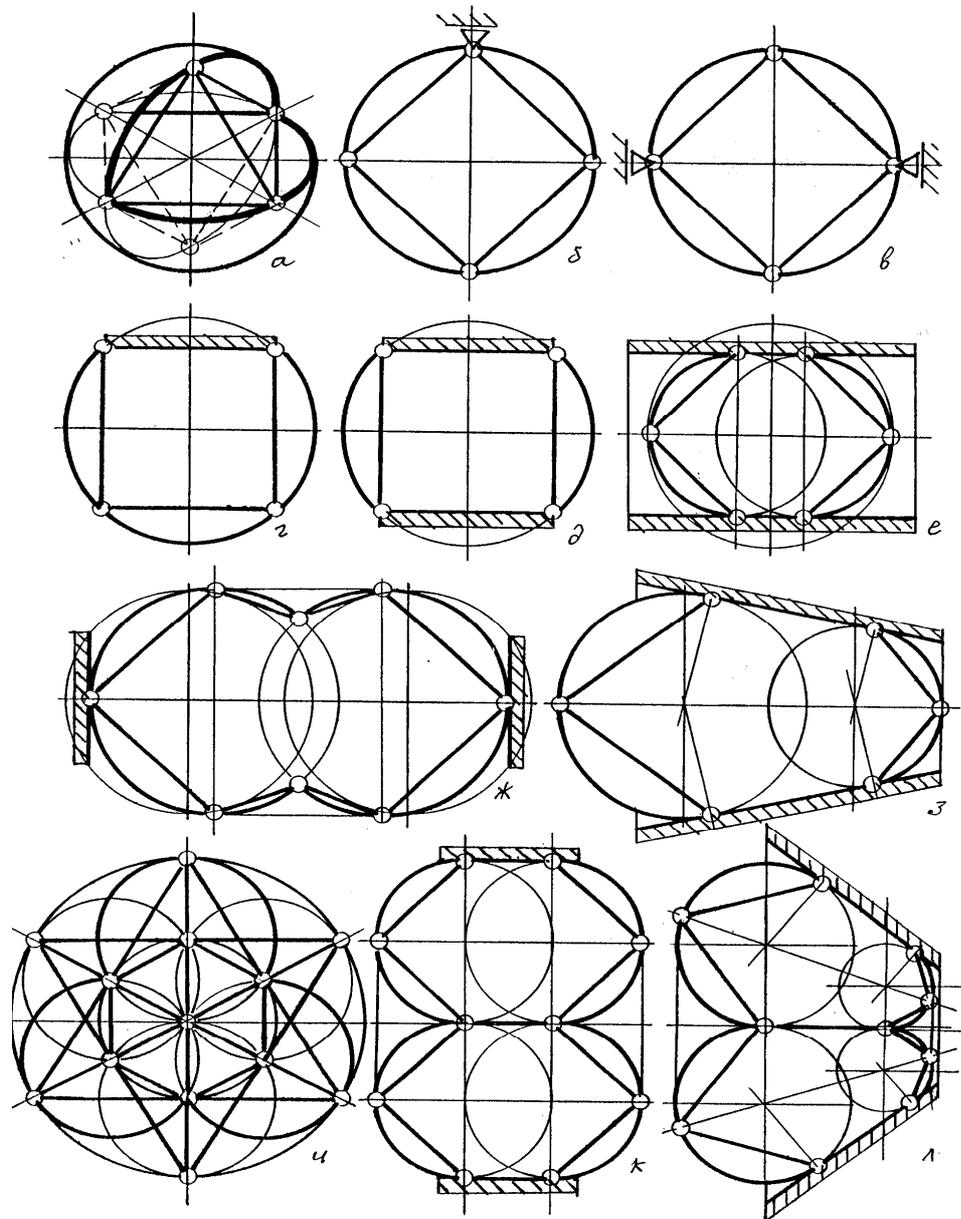


Рис. 1.3. Схема стержневого моделирования сферических оболочек, с различной степенью закрепления:

а – пространственная модель сферы; б – сфера, закрепленная в точке; в – сфера, закрепленная по образующей; г – сфера, закрепленная на плоскости; д – полужесткая сфера, закрепленная между плоскостями; е – сфера, деформированная цилиндрической поверхностью (трубой); ж – цилиндр, деформированный (сжатый) вдоль продольной оси; з – сфера, деформированная конической поверхностью; и – стержневая модель замкнутого тора; к – замкнутый тор, деформированный цилиндрической поверхностью; л – замкнутый тор, деформированный конической поверхностью

Плоская кинематическая цепь сферической оболочки представляет собой шарнирный четырехзвенник с равными по длине звеньями.

Такой механизм характеризуется взаимосвязью звеньев, а его форма зависит от перемещения любого из них на заданный угол. Свободная сферическая оболочка, как уже отмечалось, имеет шесть степеней свободы перемещения, три поступательных и три вращательных.

Закрепление оболочки ограничивает свободу перемещения. Так, свободно лежащая на плоскости сферическая оболочка может перемещаться в одном направлении (вертикально), то есть число степеней равно одному. Сфера, закрепленная в точке, ограничена в поступательном и вращательном перемещении. Отсюда число степеней ее будет также равно единице (растяжение, сжатие).

Закрепление сферы по образующей (экватору) приводит к ее фиксации. Число степеней свободы перемещения у сферы, закрепленной на плоскости, равно – пяти (все перемещения, кроме вращения вокруг вертикальной оси). То же у овалоида. Если сферическую оболочку сжать и поместить в полость трубы, то ее поверхность можно представить в виде цилиндра с полусферическими торцами.

По характеру закрепления такая поверхность имеет сходство со сферой, закрепленной по образующей, и будет иметь возможность перемещения вдоль оси симметрии. Число степеней свободы перемещения свободно лежащего цилиндра – одна. Если цилиндр закрепить по образующей, например, вдоль меридиана, то он сможет перемещаться только поперек оси перпендикулярной плоскости закрепления. Число свобод – одна.

Интересно отметить, что сжатие цилиндра вдоль оси симметрии снимает продольный распор между вписанными сферами равного напряжения и между ними появляется складка вдоль окружной образующей, характеризующая гибкую связь.

У цилиндра, закрепленного на параллельных плоскостях, число степеней свободы перемещения равно одной, поперек плоскости закрепления. Аналогичная картина перемещений конических форм оболочек, которые можно представить как деформированную сферу, заневоленную в жесткую «воронку».

На рис. 1.3 к видно, что в продольном сечении замкнутого тора, в точке соприкосновения вписанных сфер появляется шарнир, обеспечивающий дополнительную свободу перемещения тороидов (выворачивание или наволакивание) вдоль гибких связей. Действительно, свободнолежащий тороид в виде цилиндра (цилиндрический тороид) имеет число степеней свободы перемещения, аналогично тору, равным пяти, плюс перемещение вдоль оси симметрии. Аналогичная картина и для конического тороида.

На рис. 1.4 представлена схема стержневого моделирования мягких тороидных оболочек. Виды воспринимаемых нагрузок мягкими силовыми конструкциями в зависимости от способов закрепления и формы оболочек приведены в табл. 1.5 [68,71].

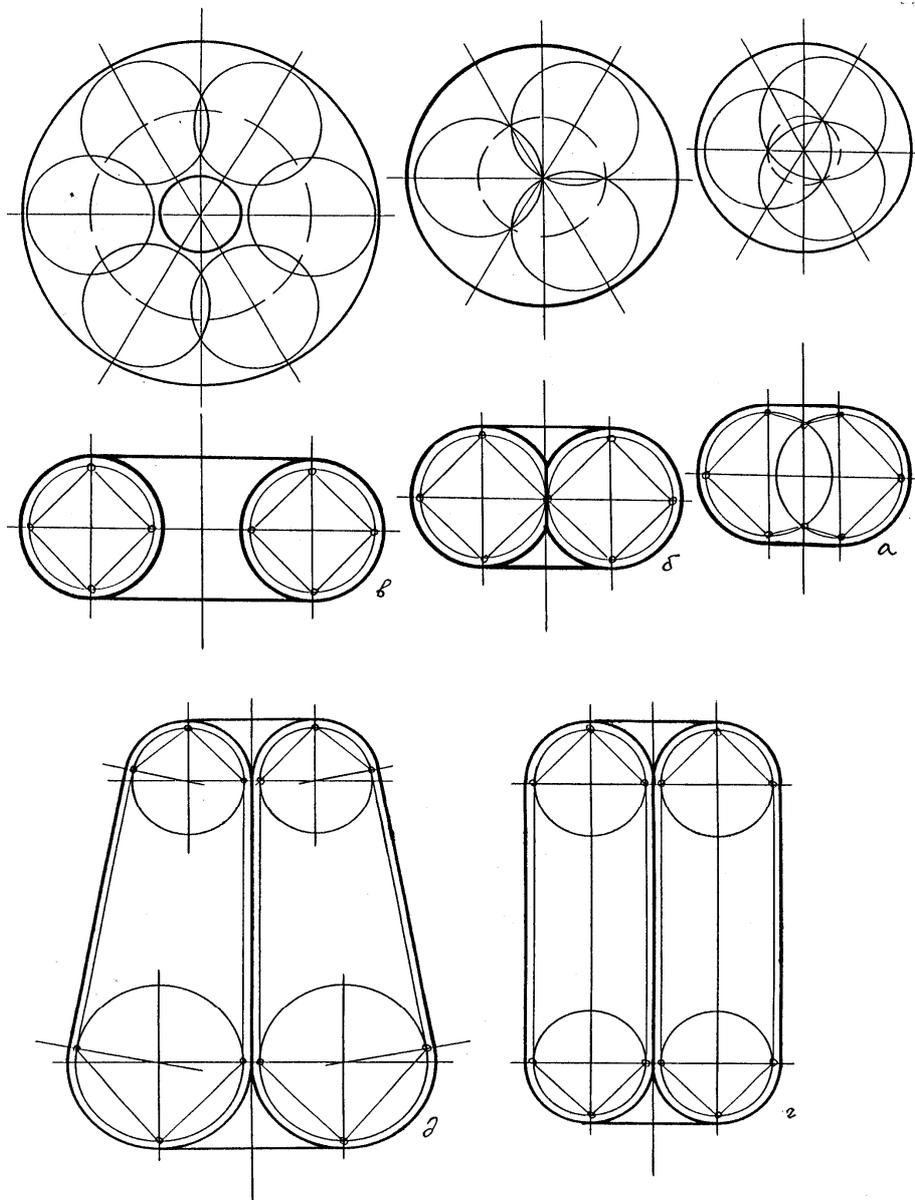


Рис. 1.4. Схема стержневого моделирования тороидных оболочек:
 а – самопересекающегося; б – замкнутого; в – открытого; г – цилиндрического;
 д – конического

Таблица 1.5

Виды нагрузок и число степеней свободы перемещения мягких оболочек

Условия за- крепления Форма оболочки	Свободно лежащая	Закреплен- ная в точке (вантовая)	Закреплен- ная по обра- зующей (раскреплен- ная)	Закреплен- ная по плос- кости (полу- жесткая)
Сфера	Сжатие 1*	Растяжение, сжатие 1	– –	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг 5
Овалоид	Сжатие 1	Растяжение, сжатие 1	– –	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг 5
Цилиндр	Сжатие 1	– –	Растяжение, сжатие 1	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг 3
Конус	Сжатие 1	– –	Растяжение, сжатие 1	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг 3
Тор	Сжатие, из- гиб 3	– –	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг 3	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг 5
Цилиндриче- ский тороид	Сжатие, из- гиб, выво- рачивание 4	– –	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, выво- рачивание 4	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, выво- рачивание 6
Конический тороид	Сжатие, изгиб, вы- ворачивание 4	– –	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, выво- рачивание 4	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, выво- рачивание 6

Примечание. * Цифра обозначает число степеней свободы перемещения.

По принципу действия метод закрепления оболочек сходен с методом каркасирования. Особенностью этого метода является введение крепежных элементов в конструкцию оболочки. Причем жесткое основание, на котором закрепляются оболочки, ограничивают их перемещения при деформировании и могут частично взять на себя несущие свойства пневмоконструкции.

Закрепление оболочек на плоском основании по площади контакта стабилизирует форму деформированной оболочки, регулируя, например, грузоподъемность мягких домкратов. Закрепление боковой поверхности сферической оболочки внутри полости трубы ограничивает формоизменение ее в вертикальном направлении. Аналогично ограничивает перемещения оболочки закрепление ее между плоскостями, по образующей или в точке.

Степень напряжения эластичного механизма зависит от его функционального назначения. Его защитные свойства определяются специальными требованиями к химической, биологической энергетике эластичного покрытия конструкционного материала оболочки, прочностные свойства – разрывной характеристикой армирующих волокон, сопротивление деформированию – площадью поверхности оболочки, ее геометрической формой, степенью сжатия рабочей среды (рис.1.5).

Таким образом, эластичные механизмы сочетают в себе свойства механизмов с упругими элементами и гибкими связями. Однако в отличие от них эластичные механизмы сами являются силовыми элементами и движителями, а механическая работа передается бесступенчато. Она зависит от способа деформирования (количества свободной от контакта поверхности), причем как внешней сжимающей нагрузкой, так и внутренними распорными усилиями, распределенными по свободной поверхности оболочки или перераспределенной по узлам крепления на жестком основании.

Выводы

Оболочечные силовые конструкции получили естественное широкое распространение практически в любых областях техники, строительства и транспорта благодаря своим уникальным свойствам: мобильности, простоте монтажа и демонтажа, эксплуатации в различных условиях, в том числе экстремальных, выполнения функций динамических машин.

В зависимости от функционального назначения отличия мягких конструкций складываются не столько в различии формы и способа изготовления оболочек, сколько в их оснащенности приводной и контрольно-исполнительной техникой. По аналогии с природой, основным конструктивным элементом эластичных машин или механизмов является заполненная упругой (рабочей) средой эластичная оболочка, которая под воздействием внешних или внутренних сил постоянно и непрерывно самоопределяется, стремясь принять форму наиболее рационального условия энергетического равновесия и равнонапряженного состояния оболочки.

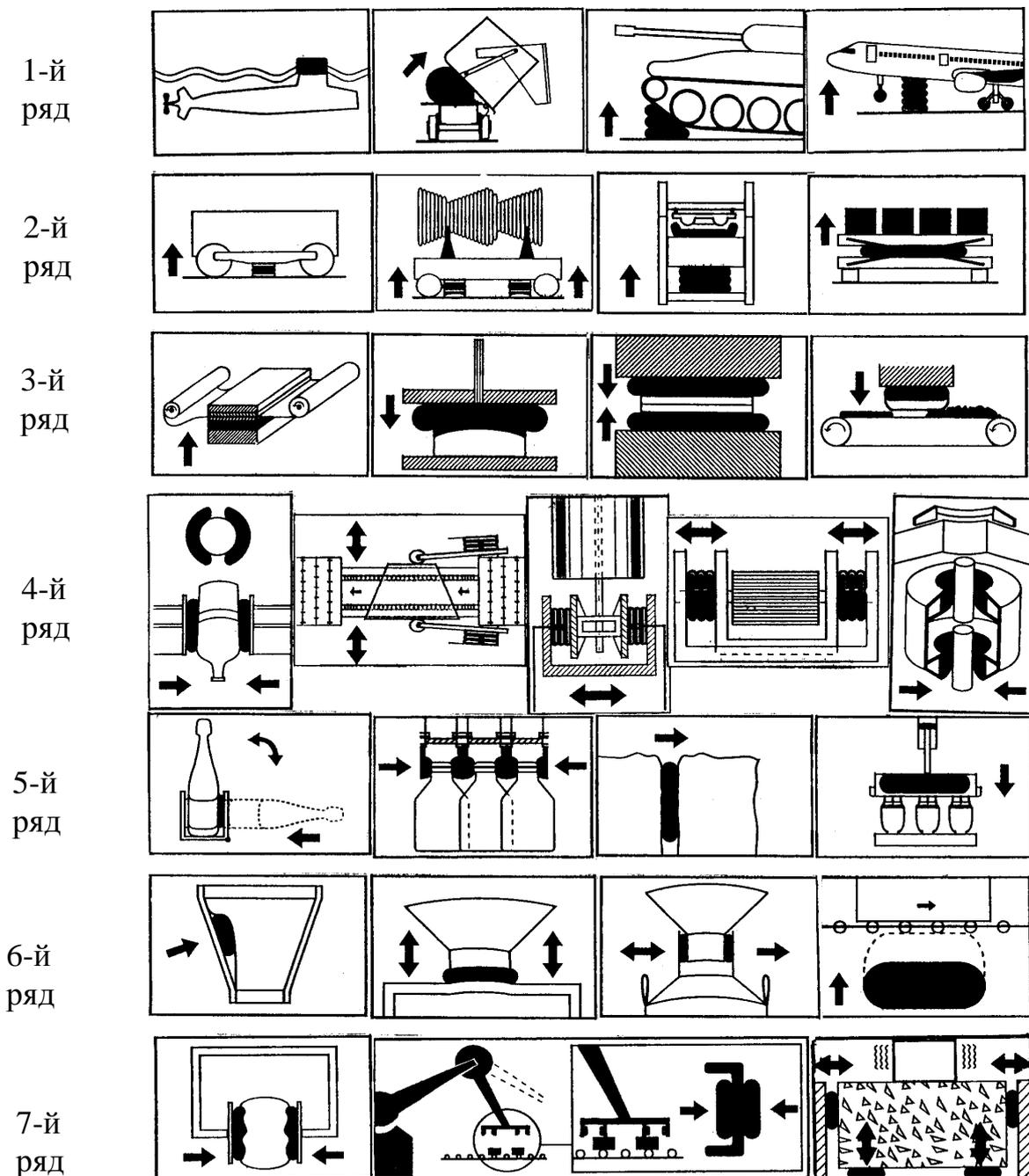


Рис. 1.5. Области использования миниподъемников различного назначения: 1-й, 2-й ряды – аварийные транспортные подъемники; 3-й – 7-й ряды – технологические устройства (прижимные, центрирующие, ограждающие, защитные, амортизирующие, уплотняющие, грузозахватывающие)

Основными особенностями эластичных механизмов является эффективность работоспособности как внешней, так и внутренней поверхности оболочки. Это может быть натяжение ее поверхности, перемещение под воздействием внешних объектов или растяжение сопряженных с ней силовых элементов. Отсюда форма оболочки под нагрузкой все время меняется, особенно в динамических режимах эксплуатации.

В формировании функциональных свойств эластичных механизмов большую роль играют общие и специальные требования к пневмоконструкции, системе исполнения и контроля на всех стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации, а также опыт их эксплуатации.

С учетом приведенной систематизации воздействующих эксплуатационных факторов требования к материалам и пневмоконструкции делятся на общие и специальные, в соответствии с международными требованиями.

По функциональному назначению пневмоконструкции делятся на защитные (ненапряженные или низконапряженные) и силовые (низко- или высоконапряженные).

Наиболее существенные отличия можно найти у энергоемких пневматических конструкций, выполняющих движительные функции. У таких оболочек присутствуют все виды и режимы нагружения, они наиболее сложны конструктивно, их энергозатраты можно оценить по традиционным механическим аналогам, они исполняются с управляемым приводом или без него.

Таким образом, в зависимости от функционального назначения, отличия эластичных механизмов складываются из специальных требований к исходному сырью и материалам на стадии проектирования; требований к комплектующим и конструктивным элементам на стадии изготовления; требованиям к их оснащенности приводной и контрольно-исполнительной техникой в процессе эксплуатации.

1.3. ЭЛАСТИЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ КАК ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Мягкие защитные конструкции в экстремальных ситуациях

Чрезвычайные ситуации, связанные с природными и техногенными катастрофами, как правило, приводят к поражению самого человека или разрушению условий его существования.

Цель защитных мер против катастроф – стремление максимально ограничить вторичные воздействия, а также предохранить от их последствий спасателей, действующих в зонах чрезвычайных ситуаций.

Вредные и опасные факторы, которые в этих ситуациях могут бесконтрольно воздействовать на здоровье людей, вызывая нарушения в их организме, вплоть до смертельного исхода, подразделяются на физические, химические, биологические и психофизиологические (см. табл. 1.2) [59].

Значения параметров поражающих факторов в зонах чрезвычайных ситуаций приведены в табл. 1.6.

Мягкие защитные конструкции, использующие физико-механические свойства конструкционного материала: энергию активации полимерного связующего и армирующего наполнителя; прочность, герметичность и эластичность резиноканевого материала, а также плотность упругость и текучесть рабочей среды, незаменимы в этих условиях.

Эластичные механизмы, элементами которых являются мягкие оболочки, могут эксплуатироваться в различных экстремальных условиях на воде, на суше, под водой, под землей, в воздухе и космосе (см. табл. 1.1). Автоматическое дистанционное управление рабочими параметрами позволяет создавать эластичные механизмы управляемой формы, манипуляторы, движители, приводы.

В производстве эластичных механизмов широко применяются технические ткани на основе натуральных, природных и синтетических волокон. Эластомеры, вулканизаты на основе каучуков различного назначения используются для покрытия тканей и придания им заданных защитных и функциональных свойств с общетехническими и специальными (высокомодульность, негорючесть, электропроводность и другие) свойствами.

Например, по газонепроницаемости резиноканевые материалы на основе дивинилстирольных каучуков следует считать наиболее предпочтительными. Для резиноканевых материалов с такими защитными свойствами, как стойкость к действию света, кислорода, озона, кислот и щелочей, применяют хлоропреновый каучук. Он – негорюч, достаточно газонепроницаем, имеет высокий показатель эластичности (близкий к натуральным каучукам). Высокую износостойкость конструкционным материалам эластичных механизмов придают полиуретановые каучуки в качестве покрытия армирующих тканей. Они обладают также высокой прочностью и эластичностью. Силоксановые каучуки обладают свойствами биологической инертности, свето-, озono- и температуростойкости.

Применение материалов со специальными свойствами позволяет расширить области применения пневмоконструкций в экстремальных условиях, продлевать их срок службы. От геометрической формы оболочек, функциональных и конструктивных особенностей зависит режим, продолжительность их работы, от свойств материала – области применения; от системы управления – отрасли использования.

Наиболее простыми являются защитные укрытия, упаковки, тенты, одежда, медицинские устройства и другие пневмоконструкции. Они, как правило, состоят из незамкнутой (с ненапряженной или напряженной механическим способом) герметичной оболочкой.

Таблица 1.6

Значения параметров поражающих факторов в зонах действия чрезвычайных ситуаций

Характер воздействия	Параметр воздействия	Степень риска		
		незначительная	умеренная	опасная
1	2	3	4	5
1. Расстояние от эпицентра взрыва (при тротиловом эквиваленте, Е, тс), м 10 30 50 100 300 500 1000 2000 5000	Действие ударной волны	1000 1150 1200 1300 1350 1500 1700 1850 2100	900 1050 1100 1200 1250 1300 1400 1550 1700	800 925 975 1050 1100 1150 1300 1400 1550
2. Глубина водного потока, Н, м	Затопление	До 1	1,5	1,5–4,0
3. Скорость водного потока, V, м/с	То же	Около 1	2,0–2,5	2,5
4. Колебание почвы, баллы	Землетрясение	7	8	9

1	2	3	4	5
5. Плотность теплового потока при пожаре, Q, кВт/м ²	Повышенная температура	До 4,2	4,2	Более 4,2
6. Время пребывания в зоне пожара, мин	При влажности, 15–20/17–75 %, и темп. °С: 40 50 60 70	240/1 20 30/15 20/10 10/5	300/180 60/3 0 40/1 5 20/1 0	360/240 90/6 0 60/2 5 35/2 0
7. Обморожение, °С	Низкие температуры, скорость ветра, V, км/час Штиль 5 10	–28,5 –17 –7	– –40 –23	Более –40 –23
8. Время пребывания в воде, мин.	При температуре, °С 25 20 15 10	– До 40 До 20 До 5	– 40 20 5	До 720 40-420 20-240 5-30
9. Концентрация кислот, %	Агрессивные среды	До 20	18– 20	20– 80
10. Концентрация щелочей, %	То же	До 15	15– 20	Более 20

Мировой и отечественный опыт техногенных аварий, происшедших на различных объектах, применяющих и использующих в технологическом цикле радиоактивные вещества, показал, что в результате аварийных выбросов радиоактивных веществ в атмосферу могут возникнуть зоны радиоактивного загрязнения местности с высокими уровнями мощности доз гамма излучения. Масштабы экологических последствий таких аварий существенно зависят от сроков ликвидации их последствий.

При конструировании вместо традиционных стальных и свинцовых материалов для элементов защиты подвижной наземной техники разработан материал на основе высоконаполненных полимерных композиций. В качестве наполнителя в них был использован порошкообразный свинец с содержанием его в материале до 90 %, а также свинцовая дробь и другие материалы и смеси.

Такие конструкции, с одной стороны, обладают защитными свойствами металла, с другой стороны, исключают недостатки чистого свинца как конструкционного материала [52].

Большинство пневмоконструкций медицинского назначения основано на использовании принципа создания местного направленного давления для надежной фиксации поврежденного участка тела. В рамках заданного направления созданы протвошкоковые костюмы, надувные иммобилизационные носилки, медицинские шины, корсеты - реклинаторы, дистракционные корсеты, надувные устройства для фиксации поясничного отдела позвоночника, массажные устройства, чехлы, камеры, в том числе тентокаркасные бассейны, резервуары, мобильные госпитали [41].

Увеличение грузовых автомобильных перевозок привело к расширению производства автопоездов со съемными тентовыми конструкциями. Применение таких конструкций позволяет повысить грузоподъемность автомобиля, снизить его металлоемкость, облегчить погрузочно-разгрузочные работы. С целью повышения эксплуатационных свойств тентов созданы синтетические тентовые материалы, которые обладают значительными преимуществами перед натуральными хлопчато-бумажными и льняными.

Весьма перспективными считаются оболочки, помещаемые в топливные или балластные отсеки танкеров. Они позволяют принимать балласт не обводняя топливо и повышать его запасы, не загрязняя воду. Облегающие емкости – это вкладыши, назначение которых – изолировать конструкции корпуса от наполняющей отсек жидкости. Для этой цели применяются также перекидные диафрагмы для танкеров и нефтенавалочников. В плоскости симметрии отсека укрепляют кромки оболочек, повторяющих форму половины поверхности танка. Когда она прижата к переборке левого борта, в танк можно принимать нефтепродукты. После их слива давлением газа оболочку перебрасывают на другой борт и отсек принимает воду [48].

Подобные диафрагменные конструкции применяются в автомобильном, железнодорожном транспорте, в емкостях и контейнерах.

Синтетические тентовые материалы, представляющие собой полиэфирную или полиамидную ткань с одно- или двухсторонним полимерным покрытием,

имеют высокую прочность, огнеупорность, грибо-, масло-, водо-, свето-, теплоустойчивость. Эксплуатационная долговечность синтетических тентовых материалов в 3 – 5 раз выше долговечности натуральных брезентов.

Здания и сооружения производственного назначения, сельские производственные (птичники, животноводческие фермы) и складские помещения не требуют использования сложных и необычных архитектурных форм. Здесь используются так называемые плоские слаботянутые тенты из тканепленочных материалов, устойчивых к внешним воздействиям, вес которых воспринимается каркасами [11].

При создании микроклимата на строительном-монтажных площадках основные затраты определяются расходами на отопление перекрываемого объема. Поэтому важным является выбор габаритов между ограждением и защищаемым объектом. Для этих целей успешно используются тентовые укрытия. Значительным преимуществом по сравнению с традиционными сборно-разборными конструкциями является многократная оборачиваемость мягких технологических укрытий за срок службы. Она зависит от продолжительности монтажа укрываемого объекта и колеблется от 10 до 50 крат за срок службы, тем самым снижается себестоимость и стоимость эксплуатации изделия.

В настоящее время для тентовых конструкций и сооружений разработаны специальные тентовые ткани с ПВХ покрытием на основе полиэфирных текстилей, которые вполне удовлетворяют требованиям эксплуатации и обладают широкой цветовой гаммой.

Защитные свойства мягких конструкционных тканей с агрессивностойким покрытием нашли применение в изготовлении защитных накидок для химических производств, средств защиты во вредных лабораторных и производственных условиях.

Из прорезиненных и тканей с полимерными покрытиями изготавливают бонные заграждения для локализации разлива нефтепродуктов в районах аварий, защитные чехлы, упаковку, тару.

В экстремальных условиях высоких температур используются термозащитные средства для спасения пострадавших. Огнезащитная и теплозащитная одежда должна обладать светоотражающими, теплозащитными свойствами, которые обеспечиваются специальными материалами.

Как правило, подобные конструкции не требуют высокой герметичности, не испытывают значительных механических воздействий. Основным их требованием является стойкость к физическим и химическим действиям окружающей среды.

Перспективность аварийно-спасательных средств из эластомерных конструкционных материалов объясняется их многофункциональным использованием, универсальностью свойств, широким диапазоном их технических характеристик, простотой конструкции и быстротой приведения в рабочее состояние, незначительной массой и объемом в уложенном (транспортном) состоянии. Значительные изменения объема и площади поверхности приводят эти конст-

рукции к широкому параметрическому ряду их грузоподъемности, запаса плавучести, рабочего объема и удельного давления.

Таким образом, мягкие защитные конструкции обладают функциональными свойствами конструкционного материала и предназначены для защиты персонала и оборудования от вредного влияния, граничащего с нарушением их функциональной деятельности, увеличивают его срок службы. Благодаря защитным свойствам эластомерного покрытия, заложенным в состав полимера, могут быть созданы специальные конструкции, защитные от агрессивных действий окружающей среды.

Мягкие функциональные конструкции

Эластичные конструкции, как энергетические системы, не только реализуют силовые свойства сжатой рабочей среды, но и благодаря физико-механическим свойствам конструкционного материала могут выполнять специальные функциональные свойства, не присущие традиционным механизмам. Это связано с созданием новых материалов на стыке отраслей физики, химии, механики, электроники, биологии, информатики и др.

Над идеей создания больших космических телескопов и антенн, которые можно было бы, компактно сложив, доставить на орбиту на одной небольшой ракете, давно уже работают службы NASA.

В начале 60-х годов эксперименты по дальней связи проводились в космосе посредством отражения радиосигналов от надувного пассивного спутника, подобного спутнику «Эхо-2», диаметром 41 м [97].

Такие структуры могут сыграть большую роль в будущих исследованиях Земли и космоса. Работы по этой тематике, а также по созданию сверхлегких материалов для подобных структур ведутся в Лаборатории реактивного движения космического агентства. В перспективе специалисты NASA собираются развернуть на орбите надувной радиотелескоп диаметром 25 м, который будет использоваться вместе с наземными. Такие мягкие конструкции предназначены для выполнения функций свето- и радиоотражения посланного на них сигнала от какого-либо источника. В данном случае используются свойства формы оболочек и свойства отражающего покрытия конструкционного материала.

Кроме того, космическая архитектура сегодня стала общепризнанной отраслью науки и практики. Предлагаемые сборные трансформируемые строительные комплекты ориентированы на такие технологии, как разворачиваемые панельные соединительные системы, раздвижные модули, складываемые каркасы и надувные структуры. Их преимущества могут заключаться в легкости сворачивания и разворачивания в зависимости от изменения программы.

В связи с началом нового этапа развития орбитальных станций большой интерес вызывают транспортные космические средства малой грузоподъемности. Канадские ракетостроители разработали проект запуска пилотируемого корабля с наполненного гелием шара, поднятого на высоту до 24 км, откуда корабль продолжает полет на жидкотопливном ракетном двигателе [43].

Для оперативной доставки грузов с орбиты предлагается использовать аэродинамические тормозные устройства, представляющие собой сферы из легких материалов (типа «майлар») или надувные двухкаскадные конуса из высокомолекулярного материала (типа «кевлар») с теплозащитным покрытием. На конечном этапе спуска возможно использование парашюта-крыла [44].

Подобные функции эластичных конструкций нашли применение в военной технике, а также средствах информации и связи, например, в радиоотражающих надувных антеннах, мишенях и ложных целях. Легкие, мобильные надувные конструкции являются очень удобными для конструирования имитаторов техники, а их радиоотражающие свойства прекрасно отображают реальные объекты. В радиобуях, а также на спасательных средствах используются световозвращающие материалы и покрытия из ярких сигнальных цветов.

В конце концов, именно портативность, наряду со свойствами материалов, делает незаменимыми надувные аварийно-спасательные средства для быстрого разворачивания и проведения спасательных работ в зонах стихийных бедствий и катастроф.

Функциональными свойствами обладают надувные катера и лодки (рис.1.6).

Все надувные суда по виду движителя делятся на буксируемые, гребные, парусные и моторные. По району плавания различают лодки прибрежного, речного и морского плавания.

Классификация надувных лодок по конструкции основных элементов производится по форме бортов в плане (замкнутая, полужамкнутая, незамкнутая); по количеству баллонов в плоскости миделя (один, два и более), конструкции (эластичное, надувное, жесткое) и расположению днища относительно бортов. По конструкции – на однослойные (монобаллонные) и двухслойные (с наружным чехлом). Монобаллонные (однослойные) суда характеризуются тем, что их внешняя и единственная оболочка выполняет функции как газодержащих, так и плавучих элементов формирующего внешнего каркаса.

Надувные лодки могут иметь механический, буксирующий, парусный или моторный привод, собираться в плоты, использоваться как грузовые баржи.

В зависимости от их функционального назначения подобные пневмоконструкции могут иметь преобладающими те или иные конструктивные особенности: вместимость, быстроходность, грузоподъемность, комфортабельность, стойкость к механическим повреждениям и износу. Они могут нести назначения: спортивных, рыболовных, грузовых, патрульных и других функциональных мягких пневмоконструкций [42].

Другими функциональными мягкими конструкциями являются весьма перспективные мягкие затворы и плотины. Сбросные, регулирующие водонапорные, водопроводящие и другие гидромелиоративные сооружения из мягких конструкционных материалов представляют целое направление мягких оболочечных конструкций.

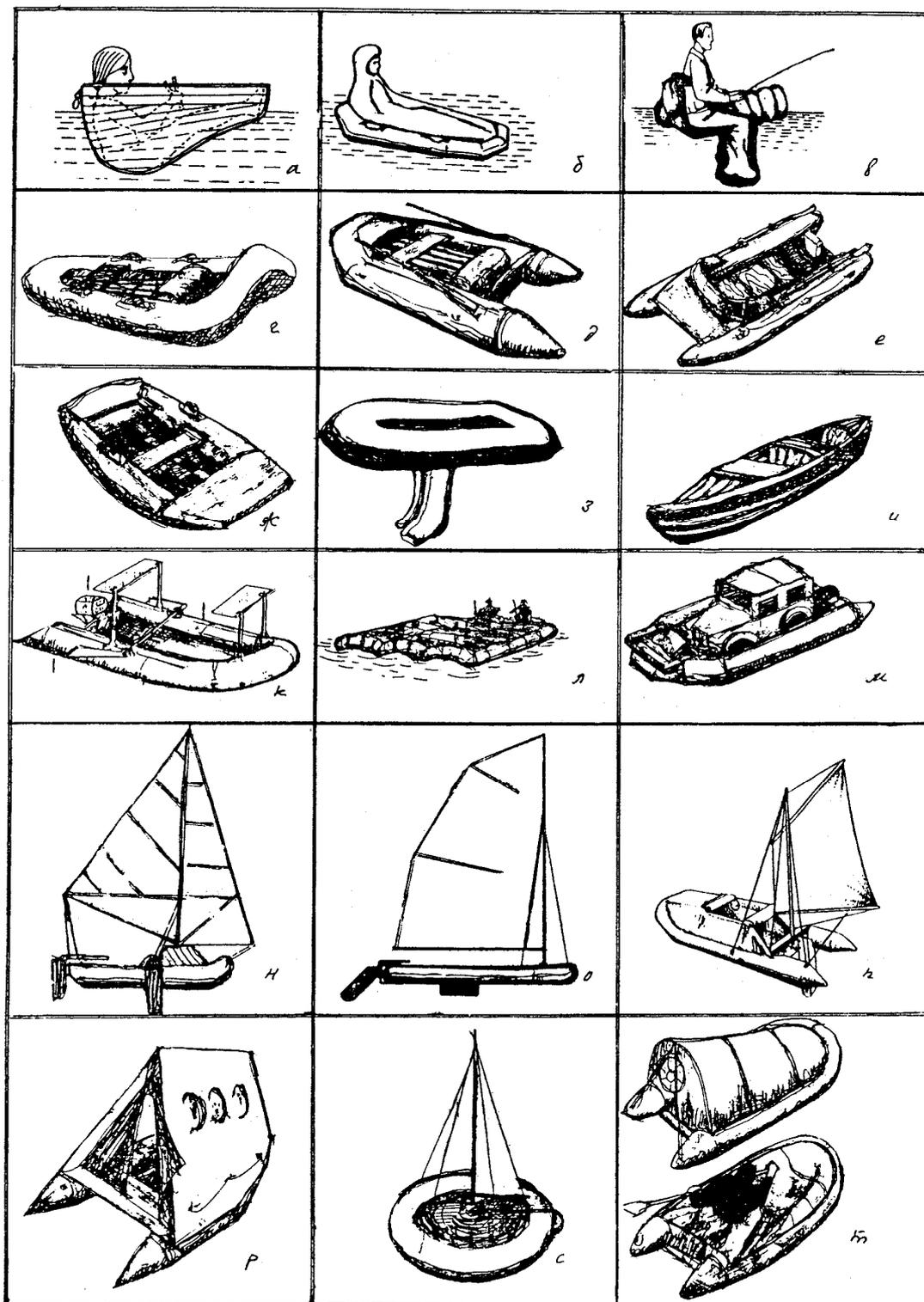


Рис. 1.6. Надувные лодки различного назначения:

а – герметичный чехол (бурдюк), с минимальной плавучестью; б – герметичный чехол с надувным каркасом; в – чехол с дополнительным поплавком; г – ж – надувные лодки с «О», «U»-образным и катамаранным типом корпуса; и – надувная байдарка (скоростная весельная лодка); з – лодка с «ножным» приводом для перемещения по мелководью; к – надувной катер с надводными крыльями; л, м – грузовые надувные лодки; н-п, с – надувные лодки с парусным двигателем; р, т – надувные лодки-плоты

По условиям работы и функциональному назначению можно выделить: водоподпорные, регулирующие, сопрягающие, водопроводящие мягкие гидротехнические конструкции [70].

По форме и конструкции мягкие гидротехнические сооружения можно разделить на наполняемые, мембранные и комбинированные (рис.1.7):

- наполняемые – заанкерованные цилиндрические оболочки, напрягаемые избыточным давлением газа (воздуха), жидкости (воды) и грунта;
- мембранные заанкерованные механически напряженные цилиндрические оболочки, имеющие плоскую или криволинейную форму;
- комбинированные – цилиндрические оболочки со свойствами мембранных или наполняемых с несущими элементами из традиционных материалов.

Другими функциями, такими как герметичность, обладают мягкие газгольдеры, емкости и резервуары.

Таким образом, мягкие конструкции обладают уникальными функциональными свойствами мягких конструкционных материалов, такими как эластичность, прочность, герметичность, легкость, стойкость к агрессивным средам, радиопрозрачность, а также упругость, высокая степень сжатия, текучесть рабочего газа или несжимаемость рабочей жидкости, характерные для рабочей среды. Система газонаполнения таких конструкций обеспечивает их несущую способность. Комплектующие детали и элементы конструкции создают условия их взаимозаменяемости и комплексного использования в эксплуатации.

Эластичные силовые механизмы

Эластичные механизмы в зависимости от назначения, степени напряженности оболочки, энергоемкости могут выполнять защитные, функциональные, силовые, защитно-силовые и движительные функции. По конструкции такие механизмы имеют много общих элементов и признаков. Кроме того, высокая степень свободы перемещения эластичных механизмов зависит от способа закрепления их на плоскости.

Упругая сжатая рабочая среда, заключенная в оболочечную конструкцию, придает ей силовые свойства, способность сопротивляться внешним воздействиям силовым нагрузкам, позволяет совершать механическую работу.

По степени нагружения мягкой оболочки эластичные механизмы низкого и относительно высокого напряжения обладают некоторыми конструктивными различиями (формой, габаритами и другим).

Особенностью низконапорных эластичных механизмов является податливость их геометрических параметров в процессе эксплуатации (большие перемещения поверхности, изменение начальной геометрической формы под действием нагрузки).

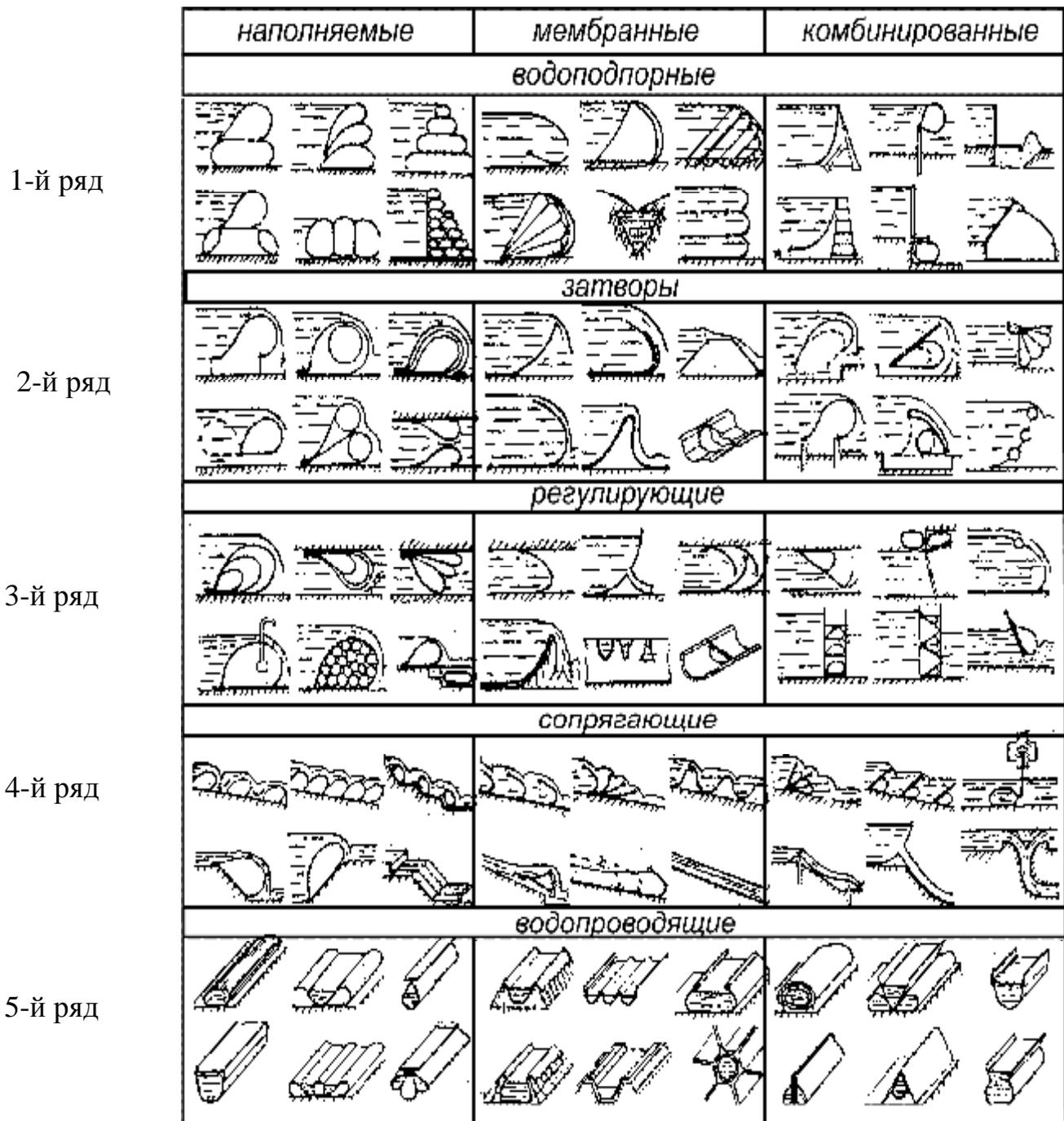


Рис. 1.7. Мягкие гидротехнические конструкции и сооружения:

1-й ряд – *водоподпорные*: наполняемые жидкостью гидротехнические сооружения; мембранные тентовые перемычки; комбинированные (тентокаркасные и пневматические силовые) запруды; 2-й ряд – *закрывающие*: оболочечные; тентовые и полужесткие затворы; 3-й ряд – *регулирующие*: оболочечные, мембранные и комбинированные перемычки; 4-й ряд – *сопрягающие*: оболочечные; мембранные и специальные каскады; 5-й ряд – *водопроводящие*: пневмокаркасные, тентовые и полужесткие желоба

В подобных конструкциях преобладают низкие удельные давления по площади контакта со сжимающим грузом. Это позволяет при относительно малых давлениях рабочей среды развивать значительные усилия грузоподъемности, в сотни раз превышающей их собственную массу. Изменения геометрической формы оказывают влияние на такие эксплуатационные характеристики оболочки, как: объем, высота подъема, площадь контакта с грузом, грузоподъемность, площадь поверхности, соотношение габаритных размеров, масса и компактность укладки.

Благодаря минимальной массе и транспортному объему, простоте конструкции и быстрой приведения в рабочее состояние эластичные механизмы незаменимы в экстремальных условиях, затрудняющих использование традиционного оборудования.

Таковыми условиями могут быть: спасательные работы на транспорте в условиях слабых грунтов и бездорожья, добыча полезных ископаемых в горнодобывающей отрасли с подводных и прибрежных шельфов, придание транспортным средствам саморазгружающих и амфибийных свойств, монтажные и строительные работы при строительстве мостов, куполов, сооружений башенного типа, прокладка подводных коммуникаций, строительство инопланетных баз.

В результате незначительной собственной толщины в исходном состоянии эти конструкции могут предварительно закладываться в незначительные зазоры и щели для последующего перемещения (подъема, раздвигания) груза, например, при расчистке завалов, добыче горных пород, проведении аварийно-спасательных работ. Автоматическое дистанционное регулирование внутреннего давления рабочей среды позволяет создавать эластичные конструкции управляемой формы, исполнительные устройства, приводы, движители-манипуляторы и т. д.

К силовым эластичным механизмам относятся также несущие конструкции из герметичных мягких материалов для хранения сыпучих, жидких и газообразных материалов, наливные плотины, перемычки, паруса и парашюты, оболочки для вскрышных горных работ и мягкие переборки, медицинское оборудование и тренажеры, аттракционы и игрушки; элементы рекреации и шоу; другие преобразователи низких и высоких напряжений оболочек в поступательное перемещение объектов.

Таким образом, эластичные силовые механизмы являются энергетической пневмосистемой, основная деталь которой – мягкая оболочка.

При этом внешняя, сжимающая оболочку нагрузка воспринимается упругой рабочей средой, избыточное давление которой компенсируется прочностными свойствами конструкционного материала. От воздействия окружающей среды конструкция защищена полимерным покрытием армирующего материала (или защитным чехлом). В табл. 1.7 приведены основные виды силовых пневмоконструкций различного назначения класса подъемно-транспортных машин [23].

Основные виды силовых пневматических конструкций

Эластичные механизмы периодического действия				Эластичные механизмы непрерывного действия		
простые машины	пневмоопоры	пневмоинструмент	пневмоподъемники	грузопроводы	погрузчики	конвейеры
поплавки, запоры, ограждения, заграждения, перемычки, амортизаторы, кранцы	опоры, фашины, каркасы, катки, платформы на ВП, крепи	домкраты, пластыри, заглушки, бандажи, пробки, грузозахваты	аэростаты, конические торы, понтоны, аквастаты, опалубка	треки, спуски, лотки, рукава, емкости	диафрагменные, оболочечные, торовые	пневмопровод, транспортеры на ВП

Мягкие опоры и каркасы

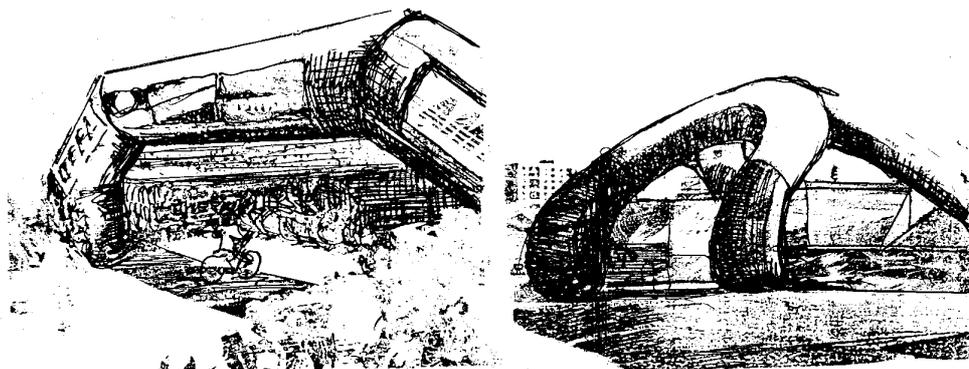
По виду совершаемой работы эластичные механизмы можно разделить на силовые пневмоконструкции непрерывного и периодического действия. К первым относятся: перегружающие, перемещаемые устройства и мягкие движители. Согласно табл.1.7 пневмоопоры, пневмоамортизаторы, пневмоинструмент, пневмоподъемники выполняют работы периодического действия, в основном в аварийных условиях, так как обладают такими достоинствами как мобильность, портативность незначительная масса и быстрота приведения в рабочее состояние.

По назначению эластичные могут быть отнесены к одному из традиционных механизмов: диафрагмам, каркасам, опорам, амортизаторам, подъемно-транспортным механизмам, плавсредствам, аэростатическим аппаратам и тому подобным механизмам и машинам.

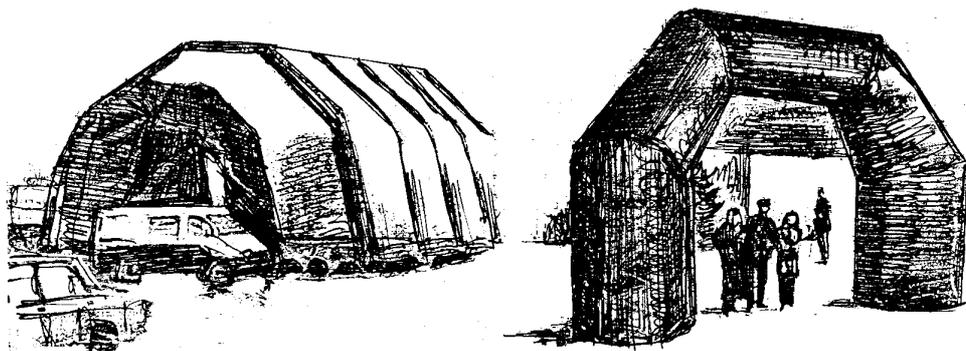
Диафрагмы, пневмокаркасы, опоры и амортизаторы относятся к опорным механизмам и предназначены для уравнивания внешней сжимающей (статической и динамической) нагрузки, например, от воздействия массы груза, воздушного или водяного напора.

Основой пневмокаркасных быстровозводимых сооружений, используемых, например, для организации временного жилья и укрытия оборудования и техники, баз спасателей, служб реагирования в чрезвычайных ситуациях, складских помещений, полевых госпиталей являются надувные опоры – арки, то есть, пневмокаркасные модули различных типов (рис.1.8).

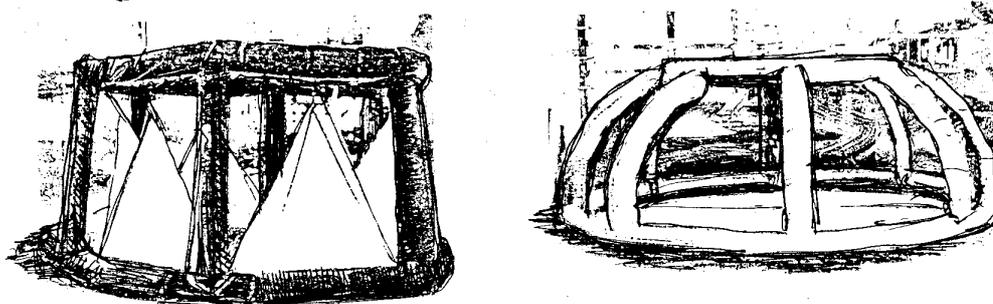
1-й ряд



2-й ряд



3-й ряд



4-й ряд

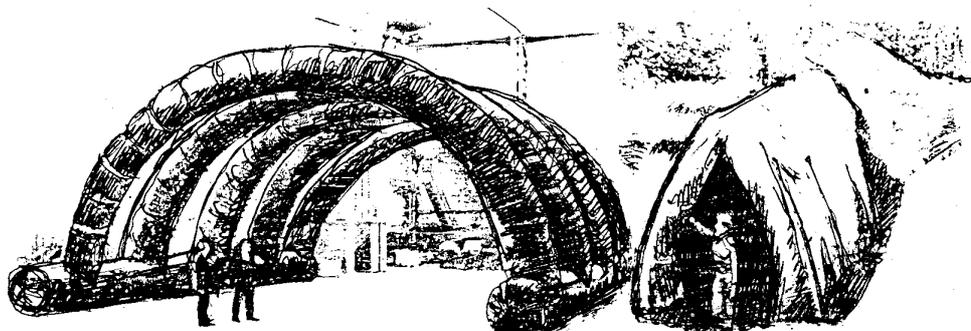


Рис. 1.8. Мягкие опоры и амортизаторы:

1-й ряд – информационные пневмоарки, архитектурный элемент сооружения; 2-й ряд – пневмокаркасный модуль, рекламная арка; 3-й ряд – пневматический каркас, формообразующий пневмокаркас; 4-й ряд – мобильный несущий пневматический каркас, силовой пневмопанельный модуль

Конструктивно пневмокаркасный модуль состоит из нескольких надувных арок, соединенных продольными надувными балками (коллекторами). С наружной и внутренней сторон имеются тканевые обшивки (тенты), выполненные из прочного негорючего материала [22].

Развернутые модули могут соединяться между собой, в зависимости от назначения, в различные варианты сооружений с помощью элементов крепления, фиксации и фартуков. Для обеспечения комфортных условий, минимальной жизнедеятельности сооружения: дежурного освещения, работы электроаппаратуры, приборов, электронной техники, в том числе в зимнее время и в районах с холодным климатом, в комплекте предусмотрены топливные электроагрегаты.

Основой надувной силовой конструкции является пневматический каркас (баллоны цилиндрической или арочной формы) из герметичной и прочной прорезиненной ткани. Несущей способностью надувных каркасов является условие сохранения предельной продольной сжимающей нагрузки без образования поперечной складки.

Так как пневматические резинотканевые конструкции способны восстанавливать свою первоначальную форму после снятия нагрузки, складкообразование арочных конструкций используется в конструкциях амортизаторов (рис. 1.9). Рассмотрим, например, пневматическое спасательное устройство предназначенное для обеспечения безопасной эвакуации человека с высотного здания во время пожара, а также для тренировочных прыжков каскадеров, обеспечивающее безопасное приземление.

Устройство состоит из надувного каркаса, создающего форму изделия, и закрепленных на каркасе амортизирующих тентов, снабженных калиброванными стравливающими отверстиями. К нижнему тору каркаса подсоединены две надувные арки, предназначенные для смягчения удара.

С помощью разъемного монтажного шва на внутренней стороне бокового полотнища закреплены два дополнительного амортизирующего элемента в виде полотнища из необрезиненной капроновой ткани. На надувном каркасе установлены обратные и предохранительные клапаны для подключения к системе газонаполнения и регулирования рабочего избыточного давления внутри каркаса.

Амортизация динамической нагрузки (пострадавшего) обеспечивается, с одной стороны, потерей жесткости надувного каркаса – для смягчения удара, с другой стороны, заданным по величине сопротивлением стравливания воздуха из объема устройства за счет заданного калибра отверстий на боковой поверхности тента.

Подобные изделия применяются для спасения пострадавших во время пожара, при эвакуации с многоэтажных зданий, амортизации ударных нагрузок при мягкой посадке на землю сбрасываемых с самолета объектов. Надувные амортизаторы нашли применение на воздушном (космическом) транспорте при доставке объектов к месту назначения.

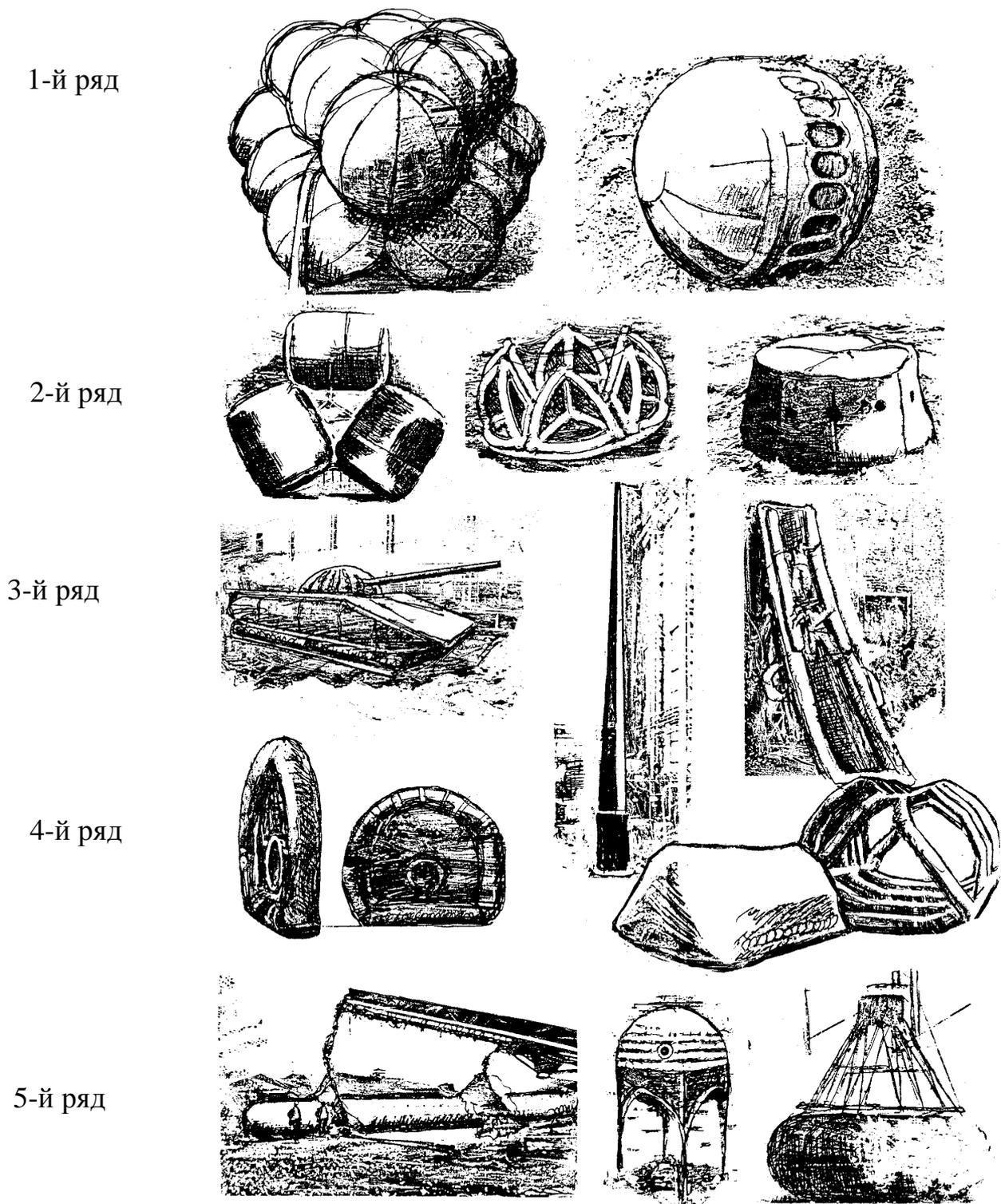


Рис.1.9. Надувные арки и каркасы:

1-й ряд – надувные амортизаторы спускаемого аппарата «Бигль-2», лунный амортизатор мягкой посадки станции Луна-9; 2-й ряд – радиоотражатели; 3-й ряд – надувной макет транспортного средства; 4-й ряд – пневмокаркасная шахтная перемычка, надувная мачта для радиоантенны, пневматическое посадочное устройство, пневмокаркасный амортизатор; 5-й ряд – пневматический пустотообразователь, подводный дом, пневмоамортизатор

На (рис.1.9а, б) показаны: лунный амортизатор мягкой посадки станции Луна-9 и надувной амортизатор спускаемого аппарата «Бигль-2», который должен был при парашютировании смягчить удар о поверхность планеты Марс [14].

К эластичным механизмам, предназначенным для компенсации динамических нагрузок, относятся мягкие гидравлические экраны, в которых рабочая несжимаемая жидкость поглощает, например, ударную волну.

Таким образом, эластичные силовые механизмы широко используются для компенсации статических и динамических нагрузок, передавая сжимающие усилия через мягкую оболочку на жесткие основания. Одно из уникальных свойств эластичных механизмов, использующих упругие свойства материала и рабочей среды и высокоэластичность конструкционного материала, нашло применение в амортизаторах различного назначения.

Миниподъемники

Большую популярность в промышленности, строительстве, на транспорте, а также у аварийно-спасательных служб получили так называемые миниподъемники (мягкие домкраты, пневмоподушки, пневмоподъемники, резиноармированные баллоны и тому подобное), перегружающие устройства (рис. 1.10, 1.11).

Резинотканевые подъемники относятся к эластичным механизмам, состоящим из мягкой силовой оболочки, жидкой или газообразной рабочей среды и системы газо-, водонаполнения. Они легко деформируются под действием внешней нагрузки, перемещаются, совершая механическую работу по преодолению внешнего силового воздействия. Эластичные механизмы обладают высокой прочностью, герметичностью и стойкостью к окружающей среде. Их несущая способность, усилия растяжения и формообразование оболочки зависят от предварительного натяжения соответствующим аэро- или гидростатическим распором. В подобных конструкциях преобладают низкие удельные давления контакта с грузом. Это позволяет при относительно малых рабочих давлениях среды развивать значительные подъемные усилия, в сотни раз превышающие их собственную массу. Собственная незначительная толщина миниподъемника позволяет закладывать его в узкие зазоры и полости для дальнейшего подъема, разжатия, сдвига воздействующих грузов.

По назначению эластичные подъемные механизмы можно разделить на аварийные устройства, спасательный пневмоинструмент, монтажные пневмоопоры, пневмокрепи, пневмоподъемники низкого и высокого давления и др.

По форме они могут представлять собой: оболочки вращения (сферу, оваловид, цилиндр, конус, тороид) или их деформированные формы (панель, подушку, линзу), а также составные устройства из двух и трех элементов.

Их технологические свойства (форма раскройных заготовок, способ сборки, трудоемкость операций, количество отходов производства) зависят от геометрической формы, которая также влияет на эксплуатационные свойства.

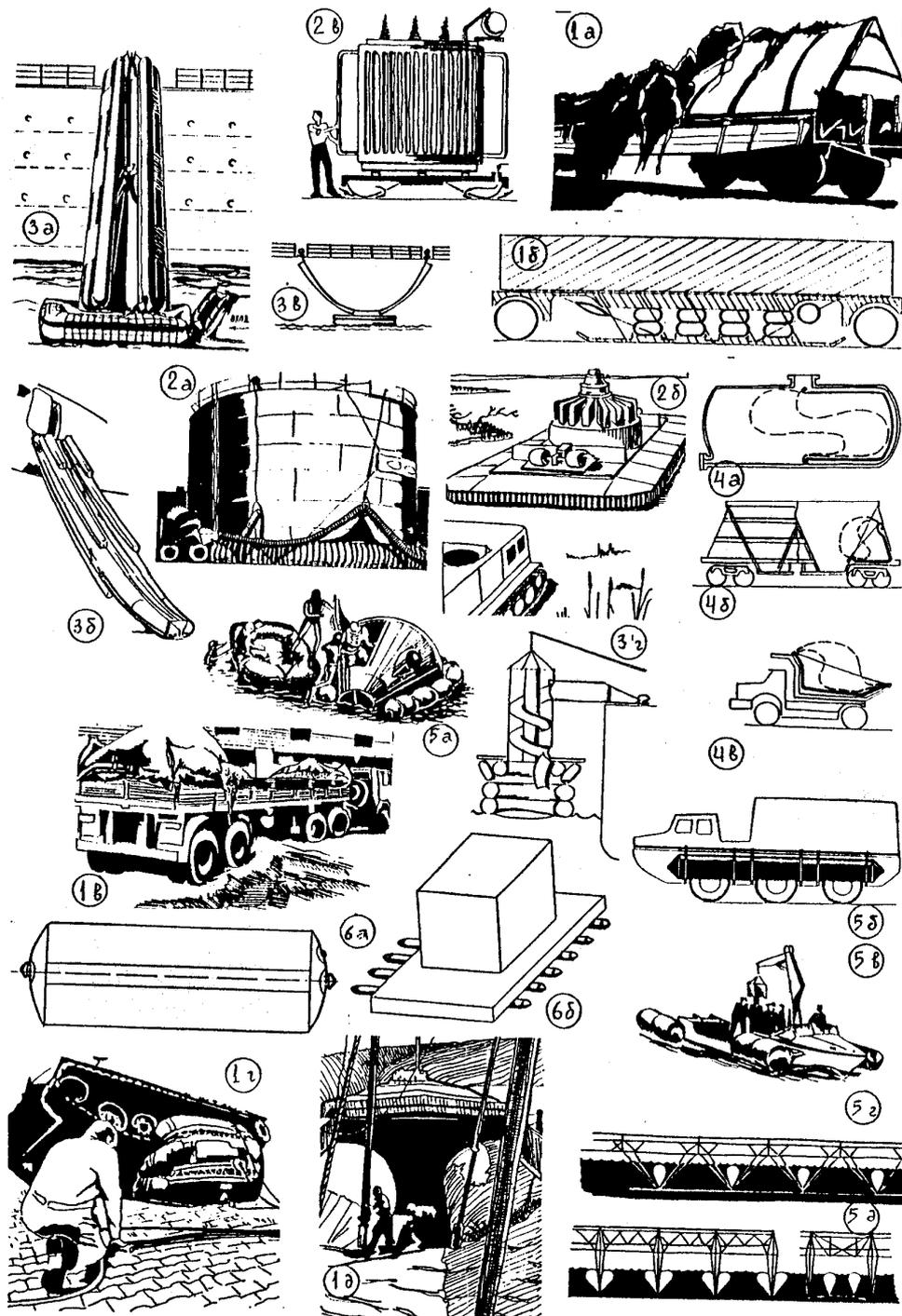


Рис. 1.10. Перегружающие эластичные механизмы:

1а – саморазгружающаяся ж/д платформа; 1б – самоперемещающаяся платформа; 1в – саморазгружающийся автоприцеп; 1г – надувной кантователь; 1д – оболочки для перемещения сыпучего груза в трюмах; 2а – 2в – платформы для подъема и перемещения груза на воздушной подушке; 3а – 3г – аварийные посадочные устройства; 4а – 4в – диафрагменные перегружатели; 5а – 5д – съемные плавучести; 6а, 6б – грузовые катки

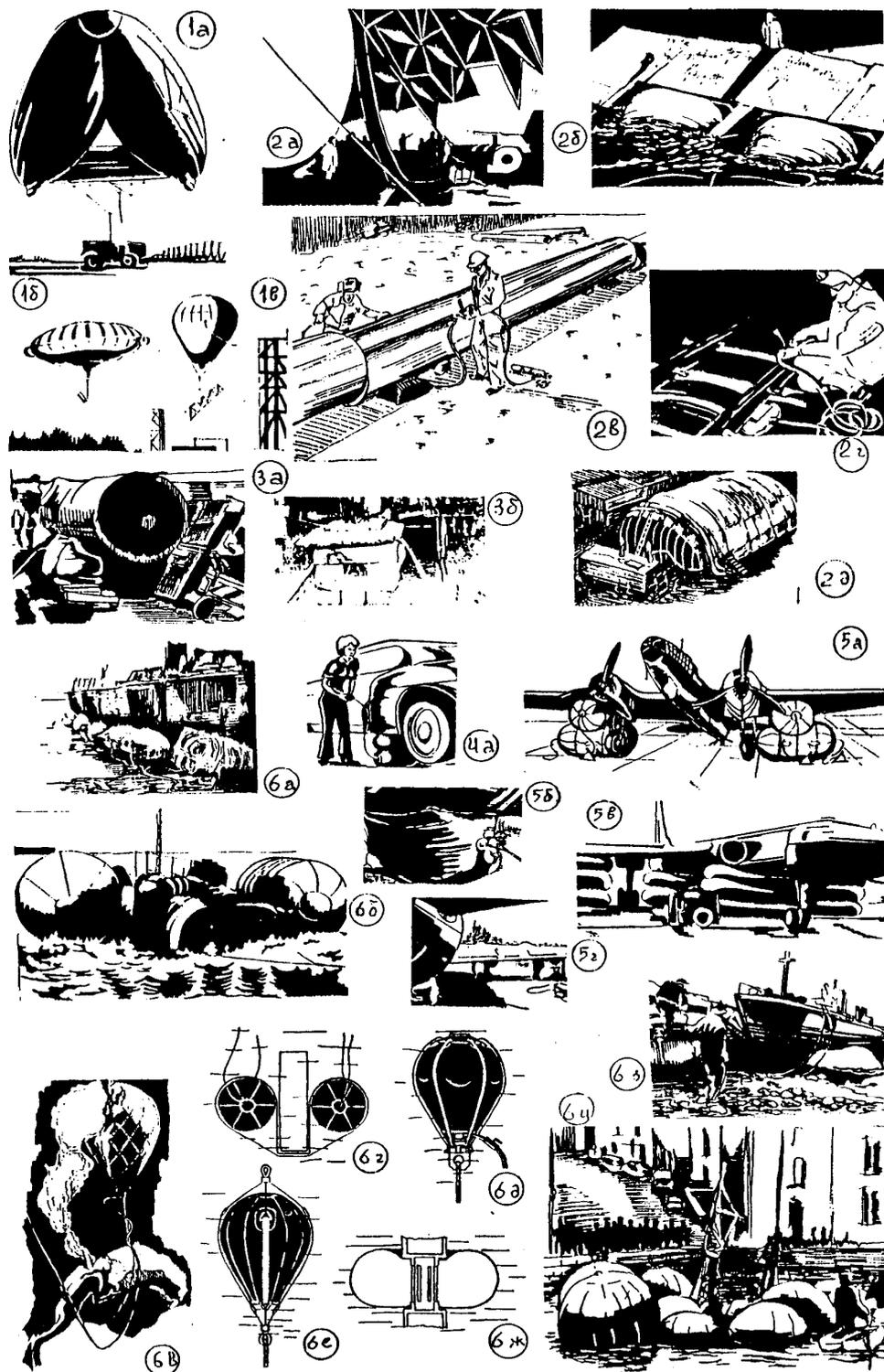


Рис. 1.11. Эластичные подъемные механизмы:

1а – в – аэростаты-краны; 2а – д – строительные пневмоподъемники; 3а – б – аварийные железнодорожные пневмоподъемники; 4а – автомобильный пневмодократ; 5а – г – авиационные пневмоподъемники; 6а – ж – плавучие пневмоподъемники различного назначения

Несущая способность, грузоподъемность, высота подъема, площадь поверхности, а также масса и объем зависят от соотношения габаритных размеров.

Так как внешняя сжимающая нагрузка воспринимается упругой рабочей средой, а растягивающие усилия от действия избыточного давления по внутренней поверхности мягкой оболочки, то эластичный подъемный механизм обладает потенциальной энергией сжатой рабочей среды и в работе находится в состоянии энергетического равновесия (при условии предварительного напряжения) с воздействующей на него массой груза.

Среди эластичных подъемных механизмов особое место по интенсивности сопротивления внешним нагрузкам занимают эластомерные подъемники или подъемные оболочечные устройства (мягкие домкраты, надувные тканевые подъемники, пневмоторовые устройства) различных форм и конструкций, с различным соотношением габаритных размеров

Подобные конструкции используются для совершения механической работы по преобразованию энергии сжатой рабочей среды в механическую энергию в экстремальных условиях, поэтому нашли широкое применение как силовые эластичные спасательные конструкции в составе аварийно-спасательных инструментов: домкраты, кантователи, пластыри, бандажи, заглушки, пробки, пакеры, поплавки, понтоны, опоры и ограждения.

Таким образом, к эластичным механизмам, для которых характерны значительные изменения формы при нормальной эксплуатации, которые изготовлены на основе податливых материалов (тканей, пленок, сетей), относятся мягкие силовые элементы. Среди пневмоконструкций, преобразующих энергию сжатой рабочей среды в работу по перемещению полезной нагрузки в заданном направлении, наиболее известны мягкие подъемники и домкраты.

Конструктивные особенности миниподъемников

Серийный мягкий пневмодомкрат, представленный на (рис.1.12), включает плоскую надувную подушку (1), с пультом управления (5) и источник сжатого воздуха (16). Незначительные различия в конструкции могут зависеть от технологии изготовления, конструкционных материалов, формы оболочки, состава и места расположения комплектующих. Комплектация миниподъемника представляет собой систему обеспечения и контроля заданного избыточного давления рабочего газа в силовой оболочке.

Основным рабочим элементом миниподъемника является эластичная подушка, выполненная из резиноармированного материала. Поверхность подушки изготавливается ребристой для увеличения поверхностного сцепления. Наполнение подушек осуществляется через быстроразъемный фиксирующий резино-металлический штуцер, эффективно осуществляющий аварийные и ремонтные работы. Небольшой вес домкратов позволяет легко переносить их и оперативно использовать в проводимых работах.

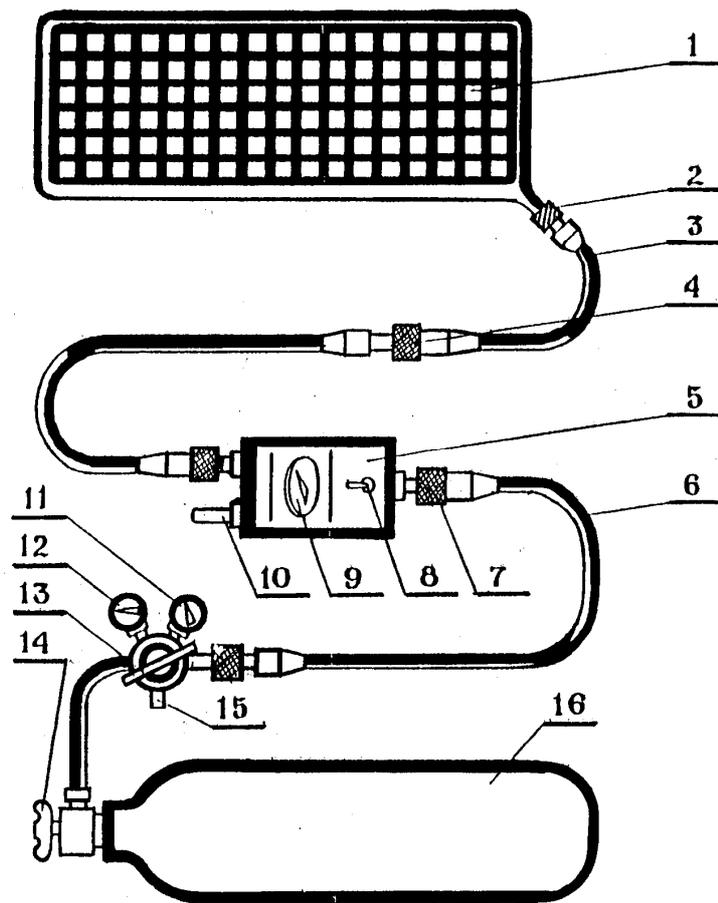


Рис. 1.12. Устройство эластичного миниподъемника:

1 – подушка; 2, 4, 7 – разъемы; 3, 6 – рукава; 5 – пульт управления; 8 – тумблер; 9, 11, 12 – манометры; 10, 15 – клапан предохранительный; 13 – редуктор; 14 – вентиль; 16 – баллон

В состав одного миниподъемника, как правило, входят следующие комплектующие узлы. Пневмоподушка (1) различных габаритных размеров и различной грузоподъемности (в комплекте могут быть две подушки). Разъемы (2, 4, 7) цанговые, байонетные, резьбовые и тому подобные предназначены для быстрой сборки и разборки системы. Рукава соединительные (3, 6) служат для подключения подушки к пульту управления и системе наполнения. Пульт управления (5) с трехпозиционным пневмораспределителем содержит тумблер (8), манометр (9) контроля давления в пневмоподушке, предохранительный клапан (10). Баллон со сжатым газом (16), укомплектованный вентилем (14) и редуктором воздушным (13), содержащий манометры низкого (11) и высокого (12) давления и предохранительный клапан (15).

При необходимости, в качестве привода может быть использован передвижной или стационарный компрессор, воздушный насос, газогенератор, транс-

портный баллон сжатого воздуха, тормозная система автомобиля или железнодорожного состава, камера грузового автомобиля и другие варианты.

На рис.1.5 представлены каскады (сдвоенные и строенные) подъемных подушек фирмы «Pronal» (Франция), которые могут иметь квадратную или круглую (для увеличения устойчивости) в плане форму. Их конструктивные особенности используются в качестве функциональных как: монтажные опоры, прижимные плиты, подъемники, кантователи, распорные подушки, кранцы, уплотнители, виброгасители, пластыри и заглушки [23].

Возможны другие функции и назначения миниподъемников, выпускающихся другими фирмами.

Фирма «Таурус» (Венгрия) предлагает резинотканевые подушки в качестве плавающих понтонов для подъема и транспортировки грузов с нулевой и отрицательной плавучестью.

Фирма «Gric air» (Франция) предлагает автомобильные пневмодомкраты, используемые в качестве рабочих – выхлопные газы.

Фирма «Eurovinil» (Италия – Франция) осуществляет подъемы грузов на высоту до двух метров трехсекционными подъемниками за счет конструктивных и технологических особенностей.

Следует отметить уникальные разработки мягких домкратов фирмой «НИИРП» (Россия) для проведения аварийно спасательных работ на транспорте. Например, мягкие катки-домкраты для снятия кораблей с мели, типа МДМ-200, способны поднимать и перемещать груз до 200 тс [23].

Кроме подушечной формы также известны силовые оболочечные механизмы цилиндрической, торовой и тороидной, панельной, сферической и сложных форм. Каждая из них имеет определенные преимущества и используется в зависимости от условий эксплуатации. Например, на рис.1.13 изображены эластомерные силовые спасательные пневмоконструкции (пневмоподъемник, заглушка, опора и каток) в форме тороидного цилиндра, а также мягкий подушечный домкрат (пневмопластырь, кранец и тому подобное), исполненный конструктивно по тороидной технологии.

Наиболее технологичными по форме и конструкции признаны мягкие силовые оболочки в форме подушки (или линзы), снабженные системой наполнения и пультом управления. Однако пневмоконструкции в форме тороидного цилиндра с помощью набора приспособлений способны переоборудоваться и выполнять дополнительные функции.

Таким образом, в различных отраслях техники нашли применение эластичные подъемные механизмы оболочечной конструкции, которые конкурентноспособны с традиционными подъемно-транспортными механизмами. Такие механизмы имеют высокую удельную грузоподъемность, которая в несколько сотен раз превышает собственную массу.

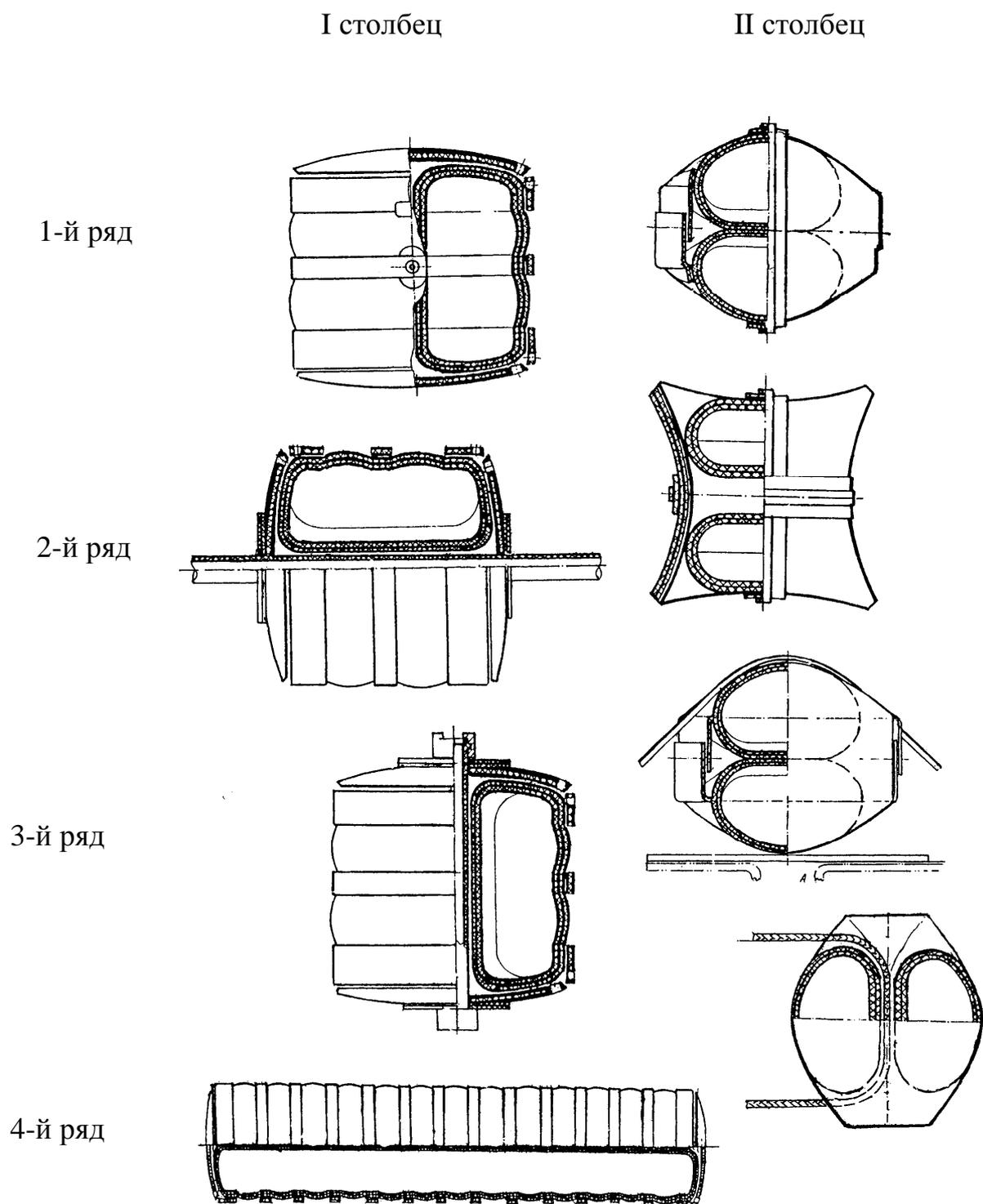


Рис. 1.13. Комплект универсальных эластичных силовых спасательных пневмоконструкций, изготовленных по торовой технологии:

I столбец – цилиндрические тороиды: 1-й ряд – подъемник, 2-й ряд – амортизатор, 3-й ряд – заглушка, 4-й ряд – каток;

II столбец – подушечные тороиды: 1-й и 2-й ряды – домкрат, 3-й ряд – пластырь, 4-й ряд – кранец, опора

Характеристики мягких подъемно-транспортных механизмов

Эластичные подъемные механизмы по назначению условно делятся на перегружающие и грузоподъемные. По виду перемещения их можно разделить на разжимающие, раздвигающие, перемещающие, опрокидывающие, подтягивающие, выталкивающие, поднимающие, перекачивающие, запирающие, регулирующие и другие.

Подвижность оболочек делится в зависимости от способа их закрепления на: свободнолежащие; закрепленные: в точке, по образующей, по плоскости. В зависимости от компоновки механизмы могут размещаться под грузом, над грузом или в стороне. Расположение подъемника под грузом позволяет механизировать разгрузочные работы различных видов транспорта, в том числе и не приспособленных для саморазгрузки, тогда они оснащаются подъемными платформами.

Оболочки размещенные над грузом, удобны для подъема (подтягивания) грузов для погрузки на платформы. На их основе разработаны мягкие грузозахваты, зажимы, пульсаторы.

Оболочки могут располагаться в конструкции других механизмов, например, на гибком ограждении воздушной подушки, в механизме опрокидывателей платформ, на крышках вентиляционных люков.

Подъемники, перемещающие грузы в вертикальной плоскости, относятся к грузоподъемным, в горизонтальной и наклонной – к перегружающим. По виду совершаемой работы различаются подъемники с повышенной грузоподъемностью и повышенной высотой подъема. Первые (высоконапорные), как правило, имеют незначительный объем, развитую площадь опоры и изготавливаются из высокопрочных материалов. Их высокая энергоемкость достигается работой давления, распределенной на площадь контакта с грузом. Вторые (низконапорные) совершают перемещения (подъем) за счет повышенного объема оболочки (или каскада секций подъемника).

Для выбора преимущественной работы при проектировании анализируются возможные геометрические формы оболочек и зависимость их работоспособности от деформирования. Например, особенностями низконапорных подъемников фирмы «Lampe» (Германия) является кубическая и бочкообразная формы. Применение в конструкции высокопрочной металлотросовой арматуры позволило значительно повысить разрывную прочность оболочек фирме «Vetter» (Германия).

Пневмоподъемники типов «АПТП» и «МДМ» фирмы «НИИРП» (Россия) изготавливаются из серийных синтетических материалов повышенной разрывной прочности с применением конструктивных разгружающих элементов (силовых поясов и перегородок) [23].

По аналогии с традиционными подъемно-транспортными механизмами основными рабочими характеристиками эластичных подъемных механизмов являются такие, как:

- грузоподъемность – максимальная масса груза, на подъем которого рассчитан механизм;
- высота подъема груза – высота, при которой изменение объема осуществляется без увеличения давления;
- максимальная площадь контактной поверхности с грузом – площадь центрального (горизонтального) сечения оболочки;
- рабочее давление – давление, необходимое для подъема заданного груза на заданную высоту;
- рабочий объем оболочки;
- режим работы механизма (время наполнения, количество циклов).

Вспомогательными являются следующие характеристики:

- собственная масса;
- собственная высота;
- транспортные габариты;
- коэффициент запаса прочности оболочки (отношение разрывного давления к рабочему).

Конструктивно эластичные подъемные механизмы выбираются и снабжаются запасными комплектующими приспособлениями исходя из требований эксплуатации и характера груза.

Для определения количественных показателей и характеристик рекомендуется использовать комплексные оценки свойств, заключающихся в определении относительной зависимости основных и вспомогательных характеристик.

Выбор рабочей среды зависит от требований безопасности и устанавливается в зависимости от относительного изменения рабочего объема оболочки. Для высоконапряженных подъемных механизмов рекомендуется использовать несжимаемую жидкость или аэрозольную смесь. В некоторых случаях (парашюты, плотины) используется аэростатический или гидростатический напор, который может быть использован для предварительного поверхностного натяжения оболочки, особенно больших габаритных размеров, и придания ей заданной формы и размеров. Некоторые виды эластичных перегружателей предварительно напрягаются механическим способом.

Кроме степени сжатия рабочие среды различаются по виду и характеристикам источника рабочей среды (объем, производительность, давление). Используются такие источники рабочей среды как ручной насос, компрессор, баллон со сжатым газом, газгенератор, газовая горелка и тому подобное.

Таким образом, рабочими характеристиками эластичных мягких механизмов являются: рабочее давление, рабочий объем оболочки, вид рабочей среды, собственная масса, объем и габариты оболочки.

Величина рабочего давления определяется заданной массой перемещаемого груза и ограничена коэффициентом запаса прочности оболочки. Рабочий объем оболочки задается высотой перемещения груза. Вид рабочей среды зависит от режима работы механизма.

Выводы

Экстремальные ситуации, связанные с природными явлениями (природные катастрофы) и деятельностью человека (техногенные катастрофы), требуют оперативных действий аварийно-спасательных формирований. Между всеми видами катастроф существует взаимосвязь, последствия которой, как правило, приводят к поражению самого человека или условий его существования. Цель защитных мер против природных и техногенных катастроф – стремление максимально ограничить вторичные воздействия, а также предохранить от их последствий жизнь спасателей, действующих в зонах чрезвычайных ситуаций.

Вредные и опасные факторы, которые в этих ситуациях могут бесконтрольно воздействовать на здоровье людей, вызывая нарушения в их организме, вплоть до смертельного исхода, подразделяются на физические, химические, биологические, психофизиологические.

Задачами, которые можно решить с помощью эластичных механизмов, являются: оказание первой оперативной помощи; обеспечение жизнедеятельности или эвакуация пострадавших; временная консервация и восстановление функциональных аварийных объектов.

Для этих целей могут быть использованы такие пневмоконструкции и механизмы как надувной медицинский инвентарь и временные укрытия и ограждения, индивидуальные и коллективные спасательные средства, эластичные силовые аварийные устройства и пневмооснастка, защитные хранилища и спецодежда, эластичные строительные конструкции и мягкие емкости, устройства для придания амфибийности транспортным средствам и тому подобное.

Предварительно напряженные эластичные механизмы, способные сопротивляться внешним силовым воздействиям, по энергетическим свойствам можно разделить на защитные и силовые. Автоматическое регулирование внутреннего избыточного давления, наряду с созданием эластичных конструкций управляемой формы, позволяет создавать новые виды эластичных двигателей и надувных манипуляторов.

Благодаря незначительной относительной массе и собственному объему эластичные механизмы незаменимы в условиях, затрудняющих использование традиционных механизмов.

В качестве рабочей среды в эластичных механизмах могут быть использованы общедоступные вещества: заборная вода, воздух, пороховые и выхлопные газы, смеси, сыпучие материалы, а также поток воды и струи воздуха.

От геометрической формы оболочки, конструктивных особенностей, способа закрепления на опоре, наличия внутренних разгружающих элементов зависит число степеней свободы перемещения.

Условия эксплуатации их различны: на суше (в условиях слабых грунтов и бездорожья) и под землей, на воде и под водой, в воздухе и в космосе, в организмах животных и человека. Высокоэффективно применение пневмоконструкций и в строительстве: возведение железобетонных сводов; монтаж мосто-

вых пролетов и башенных сооружений; строительство подводных, гидротехнических, средств мелиорации и другое.

Высока их оперативность приведения в рабочее состояние. Спасательные работы по снятию судов с мели, подъем самолетов, совершивших посадку с поврежденными шасси, применение пневмопластырей, пневмозаглушек, мини-подъемников совершаются в считанные минуты. А такие спасательные средства, как подушки безопасности, успевают развернуться в рабочее положение в считанные доли секунды.

В зависимости от назначения, требований надежности, безопасности и условий эксплуатации эластичные механизмы могут быть одноразового и многократного использования. Однако общие сроки их эксплуатации исчисляются десятками лет.

Одной из особенностей эластичных подъемных механизмов является многообразие геометрических форм эластичных оболочек, которые в зависимости от условий эксплуатации могут иметь различное соотношение размеров осей центрального сечения (равноосные, сплюснутые, вытянутые). Установлено, что силовые свойства оболочек зависят от изменения объема и площади контактной поверхности при деформации эластичных оболочек.

Оптимальными для высоконапорных силовых подъемных механизмов являются сплюснутые геометрические формы (овалоиды, подушки). А для низконапорных – вытянутые (кубы, цилиндры).

Подушечная форма эластичных подъемных механизмов является наиболее предпочтительной и для технологий раскроя и сборки в производстве. Однако при расчете подушечных оболочек существуют трудности в традиционных теориях оболочек, что требует их доработки для инженерных расчетов.

Таким образом, среди эластичных механизмов особое место по интенсивности сопротивления внешним нагрузкам занимают силовые, а среди них подъемные (низко- и высоконапряженные) механизмы. В зависимости от уровня их автоматического управления и контроля силовые механизмы могут исполнять роль опор, каркасов, подъемников, перегружателей, манипуляторов и движителей.

1.4. МЯГКИЕ ДВИЖИТЕЛИ

Природные основы происхождения движения

В современном машиностроении, авиации, судостроении задачу движения рассматривают из двух частей: корпус, который имеет сопротивление, и движитель, который создает тягу для преодоления этого сопротивления.

Благодаря длительной адаптации летающие и плавающие животные приобрели оптимальные характеристики двигательного комплекса. Раскрытие основных закономерностей в структуре и работе их локомоторного аппарата может позволить создать новые типы движителей более экономичных и маневренных.

Движительным аппаратом, который способен развиваться в организме человека или животного, являются мышцы и система костно-мышечных рычагов.

Мышца – основной элемент, подвергающийся нагрузке в процессе движения организма. Она является сложным молекулярным двигателем, способным непосредственно преобразовывать химическую энергию в механическую работу [59].

Каждый сустав человека представляет собой ось рычага. Чем дальше от оси рычага прикладывается тяговое усилие к его плечу, тем большее усилие можно развить с помощью мышцы, прикрепленной к этому плечу. Мышца прикрепляется к костному рычагу с помощью сухожилия. Кость к кости прикрепляется с помощью связок, фиксирующих суставы. В любом движении, как правило, участвуют минимум две мышцы. При выполнении движения изоляция одной, отдельно взятой мышцы, практически невозможна.

Следует знать, что мышцы делятся на две группы – антагонисты, которые сгибают (разгибают) конечность, и синергисты, работающие совместно в одном направлении. Ряд мышц при выполнении конкретного движения вообще работают в своеобразном режиме статического усилия, не включаясь в выполнение тяги, стабилизируя положение частей тела.

Чисто унитарное деление мышц выглядит так:

- непосредственные движители – мышцы, работа которых перемещает туловище или конечности;
- вспомогательные движители – мышцы, работа которых способствует перемещению туловища или конечности (синергистами по отношению к непосредственным движителям);
- стабилизаторы – мышцы, работа которых фиксирует положение частей тела при мощных усилиях, развиваемых вспомогательными движителями.

Любой биологический организм представляет собой конкретную материальную систему, структура которой выступает как совокупность внутренних связей между ее элементами, а также законов данных связей.

Биологическая система, имеющая цель – передвижение в пространстве состоит из следующих групп элементов:

- источника энергии (пищеварительная система);
- двигателя (мышцы, преобразующие химическую энергию в механическую);
- передаточно-согласующих элементов (от мышц к рабочим органам);
- рабочего органа: крыло, перья, плавник, тело животного и другие части;
- окружающей среды, в которой индуцируются движущие силы и силы сопротивления;
- тела животного;
- подсистемы управления [63].

Таким образом, любой биологический организм представляет собой конкретную материальную систему, структура которой выступает как совокупность внутренних связей между ее элементами, а также законов данных связей. Для

целей передвижения биологическая система состоит из семи групп функциональных элементов, состоящих из трех подсистем: внутренний локомоторный механизм, окружающая среда, подсистема управления.

Систематизация эластичных движителей

Одной из глобальных задач, стоящих перед человечеством, является срочный поиск новых источников энергии, как путем увеличения эффективности известных возобновляемых источников, так и принципиально новых.

Невозобновляемые (двигатели внутреннего сгорания, атомные электростанции) высокопотенциальные источники энергии не имеют будущего, экологически вредны и, как правило, имеют истощающиеся ресурсы.

Возобновляемые (ветро-гидрогенераторы, солнечные батареи, преобразователи энергии волн и другие) высокопотенциальные источники энергии имеют низкую эффективность (низкий отбор энергии).

Суммарная низкопотенциальная энергия – энергия окружающей среды (тепло атмосферы, земли и воды, энергия электромагнитных полей Земли), рассеянная вокруг нас, огромна, экологически чистая и неисчерпаема. Однако создание преобразователей для переноса энергии от низкопотенциального источника к потребителю – задача чрезвычайно сложная. Поэтому в настоящее время является целесообразным, наряду с увеличением эффективности высокопотенциальных возобновляемых источников энергии, создавать новые низкопотенциальные источники.

Низкопотенциальная энергия окружающей среды может экстрагироваться с помощью вихревых, кавитационных, колебательных, волновых и других процессов. Природа среды и энергия может быть любая: механическая, тепловая, электромагнитная, гравитационная, градиентная известных и еще неизвестных физических полей [64].

Одним из источников низкопотенциальной энергии является градиентная энергия давления сжатого газа, заключенного в тонкую замкнутую эластомерную оболочку.

Подвижность и силовые качества мягких оболочек используются в эластичных механизмах, мягких движителях, в аварийно-спасательных устройствах путем автоматического регулирования рабочими характеристиками.

Известна экспериментально обоснованная теоретическая модель взаимодействия эластичных движителей с опорным основанием на основе формализованного представления трех составных частей теории:

- механика опорного основания;
- механика движителей;
- механика процесса контактного взаимодействия машины с местностью [24].

Отсюда основными источниками систематизации функциональных свойств конструкций эластичных движителей, как правило, являются: окружающая

среда, характеристика перемещения (вид движения) и механизм взаимодействия рабочей среды с мягкой оболочкой.

В зависимости от области использования мягкие движители делятся на:

- движители, приводимые в действие ветром;
- движители, непосредственно воздействующие на воздух;
- движители, воздействующие непосредственно на воду;
- реактивные движители;
- эластичные преобразователи мускульных усилий;
- пневмодвижители, использующие разницу натяжения оболочки;
- эластичные элементы механических преобразователей.

По типу конструкции мягкие движители делятся на оболочечные конструкции замкнутого и незамкнутого объема. Общими их элементами являются: эластичная оболочка и текучая рабочая среда (сжимаемая - газ и несжимаемая - жидкость) и воздушный поток или гидронапор.

По компоновке и направлению приложенной нагрузки движители могут быть: поступательного – вертикального (подъемного над или под грузом) или горизонтального (раздвигающего – толкающего), вращающего, а также смешанных действий (подъем или вращение с продольным перемещением).

Таким образом, в общем виде к мягким движителям следует отнести эластичные механизмы, силовые свойства которых автоматически регулируются системой контрольно-исполнительных механизмов.

Движители, приводимые в действие ветром

Природным движителем, использующим действие потоков воздуха (напор) на корпус и крыло, является птица. Форма ее крыла, хвоста, корпуса, расположение головы и шеи предусматривает максимальное использование мышечной работы с минимальными энергетическими потерями. Движение ее крыльев плавное колебательное, переменное направленное вверх и вниз для захвата большего объема воздуха и отталкивания от него, а после набора высоты – свободное падение в струях восходящих потоков, величественные повороты с помощью хвостового руля.

Движители, использующие аэродинамику крыла и мускульные усилия человека, для создания подъема в воздух летательного аппарата и практически не приспособленного для значительных перемещений, относятся к орнитоптерам (махолетам).

В отличие от птиц крылатые насекомые не используют аэродинамику крыла. В отличие от бабочки стрекоза или муха не машет крыльями. Крылатые насекомые, и среди них птица колибри, используют вибрацию крыльев (возвратно-поступательные перемещения с большой скоростью и малыми смещениями), нелинейность сопротивления среды от скорости. При больших скоростях перемещения крыла воздух представляет собой практически «твердую» опору. При малых – за счет обтекания воздухом крыла, сопротивление значительно

меньшее. Равнодействующая сил сопротивления является движущей силой и направлена в сторону меньшей силы (рис. 1.14).

В соответствии с законом полноты частей энергетической системы необходимым набором функциональных элементов являются следующие части:

- рабочий орган;
- энергия для обеспечения его работы;

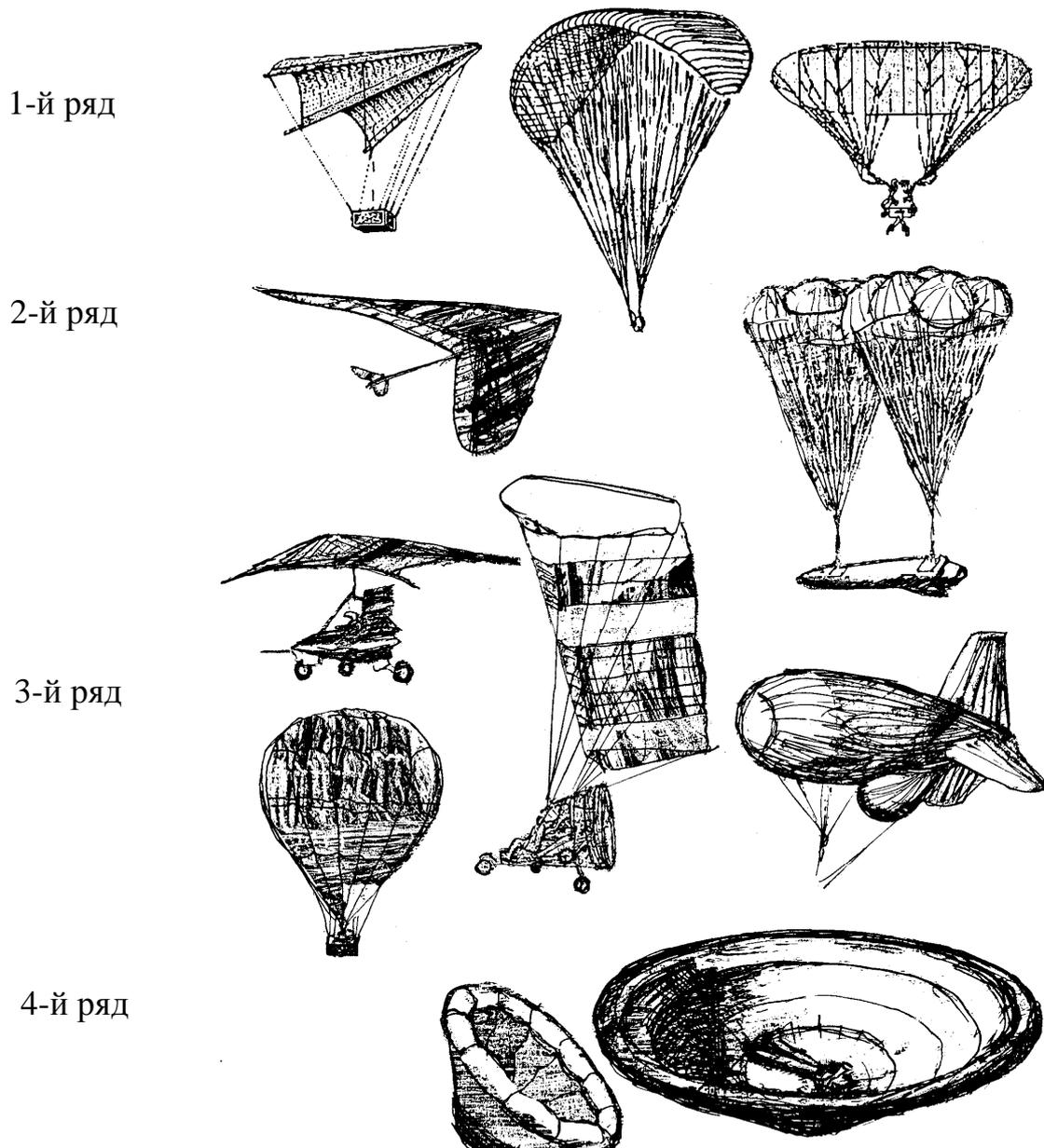


Рис. 1.14. Планирующие движители, использующие воздушный поток (напор):
1-й ряд – крыло Рогалло, параплан, парашютер; 2-й ряд – дельтаплан, посадочная парашютная система бескрылого орбитального корабля; 3-й ряд – мотодельтоплан и мотопараплан, теплостат и аэростат; 4-й ряд – устройство для торможения спускаемых космических аппаратов, спускаемое тормозное устройство для эвакуации с высотных зданий

– система управления рабочим органом.

Минимальным набором элементов в средствах транспорта являются:

- движитель – рабочий орган;
- двигатель с источником энергии;
- корпус;
- система управления.

Движителями для судов могут быть: весло, гребное колесо или гребной винт, водомет, реактивная струя, парус, крыло, воздушный змей, парашют, аэростат, пропеллер, вращающиеся роторы.

Парусный движитель активного типа, представляющий собой вращаемый цилиндр (ротор), вертикально установленный на палубе судна и использующий для своего движения энергию ветра, называется роторным.

Работа вращающегося ротора основана на эффекте Магнуса. Суть эффекта в следующем. Цилиндр, вращающийся в определенную сторону, находится в потоке ветра. Когда их скорости складываются – общая скорость увеличивается. При увеличении скорости, согласно принципу Бернулли, давление в потоке воздуха падает. С другой стороны, скорости вычитаются, общая скорость уменьшается, и давление увеличивается. Так образуется сила, направленная перпендикулярно к потоку, которую можно использовать для движения судна (рис.1.15) [67].

Преимущество роторного движителя по отношению к парусному в его значительно меньшей площади и массе. Он проще в обслуживании, быстро входит в рабочий режим. Вращая ротор быстрее или медленнее, можно управлять скоростью судна. Роторные суда имеют от одного до трех вертикальных цилиндров-роторов, вращаемых вспомогательным двигателем.

В качестве движителя может быть использован воздушный змей.

Прямоугольная рамная конструкция, обтянутая прочной синтетической пленкой и заполненная гелием, запускается с палубы судна. По сути, это тот же парус, но без мачты.

Преимуществом такого движителя является возможность использования воздушных потоков на разных высотах. На змее установлена метеорологическая аппаратура, которая передает информацию на судно. Змеем можно управлять с помощью перетекания газа во внутренних отсеках.

Одним из примеров ветряного движителя является парус в виде купольного парашюта длиной до 500 м и диаметром около 1 км, связанного с забалластированным поплавком, движущегося на высоте 170 – 300 м над уровнем воды. Такая высота, даже при отсутствии ветра поддерживается гелием или водородом, заполняющим специальные камеры парусов.

Примером движителя, типа надувное крыло, является параплан. Параплан состоит из купола, верхняя и нижняя поверхности которого соединены вертикальными нервюрами для придания сечению формы крыла и разделения его на секции. Они открыты спереди на передней кромке. В нервюрах есть отверстия, которые помогают равномерному распределению воздушного давления внутри. Несколько конечных секций крыла (уши) являются стабилизаторами.

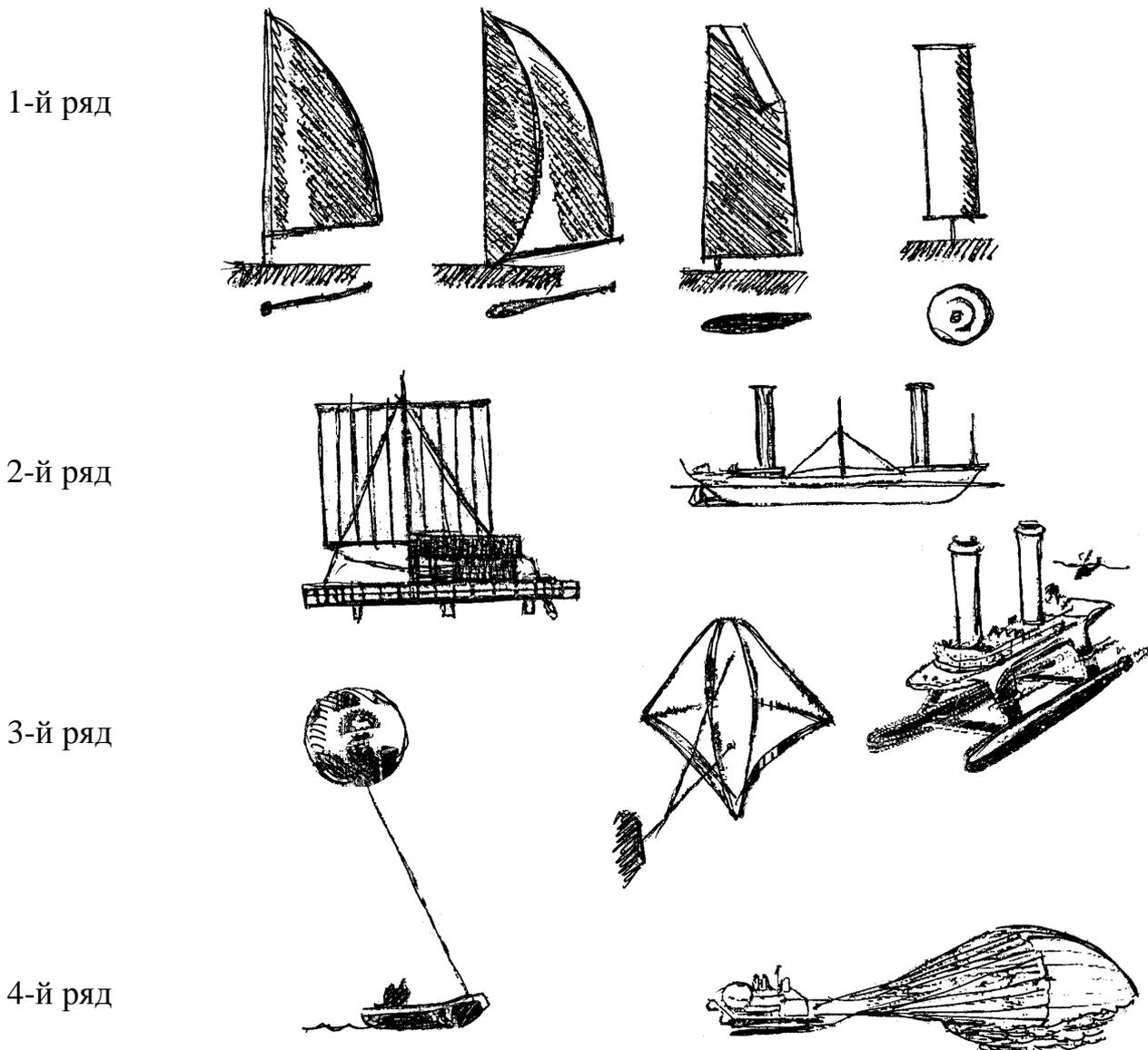


Рис. 1.15. Движители, приводимые в действие ветром:
 1-й ряд – мягкий, полужесткий, жесткий паруса, вращающийся ротор; 2-й ряд – инкский плот, Роторное судно Флетнера; 3-й ряд – воздушный змей, роторное судно с полупогруженным корпусом; 4-й ряд – аэростатный движитель, парашютный парус

Множество строп, соединяющих купол с сидением пилота, распределяют его вес по всей поверхности крыла и сохраняют его форму. Дополнительные стропы присоединены к левой и правой частям хвостовой кромки и заканчиваются петлями управления (клевантами) (рис.1.14).

Другим надувным летательным аппаратом является параглайдер. В отличие от крыла его купол имеет форму эллипса, используется герметичный материал оболочки, часто применяемые рейки и вставки из более прочного материала сохраняют заданную форму и более равномерно распределяют нагрузку от строп на большую часть купола. Как варианты, в качестве натяжения оболочки и придания конструкции подъемной силы может быть использован, в качестве рабочего, газ гелий (аэростат) или нагретый воздух (воздушный шар – тепло-стат) [27].

Применяемые в качестве движителей ветряки (ветродвигатели, крылья ветряной мельницы) имеют различные конструктивные решения. Здесь вращение вала ветродвигателя может передаваться с помощью трансмиссии на гребной винт судна, или приводить в движение электрогенератор, возможна комбинация ветродвижителей с крылом (парусом).

Таким образом, ветряной движитель, как правило, использует силу ветра, воздействующую на площадь парусности оболочки. В некоторых случаях частично используется разность плотностей рабочей и окружающей среды. Тяговое усилие осуществляется с помощью гибких тяг, равномерно распределенных по поверхности оболочки, или непосредственным воздействием на корпус и обеспечивающих прямолинейное перемещение присоединенного объекта.

Движители, воздействующие на воду

В природе известны движители, использующие реактивную энергию струи, – это, например, спрут. Причем природный движитель устроен так, что он использует в качестве рабочего тела среду перемещения и не выбрасывает в окружающее пространство продукты сгорания.

Движителем чемпиона по скорости – дельфина – является хвост, который гораздо эффективен, чем винт. Плоскость винта нормально расположена к направлению движения – потоку, поэтому он обладает собственным сопротивлением. Винт вращается поперек направления движения, поток, создаваемый винтом, резко турбулентен, и в нем образуется кавитация. Часть энергии винта расходуется на образование звука, и только 10 – 15 % энергии затрачивается на перемещение.

Для движения под водой обычно широко применяют ласты – устройство, которое копирует природные движители подводных обитателей. Практически это также реактивный движитель, использующий в качестве рабочего тела среду перемещения. Причем такой движитель применим для транспортирования различных текучих и сыпучих сред. Среди рассеянных источников энергии в наиболее сконцентрированном виде существуют: солнечная, ветровая, волновая.

Научно-технические программы освоения энергетических ресурсов океана могут быть представлены такими преобразователями волновой энергии как успокоитель волн Рассела, плоты Коккерела, нырок Селтера, камера Масуды [54].

Примером использования пневматических эластичных механизмов для преобразования волновой энергии могут быть, например, шарнирно сочлененные плоты Коккерела (рис. 1.16). Конструктивно плоты имеют длину около четверти длины волны (порядка 10 м) и ширину, соответствующую минимальной длине гребня волны (20 – 40 м). На шарнирах установлены гидравлические насосы, которые поглощают энергию относительно вращения смежных поплавков. Замена жестких элементов конструкции на надувные, как минимум, повышает эффективности ее использования.

Среди множества иных типов волновых станций, предлагаемых в литературе, интерес представляют станции типа: насос Денисенко, установка Денисенко и Щербакова и другие [54].

Несмотря на многообразие использованных принципов, эффектов и способов преобразования энергии, общими для них являются такие волновые эффекты как изменение уровня воды, переменные изгибания поверхности, продольные колебания в жидкости. У всех этих преобразователей энергии двигателем является переменное гидростатическое давление.

К двигателям, использующим разницу в плотности рабочей и окружающей среды (воды), относятся поплавки, понтоны, лодки, платформы и другие всплывающие надувные средства.

В табл. 1.8 приведена общая классификация устройств отбора энергии волнения океана.

К гравитационным двигателям относятся устройства, использующие массу заданного груза для осуществления перемещения объекта в прямолинейном или криволинейном направлениях. Например, гидронасосы, водяные мельницы, гидрозатворы и другие.

Эластичные тороидные двигатели

Еще одним двигателем реактивного (а также мышечного, торового) типа, непосредственно воздействующим на рабочую среду, является перистальтика – волнообразные сокращения, распространяющиеся вдоль полого органа в направлении от входа к выходу. Это единственный двигатель привода пищевых материалов от пищевода до прямой кишки [88].

Конструкция подобной оболочки относится к замкнутой двустенной цилиндрической (рукавной), торцы которой сформированы в виде полуторов. В наполненном состоянии за счет внутреннего распора оболочка сохраняет стабильное положение центральной части (струны), которая в свою очередь формирует тороидную поверхность торцев.

Торовые оболочки известны своей эффективностью и тяговой силой. Торовые двигатели применяются в подъемно-перемещающих, сжимающих, грузозахватных, и других силовых конструкциях, связанных с перемещением.

*Общая классификация движителей и устройств,
использующих волновую энергию*

Типы устройств, использующих волновые эффекты					
Изменения уровня воды	Скорость изменения уровня	Глубина взаимодействия с жидкостью	Ширина спектра взаимодействия	Тип движителя	Тип преобразователя энергии
Продольные колебания в жидкости	Горизонтальная скорость жидкости	Поверхностное	Узкополосная неадаптивная	Поплавковый	Гидротурбинный
Изменение наклона поверхности	Пространственная скорость жидкости	Ограниченного заглубления	С регулируемой настройкой	Поршневой	Пневмотурбинный
Переменное изгибание поверхности воды	Гидродинамическое давление	Произвольного заглубления (регулируемого)	Широкополосные	Объемнодеформируемый	Насосный гидравлический
	Переменное гидростатическое давление			Контактно-взаимодействующий	Непосредственный, электромагнитный

Известно применение торковых технологий также в запорных и регулирующих, восстановительных устройствах трубопроводов. При этом используются упругие свойства рабочей среды и эластичность материала, при которых достигается эффект регулирования наружного и внутреннего диаметра торкового элемента, названного механической мышцей [12].

Кроме того, конические тороиды обладают силовой функцией (способностью сохранять равновесное положение при выворачивании их в сторону меньшего торца), тем самым совершают работу по подъему или перемещению определенного груза в заданном направлении.

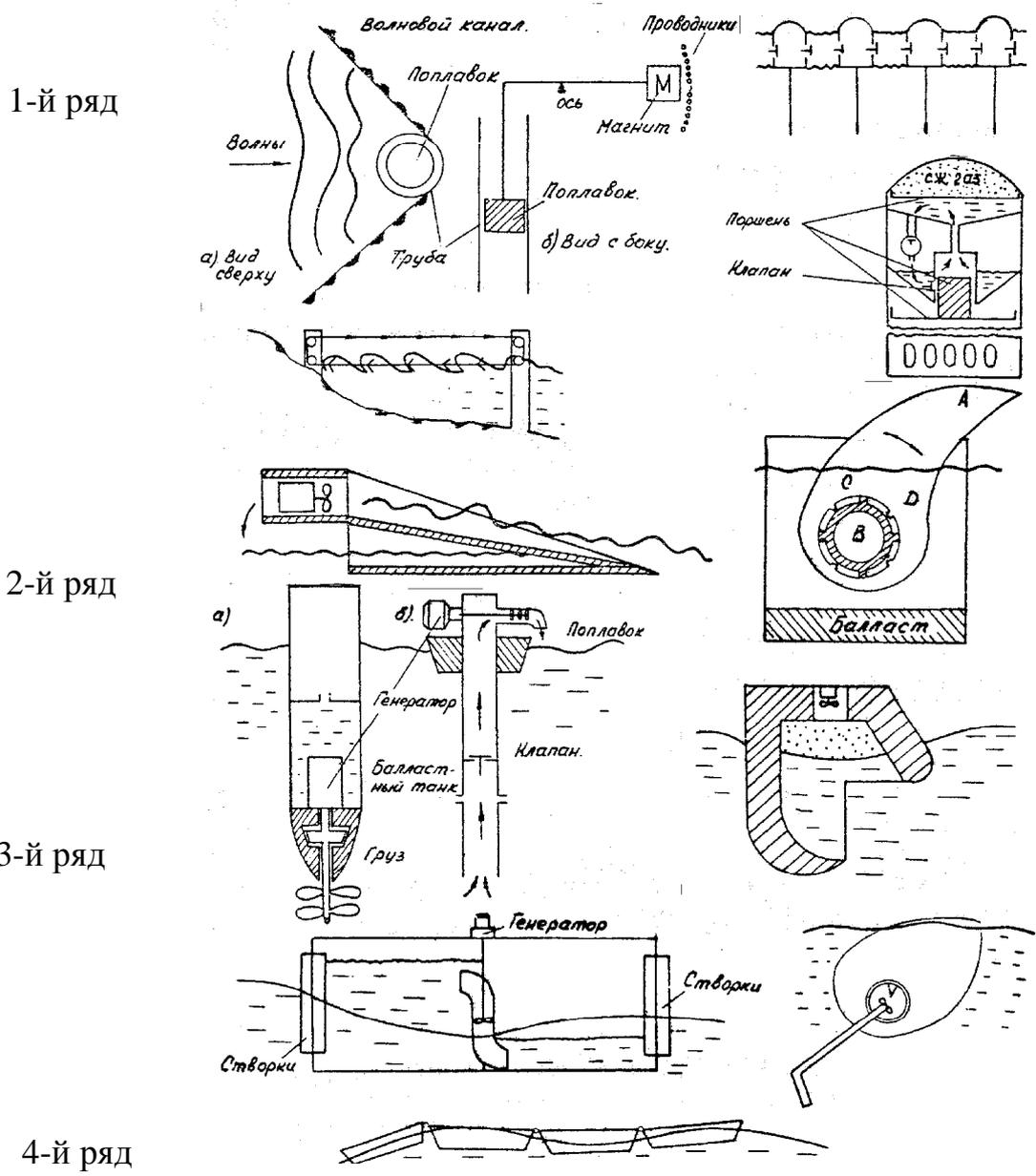


Рис. 1.16. Устройства отбора волновой энергии:

1-й ряд – станция прямого преобразования энергии волн в электрическую, волновой насос; ниже: устройство для преобразования энергии прибрежных волн, буй Кайзера; 2-й ряд – подвижный генератор, колеблющая лопасть, «нырок» Сельтера; 3-й ряд – волновые станции резонансного типа, воздушная камера Масуды; 4-й ряд – успокоитель волн Рассела, установка для использования энергии волн, плоты Коккерела

Важную роль в правильности выбранного научно-технического направления в области торových технологий для эластичной механики сыграли изобретения Р.З. Кожевникова, который сделал основополагающие исследования по цилиндрическому и конусообразному эластичным тороидам и проверил их работоспособность на действующих моделях [29 –36].

На рис. 1.17 схематически изображены различные варианты технических решений совершения механической работы по подъему и перемещению грузов (объектов) оболочечными мягкими конструкциями, выполненными с помощью торových технологий.

Таким образом, поверхность цилиндрического тороида обладает уникальной геометрической поверхностью, имеющей отрицательную, положительную и нулевую гауссову кривизну. Оболочечный тороид способен перемещаться поступательно внешней опоры (при выворачивании), при этом сохранять неподвижность относительно внутреннего жесткого или гибкого центрального тела (при наволакивании), перемещаться в зазоре между параллельными горизонтальными плоскостями, раздвигая зазор между ними. С помощью торových оболочек можно создавать новые (торовые) эластичные механизмы, бесступенчато преобразующие одни виды движения в другие, за счет упругости рабочего газа и несжимаемости рабочей жидкости совершать одновременно комплекс механических статических, динамических, циклических работ.

Эластичные преобразователи мускульных усилий

В отличие от широко распространенных колесных и гусеничных вездеходов с движителями монотонного опорного взаимодействия (монодвижители) существуют опорно-двигательные аппараты с дискретным взаимодействием (шагающие машины).

Согласно принятой классификации шагающие движители можно разделить на следующие: на основе жестких рычажных систем, с моделированной траекторией, с педипуляторным управлением, адаптивные.

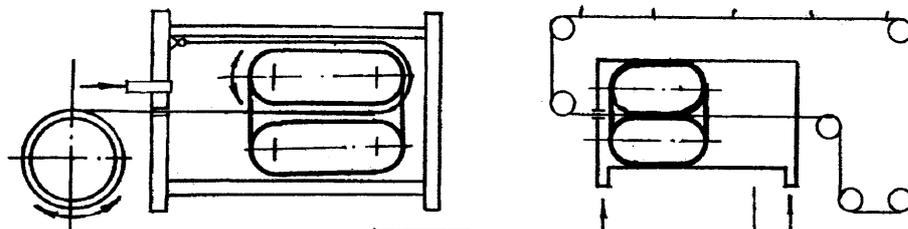
Движители, основанные на рычажных системах, предусматривают механический преобразователь, синтезирующий заданный механизм, и обеспечивающий неизменную траекторию опоры.

Машины с гибкой моделированной траекторией управляются оператором по заданным параметрам.

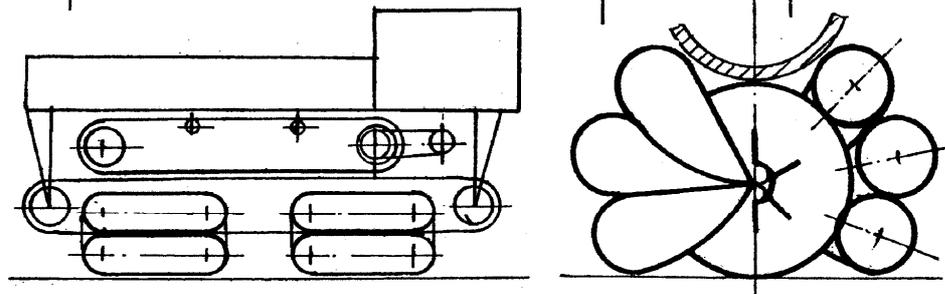
Педипуляторное управление основано на использование обратной силовой связи с движителем [12]. Одним из направлений подобных систем явилось создание так называемых антропоморфных экзоскелетов, крепящихся на тело человека, для реабилитации двигательных функций (рис.1.18).

В адаптивных шагающих движителях мыслительные человеческие возможности заменяются датчиками адаптации и вычислительной техникой.

1-й ряд



2-й ряд



3-й ряд

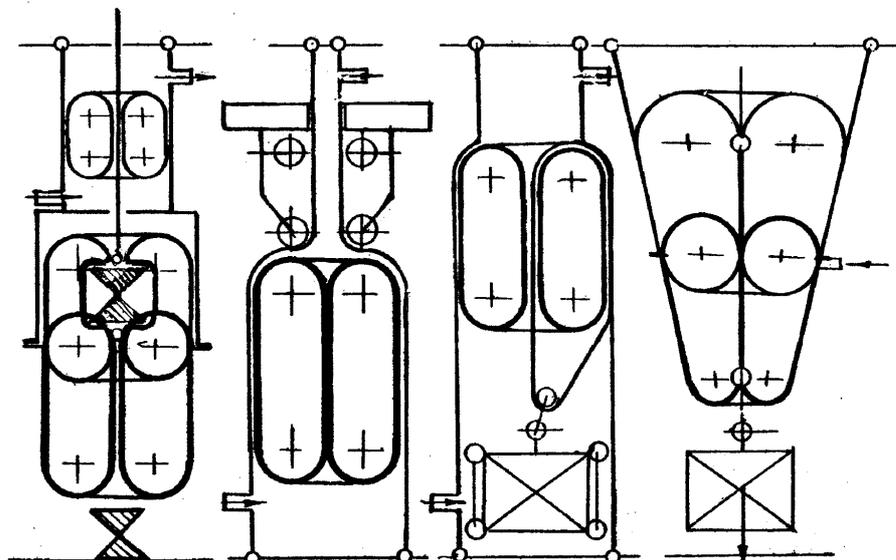


Рис 1.17. ТорOIDные движители:

1-й ряд: пневматическое устройство для затягивания кабельных изделий в трубопроводы [34], элеватор для транспортировки штучных грузов [35]; 2-й ряд: движитель транспортного средства [33], передвижная пневмоопора трубной плети [30]; 3-й ряд: грузозахватное устройство для подъема штучных грузов [32], пневматическая мачта [31], ударное устройство [36], устройство для подачи грузов в пневмоопорное сооружение [29]

Использование торового оболочечного движителя для создания бегущей волны позволило создать «ползающий» вездеход, у которого скорость движения можно регулировать запорным краном – переключателем, регулирующим направление бегущей волны и скорость перемещения.

Представление о функциональных возможностях этих пневмоконструкций может дать система мягких пневмосиловых элементов для перемещения платформы Магромувер [48].

Платформа (рис.1.19) представляет собой плоскую раму (2) из легких сплавов, перемещаемую без груза при высоте 125 мм на роликах (11). Под рамой установлены надувные трубы (3). Платформа подводится под контейнер (1). Через шланг (9) в оболочки (3) попадает воздух, приподнимающий контейнер.

Между трубами (3) под рамой на гибких связях (5) расположено резиноканевое днище (7), на котором укреплено два ряда сильфонов (8). Движущую силу платформе с грузом придают мускульные цилиндрические оболочки (6). Когда одна из них (правая на рисунке) надувается, она стремится подтянуть к себе через гибкий элемент (4) днище. Но так как в этот момент оно прижимается сильфонами к палубе, а оболочки (3) не испытывают давления, платформа с грузом перемещается в противоположную сторону на 200 мм.

Периодическое переключение воздуха, которое можно автоматизировать, позволяет перемещать контейнер в нужном направлении со скоростью до 4 м/мин. Пульт управления (10) выносной. Давление в сильфонах – 7 кгс/см², в мускульных элементах – 2 кгс/см². Платформа с грузом преодолевает препятствия высотой до 25 мм и подъемы с уклоном 1:10. Масса спаренной платформы 400 кг. При использовании платформ не требуется подкрепление палубы.

Замена жесткой рычажной системы на упругие оболочки позволяет перемещать (переползать) вездеходный аппарат путем переноса его центра тяжести. Для этого можно использовать оболочки управляемой формы, изменение поверхностного натяжения которых регулируется величиной внутреннего давления и формой (самокатящееся колесо, червяк, рыбий хвост).

Таким образом, природный источник технических идей и конструкторских решений – неисчерпаем. С развитием интеллектуальных машин и материалов появляется возможность использования низкопотенциальной энергии окружающей среды, потенциал которой безмерен.

Новая концепция амфибийных транспортных средств нетрадиционной конструкции

Весь цивилизованный мир покрывает гигантская сеть автострад и шоссе. Затраты на их строительство и содержание достигли поистине фантастических размеров, и все же пропускная способность современных дорог остается в полной зависимости от сезона и метеоусловий. А особенности ландшафта и климата, весьма сдерживающие развитие местных дорожных сетей, выразились в потребности внедорожников, амфибийном транспорте, многофункциональных средств, способных обходиться без дорог.

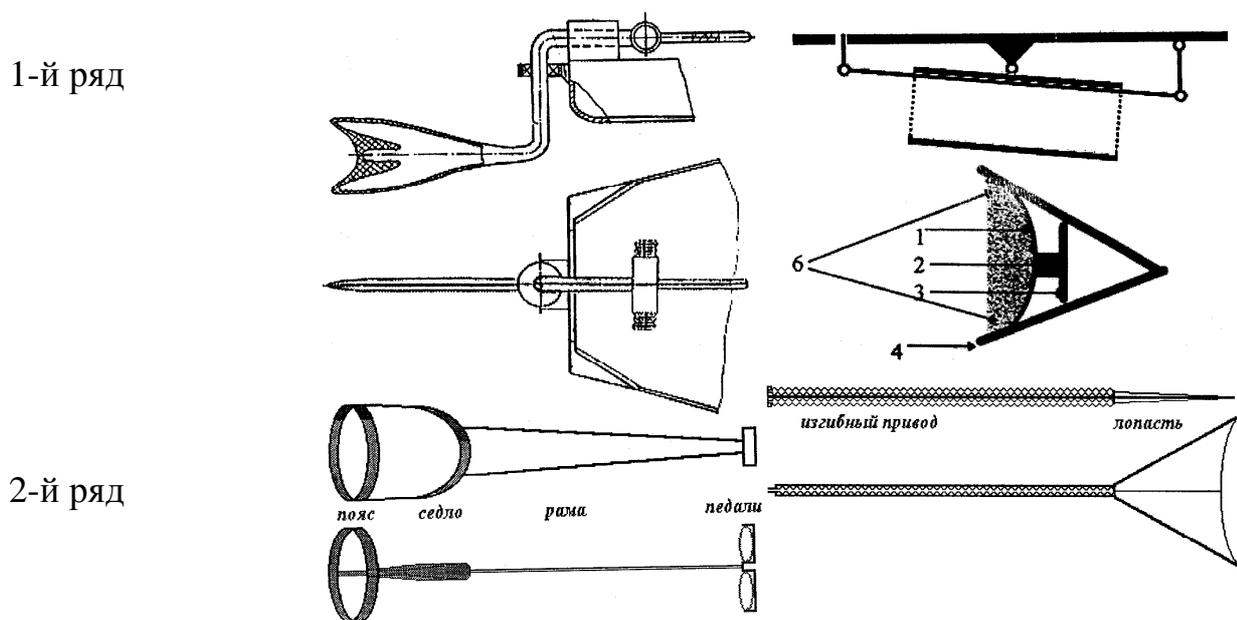


Рис. 1 18. Эластичные движители, приводимые в действие мускульными усилиями[29;30]:

I столбец: 1-й ряд (вид сбоку, сверху) – реактивные ласты; 2-й ряд (вид прямо, сбоку) – ножной привод (возвратно-поступательный);

II столбец: 1-й ряд (вид сбоку) – реактивная коробка (вид сверху), реактивные створки (1–3 – упруго-перемещающий привод, 4 – створки, 5,6 – рабочая среда); 2-й ряд (вид сбоку, сверху) – ножной привод (колебательный)

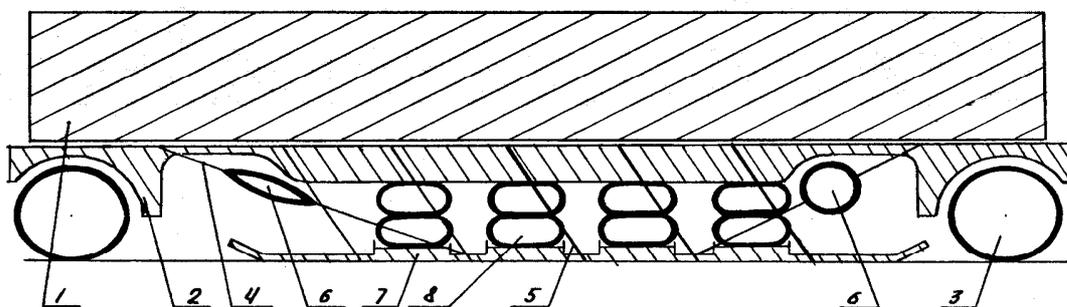


Рис.1.19. Платформа Магромовера

Перманентные попытки совершенствования ранее созданных аппаратов нетрадиционных конструкций с использованием последних достижений в области новых технологий и материалов показали на практике бесперспективность направления развития. Поэтому потребовалась новая концепция внедорожного полностью амфибийного транспортного средства, новых видов движителей.

К первым самоходным аппаратам-внедорожникам следует отнести танки. Главная идея их заложена в движителе. Это «гусеница» – бесконечная лента из шарнирных звеньев, приводимая в движение двигателем внутреннего сгорания через трансмиссию и как бы представляющая часть дороги, принадлежащей транспортному средству. К их модификациям относятся болотоходы, снегоходы, амфибии [1,2].

Концепция аэросаней основана на универсальности такого движителя, как воздушный винт. Традиционная схема аэросаней: корпус на амортизационных опорах (лыжах, поплавках в зависимости от сезона) с кормовым движителем.

Для аэросаней-амфибий отсутствие эффективной амортизации опорной поверхности и надежных систем торможения отнесло их в разряд неперспективных. Главная идея аппаратов на воздушной подушке – использование одного из динамических принципов поддержания корпуса над опорной поверхностью и снижение сопротивления движению путем наддува воздуха под днище аппарата. Суда на воздушной подушке разделяются на амфибийные (двигатель – воздушный винт) и скеговые (водомотный движитель). К недостаткам следует отнести почти полное отсутствие контакта с поверхностью среды. Отсюда – зависимость от рельефа берега, ветра, большие заносы при маневренности, отсутствие эффективных систем торможения.

Наземные АВП могут иметь колесный движитель в сочетании с водометом и гибким ограждением воздушной подушки, частично разгружающим удельное давление колес на грунт. При этом колесный движитель может использоваться как опорное или гребное колесо (в режиме вакуумирования) [48] (рис. 20).

Принцип динамического поддержания корпуса над опорной поверхностью (с помощью авиакрыльев) использован в экранопланах. Экраноплан – аппарат для полета вблизи от поверхности среды передвижения. Использование «экранного эффекта» выражается в резком увеличении подъемной силы крыла. Аппараты подразделяются на три отдельно сертифицируемых разновидности: экранопланы, экранолеты и самолеты. Двигителем является воздушный винт.

Ряд аппаратов нетрадиционных конструкций можно продолжить: шнекоходы (двигатель – вращающиеся в противоположные стороны боковые цилиндрические шнеки), гидролеты, виброходы, шагоходы. Однако концепция их развития прослеживает совершенствование существующих конструкций нетрадиционных транспортных средств.

Новая концепция амфибийного транспорта определилась в проекте «роллеркрафта» с использованием альтернативного универсального движителя. Главная его идея – окруженные эластичной оболочкой гребные колеса – роллеры, которые имеют изменяемое водоизмещение.

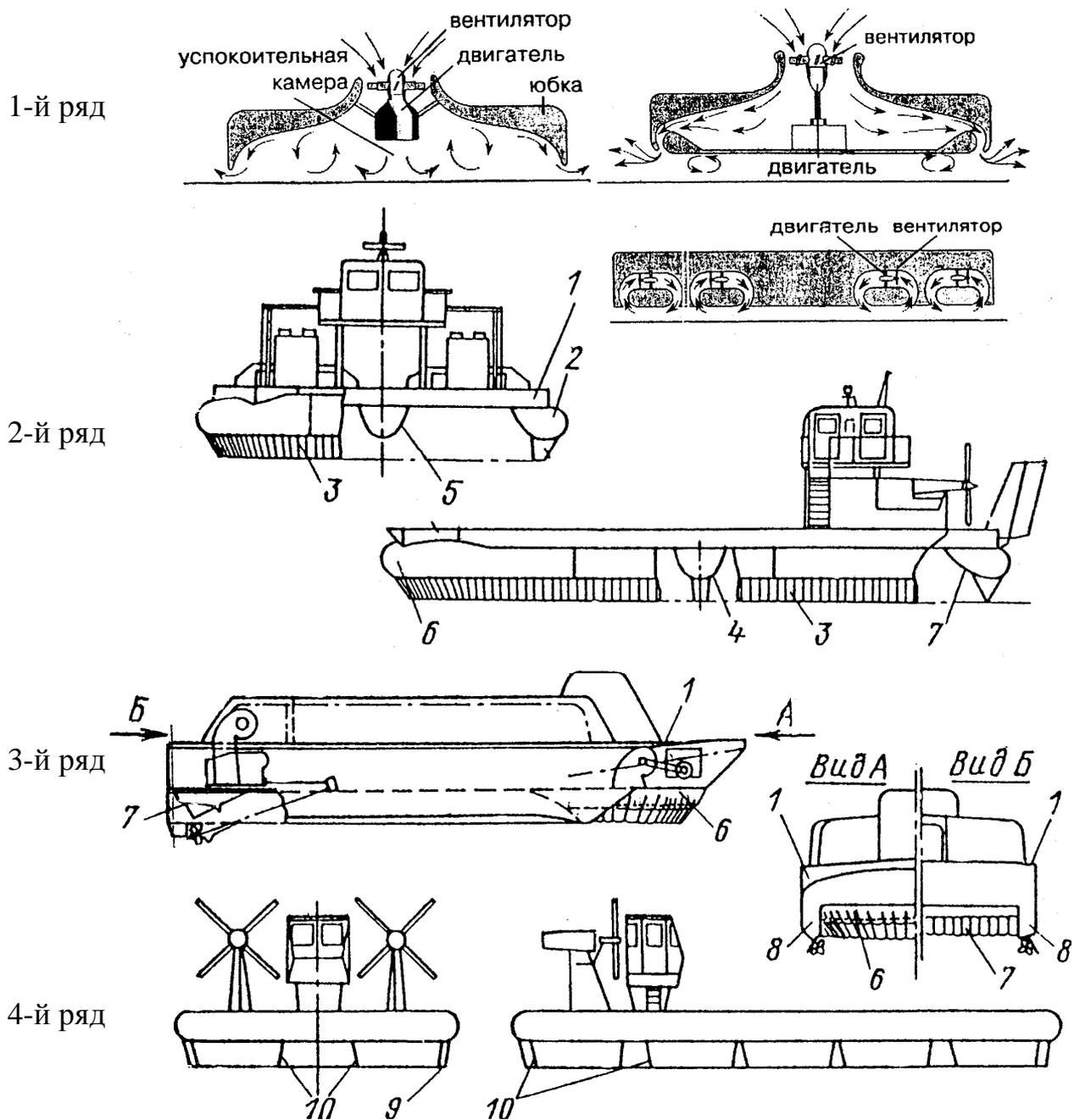


Рис. 1. 20. Аппараты на воздушной подушке:

1, 2-й ряды – схемы воздушной подушки наземных аппаратов: камерные; сопло-щелевые; многорядно-сопловые; 2, 3-й ряды – морские суда: 1 – корпус, 2 – ресивер, 3 – сопловые элементы (4 – поперечное и 5 – продольное), 6 – носовое и 7 – кормовое гибкое ограждение, 8 – скеги, 9 – наружное полотнище, 10 – конусные камеры

Расположенные вдоль носовой и кормовой оконечностей широкого корпуса, роллеры поддерживают аппарат над поверхностью среды передвижения и одновременно служат движителями. При движении по водной поверхности давление в роллерах снижается, обеспечивая необходимый для создания упора профиль лопаток гребного колеса. При выходе на сушу давление в оболочке повышается и роллер принимает форму пневматика (рис. 1.21). Характеристики роллер-крафта близки к автомобилям, например, наземным аппаратам на воздушной подушке с колесным движителем [61, 62, 77].

Все перечисленные выше аппараты нетрадиционной конструкции представляют существенный прогресс на пути создания полностью амфибийных внедорожных транспортных средств. Однако из-за присущих им органических недостатков, окончательного решения указанной проблемы не найдено. Воздушный винт в качестве универсального движителя далек от совершенства. В тех же условиях иные движители амфибий: колесные, гусеничные, водометы, а также гребные винты и колеса весьма эффективны, но только при работе в соответствующих средах. Новая концепция опирается на такие базовые требования, как универсальность движителя, гибридная модульность корпуса, совместно с двигателем высокой энерговооруженности.

Требуемый движитель без предварительной подготовки должен быть способен реализовать и совмещать функции ведущего колеса, гусеничного движителя, гребного колеса, водомета, воздушного нагнетателя.

Воспринимая регулируемый приводящий момент, движитель адекватно должен сообщать корпусу упор на любых профилях поверхностей различных сред и их комбинаций во всем диапазоне скоростей. Движитель обеспечивает переход из одной среды в другую без предварительной подготовки; имеет систему амортизации и подвески, предохраняющую его от повреждений и не допускающую потерю контакта с поверхностью среды передвижения во всем диапазоне скоростей; осуществляет эффективное торможение.

Таким образом, в основе новой концепции полностью амфибийного внедорожного транспортного средства должен быть альтернативный, свободный от недостатков, но суммирующий достоинства упомянутых, универсальный движитель. Универсальный движитель должен создавать упор на поверхности той среды или комбинации сред, по которым происходит перемещение, иметь систему амортизации, эффективный способ торможения. Таким движителем может быть мягкий пневматический.

Выводы

Исследование природного происхождения движения привело к созданию новых видов движителей – мягких оболочек.

Традиционно подобные системы состоят из окружающей среды, на которую воздействуют движущие силы, источника энергии, двигателя, движителя, функциональных элементов, подсистемы управления.

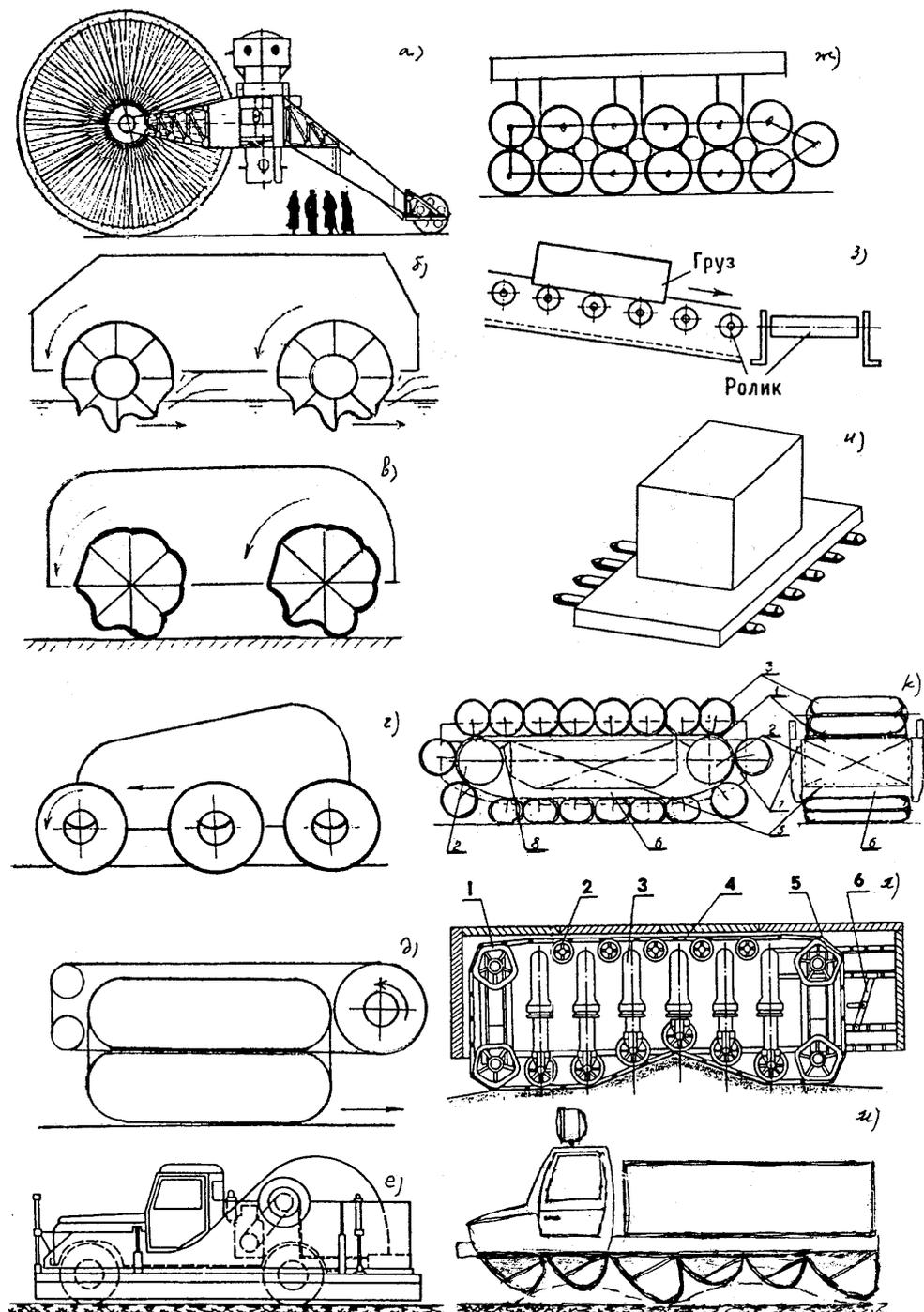


Рис.1.21. Наземные нетрадиционные вездеходы:

а – колесный танк; б,в – роликкрафты; г – колеса сверхнизкого давления; д – торовые; е – средство на воздушной подушке с колесным движителем; ж – катковый движитель д`Эрмана; з – роликовый привод; и – пневмокатки; к – воздухоопорная гусеница (1-лента гусеничная, 2 – барабан, 3 – пневмоплица, 4 – мембрана, 5 – понтон, 6 – нижняя полость, 7 – скег, 8 – уплотнение); л – гусеничный движитель (1 – колесо, 2 – ролик, 3 - рессора, 4 – гусеница, 5 – привод, 6 – корпус); м – шагающий пневмодвижитель

Отсюда основными источниками систематизации функциональных свойств эластичных движителей являются: окружающая среда, вид движения и механизм взаимодействия рабочей среды с мягкой оболочкой. Ветряной движитель использует силу ветра (воздушный напор), воздействующий на площадь парусности оболочки. В некоторых случаях используется разница в плотности рабочего газа и окружающего воздуха (аэростат).

Тяговое усилие при этом осуществляется гибкими тягами. К движителям, использующим разницу в плотности рабочего газа и окружающей воды относятся поплавки, понтоны, лодки и другие надувные плавсредства.

Таким образом, в создании вездеходной техники появились новые концепции нетрадиционного перемещения по твердой и водной поверхности, преодоления неровностей и препятствий – колесный мягкий движитель на пневматиках. Разработка данного направления приближает дизайнеров к созданию нового нетрадиционного многофункционального пневмодвижителя, обладающего уникальными свойствами гусеницы, колеса, катка и воздушной подушки.

1.5. МЯГКИЕ ТОРОИДАЛЬНЫЕ ДВИЖИТЕЛИ В ТРАНСПОРТНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Торовые технологии и эластичная механика

Исследование природного происхождения движения привело к созданию новых нетрадиционных видов движителей – мягких оболочек.

Традиционно подобные системы состоят из окружающей среды, на которую воздействуют движущие силы, источника энергии, двигателя, движителя, функциональных элементов, подсистемы управления.

Конструктивные особенности мягких оболочек, рационально использующих энергию сжатого газа, можно найти в свойствах таких мягких оболочек, как тороиды. С помощью тороидных оболочек можно обеспечивать продольное и поперечное перемещение, создавать тяговое усилие. За счет свойства «выворачивание – наволакивание» тороидные цилиндрические оболочки используются в эластичных механизмах в качестве мягких движителей. Замена жесткой рычажной системы или механизмов с гибкими тягами на упругие оболочки позволили обеспечить вездеходность транспортному средству, за счет перемещения его центра тяжести относительно неподвижной опоры [49, 90].

Предложенные виды тороидных оболочек (см. рис. 1.2) дают представление о широких возможностях использования их в составе эластичной механики. Они могут найти применение практически во всех областях техники, транспорта, промышленности и народного хозяйства. Такие конструкции различаются по форме и размерам, материалам и рабочим средам, условиям закрепления и функционирования (рис.1.22).

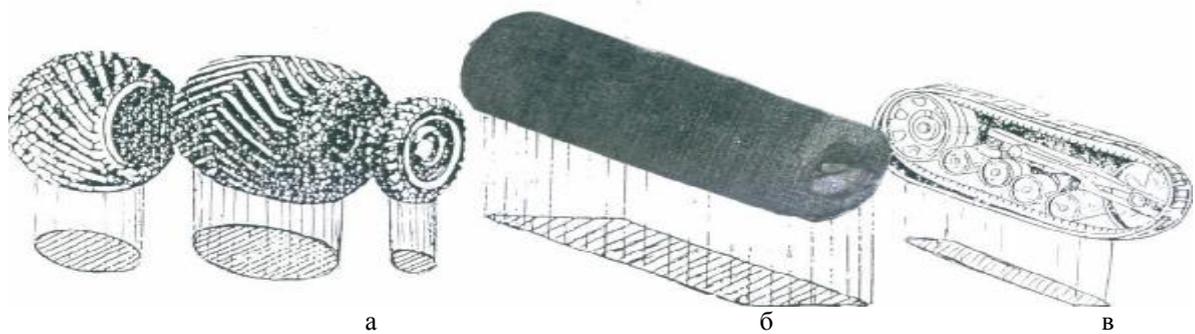


Рис. 1.22. Площади контактной поверхности:

а – арочной шины, пневмокатка, обычной шины, б – эластичного тороида и в – гусеницы

Таким образом, в создании вездеходной техники появилась новая концепция нетрадиционного перемещения по твердой и водной поверхности, преодоления неровностей и препятствий без проскальзывания. Разработки в этом направлении приближает дизайнеров к созданию нового нетрадиционного многофункционального пневмодвижителя, обладающего уникальными свойствами гусеницы, колеса, катка и воздушной подушки.

Обоснование применения

Новым направлением в технике ознаменовался приход в промышленность эластичной механики и торовых технологий, созданных на стыке таких наук как механика, физика, химия, математика. А с привлечением электроники, бионики, информатики и нанотехнологий появилась возможность создания интеллектуальных конструктивных материалов и биороботов.

Принцип тороидального движения известен в природе в виде перистальтических процессов и способов локомоции у беспозвоночных; систем циркуляции морских и океанических течений, воздушных потоков; структуры циклонов, комет, галактик и т. д.

Основным конструктивным элементом является мягкая оболочка тороидной формы, обладающая не менее чем пятью степенями свободы перемещений.

Форма эластичного тороида представляет бесконечную цилиндрическую или коническую замкнутую оболочку двустенного рукавного типа, которые отличаются по своим функциональным и конструктивным особенностям. Перемещение груза (рис.1.2) осуществляется за счет внешних нагрузок (подпор) вдоль направляющей и внутренних усилий (разность натяжений верхнего и нижнего торца).

Выворачивание поверхности – свободное или заневоленное. Сравнительные тяговые усилия в оболочках: минимальное – в цилиндрической и максимальное – в конической.

Периферия тороида с положительной гауссовой кривизной поверхности плавно переходит в центральную часть с поверхностью отрицательной кривизны и затем снова замыкается с периферией. Граница раздела между периферией и центральной частью находится на его торцах и является линией (кольцом) изме-

нения знака кривизны. При поступательном перемещении оболочка тороида выворачивается и/или наволакивается, при этом его периферия постоянно меняется местами с центральной частью (см. рис.1.23).

В зависимости от способа закрепления (по образующим периферии, центральной части или по торцу) за счет натяжения поверхности оболочки осуществляется перемещение или торможение его движения.

Использование оболочек управляемой формы, изменение поверхностного натяжения которых регулируется величиной внутреннего избыточного давления и размерами, позволяет предложить новую концепцию использования пневматики низкого и сверхнизкого давления для создания нетрадиционных движителей транспортных средств, в том числе наземных.

Тороидальный движитель внедорожного транспортного средства (рис. 1.23б) состоит из гибкого привода эластичных тороидных оболочек-опор (10); выворачивающей эластичный тороид тяговой бесконечной ленты (9), расположенной между натяжными роликами и фрикционно связанной с внутренней поверхностью (1) опоры. Гибкий привод состоит из двигателя с ременной передачей, вращающей приводной ролик бесконечной ленточной тяги, и натяжного роликового устройства, закрепленных на платформе транспортного средства.

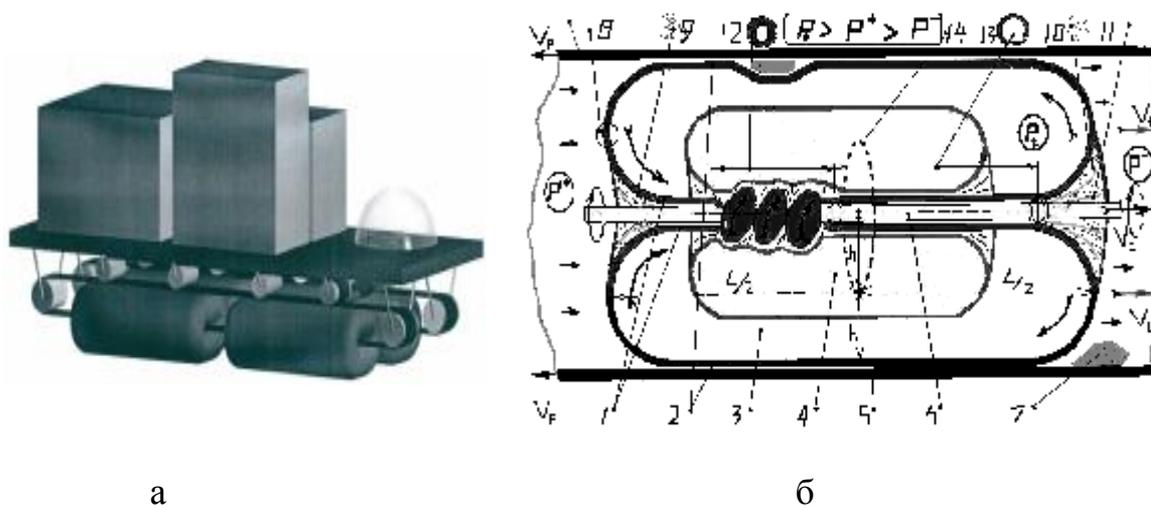


Рис. 1.23. Мягкий пневматический тороидальный движитель транспортного средства: а – общий вид макета транспортного средства; б – комплексный эластичный (тороидальный) механизм

Принцип действия и свойства тороидального движителя

Движитель работает следующим образом.

Привод от двигателя через ременную передачу и приводной ролик перемещает фрикционную ленту, прижимающуюся к внутренней поверхности тороидных

опорных оболочек. Фрикционная лента, зажатая в центральной части тороидной оболочки, перемещаясь, выворачивает оболочку в сторону перемещения. Эластичная тороидная оболочка, заполненная воздухом под сверхнизким избыточным давлением, взаимодействует с опорной поверхностью, перемещаясь вместе с платформой в противоположное от движения фрикционной ленты направление. Перемещение осуществляется качением без скольжения относительно контактной поверхности опоры.

Основные конструктивные элементы комплексного тороидального механизма: Эластичный тороид – тонкая эластичная/мягкая тороидальная оболочка, заполненная рабочей текучей средой под избыточным давлением P_t , где 1 – центральная часть, 2 – периферия эластичного тороида, 3 – рабочая текучая среда под избыточным давлением, 4 – внутреннее периферийное тело, 5 – внешнее периферийное тело, 6 – центральное тело, 7 – препятствие, 8 – точка, торцевая кривая (овал) перегиба, 9 – «вогнутый», наволакивающийся ведущий конец/торец эластичного тороида, 10 – «выпуклый», выворачивающийся ведомый конец/торец, 11 – складки.

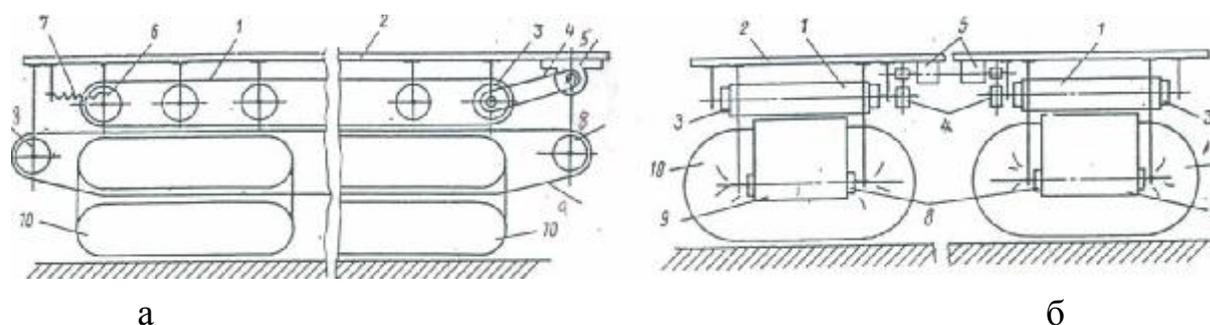


Рис. 1.24. Один из простейших конструктивных вариантов тороидального движителя: а – вид прямо; б – вид с торца; 1 – приводная, ведущая бесконечная лента, 2 – рама (платформа), 3 – ролики приводной ленты, 4 – передача (ременная), 5 – двигатель, 6 – натяжной ролик, 7 – механизм натяжения, 8 – ролики фрикционной бесконечной ленты, 9 – фрикционная бесконечная лента, 10 – эластичный тороид

Возможно использование коаксиальных тороидальных опор, отличающихся конструкцией и дополнительным движущим воздействием, осуществляемым натяжением (закручиванием) внутренней поверхности опоры, где 12 – «бегущие закрутки»/витки/узлы (постоянное/неизменяемое количество), 13 – цилиндрический «колодец», 14 – средняя линия (овал) – струна внутреннего эластичного тороида.

Составной частью торцов эластичного тороида являются, соответственно, воронка⁺-предиктор (повышенное давление P^+) и воронка⁻-корректор (пониженное давление P^-). При этом $P_t > P^+ > P^-$. Периферия эластичного тороида через торцевую кривую линию перегиба и воронку-предиктор «переходит» в его центральную часть, которая, в свою очередь, через воронку-корректор и через другую торцевую кривую линию перегиба переходит обратно в его периферию.

Скорость перемещения и тяговое усилие регулируется мощностью двигателя. Режим торможения – бесступенчатый фрикционный.

Перемещение под действием внешних или/ и внутренних сил тороида происходит путем выворачивания или наволакивания по жесткой или мягкой опорной поверхности, с обволакиванием ее деформированных участков и различных по высоте выступов. Скорость движения центральной части тела относительно периферии тора при выворачивании, как и наружной поверхности относительно центральной части при наволакивании, имеет вдвое большую величину.

Возможно перекачивание оболочки в поперечном направлении, подобно катку или колесу [90].

Тороидная опора заданного диаметра осуществляет перемещение платформы транспортного средства с зазором (клиренсом) между опорной поверхностью и днищем, равным высоте оболочки, деформированной массой средства, и регулируется давлением в опоре (рис. 1.24).

Высота воздушного зазора между основанием и центральным телом (фрикционной лентой), равно половине величины клиренса. При наезде на локальное препятствие высотой равной и большей высоты центрального тела деформированная опора наволакивается на него. При этом, в деформированной оболочке изменяется объем, что приводит к повышению давления и компенсации натяжения оболочки. Натяжение поверхности оболочки сглаживает величину деформации, а горизонтальная составляющая выворачивающего (тягового) усилия (F) значительно превышает сопротивление на преодоление препятствия.

Процесс перемещения тороидной опоры над препятствием

Экспериментально подтверждено, что в случае контакта центральной части опоры с препятствием между ними возникает воздушная прослойка (подушка), препятствующая механическому повреждению [89].

Смягчение колебаний груза на платформе транспортного средства при перемещении через препятствия возможно за счет регулирования (снижения) рабочего давления в опорах.

Традиционный колесный движитель не предусматривает выворачивания своей оболочки относительно оси вращения. Тип его движения – качение вокруг оси вращения. В силу конструктивных особенностей колесо представляет собой мягкую оболочку, защищенную резино-армированной покрышкой и каркасированную жестким диском. Существуют колесные движители на пневматиках сверхнизкого давления, которые по своим свойствам можно объединить с мягкими тороидными оболочками. Однако, последние обладают рядом преимуществ.

Мягкие тороиды обладают повышенной контактной поверхностью, которая за счет цилиндрической формы практически не ограничена по площади. За счет увеличенной площади внутренней поверхности оболочки мягкие тороиды, при той же величине давления, имеют вдвое меньшее натяжение, чем, например, у цилиндра.

Наличие центральной части оболочки (внутренней стяжки) снимает часть растягивающих натяжений с поверхности оболочки. Уменьшение натяжения снижает сопротивление изгибу при наволакивании и складкообразованию при преодолении препятствий.

Снижение рабочего натяжения позволяет более рационально использовать рабочее давление для совершения механической работы (подъем груза, перемещение). Наличие центральной части у тороидной оболочки позволяет использовать ее для расширения технологических и функциональных свойств, например, крепления на ней дополнительного оборудования и монтажной оснастки, осуществлять аварийные работы по перемещению (буксированию, самовытаскиванию) объектов.

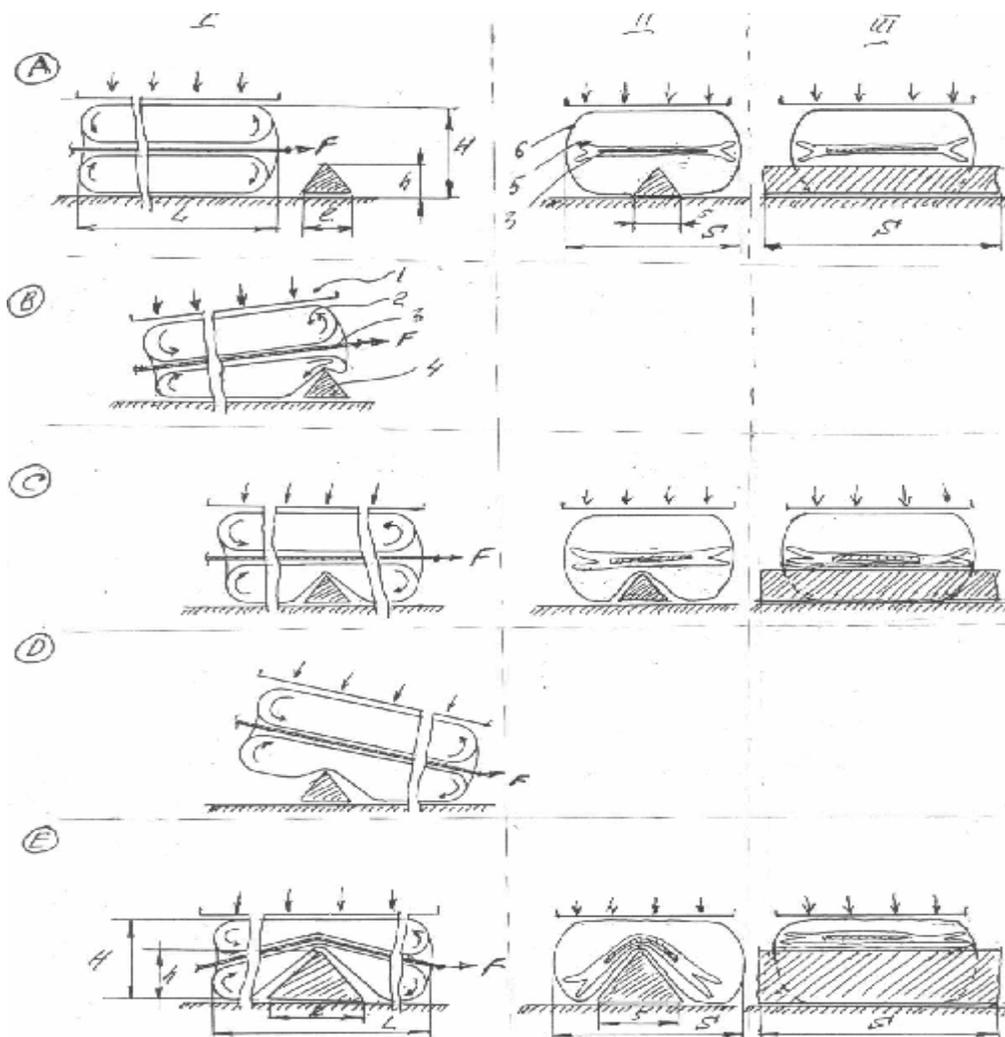


Рис. 1.25. Поведение эластичного тороида при преодолении препятствий различных размеров: А – перед наездом на препятствие, В – начало наезда, С – преодоление препятствия, D – съезд с препятствия, E – деформация опоры над препятствием; F – тяговое усилие 1 – груз, 2 – эластичный тороид, 3 – центральное тело – бесконечная лента, 4 – препятствие, 5 – центральная часть эластичного тороида со складками, 6 – периферия эластичного тороида

Преимущества эластичных машин и механизмов

Эластичные механизмы имеют возможность получения новых форм движения, свойственных текучей среде, таких как: наволакивание, выворачивание, обладают бесступенчатым управлением и плавностью регулирования, экологической чистотой, бесшумностью работы.

Эластичные тороидные опоры не имеют ограничения по длине и могут иметь геометрические размеры, изменяющиеся от долей миллиметров до десятков, сотен метров при определенных их пропорциях.

Преобразование видов тороидного движения оболочки и кинематически связанных с ней конструктивных элементов включает, например: подъем, перемещение, плавание, дрейфование, перемещение в прямолинейном и под углом направлении, а также пульсирование, волновое движение, колебание вдоль и поперек осей вращения, складывание в управляемую форму, телескопическое перемещение и т.п.

При целенаправленном программировании функций повышается КПД, преобразовывается энергия рабочей среды, заключенной в эластичную оболочку, а также движение без скольжения в движение качения (эффект «колеса»).

Низкая материалоемкость эластичных конструкционных материалов оболочек позволяют создавать конструкции с минимальной массой и малыми габаритами при хранении и транспортировании.

Такие механизмы обладают высокой мобильностью, простотой эксплуатации, ремонта, монтажа и демонтажа, особенно в экстремальных условиях;

Конструктивные элементы эластичных механизмов имеют высокую универсальность использования. Эти устройства могут работать (функционировать) в условиях экстремальной экологии в ограниченном или неограниченном воздушном или безвоздушном пространстве, на воде или под водой, в жидких и сыпучих средах и Космосе.

Таким образом, использование эластичных механизмов в различных отраслях промышленности, в частности в транспортном машиностроении, позволяет применять новые направления в конструировании, открывающие не только совершенствование существующих машин, но и создание новых подходов в классической механике.

Выводы

Тороидальное движение является новым направлением в естественных и технических науках. На основе тороидального движения построены и функционируют многие природные конструкции, так называемые *тороидные эластичные машины и механизмы* [91].

При этом тороидальным движителем является герметичная эластичная мягкая оболочка (*эластичный тороид*), заполненная газовой рабочей средой под избыточным давлением.

К элементам этой системы относятся датчики и исполнительные механизмы, информационные и энергетические связи, центры обработки информации, генераторы, преобразователи энергии и т.п.

Под воздействием внешних и внутренних сил тороидальный вездеход использует и сохраняет следующие функциональные особенности:

- перемещается путем выворачивания или наволакивания по твердой, слабой и любой другой опорной поверхности, «омывая» ее деформированные участки и инородные включения, при этом самоуплотняется в замкнутой, охватывающей его периферию, поверхности («сам себя находит»);

- обеспечивает широко регулируемую площадь контакта и небольшие удельные давления на опорную поверхность с низким рабочим давлением текучей среды в своей оболочке;

- создает тяговые усилия и ударный эффект;

- преобразовывает виды движения, например, поступательное во вращательное и наоборот;

- наволакиваясь на предмет, захватывает его независимо от его формы, удерживает и/или перемещает его внутри себя с регулируемым обжимающим усилием («мягкий» захват);

- выворачиваясь, выталкивает с различной начальной скоростью находящийся внутри себя предмет;

- выворачиваясь и/или наволакиваясь переходит из одного устойчивого состояния в другое;

- при образовании поперечной складки в точке «залом» своей центральной частью (центральным жгутом) соприкоснется с периферией, сохраняя перемещение и шарнирное качение, по меньшей мере, одного свободного конца;

- при выворачивании и наволакивании скорость поступательного движения центрального жгута, по крайней мере, в два раза больше скорости поступательного движения тороида относительно его периферии;

- при продольном перемещении перемещается дополнительно и в поперечном направлении и т.п.

Функциональные возможности машины или механизма, имеющего в своем составе эластичный тороид, увеличиваются, как минимум, в два раза, поскольку эластичный тороид на своей внешней поверхности имеет две рабочие поверхности – центральную часть и периферию, плавно переходящих друг в друга – двухсторонняя замкнутая поверхность

Таким образом, оболочка тороидного движителя может использоваться автономно в экстремальных условиях в качестве домкрата, грузового катка, пластыря, бандаж, заглушки, понтона, аппарата, фашины (для преодоления траншей, рвов), а в бытовых условиях – опор, балок, емкостей и т.п. Из-за незначительных массы и объема в уложенном положении они могут храниться в составе транспортного средства в качестве запасных принадлежностей.

Глава 2. МЯГКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Роль классической механики заключается в преобразовании механической работы в работу перемещения, привода, исполнительного механизма, а также преодоления сопротивления допустимым внешним воздействующим факторам.

В основном, слабой стороной таких механизмов является отсутствие обратной связи в системе управления и контроля. Введение управления на базе электрических и других энергозатратных технологий усложнит систему управления, не уменьшая материалоемкости металлической части.

Для установления ограничений в работе классической системы требуются дополнительные энергетические ресурсы, по составу и сложности не уступающие основным.

Предельно допустимые нагрузки элементов классических механизмов также являются ограничителями их возможностей.

Следовательно, целесообразным является введение нетрадиционной механики машин и механизмов на базе гибких, упругих и эластичных связей, стойких к циклическим нагрузкам, восстанавливающих функциональные возможности после снятия предельных нагрузок.

Одно из таких направлений – переработка эластичных механизмов. Эластичные механизмы относятся к нетрадиционным, выполняющим роль многофункциональных, входящих в состав силовых и движительных машин, рабочим элементом которых является сжатая рабочая среда, замкнутая в мягкую оболочку.

Мягкой называется оболочка, изготовленная из мягких материалов по технологии, соответствующей их свойствам (механическая, конфекционная, тепловая или химическая сборка).

К мягким материалам относятся тонкостенные пластины и оболочки практически не обладающие сопротивлением к изгибу. Следовательно, такие материалы обладают лишь разрывной прочностью и в рабочем состоянии способны выдерживать значительные растягивающие нагрузки.

Следует отметить, что мягкая оболочка без предварительного напряжения не имеет собственной формы. За счет распределенной погонной растягивающей (от действия внутреннего давления рабочего газа) нагрузки оболочка принимает раскройную форму. А под действием внешней сжимающей нагрузки – рабочую (расчетную).

Мягкая оболочка выполняет механическую работу при различных способах закрепления: свободнолежащие (плавающие); свободнолежащие (на твердом или жидком основании); закрепленные в точках, по образующим, по плоскости. По конструкции они могут быть свободными, армированными, полужесткими, каркасными.

Раскройная форма оболочек представляет: простую – осесимметричную поверхность вращения (сферу, цилиндр, конус, тор); деформированную и составную. Следует отметить, что ввиду значительной разности в модулях растяжения материалов оболочки и модуле сжатия рабочего газа (воздуха) раскройную форму оболочки следует рассматривать как каркасирующую.

Сжатая рабочая среда формирует поле давления (напряжения поверхности), которое в диапазоне рабочих давлений мягких оболочек имеет сферический потенциал. Поэтому поверхностями равного потенциала являются: сферическая и ее производные (цилиндрическая, торовая, панельная).

Под действием внешних сжимающих (каркасирующих) нагрузок изменяются соотношения геометрических размеров напряженной оболочки, создаются условия складкообразования (потери несущей способности), эквивалентных образованию шарнира. Снятие предельных нагрузок приводит к восстановлению первоначальной формы и несущей способности. Таким образом, условие складкообразования является обратной связью с нагруженной мягкой оболочкой.

Так как рабочими являются внешняя и внутренняя поверхность оболочки, расчетным следует рассматривать энергетическое равновесие между работой давления и объема рабочей среды и работой растяжения замыкающей оболочки. При этом деформирующая работа внешней нагрузки изменяет величины уравнивающих ее работ объема и давления, распределенного как по поверхности контакта, так и по значительно уменьшенной внутренней поверхности, свободной от контакта.

Возможность автоматического управления давлением рабочей среды оболочки позволяет программировать работу и обратную связь внешних и внутренних сил эластичных механизмов, создавая бесступенчатое нагружение и регулирование пневмодвижителей (манипуляторов).

Использование свободной от контакта достаточно развитой поверхности оболочки для закрепления датчиков контроля имеет большие возможности применения этих механизмов в роботостроении. А использование нанотехнологии в конструировании мягких материалов (введение чипов в состав армирующего материала или состав покрытия) открывает большие перспективы в развитии кибернетики.

Таким образом, благодаря уникальным свойствам мягких конструкционных материалов получило развитие новое направление – разработка нетрадиционных эластичных механизмов. Они обладают большим числом степеней свободы перемещения, способны совершать механическую работу и передавать силовые функции другим механизмам, легко управляются оператором и позволяют контролировать заданную нагрузку. Эластичные механизмы могут входить в состав классических механизмов и существовать параллельно, выполняя аналогичную работу. Рабочая среда подобных механизмов – воздух и вода. Затраты на сжатие – незначительны, стоимость сырья – бесплатно, источник – неисчерпаем.

По определению, «эластичная механика – координированная система механизмов, состоящая из комбинации традиционных жестких элементов и эластичных оболочечных конструкций, работа которых осуществляется за счет использования потенциальной энергии сжатой рабочей среды (жидкости, газа) и

контролируется средствами микроэлектроники, включенной, например, в конструкцию эластичного материала замыкающей оболочки» [91].

Отсюда следует, что основным материалом эластичных механизмов является материал оболочки со сформированным в его импрегнированной структуре неким «живым» слоем. Такой материал, в котором отсутствует электронная система, известен как эластомерный конструкционный материал (прорезиненная ткань, искусственная кожа, тканепленочный материал, многослойные полимерные пленки и другие композиции).

В зависимости от условий эксплуатации оболочечные конструкции могут разделяться на защитные, силовые и движительные.

Защитные оболочки предназначены для временного ограждения (защиты) материальных объектов от воздействия окружающей среды. Это могут быть изделия: чехлы, тенты, упаковка, поверхность которых не испытывает достаточного напряжения. Материалом защитных оболочек в основном является влагонепроницаемая ткань: (пропитанная, ламинированная, прорезиненная) или полимерная пленка. Простейшим примером защитного материала является колбасная пленочная оболочка. Все указанные изделия и конструкции материала отличаются достаточной простотой функциональных свойств.

Если оболочечная конструкция напряжена воздействием механического натяжения, гидравлического или пневматического распора, то функции таких эластичных элементов, кроме защитных, являются силовыми (низконапряженными). Примером защитно-напряженных эластичных конструкций являются, например, тара, емкости, мягкие переборки, надувные игрушки и аттракционы. В сочетании с силовыми каркасами или эластичными механизмами они могут сопротивляться внешним сжимающим нагрузкам (покрытия строительных сооружений, надувные арки, опоры, запорные заглушки). Материал защитно - напряженных оболочек является композиционным, сочетающим функциональные свойства силовой основы (ткани) и герметичного (эластомерного) покрытия. Чем сложнее функциональные требования к оболочечной конструкции, тем сложнее конструкция ее композиционного материала.

Некоторые эластичные механизмы обладают значительными рабочими нагрузками, наличием высокого напряжения силовой оболочки (кранцы, подъемники, домкраты). Для некоторых так называемых «движительных» эластичных механизмов, характерны энергетические функции и, как следствие, усложненные функциональные требования. Нагрузка носит динамический, циклический характер. Создаются зоны перенапряжений, и закладывается определенный ресурс в работоспособность устройств. Осуществляется механическая работа по перемещению деформированной напряженной поверхности мягкой оболочки под управлением исполнительных приборов (оболочки управляемой формы, затворы, перистальтические насосы, движители: «рыбий хвост», самокатящееся колесо) [60].

Материал таких оболочек, кроме функционального назначения, должен обладать и обратной связью, то есть исполнять команды и контролировать на-

грузки на оболочку, обладать так называемыми интеллектуальными свойствами.

Таким образом, с изменением уровня энергоемкости, работоспособности и силовых качеств эластичного механизма изменяются и требования к функциональным свойствам как механизма, так и его пневмооболочечным элементам. Усложняются технические требования к конструкционному материалу, соединениям (с комплектующими и крепежными элементами) и стыкам. Повышается сложность и ответственность их структур.

Высшим эластичным механизмом является живой организм.

2.1. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Традиционно в мягких оболочечных материалах роль силовой основы и выполняют текстильные материалы, а защитное герметичное покрытие создается нанесением (импрегнированием) полимерного эластичного связующего (резины, термопластов, полимерных пленок). Покрытие на текстильный наполнитель наносится различными методами с одной или двух сторон. Тогда одна сторона контактирует с внешней средой, а другая – с внутренней рабочей жидкостью (или газом). Различные условия эксплуатации наружного и внутреннего покрытия должны учитываться при проектировании конструкционного материала оболочки. Для повышения надежности материал оболочки делают многослойным, из различных силовых основ, защитных покрытий и межслойных адгезионных подслоев. Такой «сэндвич» позволяет в некоторых случаях максимально приблизить свойства материала к требованиям эксплуатации.

Однако создать материал, который полностью соответствовал бы желанию конструктора, невозможно, поэтому для расчета его свойства идеализируют, а затем уточняют по реальным характеристикам. Как правило, это происходит с помощью коэффициентов запаса прочности.

Идеальным мягким материалом считается абсолютно прочный, герметичный, невесомый, нерастяжимый, стойкий к многократным изгибам, агрессивным воздействиям окружающей среды, конструкционный материал, не теряющий прочностных свойств в соединениях.

Таким образом, для обеспечения заданных свойств мягким оболочкам их конструкционный материал должен быть прочным, герметичным и не терять заданных свойств под воздействием окружающей среды. По мере усложнения условий эксплуатации эластичных механизмов функциональные свойства конструкционного материала дифференцируются от защитного общего назначения до функционального с элементами интеллектуального управления и контроля.

Обоснования для создания интеллектуального материала

Появление в материаловедении нового термина – «интеллектуальные материалы» связано с различного рода композитами. В настоящее время материалов, которые во всех отношениях считаются интеллектуальными, не существует. Однако, с точки зрения исследования структуры и свойств соединений и ма-

териалов различных классов, информация имеется. В литературе интеллектуальные материалы представлены как логический результат исторического развития в ряду: конструкционный материал – композиционный материал – функциональный материал – интеллектуальный материал.

Описание макромеханического поведения гетерогенных сред и композитов с исследованием свойств отдельных элементов структуры называется нанотехнологией. *Нанотехнология* или *нанотехнологическое приближение в механике гетерогенных сред и композитов* в течение последних лет развивается в институтах РАН.

Так, например, разработаны методы численного исследования механического поведения композитных полимерных матриц, построенные на совокупности феноменологических и молекулярных подходов теории вязкоупругости. На базе имитационного моделирования проведено описание структуры и свойств межфазных слоев полимерных композитов с учетом «активности» поверхности наполнителей.

Проведены сравнения свойств олигомеров со свойствами «живых объектов». В результате исследований показано, что в поведении олигомеров, в отличие от низкомолекулярных (материальных точек) и полимерных (бесконечно больших) соединений, в первом приближении, проявляется большинство свойств «живых объектов». К таким свойствам относятся энергозависимость, воспроизведение и другие.

Выдвинуто предположение, что создание интеллектуальных материалов следует базировать на теоретической платформе, характерной для олигомеров и их композиций (систем ограниченного размера).

На примере химических реакций линейных цепей ограниченного размера (олигомеров) представлены возможности трансформации химической энергии (энергии химических реакций) в механическую и обратно. Установлено, что данный принцип трансформации энергии характерен и для более сложных пространственных систем (плоскостных, объемных) [91].

В последнее десятилетие для стабилизации тепловых режимов объектов и их защиты от внешних тепловых воздействий используются фазопереходные теплоаккумулирующие материалы с переходом «твердое тело – жидкость».

Предложены разработки концепции так называемых материалов с обратной связью, способных «ощущать» внешнее воздействие и менять свои параметры. Основное назначение таких материалов – воспринимать эксплуатационные нагрузки, обеспечивать самоконтроль возникновения и развития усталостных повреждений, их идентификация и локализация как реакция на внешнее воздействие и коррекция напряженного состояния в критических состояниях конструкции. Такие материалы также называются адаптивными, самонастраивающимися или «интеллектуальными». Новый класс материалов должен обладать сенсорной, процессорной и эффекторной функциями.

В качестве методов получения и контроля тонкой структуры материалов на данном этапе предложено использовать существующие и достаточно отработанные технологии получения тонких пленок, эпитаксиальную технологию, ме-

тоды золь-гель, интеграции и выборочного травления, различные виды электронной микроскопии, спектроскопические и дифракционные методы анализа и тому подобное [39].

Сегодня известны самые разнообразные решения объединения электронной и механической систем в одной машине.

Это мягкие электронагреватели, «интеллектуальная» одежда, ленточные энергетические и информационные кабели (изделия из токопроводящей резины, эластичные теплопроводящие изоляторы, скотч из слоистых полимерных материалов для хранения голографической информации); антенные излучатели СВЧ- и КВЧ-диапазонов; экраны из полупроводниковых, гибридных, органических или неорганических материалов, солнечные батареи на тканевой основе; простейшие системы контроля и управления рабочим состоянием оболочечных конструкций, встроенные в материал оболочки (индикаторы, клапаны, концевые выключатели и т.п.).

Таким образом, на стыке наук – химии, механики, микроэлектроники и компьютерной технологии неизбежно должна появиться ниша с новыми функциональными свойствами эластичных механизмов.

Исследование возможности превращения одних видов энергии в другие, сравнение свойств полимеров со свойствами «живых объектов», объединение материаловедения, микроэлектроники, компьютерной и инженерной технологии механических систем в составе одной машины или механизма связаны с созданием «интеллектуальных материалов».

Важнейшим достоинством концепции является использование в качестве исходных точек ее развития аналогии между свойствами будущих материалов и функциями живого организма.

Использование функциональных особенностей полимерных связующих

Одной из важнейших задач химии наших дней является применение новых веществ и материалов. Например, органические полупроводниковые соединения можно использовать как самостоятельно, так и в составе связующих армирующей основы композиционных материалов.

К органическим полупроводникам относят низкомолекулярные соединения, полимеры с большим числом сопряженных связей, комплексы с переносом заряда, где благодаря определенной структуре создаются условия для делокализации электрона, стабильные свободные радикалы, а также некоторые биополимеры (в том числе и белки), проводимость которых можно объяснить неионным механизмом.

Из низкомолекулярных соединений наиболее известны ароматические (полициклические и азотсодержащие) соединения, красители и фталоцианиты [39]. Полимерные материалы с системой сопряжения могут быть разбиты на группы:

- полимеры с линейным сопряжением в основной цепи (поливинилены);
- полимеры с ароматическими ядрами в цепи сопряжения (полифениле

- ны, полиазофенилены, полифениленхиноны, полифениленферроцены);
- полимеры с гетеро- и металлоциклами в цепи сопряжения (термически обработанный полиакрилонитрил, который приготавливается в виде пленок, волокон и ткани);
- полимеры с системой сопряженных двойных связей, полученные термическими и радиационными методами (термообработанные полидивинилбензол, поливинилхлорид, поливинилиденхлорид, поливинилбромид, поливинилацетат и поливиниловый спирт).

Известны полимеры, имеющие высокую проводимость с положительным и отрицательным температурными коэффициентами сопротивления, термопластичные и терморезистивные, с носителями как *p*-, так и *n*- типа.

Кроме того, получены не только диамагнитные и парамагнитные, но и ферромагнитные термостойкие полимеры. Эти полимеры можно получать как в виде твердых, так и в виде мягких материалов.

Некоторые успехи достигнуты в получении материалов, сочетающих полупроводниковые свойства с оптической прозрачностью и пластичностью. Перспективные для практического использования вещества можно также получать при воздействии ионизирующих излучений на полимеры, не содержащие сопряженных связей [7, 93].

Так, например, разработана полупроводниковая пленка, которая представляет собой облученный пучком электронов полиолефин.

Полученный материал обладает свойством размягчаться и плотно облепать поверхность любой конфигурации, сохраняя принятую форму при повышении температуры до 325 °С. Это свойство открывает новые возможности для создания проводящих покрытий. Достоинством пленки является способность к самоорганизации при нагревании до 200 °С.

Полупроводниковые полимерные покрытия (полиины) предполагается также наносить из раствора в ацетоне на твердую подложку с последующим испарением растворителя. Нагревание или освещение придают полиинам полупроводниковые свойства.

Возможно применение органических полупроводников в качестве детекторов инфракрасного излучения в широкой инфракрасной области. Кроме того, фотохромные системы орабатывались на использование в устройствах для преобразования энергии света в электрическую энергию. При необратимой фотохимической реакции может быть превращено до 25 % световой энергии [19].

Важное применение органические полупроводники найдут в качестве лазерных материалов (бензоилацетонат европия). Так, например, активная среда лазера на основе полиметилметакрилата с хелатами европия может быть выполнена в виде тонкого листа или нитей, толщиной в человеческий волос. Эти преимущества заключаются в хорошей растворимости хелатов во многих органических растворителях и различных пластмассах, в результате чего последним можно придавать любую форму, отвечающую специальным целям. Возможности получения лазеров на жидкости в больших объемах освобождают от про-

блем выращивания монокристаллов и их обработки, а также решения проблем теплоотвода и его охлаждения.

Ряд изобретений последнего времени создали предпосылки для организации производства модернизированных дисплеев и других устройств. Корпорация IBM объявила о создании матрицы полупроводниковых транзисторов, которую можно скатать в рулон. В разработках IBM используется гибкий материал, представляющий собой соединение оксида олова с фенилэтиламмонием, распыляемый на обычной пластиковой пленке.

Представители IBM считают, что их технология обладает замечательным преимуществом по сравнению с обычными полупроводниками, которые делаются из твердых материалов, устойчивых к плавлению и требующих высокотемпературной обработки. При использовании технологии напыления получается полупроводниковая матрица, которая обладает всеми свойствами жидкокристаллического дисплея, но при этом оказывается легче, прочнее и дешевле в производстве.

Корпорация Lucent Technologies предлагает аналогичную технологию для выпуска электронных книг с гибкими страницами. В решении Lucent, которое по своей сути аналогично изобретению IBM, применяется другой органический материал – пентацин. С его помощью также можно наладить выпуск гибких пластиковых матриц транзисторов.

Обе эти технологии могут быть использованы для организации производства самых разнообразных устройств. Компания E Ink вместе с Lucent, к примеру, работает над созданием «электронной бумаги», которая предназначена для электронных книг и газет. В основе данной технологии лежит использование миллионов крошечных микрокапсул, наполненных темной краской и легким пигментом. При создании с помощью пластиковых транзисторов электрического поля микрокапсулы изменяют свой цвет и формируют на экране изображение [98].

Другое функциональное покрытие – анизотропная токопроводящая резина. Например, резина «зебра» (L-типа) состоит из двух чередующихся слоев силиконовой резины: наполненного графитом (токопроводящего) и ненаполненного (непроводящего). Другие модификации подобного материала различаются конструкцией защиты (с диэлектрической тонкой или плотной, одно- или двухсторонней, монолитной или пористой изоляцией) [3].

Таким образом, теоретически установлено, что система уровней в полимерных полупроводниках гораздо разнообразнее, чем в низкомолекулярных соединениях с сопряженными двойными связями, что позволяет гораздо шире решать поставленные задачи именно на полимерных материалах. Одной из таких проблем является возможность синтезировать сверхпроводники. Еще одна проблема связана с волноводными свойствами сопряженных систем. Длинные молекулы полимеров могут служить также проводниками для распространения электронных волн. Переход электронов от одной молекулы к другой может управляться внешним полем, нагреванием и действием света

Роль текстильных наполнителей

Функциональные свойства синтетических волокон могут быть использованы в производстве конструкционных материалов специального назначения. Причем использование гибридных тканей на основе различных типов волокон позволяет управлять свойствами композита, особенно если в состав комплексной нити входят, например, электропроводные волокна.

На сегодняшний день широко известны и хорошо развиты волоконно-оптические коммуникационные сети в системах управления современным производством, охранных ведомств. Известны волоконно-оптические датчики, способные регистрировать большое количество различных физических величин: давление и деформацию, температуру и влажность, химические и биологические параметры и другое [79].

Технология производства отдельных волоконно-оптических элементов позволяет создавать распределенные измерительные системы, способные осуществлять съемку параметров физических полей на любой поверхности. Использование волоконной оптики для создания измерительных технологий для эластичной механики является перспективной благодаря тем преимуществам, которыми обладают волоконно-оптические чувствительные элементы по сравнению с их электрическими аналогами.

Физическая и биологическая инертность обусловили широкий интерес к их применению в индустриальной науке, в условиях электромагнитных помех, высоких температур и действия агрессивных сред. Малый удельный вес и размеры в сочетании с высокой технологичностью волоконно-оптических элементов играют важную роль при разработке миниатюрных измерительных датчиков, наличие которых имеет большое значение, например, для создания эластичных механизмов различного назначения.

Так, многофункциональные микроволокнистые нетканые полимерные и композиционные материалы типа «Суперпор» (основа – смесь резолы с поливинилбутиралем) рекомендуется использовать в современной технике и технологии [82]:

- в качестве комбинированных фильтр-сорбентов и фильтр-хемосорбентов для одновременного улавливания из воздуха и других газов вредных или ценных примесей;
- для высокоэффективной очистки жидкостей;
- в качестве комбинированных фильтров - ионообменников;
- в качестве компактных электрокалориферов и самогенерирующих фильтров;
- в качестве пористых электродов и сепараторов.

Сохраняя типичную для этого типа материала волокнистую двумерную микроструктуру и макроскопические свойства – малую плотность упаковки, низкое гидродинамическое сопротивление и другие отличительные свойства, материалы «Суперпор» в процессе электродинамического формования или после дополнительной термообработки приобретают новые или улучшенные эксплуата-

ционные свойства. Они могут быть использованы в технологии создания эластичных функциональных материалов с повышенными сорбционными, ионообменными, каталитическими, асептическими, устойчивыми к повышенным температурам и агрессивным средам, с высокой электропроводимостью, повышенной прочностью, формоустойчивостью и упругостью [10, 66, 80].

Следовательно, все полимерные композиционные материалы по типу наполнителя условно можно разделить на следующие группы:

- полимерные композиты, состоящие из ориентированных в материале непрерывных волокон, нитей, жгутов, соединенных между собой клеящей средой – полимерной матрицей;
- композиты на основе волокон, обычно коротких, располагающихся в полимерной матрице хаотично в объеме или плоскости листового материала;
- дисперсно наполненные полимерные системы, в которых наполнителями служат частицы или гранулы неорганических или органических веществ.

Таким образом, возможность внедрения новых функциональных волоконных или тканых наполнителей в композитные материалы и другие системы приближает их к таким многофункциональным природным материалам с живым защитным слоем, как натуральная кожа. Подобные простые или комбинированные армирующие материалы, улучшая или существенно изменяя механических свойств конструкционных материалов, открывают перспективы создания «интеллектуальных» материалов для «чувствительных» оболочечных конструкций, эластичных механизмов а также новых мягких движителей с обратной контрольной связью.

Строение и функциональные особенности натуральной кожи

Рассмотрим строение и функции кожи животного с точки зрения поиска аналогий с конструкционными материалами эластичных механизмов.

Кожа покрывает всю поверхность тела животного и рыбы и выполняет в организме защитные, физиологические, сенсорные и нервные функции. К коже могут прикрепляться мышцы, на которые они действуют. Кожа состоит из эпидермиса и дермы, которые связаны друг с другом, но сильно отличаются по природе и происхождению.

Эпидермис расположен на поверхности тела и во много раз тоньше дермы.

Переход от внутренней части эпидермиса к наружной может быть постепенным и содержать живые клетки, которые на поверхности постоянно заменяются нижележащими в результате изнашивания или повреждения (рыбы и амфибии).

У обитателей суши по мере приближения к поверхности омертвевшие клетки постепенно уплотняются. Граница между нижним слоем живых клеток млекопитающих и уплощенными мертвыми и ороговевшими клетками рогового слоя достаточно резко выражена.

У всех высших позвоночных кожно-мышечный эпителий, наполненный кератином, образует разного рода специализированные структуры: утолщения рогового слоя (бородавки у жаб), подошвенные подушки, кожные гребешки ладоней у приматов, чешуйки и щитки у рептилий. По аналогии с эластичными конструкционными материалами подобные структуры несут износостойкие защитные функции.

Нижний слой эпидермиса являетсяместищем жизненно важных желез (слизистая, жировая, потовая, ядовитая и др.). Более глубокий слой кожи, дерма или кориум, состоит, в основном, из массы плотно переплетенных волокон соединительной ткани. Именно из дермы различных животных после соответствующей выделки получают кожу для изготовления одежды, обуви и других изделий.

Дерма представляет собой эффективный изолирующий материал, а эластичность при одновременной прочности делает ее главным средством защиты тела от повреждений (аналогия с армирующей тканевой основой конструкционного резинотканевого материала).

Более глубокая часть дермы имеет рыхлую структуру, нередко с жировыми отложениями, часто незаметно переходящую в соединительную мышечную ткань или внутренние органы. Большую массу типичной дермы в основном образуют коллагеновые волокна, однако в ней содержатся также и эластичные волокна, и жировая ткань. У высших позвоночных в дерме расположены базальные части желез и фолликулы волос и перьев. В дерме могут развиваться гладкие мышечные волокна, а к нижней поверхности кожи могут прикрепляться поперечно-полосатые волокна из нижележащих мышц тела. Чувствительность кожи обусловлена наличием в кориуме нервных волокон, заканчивающихся специальными рецепторами. Дерма обильно снабжена сосудами, что создает возможность для обмена веществ с окружающей средой [26].

Мягкие конструкционные материалы в пневматических конструкциях также имеют внутреннюю поверхность и используются для крепления на ней различных силовых элементов и комплектующих деталей. Эта поверхность используется для закрепления различных коммуникационных систем и соединительных стыков.

Эластичные конструкции и механизмы имеют многотысячную историю существования, где природные материалы использовались в качестве конструкционных. Например, из шкур крупного рогатого скота, а также пушного зверя изготавливали поплавки для переправы через водные препятствия, емкости для хранения жидкостей, одежду. Воздушный шар Крякутного, кузнечные меха, старые книги – из тех же шкур.

Уже в обозримом прошлом для изготовления эластичных конструкций научились использовать шкуры, желудки и кишки животных. Серозная оболочка тонких кишок домашних животных (коров, свиней, овец) – «бодрюш», в обработанном виде пленка полупрозрачного белого цвета, при малой прочности имела отличную газонепроницаемость. Применялся бодрюш, склеенным в несколько слоев, вместо оконного стекла. А в композиции с текстильными мате-

риалами (бодрюширование материи), с последующим лакированием с одной или двух сторон – в качестве воздухонепроницаемой оболочки воздушных шаров (монгольфьеры).

С изобретением Макинтоша для тех же целей ткань стали пропитывать каучуковым раствором [74, 50].

Таким образом, кожа как природный конструкционный материал, состоящий из защитной пленки, прочно покрывающей волокнистую силовую основу, обладающую эластичными и прочностными свойствами, является прототипом интеллектуального материала.

Выводы

Одним из возможных направлений развития механизмов является эластичная механика. Эластичная механика – это класс интеллектуальных механизмов, объединенных структурными элементами, контрольными и исполнительными органами, базирующимися на основополагающих явлениях природы. Законы аэростатики, аэро- и гидродинамики с учетом основ физической электроники и квантовой механики формируют новое направление развития творческого мышления, требующего прежде всего познания механизмов явлений с последующим привлечением арсенала технических знаний для решения поставленных инженерных задач.

Уже сейчас известны неоспоримые доказательства достоинств эластичных конструкций и сооружений, например, пневмодомкратов. По своим рабочим характеристикам они близки, а по некоторым (удельная грузоподъемность) в десятки и сотни раз превышают характеристики традиционных подъемно-транспортных механизмов. Аналогичная картина и с надувными строительными сооружениями, у которых с ростом перекрываемых пролетов не изменяется удельная масса материала [6, 23].

Уникальны достоинства технических тканей. В зависимости от технологических свойств нитей и химических волокон существуют так называемые сверхвысокопрочные, сверхвысокомодульные волокна (арамиды), область использования которых шире, чем у некоторых металлов, по удельным весовым характеристикам они на несколько порядков выше их.

Предложены разработки концепции так называемых материалов с обратной связью, способных «ощущать» внешнее воздействие и менять свои параметры. Основное назначение таких материалов – воспринимать эксплуатационные нагрузки, обеспечивать самоконтроль возникновения и развития усталостных повреждений, их идентификацию и локализацию как реакцию на внешнее воздействие и коррекцию напряженного состояния в критических состояниях конструкции.

Существующие химические волокна в полимерном связующем способны подвергаться практически любым физическим воздействиям, сохраняя работоспособность в заданных пределах. А в отличие от традиционных материалов, открытия новых и модификация известных химических соединений еще не ис-

черпаны. С другой стороны, прочностные свойства текстиля зависят и от прочностных свойств комплексных нитей (корда), ткани, а также их структурных и технологических свойств. В то же время комбинирование состава и структур тканей продолжается в зависимости от требований эксплуатации.

Новые полимеры, новые конструкции, расширение областей использования и функциональных требований, объединение межотраслевых с привлечением компьютерных технологий создают предпосылки к поиску новых подходов в создании нетрадиционных, интеллектуальных материалов.

Таким образом, представленный обзор показал возможности и перспективы использования эластомерного конструкционного, функционального материала мягких оболочечных конструкций, например, для создания элементов эластичной механики. В то же время, появление новых требований к конструкционным материалам, связанных, например, с космическим проектированием, робототехникой, потребовало поиска новых возможностей традиционных механизмов. Это, например, создание «интеллектуальных» материалов, объединенных усилиями материаловедения, микроэлектроники, инженерной технологии механических систем в составе одной машины или механизма, связанных с компьютерной информацией.

2.2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Композиционные материалы и компаунды

Появление многослойных композиционных материалов можно проследить от эпохи татаро-монгольских завоевателей, чьи луки представляли собой подобную конструкцию из таких материалов, как рога буйвола, сухожилия, пропитанные натуральными смолами.

В двадцатом веке – это стеклотекстолиты (на бакелитовом лаке), стеклопластик СВАН, тканепластики и другие армированные пластики.

В наши дни в качестве армирующих волокон используются, кроме стеклянных, углеродные, органические, на основе гибко-, жесткоцепных полимеров, борные, карбидокремниевые и ряд других.

Композиционные полимерные материалы на основе полипропилена и полиамида, производимые методами литья под давлением или экструзией, предназначены для производства разнообразных изделий конструкционного, электротехнического, антифрикционного, общетехнического и других назначений.

Так, например, армлен и армамид, композиции НПП «Полипластик», содержат наряду с полимерной матрицей различные усиливающие наполнители: стекловолокно, стеклошарики, углеволокно, слюду, тальк или их гибридные комбинации. Наполнители химически и физически связаны с полимерной матрицей, что обеспечивает высокий уровень механических, термических и других важных эксплуатационных характеристик материалов. С целью придания специальных свойств в композициях используется широкий спектр добавок: термо- и светодобавки, технологические смазки. Модификации с пониженным мо-

дулем упругости представляют собой эластифицированные композиции, в том числе со свойствами термоэластопластов.

При создании полимерных композиционных материалов одной из важных задач является выбор или разработка полимерной матрицы (связующего), которая обеспечивала бы достижение максимальных прочностных характеристик композита и удовлетворяла различным технологическим и эксплуатационным требованиям.

На основании исследований наполнителей основной характеристикой всех видов волокон является дисперсия их прочности и длины в пучке (нити, жгуты, ровинги), ровнице, обусловленная технологией их формирования и получения волокнистых армирующих материалов.

Прочность композита существенно зависит от его структуры, напряженного состояния и непосредственно связана с механизмом разрушения материала.

При осевом расположении нагружения вдоль волокна можно выделить следующие механизмы разрушения:

- накопление разрывов волокон и за счет этого исчерпание их несущей способности;
- рост поперечной магистральной трещины путем последовательного разрыва волокон в устье трещины вследствие увеличения концентрации напряжений;
- расслоение по матрице вдоль волокон и по границе раздела или по самому волокну в зависимости от соотношения их свойств.

Большая роль связующего заключается также в том, чтобы поглощать статическую и динамическую составляющие упругой энергии разрушения волокон за счет пластических деформаций. Повышение вязкости разрушения связующего – необходимое требование оптимизации свойств матрицы. Например, увеличение степени сшивки повышает прочность, жесткость и термостойкость полимеров, однако существенно снижает их вязкость разрушения [96].

Эластифицированные композиции аррамида, например, имеют высокую ударную вязкость с надрезом, в том числе при пониженных температурах до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$; высокую эластичность (до 400 %), способность к многократным перегибам, в том числе при пониженных температурах (до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), повышенную масло-бензостойкость.

Термоэластопластичные композиции армлена обладают высокой эластичностью и морозостойкостью (до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), способностью к многократным знакопеременным нагрузкам.

Широкий ассортимент компаундов «СИЭЛ» (ГНИИХТЭОС), применяющихся в электронной технике в качестве эластичных подслоев для защиты ($p-n$) переходов полупроводниковых приборов и устройств, заливочных материалов для печатных плат, блоков и модулей, защиты электронной техники, работают в широком диапазоне температур, агрессивных сред, вакуума, сильных вибраций [38].

Компаунды имеют одно- и двухкомпонентную модификации, различающиеся пропорциональными соотношениями частей (основы и катализатора).

Компаунды «СИЭЛ» используют в качестве «контактолов» и продуктов, обеспечивающих электрический контакт в приборах и устройствах электронной и часовой отраслей промышленности и используются для покрытий различных элементов электронной техники и электротехнического оборудования, длительно работающих при температурах 250 – 300 °С.

Как наполненные, так и ненаполненные компаунды обладают хорошей адгезией к различным материалам электронной техники: металлам и сплавам, стеклу, пластмассам.

По эластичным свойствам матрицы композиционные материалы могут быть жесткими и эластичными (эластомерными).

Таким образом, эластифицированные композиции, в том числе со свойствами термоэластопластов, обладают высокой эластичностью и морозостойкостью (до –60 °С), способностью к многократным знакопеременным нагрузкам. Они предназначены для производства разнообразных изделий конструкционного, электротехнического, антифрикционного, общетехнического и других назначений и могут быть использованы в качестве новых функциональных материалов.

Эластичные композиционные материалы

Эластичные композиты – это материалы, у которых матрица из эластомера армирована волокнами или тканью. В процессе эксплуатации мягкими конструкциями воспринимаются как внешние силовые (сосредоточенная или равномерно распределенная сжимающая нагрузка), от действия растягивающего избыточного давления рабочей среды, так и внутренние (старение, деструкция) – воздействия от действия окружающей среды. Удовлетворить необходимые требования эксплуатации путем применения материала одного вида практически невозможно. Результат достигается путем использования материалов специальных конструкций с различными видами армирующих наполнителей (ткань, корд, монопить, нетканый материал), а также специальными покрытиями, в том числе многослойными. Поэтому эластичные композиционные материалы обладают комплексными свойствами силовой армирующей основы (наполнителя) и эластичного покрытия (связующего).

Такие материалы резко анизотропны. В реальных резинотканевых конструкциях модуль упругости при растяжении значительно больше модуля сдвига эластомера, следовательно, экстремальные значения податливости различаются в десятки раз.

Так как армирующая ткань окружена эластомером, то последний ограничивает поперечную и продольную деформации нити. В эластомере между стренгами нити (корда) возникают деформации в результате изменения диаметра нити или уменьшения шага стренг. На границе касания стренг деформация эластомера должна возрастать, что приводит к наибольшим напряжениям, а следовательно, к усталостному разрушению пограничного слоя. В этой зоне наиболее вероятно отслоение нити от эластомера. За счет деформации сдвига между стренгами также происходит местное отслоение корда от эластомера, жесткость

нити падает и возникают концентрированные деформации сжатия, которые разрушают нить. Оборванная нить приводит к резкому возрастанию сдвиговых деформаций эластомера между нитями, в результате чего происходит их отслоение.

Рассмотренный механизм разрушения свидетельствует о значительном влиянии прочности связи между армирующими материалами, адгезивом и эластомером на прочность конструкции в целом. При этом попытки найти надежные способы соединения элементов конструкции будут ограничены фактической прочностью связи элементов самого материала.

Степень участия в напряженном состоянии армирующих элементов (в первом случае) и связующего (во втором случае) зависит от углов между пересекающимися нитями основы и направлением приложения растягивающей нагрузки. Зависимость прочности и растяжения материала от угла приложения растягивающей нагрузки к направлению нитей основы или утка характеризует податливость материала.

Податливость прорезиненного материала, например, мягкой пневматической конструкции, минимальна при совпадении направления растягивающего усилия с направлением нитей основы (утка) и максимальна - вдоль диагоналей ромба (между пересекающимися нитями армирующей ткани). Податливость характеризует коэффициент использования прочностных свойств конструкционных армирующих материалов и будет рассмотрена ниже.

Нагружение эластомернотканевых изделий можно рассматривать как деформирование в своей плоскости и изгиб материала. Упругие свойства таких конструкций различаются по степени анизотропности и ряду характерных констант [50]:

- углом между нитями перекрещивающихся слоев (углом намотки корда);
- жесткостью в направлении нитей;
- модулем сдвига эластомера;
- коэффициентом поперечной деформации и т.д.

Оптимальным считается тот материал, в котором анизотропия упругих свойств наиболее выгодно соответствует напряженному состоянию изделия, то есть когда напряженное состояние обеспечивается наполнителем без участия связующего. Это является характерным для эластомернотканевых композитов, таких как прорезиненная ткань или армированные пластики. Здесь наполнитель лишь ограничивает продольную и поперечную деформации армирующей нити.

Интересные свойства имеют эластичные ткани трикотажного переплетения, обладающие переменной жесткостью и податливостью, близкой к показателям эластичного покрытия. Такие материалы нашли применение в трубчатых изделиях: цельнотканых рукавах, арках. Герметичность таких изделий достигается путем обрезинивания внутренней поверхности рукавов экструзионным методом, а также на каландре. При нанесении покрытия применяется также пропитка рукава латексными растворами с последующей вулканизацией резиновой пленки.

В зависимости от требований к величине эластичности и растяжимости, например, в медицинских изделиях, применяются трикотажные полотна и ткани, имеющие в составе эластомерные нити (однородные и неоднородные полотна). Такие ткани могут растягиваться либо в двух направлениях, либо только в одном: продольном или поперечном. В зависимости от диапазона растяжимости они делятся на группы изделий: комфортные (спортивные, бытовые); профилактические, компенсационные, компрессионные и специальные (спортивные, медицинские).

Таким образом, прорезиненные материалы широко используются в резиновой промышленности для медицины, спорта, аварийно-спасательных работ, в строительстве и на транспорте. В зависимости от жесткости требований эксплуатации такие материалы могут расширять свои функциональные свойства путем комбинирования свойств отдельных компонентов многослойной композиции.

Резино-ткане-пленочные композиции для аппаратов легче воздуха

Эра аэростатостроения открыла легкие эластичные композиционные материалы, изготовленные из импрегнированных тканей.

Наиболее легким и гибким материалом для оболочек аэростатов казалось должна быть резиновая пластина (мембрана, пленка), с помощью которой можно получать различные надувные формы даже без специального раскроя. Однако жесткость и прочность ее оказались маловатыми.

Из полимерных пленок также можно было склеивать или сваривать оболочки. Однако и они оказались недолговечны, недостаточно прочны и требовали конструктивной модификации. Для увеличения прочности на разрыв и раздир пленки дублировались в два или три слоя, армировались тканью (нетканым материалом, сеткой, кордом).

Прочность мембран существенно повышалась с помощью поясов и сеток, а также металлических тросов.

В пневматически напряженных конструкциях были использованы также тонколистовые металлы и фольга.

Для повышения газонепроницаемости тканей они покрывались пластмассами, термопластами, резинами из натурального и синтетического каучуков или латексами.

Создание новых видов полимеров, адгезивов, высокопрочных волокон, совершенствование технологических способов их изготовления позволили разрабатывать новые конструкции эластомерной механики из пленочных, ткане-пленочных и резино-ткане-пленочных материалов.

Для обеспечения комплекса требований отечественной промышленностью выпускаются следующие группы композиционных материалов с использованием тканей, пленок, резины и их комбинаций:

- многослойные пленочные материалы, состоящие из полимерных слоев (пленка-пленка, пленка-синтетическая ткань);

- комбинированные пленочные материалы с неполимерными компонентами (пленка-фольга, пленка-металлическое покрытие, пленка-ткань из стеклянных, кварцевых или кремнеземных волокон);
- прорезиненные материалы (ткань-резина-пленка).

Основные способы получения многослойных и комбинированных пленочных материалов:

- каширование;
- ламинирование;
- соэкструзия расплавов двух или нескольких термопластичных полимеров;
- металлизация пленок методом вакуумного магнетронного, токоплазменного, электродугового напыления;
- лакирование;
- обрешивание методом шпрединогования или каландрирования.

Современные технологии позволяют получать многослойные и комбинированные материалы на основе полимерных пленок и синтетических высокопрочных тканей. Основная схема их конструкции представляет три слоя:

- А – высокомодульная, газонепроницаемая пленка;
- В – армирующая основа;
- С – термосвариваемый слой.

Выпускаемая промышленностью двухслойная газонепроницаемая пленка на основе ПЭТ и полиолефинов (ПЭ, ПП, ПЭВП), выполняющих роль термосвариваемого компонента, на два порядка превосходит показатели вулканизированных резин по газонепроницаемости.

Повышение газонепроницаемости материала достигалось путем создания комбинированных материалов с металлизацией одной или двух сторон пленки. Нанесение на ПЭТ пленку алюминиевого покрытия методом вакуумного напыления уменьшило ее газопроницаемость на 1-2 порядка.

Трехслойные материалы ПЭТ-ПЭ-ткань получают в одну стадию методом экструзии. Изготовленные на основе различных тканей, они, кроме высокой газонепроницаемости, показали высокую разрывную прочность. Увеличение адгезионной прочности достигалось путем предварительной обработки поверхности пленки коронным разрядом.

Однако недостатком многослойных пленочных материалов остается их низкое сопротивление проколам, недостаточная прочность.

Для увеличения прочностных характеристик пленочные материалы рекомендуется армировать тканями.

Разработаны и выпускаются опытными партиями материалы на основе полиуретана и капроновых тканей; ПУ и ткани арамид (кевлар). Ведутся работы по созданию термостойких прорезиненных материалов массой 100-200г/м², включающих полиамидную пленку ПМ-ОА и арамидную ткань [75, 95].

В последние годы аэростатные оболочки стали изготавливать двойными: внешняя оболочка и камера герметичности, изготовленная из тонкослойных пленок ПЭ, ПА/ПП, ПЭ/ПЭТ. Для камер используются бесшовные оболочки из

латексной резины. Для внешних оболочек из тканей с пропиткой или покрытием применяют капроновые ткани, реже сетки из высокопрочных нитей.

Такой материал может быть подготовлен для операции нанесения на ткань в виде раствора, пасты, расплава, порошка, высоковязкой смеси, пленки, водной дисперсии и другого материала в зависимости от типа имеющегося оборудования [40].

Таким образом, использование новые пленочных, тканепленочных и резино-ткане-пленочных материалов, в том числе для воздухоплавательной и космической техники, может являться примером конструирования эластомерных композиционных материалов с заданными свойствами.

Мягкие функциональные материалы

Мягкие функциональные материалы должны обеспечивать возможность эксплуатации оболочечных конструкций в любых (наземных, подводных и других) условиях, как в статическом, так и в динамическом режимах.

Все виды пневматических конструкций из эластомерных материалов могут быть изготовлены из различных по назначению специальных конструкционных материалов. Защитные и тентовые конструкции выполняются из материалов общего назначения, высоконапряженные надувные конструкции могут изготавливаться из специальных высокомодульных тканей или тканей пространственного переплетения.

Функциональные свойства материала должны уточняться в процессе разработки и изготовления эластичных оболочек в зависимости от условий эксплуатации, назначения оболочечных конструкций эластичного механизма (машины). В основе проектирования таких механизмов заложены следующие условия.

1. Геометрическая форма тонких эластичных мягких оболочек (сферообразных, цилиндрических, тороидальных и других) работоспособна только в напряженном растянутом избыточным давлением рабочей текучей среды, а также механически напряженном состоянии.

2. Силовые поля давления, которые формируют равнонапряженные эквипотенциальные поверхности, в сочетании с замыкающей оболочкой различного раскроя создают комбинации геометрических форм оболочек с различными топологическими характеристиками.

3. Контрольно-исполнительная электронная система (датчики, исполнительные механизмы, информационные и энергетические связи, центры обработки информации), сформированы в виде единой физической структуры в «материале» оболочек.

4. Механическая и электронная системы эластичных машин и механизмов оптимально поддерживают свою жизнь, то есть осуществляют работу движения с минимальными затратами энергии в балансе со взаимодействующим окружающим пространством.

Многофункциональность, а также структурные и технологические свойства мягких материалов зависят от физико-механических и технологических свойств текстильных тканей, комплексных нитей и волокон, пригодных для внедрения электронной системы в любом промежутке изготовления и эксплуатации материала.

Функциональные, или специальные, свойства эластомерных армированных материалов являются комплексными, зависящими от вида воздействия эксплуатации. Оптимальная конструкция материала может быть найдена в результате проведения исследовательских работ.

Поэтому комплекс эксплуатационных требований может быть обеспечен эластичными композиционными материалами: армированными пленками, прорезиненными тканями, резино-ткане-пленочными материалами.

Таблица 2.1

Зависимость функциональных свойств прорезиненной ткани от ее конструкции

Свойства прорезиненной ткани	Влияние текстиля	Влияние резинового покрытия	Влияние адгезионного подслоя
Разрывная нагрузка	+		
Раздирающая нагрузка	+	+	+
Герметичность		+	+
Минимальная масса	+	+	+
Термостойкость	+	+	
Морозостойкость		+	
Стойкость к многократному изгибу	+	+	+
Прочность связи	+	+	
Стойкость к атмосферному старению	+		
Жесткость			

Влияние структуры ткани, состава резинового покрытия и способов их сочетания на свойства прорезиненной ткани приведено в табл. 1.

Разрывная нагрузка прорезиненной ткани зависит от прочности армирующей основы. Резиновое покрытие частично может увеличивать прочность материала за счет повышения связанности нитей и, соответственно, увеличения количества одновременно разрываемых нитей. При этом резиновое покрытие может вызывать снижение прочности за счет деструкции материала в процессе вулканизации под воздействием компонентов резиновой смеси или соединений, выделяющихся из резины в процессе вулканизации (например, лавсан+СКЭПТ, БК с вулканизующими агентами аминного типа).

Раздирающая нагрузка зависит от любого фактора, приводящего к изменению числа нитей в треугольнике деформации: прочности нитей ткани, типа пе-

реплетения (полотно, саржа, рогожка, сетка). В то же время на раздирающую прочность влияют эластичные свойства резинового покрытия на границе: матрица – субстрат, а также степень проникновения резины в ткань. Несомненно влияние на раздир прочности связи покрытия с силовой основой (адгезионного подслоя).

Чем плотнее ткань (больше число нитей на единицу площади), чем она более плоская, тем выше герметичность, которая выше у синтетических тканей, чем у хлопчатобумажных (при тех же конструкциях). В данном случае текстильную основу можно рассматривать как непроницаемый наполнитель резины. Однако, в большей мере герметичность зависит от газонепроницаемости каучука, качества и толщины резинового покрытия. Герметичность также зависит от прочности связи, так как снижается количество дефектов материала, через которые может происходить не только диффузионная, но и фазовая проницаемость.

Минимальная масса при достаточной герметичности зависит от рельефности ткани (резиноемкость), удельной плотности резины (газонепроницаемость).

Температуростойкость прорезиненной ткани в равной степени зависит от температуростойких свойств резины и ткани, однако у резин более низкая теплопроводность, что дополнительно обеспечивает ее защитные свойства. В то же время у волокон значительно ниже температура кристаллизации.

Стойкость к многократному изгибу зависит от эластичности покрытия. Резина защищает даже относительно нестойкие к изгибу ткани за счет исключения образования острых складок. Прорезиненные ткани на основе арамидных волокон более изгибоустойчивы, чем ткань и тканепленочные материалы на той же основе.

Прочность связи зависит от природы армирующих тканей. Переход от хлопчатобумажной основы к синтетической поставил более остро вопрос о необходимости введения в прорезиненные ткани промоторов адгезии (особенно для лавсанов и арамидов). С другой стороны, резины с малой непредельностью и отсутствием или низким содержанием функциональных групп осложняют достижение высокой прочности связи.

На стойкость к атмосферному старению прорезиненного материала прежде всего влияет стойкость резин (светопроницаемости, особенно ультрафиолетового спектра) и их защитных свойств. При этом потеря прочности ткани зависит от собственной атмосферостойкости, озоностойкости.

Тип тканей (структура переплетения, масса, наличие пропитки) влияют на жесткость прорезиненной ткани. Однако она также зависит от толщины покрытия и эластичных свойств резины.

Таким образом, конструкционные свойства прорезиненной ткани как композиционного материала могут включать в себя прочность, эластичность и герметичность как основные силовые и защитные свойства материалов оболочек эластичных механизмов. Другие требования к свойствам материалов являются специальными и зависят от области использования эластичных конструкций. За счет послойной модификации, введения электропроводящих, радиопрозрачных волокон армирующей ткани изменения функциональных свойств адгезионного

подслоя и защитного резинового покрытия конструкционный материал дифференцируется в функциональный.

Мягкие конструкционные материалы

К простейшим эластомерным конструкционным материалам относятся такие, которые могут выполнять хотя бы минимум защитных или силовых функций при изготовлении мягких оболочек. Например, мыльная пленка.

Использование пленочных материалов в пневмоконструировании носит временный характер для производства ненапряженных защитных тентов и укрытий, например, парников и теплиц. Недостаточная прочность к растягивающим нагрузкам и потеря прочности под действием ультрафиолетовых лучей может быть компенсирована модификацией их конструкции.

Упрочнение материала достигается путем введения в материал армирующей основы в виде волокон, нитей, тканей. Защитные свойства можно улучшить, комбинируя полимерное покрытие за счет использования различных материалов.

Любые ткани с защитным покрытием (дерматин, прорезиненная ткань, тканепленочный материал) являются, в некотором приближении, заменителями натуральной кожи.

Однако, в зависимости от условий эксплуатации, которые могут в некоторых случаях достигать экстремальных значений, конструкционные материалы должны соответствовать специальным требованиям. Под заданные требования эксплуатации большинство конструкционных материалов общего назначения не могут быть использованы, в основном по заданным гарантийным ресурсам.

Специальные конструкционные материалы, предназначенные для использования оболочечных изделий в экстремальных условиях эксплуатации, относятся к функциональным композиционным. Комбинация свойств таких материалов позволяет придать им специальные свойства, например, огнестойкость, озоностойкость, температуростойкость и другие.

В соответствии с классификацией функциональные материалы должны обеспечивать безотказную работу изделий в условиях воздействия физических, химических и/или биологических факторов.

Таким образом, в зависимости от условий эксплуатации мягкие конструкционные материалы подразделяются на материалы общего назначения, композиционные, функциональные. Повышенные требования к конструкции и материалам в условиях функционирования движительных эластичных механизмов привели к необходимости усложнения конструкций материалов за счет комбинирования их с электронными системами управления и контроля.

Технические требования к эластичным конструкционным материалам

Эластичные пневмоконструкции – изделия, состоящие из комплекса эластичных материалов и элементов: гибких нитей, эластичных покрытий, конфек-

ционных соединений, обеспечивающих их работоспособность, надежность и безотказность в заданных условиях эксплуатации.

Окружающая среда эксплуатации эластичных пневмоконструкций - воздух, вода. Рабочая среда в оболочке – газ или жидкость под избыточным давлением.

Внешними воздействующими нагрузками в статике являются: растяжения материала внутренним избыточным давлением рабочей среды оболочки. Внешние сжимающие нагрузки полностью компенсируются внутренним давлением, разгружая натяжение материала.

С учетом приведенной систематизации пневмоконструкций общими требованиями к эластичным конструкционным материалам являются такие:

- герметичность в рабочей среде – воздухе, жидкости;
- прочность в заданных пределах;
- ограниченное удлинение хотя бы в одном направлении приложенной растягивающей нагрузки;
- минимальная толщина и материалоемкость;
- технологичность для соединения в швах, материал должен иметь возможность склеиваться или свариваться;
- товарный вид.

Кроме общих, специальными требованиями к эластичным материалам являются следующие:

- герметичность для специальных рабочих сред: газа (гелия, смесей, паровых газов); агрессивных жидкостей; смесей;
- прочность к локальным нагрузкам (проколам);
- быть высокомодульным, иметь минимальные разрывные удлинения;
- обладать максимальной устойчивостью к циклическим изгибам;
- температуростойкость, негорючесть;
- быть агрессивностойким к физическим, химическим, биологическим воздействиям окружающей среды;
- обладать технологичностью для соединения в швах, иметь возможность склеиваться или свариваться с другими материалами без уменьшения прочности основного материала;
- не должен выделять вредных летучих ингредиентов и компонентов, загрязняющих технологическую среду, например, производство изделий микроэлектроники, медицины, атомной и др. промышленности.

Материал с покрытием изготавливается различными способами – намазкой, окутанием, пропиткой расплавом на вальках («вальц-шмельц»), напылением или кашированием [9, 40].

Таким образом, в общем виде эластомерные конструкционные материалы представляют собой композицию армирующего материала на связующей эластомерной основе. Прочностные свойства и герметичность материала, а также их структурные и технологические свойства зависят от физико-механических и технологических свойств текстильных тканей, комплексных нитей и волокон, полимерных покрытий и адгезионных подслоев. Функциональные свойства эла-

стомерных армированных материалов, зависящие от условий эксплуатации, и относятся к специальным.

Выводы

Композитные материалы жесткие и эластичные имеют общее сходство, объединяющее их по конструктивным элементам: многослойный высокопрочный тканевый каркас (наполнитель) и связующее, обладающее специальными свойствами (матрица), соединенные между собой, при необходимости, адгезионным подслоем.

Сильная зависимость прочности от молекулярной ориентации полимеров является основным признаком, отличающим их прочностные свойства от закономерностей прочности других твердых тел.

В зависимости от требований эксплуатации наполнитель и матрица подвергаются физической или химической модификации для улучшения определенных эксплуатационных характеристик композиционного конструкционного материала.

При активации резин различными промоторами адгезии для повышения, например, прочности связи, учитываются: тип эластомера, тип и содержание наполнителей, природа волокна, наличие поверхностной модификации, тип адгезионной обработки текстильного материала. Прочность связи также зависит от правильности проведения процесса вулканизации в многослойных резиновых изделиях.

На физико-механические свойства резин, например прочность и эластичность, большое влияние оказывают тип и микроструктура каучука, тип вулканизирующей системы и характер образующихся при вулканизации структур, а также концентрация и морфологические характеристики наполнителей, пластификаторов, модификаторов и некоторые другие факторы.

Материал покрытия может быть подготовлен для операции нанесения в виде раствора, пасты, расплава, порошка, высоковязкой смеси, пленки, водной дисперсии и др. в зависимости от типа имеющегося оборудования.

Сильная зависимость прочности от молекулярной ориентации полимеров является основным признаком, отличающим их прочностные свойства от закономерностей прочности других твердых тел.

Для производства мягких конструкций применяется большое количество защитных эластомерных материалов, армированных или дублированных. Для расширения функциональных свойств армирующего материала, в зависимости от назначения, целесообразно применять ткани сложных переплетений (многослойные, многослойные), с двумя или тремя типами волокон одновременно, используя достоинства каждого, применять нити комбинированные, армированные, изготовленные из смесовой пряжи, а также разные нити в основе и утке ткани.

Введение в конструкцию композиционного материала специальных функциональных элементов (слоев) позволит расширить области его использования.

Очевидно, можно предусмотреть среди слоев место и для контрольно-исполнительных элементов, например, на базе микроэлектронных приборов

Такой материал будет нести в себе не только силовые и защитные функции, но и, например, отслеживать допустимые пределы своих защитных свойств. Кроме того, в материале можно предусмотреть и коммуникационные ниши, и места расположения микрокапсул с различными защитными веществами, улучшающими условия эксплуатации.

Таким образом, успехи микро- и нанотехнологий позволяют приблизить функциональные свойства конструкционных материалов мягких оболочек к свойствам натуральной кожи. И такие композиционные материалы являются прообразами мягких интеллектуальных материалов.

2.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТКАНИ И ИХ СВОЙСТВА

Свойства технических волокон

Химические волокна, лежащие в основе конструкций технических тканей и нитей, классифицируются по химической природе, способам получения, областям применения.

В зависимости от происхождения текстильные волокна принято разделять на природные (хлопчатобумажные и льняные), искусственные (вискозные), получаемые при определенной переработке природных материалов (стеклянные, угольные, базальтовые) и синтетические (полиамидные, полиэфирные, арамидные).

На рис 2.1 представлены деформационные кривые «нагрузка – удлинение» для волокон различного происхождения [61-99].

Выбор волокон зависит от назначения и представляет следующие группы:

- волокна общего назначения;
- высокопрочные и высокомодульные волокна;
- волокна со специфическими свойствами;
- комбинированные.

Эластичные текстильные композиты, воспринимающие основные и второстепенные нагрузки в мягких силовых конструкциях, как правило, изготавливаются из высокомодульных волокон и нитей.

Высокой механической прочностью и меньшему старению подвержены ткани на основе ароматического полиамида (арамида), например, из волокон «кевлар» или «аренка». Определенный интерес для создания специальных композиционных материалов представляют волокна с электрическими свойствами, это: проводники, полупроводники, диэлектрики, ионообменные, электронообменные и другие материалы [72].

Классическими видами электропроводных волокон являются металлические нити, проволока и волокноподобные металлические частицы.

В табл. 2.2 приведена приблизительная классификация волокон со специфическими свойствами для различных областей применения.

Перспективным видом полимерных материалов являются полупроводниковые волокна, которые можно получить несколькими путями.

Наполненные полимерные волокна получают введением в прядильный раствор или расплав волокнообразующего полимера электропроводящих частиц в значительной концентрации. Такими частицами могут быть, например, порошки сажи, графита, металлов.

Полупроводниковые свойства могут быть приданы волокнам путем введения в них после формования растворимых солей металлов или других электропроводных веществ.

Наиболее распространенным методом придания полупроводниковых свойств волокнам является создание системы сопряженных двойных связей методами полимераналогичных превращений. Наличие в таких системах π -электронов придает им устойчивый эффект электропроводности.

Примером электропроводных волокон и нитей являются дегидратированные поливинилспиртовые волокна, дегидрированные полиакрилонитриловые волокна, угольные и графитовые волокна. Подобные материалы известны в электронике, радиотехнике в виде нитей, жгутов, тканей, нетканых материалов, бумаги, наполненных пластиков и других видов изделий.

К волокнам с высокими диэлектрическими свойствами относятся материалы с наименее полярной структурой, политетрафторэтиленовое, полиэтиленовое, полипропиленовое. Часто используется полиэтилентерефталатное волокно. К волокнам с хорошими диэлектрическими свойствами относятся термостойкие ароматические полиамидные и полиимидные.

Ионообменные и электронообменные (окислительно - восстановительные «реактивные») волокна могут быть получены как при модификации исходных волокнообразующих полимеров, так и при последующей модификации волокон, введением ионообменных групп в волокна самыми различными путями. Такие волокна созданы на основе целлюлозных волокон, поливинилового спирта. Отличительной особенностью волокон со специфическими свойствами является их уникальность и ограниченная потребность. Однако, незаменимость новых видов волокон и пленок позволяет применять не только в виде тканых материалов, но и в виде армирующих наполнителей, где также находят применение органические и неорганические волокна и игольчатые монокристаллы.

Получение волокон со специальными свойствами возможно различными путями:

- 1) подбор исходных полимеров до процесса получения волокон;
- 2) модификация волокон в процессе их формования;
- 3) проведение реакции полимераналогичных превращений с изменением структуры молекулярных цепей;
- 4) то же с изменением боковых функциональных групп (без изменения структуры цепей);
- 5) осуществление межмолекулярной сшивки путем применения би- и полифункциональных соединений, реагирующих с боковыми функциональными группами.

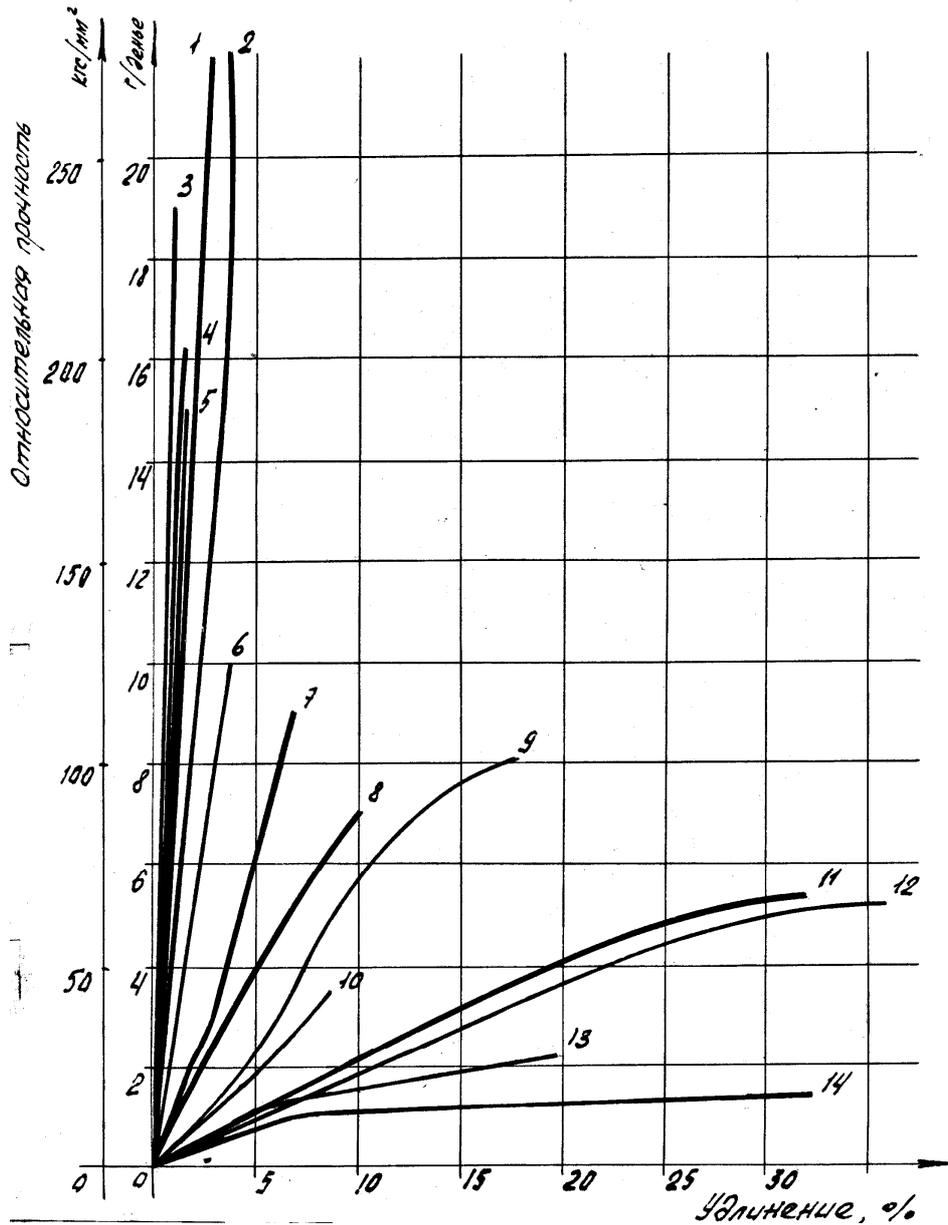


Рис. 2.1. Деформационные кривые «нагрузка – удлинение» волокон различной природы:

1 – кевлар 49; 2 – кевлар 29; 3 – борные волокна; 4 – сталь; 5 – угольные НТ; 6 – стекло Е; 7 – фортизан; 8 – полиэфирное (высокопрочное); 9 – найлон 6,6 (высокопрочный); 10 – хлопок; 11 – полиэфирное (обычное); 12 – найлон 6,6 (обычный); 13 – вискозное; 14 – ацететное (обычное)

Модификация волокон может проводиться на стадии получения полимера или формирования волокон, а также при их дополнительной обработке. Многие виды модификаций или нанесения защитных покрытий применяются на стадии нити или ткани.

Следует обратить особое внимание на зависимость комплекса свойств волокон от их модификации на конечной обработке, которые влияют как на характеристики волокон, так и на качество материалов и изделий из них.

Специфические свойства волокон могут быть использованы в производстве конструкционных материалов как общего, так и специального назначения, причем их модификация доступна как до или в процессе изготовления, так и после, при изготовлении технических тканей и полуфабрикатов композиционных материалов.

Причем использование, например, гибридных тканей на основе двух и более типов волокнистых нитей позволяет управлять свойствами композита, повышать его надежность и обеспечивать экономичность производства. Для изучения свойств мягких композитов следует взять за основу иерархическую структурную организацию этих материалов: волокно – нить – ткань – композит.

Таким образом, свойства химических волокон классифицируются по химической природе, способам получения, области применения. Модификация волокон в процессе изготовления позволяет придавать им заданные специфические свойства.

Основными направлениями по применению технических волокнистых материалов являются производства жестких и мягких композитов, пластин, бумаг, тканей, нетканых материалов, нитей.

Характеристики нитей

Нити и нетканые материалы обладают рядом одинаковых черт, как плотно упакованные волокнистые системы.

Отличием их является отклонение ориентации осей волокон.

Нить является одномерной пряжей, образующей армирующие структуры намоткой или переплетением в ткани.

Простейшей формой нити является моноволокно, образованное вытяжкой через одну фильеру из расплава или раствора с последующей обработкой, фиксирующей форму. При этом свойства нитей идентичны свойствам волокна. Моноволокна, как правило, не находят применения в технологии композитов.

Примерная классификация волокон со специфическими свойствами приведена в табл.2.2.

Наиболее важным типом нитей, пригодных для переработки в композиты являются многоволоконные, экструдированные из прядильной головки с большим количеством отверстий (ровница, жгут).

Форму и плотность такой пряжи придают фрикционным (круткой, обмоткой, спутыванием, перекрещиванием) или адгезионным взаимодействием (для некрученых нитей) (рис. 2.2).

Особый интерес для эластичных композитов представляет крученая или кордная пряжа, получаемая путем скручивания вместе единичных нитей.

Классификация волокон

Типы волокон	Свойства и применение	Наименование
1	2	3
С особой формой сечения		
Полые Профилированные Сверхтонкие	В качестве микротрубок, для диализа, гиперфильтрации Для галантерейных изделий Для трикотажных изделий Для сверхтонкой фильтрации воздуха	Полиамидные, ацетатные Вискозные плоские Полиамидные Поливинилхлоридные (ПВХ), полиакрилонитрильные
С особыми механическими свойствами		
Сверхпрочные и высокомодульные Высокоэластичные	Для армирования конструкционных пластиков; для тросов Для армирования пластиков Для галантерейных и спортивных изделий	Органические – поливинилспиртовые, гидратцеллюлозные, полиамидные (ароматические) Углеродные (угольные, графитовые); неорганические (кварцевые, карбидные, борнитридные); игольчатые монокристаллы (графитовые, нитридные) Каучуковые, полиуретановые
С особыми термическими свойствами		
Жаростойкие Термостойкие Огнестойкие (невоспламеняющиеся) Термопластичные Термогидропластичные Высокоусадочные	Для армирования термостойких пластиков Для армирования термостойких пластиков и резиновых изделий Для обивки мебели, занавесей, спец. Одежды Связующие нетканых материалов, бумаг Искусственная кожа, войлоки	Углеродные (графитовые, угольные); неорганические (кварцевые, борные, карбидные, борнитридные); игольчатые монокристаллы (графитовые, нитридные) Ароматические полиамидные, полиимидные, бензимидазолные, оксазолные) На основе галогенсодержащих или фосфорсодержащих, ароматических полимеров; ПВХ, полиолефиновые, полиамидные. Волокнистые полимерные связующие Поливинилспиртовые ПВХ, полиэфирные, полиакрилонитрильные

1	2	3
С особыми электрическими свойствами		
Полупроводниковые Диэлектрики	Нагреватели, поглотительные экраны, термосопротивления Изоляция в электрорадио-промышленности	Углеродные (угольные, графитовые), карбидные Полиолефиновые, политетрафторэтиленовые, полиэфирные, полиамидные
Биологически активные		
Бактерицидные, бактериостатические, антигрибковые, кровоостанавливающие	Для медицинских целей (перевязочные материалы)	Модифицированные гидратцеллюлозные, поливинилспиртовые
С особыми химическими свойствами		
Химически инертные Ионообменные Электрообменные Сорбенты	Для фильтрования агрессивных жидкостей и газов Для получения ионообменных материалов Для проведения процессов восстановления соединений в растворах Для получения сорбирующих материалов для очистки газов и жидкостей	Политетрафторэтиленовые Модифицированные поливинилспиртовые и гидратцеллюлозные Угольные
Растворимые		
Водорастворимые Рассасывающиеся	Вспомогательный удаляемый компонент в получении тонких тканей, временного усиления изделий, их разъединения В качестве шовного материала в медицине	Поливинилспиртовые Белковые

Для поддержания целостности, определенной плотности и формы сечения группы волокон традиционно незначительно скручивают или объединяют нерегулярным «ложным плетением».

Степень крутки, способствующая уплотнению волокон в нити, улучшает усталостные свойства и нелинейно влияет на их разрывную прочность.

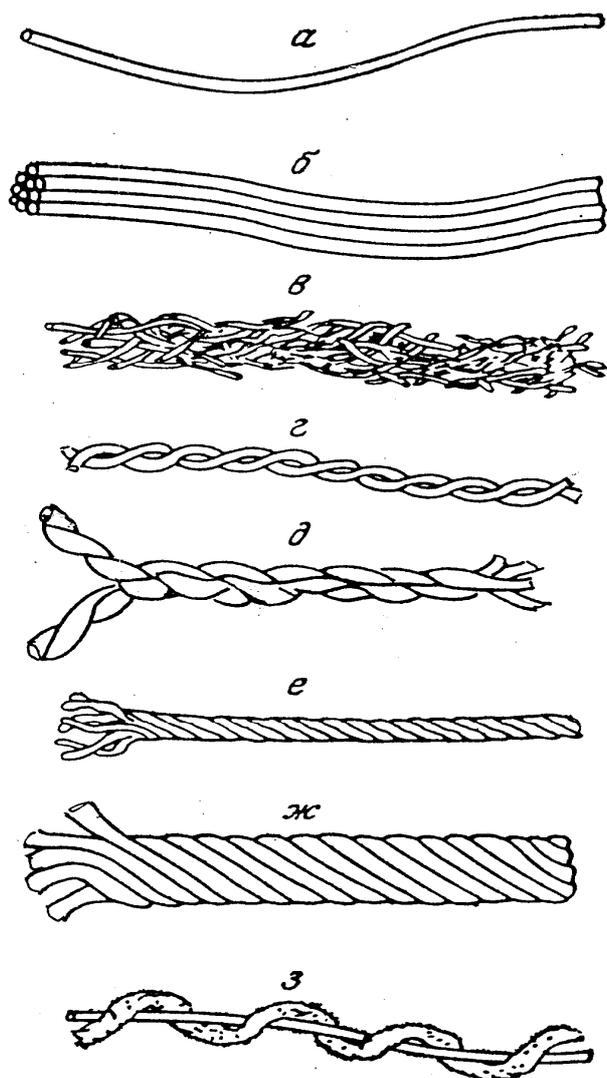


Рис. 2.2. Специализированные схемы нитей различных структур:

а – моноволокно; б – пучек непрерывных волокон; в – пучек штапельных волокон; г – крученая нить в два сложения; д – крученая нить в несколько сложений; е–ж – сложные пряжи; з – комбинированные нити

Получить нить, состоящую из волокон разного типа, можно путем совместного прядения или комбинирования сердцевины из непрерывного волокна с оболочкой из штапельных волокон (нить типа Bobtex).

Для придания нитям из непрерывных волокон объемности или вытяжки применяют различные методы текстурирования. При форсуночном текстурировании получают нити с улучшенным сцеплением волокон с полимерной матрицей композита. Для этих же целей изготавливаются нити с локализованными по длине утолщениями.

Среди синтетических и искусственных нитей наиболее широко используют комплексные нити. Их свойства, применение и качество во многом определяются их структурой (формой, размерами, количеством и расположением элементарных нитей, связь между ними). Структура нитей в основном зависит от технологии их производства и переработки. Путем физической модификации – направленного изменения состава, структуры, свойств технологии производст-

ва и переработки можно значительно изменить эффективность использования нитей в текстильных изделиях. Известны следующие основные методы физической модификации нити:

- формование элементарных и комплексных нитей из смеси полимеров;
- введение в прядильные расплавы и растворы полимеров низко- или высокомолекулярных органических и неорганических веществ;
- изменение количества компонентов и технологического процесса производства элементарных нитей путем их формования из двух и более кинетически совместимых расплавов;
- изменение продольной и поперечной формы и конечных размеров сечения элементарных нитей;
- изменение количества элементарных нитей;
- изменение поперечных размеров комплексных нитей;
- изменение ориентации, вытягивание и релаксация элементарных и комплексных нитей;
- изменение расположения и связей элементарных нитей в комплексные.

Основными характеристиками текстильной структуры комплексных нитей являются линейная плотность элементарных нитей (размеры и количество) и крутка (расположение и связь между собой).

Снижение линейной плотности элементарных нитей вызвано более высокой ориентацией. Это приводит к увеличению разрывной нагрузки, относительной прочности, начального модуля; уменьшению разрывного удлинения, полной деформации растяжения.

Большое влияние на механические свойства комплексных нитей оказывает крутка. При кручении комплексных нитей, состоящих из элементарных меньшей плотности, снижается жесткость; напряжения при скручивании растут медленнее. Причем характер изменения практически не зависит от химической природы нитей. При повышении крутки комплексных нитей до определенной величины происходит, в основном, увеличение их разрывной нагрузки и относительной прочности в результате выравнивания степени растяжения, а также напряжения элементарных нитей, повышение их одновременного разрыва из-за возникающих при кручении сил трения между ними. Однако при повышении крутки выше оптимального значения возникает перенапряжение между элементарными нитями за счет неравномерного напряжения и деформирования при крутке. Особенно это заметно для комплексных нитей и корда, состоящих из более толстых элементарных нитей [53].

Таким образом, регулируя линейную плотность элементарных нитей, коэффициент крутки, совершенствуя структуру нитей путем физической модификации, можно повысить прочностные свойства комплексных нитей, значительно улучшить их механические показатели. Успешное применение нашли различные по природе нити, например, в производстве резинотканевых материалов при решении специальных задач, например, обеспечении электропроводности, а также прочного крепления нитей к резине.

Ткани в композитах

Текстильные композиты могут быть эластичными или относительно жесткими. К эластичным текстильным композитам относятся, например, прорезиненные ткани, в которых текстильный наполнитель обеспечивает прочность и стабильность при растяжении, а резиновый связующий образует гибкую герметичную матрицу.

Не обладая необходимыми совокупными свойствами, каждый из компонентов незаменим в единой системе составляющих эластичный композит, предназначенный для эксплуатации в определенных условиях.

Ткани с покрытием (специальные ткани, «мембраны») не производят только для пневматических конструкций. Их общий объем для инженерных целей (в том числе тентовых конструкций) едва превышает один процент от их промышленного производства. И если в производстве товаров широкого потребления все еще преобладают натуральные волокна, то для чисто технических целей применяют преимущественно синтетические.

Применение текстильных материалов (подложки, наполнителя) с покрытием (связующим) из эластомеров или пленок является общим направлением в проектировании эластичных механизмов и пневматических конструкций. В основе эластомерных конструкционных материалов лежат силовые свойства химических волокон и структура тканей. Их разработка и проектирование направлены не только на расширение функционального назначения, но и на создание новых свойств, в том числе с обратной связью, позволяющих управлять и контролировать рабочие процессы механизмов в автономном режиме.

Непропитанные волокнистые материалы (волокна, нити или ткани), образующие определенные плоские или пространственные структуры, называют текстильными армирующими каркасами. Текстильные каркасы различаются ориентацией волокон, видом переплетения и геометрическими параметрами. Строение текстильного каркаса может изменяться в широком диапазоне от плоского листа до сложной пространственной многонаправленной структуры [50, 53].

На рис.2.3 представлена классификация текстильных систем: ткаными ($a - z$), вязаными ($d - p$), плетеными ($c - ш$) и неткаными ($щ - я$) материалами.

Рубленые волокна (тип I), как правило, не пригодны для изготовления изделий конструкционного назначения ввиду малой длины волокон, трудности контроля их ориентации и низкой степени интегрированности или взаимодействия волокон между собой.

Система из линейных нитей, образованных моноволокнами (тип II), приемлема для изготовления конструкционных элементов, которые в процессе эксплуатации подвергаются действию растягивающих нагрузок. Однако, чтобы удовлетворить требованиям не столь узкоспецифических областей конструкционного применения, система нитей должна быть многонаправленной.

Слоистые системы (тип III), представленные многообразными видами простых текстильных материалов (тканых, вязаных, плетеных и нетканых), наибо-

лее пригодны для плоских силовых конструкций. К основным чертам простых текстильных материалов относятся непрерывность волокон, ориентация волокон в плоскости и в большинстве случаев плоская система взаимозацеплений или интегрированности волокон.

Полностью интегрированные современные текстильные системы (тип 1У) можно считать наиболее надежными материалами для изготовления элементов конструкции, воспринимающих нагрузки общего типа, поскольку в них обеспечиваются непрерывность, заданное пространственное расположение и зацепление волокон. Свойства различных текстильных структур приведены в табл.2.3.

Текстильный материал, как совокупность волокон и нитей, обладает значительной площадью поверхности по сравнению с толщиной и достаточной механической прочностью для обеспечения собственной целостности. Тканый материал изготавливается в процессе ткачества посредством переплетения нитей основы и утка и имеет две основные структуры: тканую и вязаную (трикотажную). Качество текстиля определяют свойства волокон, перерабатываемых в технические ткани. Однако оно зависит еще от структуры и плотности переплетения.

Применение текстильных материалов определенной структуры диктуется областью их эксплуатации. Волокна и текстиль должны обладать такими свойствами, которые обеспечили бы стабильное функционирование изделия при эксплуатации.

Для армирования импрегнированных тканей применяют текстильные материалы различной структуры:

- ткань полотняного (рогожка) и саржевого переплетения основной и уточной нити;
- ткани двухосновные с двумя системами нитей основы и одной системой нитей утка;
- ткани типа "малимо", где нити обоих направлений не переплетаются и, оставаясь недеформированными, соединяются между собой третьим слоем тонких нитей;
- ткани типа "аэромат", представляющие собой двухслойную ткань, нити каждого из слоев которой переплетены между собой общей уточной нитью заданной длины;
- ткани многослойные;
- ткани профилированные (круглого, многопрофильного и т.д. сечения);
- ткани кордовые (с кордосновой или кордутком), у которых нити основы соединены технологическим уточным слоем тонких нитей;
- сети, ленты, шнуры [46].

В некоторых случаях для производства эластичных конструкционных материалов применяют ткани трикотажного переплетения, нетканые материалы, пряжу. Таким образом, на этапе проектирования текстильных конструкционных композитов необходимо подбирать такие оптимальные сочетания компонентов, методов изготовления и формы, чтобы обеспечить наилучшие эксплуатационные показатели при минимальных затратах.

Материалы для пневмоконструирования инженерного имущества

При проектировании и расчете пневматических конструкций и изделий инженерного имущества приходится сталкиваться с задачами, связанными с выбором материала, соответствующего по своим исходным свойствам требованиям технического задания и обеспечивающего сохранение работоспособности изделия в течение заданного срока эксплуатации и хранения. В настоящее время промышленность выпускает широкий ассортимент материалов для изделий этого вида, различающихся физико-механическими показателями и условиями применения [6].

Прорезиненные ткани различаются по признаку их конструирования на следующие группы: однослойные; двухслойные; многослойные с параллельным, диагональным, перпендикулярным дублированием; с односторонним и/или двухсторонним покрытием, ленточные. Параллельное дублирование, при котором нити основы слоев укладываются в одном направлении, повышает разрывную прочность; диагональное – увеличивает прочность на раздир; перпендикулярное – сообщает ткани одинаковые свойства в двух основных направлениях.

По методу изготовления прорезиненные ткани объединены в группы: ткани, изготавливаемые методом шпрединогования и/или каландрования [40, 50].

В отличие от обрешивания полимерные покрытия на ткань могут наноситься также методами каширования, экструзии, на плавильных барабанах. Для операции нанесения используется материал в виде раствора, пасты, расплава, порошка, высоковязкой смеси, пленки, водной дисперсии в зависимости от типа имеющегося оборудования (рис. 2.3).

Свойства конструкционных прорезиненных материалов оцениваются рядом регламентированных величин. Прочность на разрыв (кН/м, кгс/5см) – растягивающее усилие, вызывающее разрыв стандартного образца, шириной 5см при стандартном способе приложения нагрузки. Относительное удлинение (%) измеряют в момент разрыва образца материала.

Прочность на раздир (кгс, Н) – нагрузка, вызывающая разрушение надрезанного стандартного образца вдоль разреза (раздир) при растяжении его полосок в разные стороны. Прочность связи (адгезия) между тканью и защитным покрытием (кгс/см, кН/м) – усилие, необходимое для отделения (отслоения) слоя покрытия от ткани, отнесенное к ширине стандартного образца.

Газопроницаемость (л/м²сут) – количество газа, просачивающегося в единицу времени через площадь, пересчитанную на 1 м² материи, при стандартных условиях испытаний. Основные конструктивные характеристики прорезиненных тканей отвечают требованиям соответствующих технических условий и технологических регламентов. Ряд технических показателей тканей должны соответствовать техническим требованиям на изделия.

Таким образом, нормативные характеристики, хотя и дают общее представление о свойствах прорезиненного материала, не позволяют оценить его поведение в условиях эксплуатации.

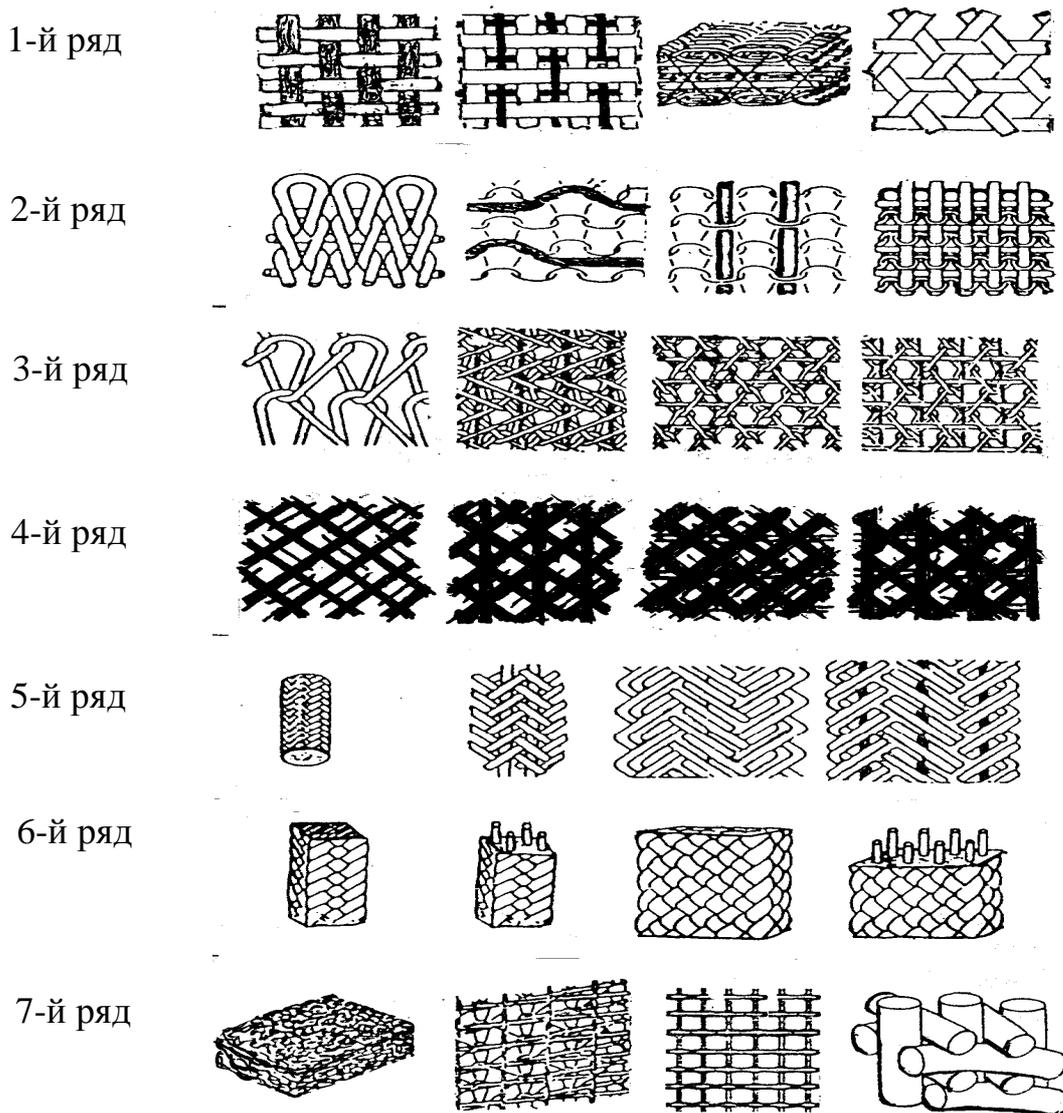


Рис. 2.3. Структуры тканых материалов:

1-й ряд – двухосная ткань, высокомодульная, многослойная, трехнаправленная плоская; 2-й ряд – уточный (кулирный) трикотаж, то же с проложенной уточной нитью, то же с проложенной основной нитью, то же с проложенными основной и уточной линиями; 3-й ряд – основной трикотаж, основной трикотаж с проложенными уточными линиями; 4-й ряд – многослойный основной трикотаж $\pm 45^{\circ}$, то же $0^{\circ}/\pm 45^{\circ}$, то же $\pm 45^{\circ}/90^{\circ}$, то же $0^{\circ}/\pm 45^{\circ}/90^{\circ}$; 5-й ряд – трубчатое (рукавное) плетение, то же с проложенной основной нитью, плоское плетение, то же с проложенной основной нитью; 6-й ряд – квадратное плетение, то же с проложенной основной нитью, фасонное плетение, то же с проложенной основной нитью; 7-й ряд – волокнистый мат, прошитый материал с проложенными уточной и основной нитями, проклеенный материал, каркас из пространственно ориентированных нитей

Это объясняется изменением свойств текстильной основы и покрытия в процессе эксплуатации в напряженном состоянии и при длительном хранении. Установлено, что эластичные тканые композиты в основном характеризуются нелинейными соотношениями между напряжениями и деформациями вследствие вытягивания искривленных нитей при двухосном напряжении.

Особенности использования прочностных свойств прорезиненных тканей

Основными свойствами эластомерных пневматических конструкций как механической системы являются: энергетическое равновесие потенциальных сил давления сжатой рабочей среды и упругого растяжения замыкающей оболочки; дифференцированная напряженность в пределах заданного запаса прочности конструкционного материала и соединительных швов в условиях агрессивного действия окружающей среды; оптимальная геометрическая форма этой оболочки.

Эксплуатация эластомерных пневмоконструкций возможна при наличии определенного объема рабочей среды, замкнутой в полости оболочки под избыточным давлением. Ее работоспособность зависит от уровня рабочего давления, необходимого для сохранения геометрических параметров оболочки, и величины натяжения материала в условиях действия внешней нагрузки.

То есть силовые показатели оболочечной конструкции зависят от геометрических размеров, формы (кривизны), а также деформационно-прочностных свойств конструкционного материала. Так как прочность связующего, по сравнению с армирующим материалом незначительна, то ответственными за силовые свойства пневмоконструкций считаются прочность и деформативность армирующего материал. В свою очередь, его прочностные свойства определяются технологическими (структурой) и физическими (плотность, модуль упругости) свойствами волокон и нитей. Волокна различной плотности и толщины могут иметь равную разрывную прочность, и наоборот, за счет различной удельной прочности волокон и нитей можно улучшить, например, весовые характеристики конструкции в целом.

Таким образом, в отношении разрывной прочности волокна (нити, ткани) к их массовым составляющим скрыт важный эксплуатационный количественный показатель качества, использование которого удобно и целесообразно. Например, волокна и нити полиамидного материала, независимо от толщины, имеют одинаковую удельную прочность, а более прочные арамидные – вдвое легче первых. Кроме того, изменения этих показателей указывают на отклонение от нормативных требований и могут быть легко проконтролированы [95]. При внешнем сжатии наблюдается деформация стенок эластомерных силовых пневмоконструкций, изменение геометрической формы оболочки и перераспределение напряжения, пропорционально кривизне ее поверхности. Упругие свойства таких конструкций резко анизотропны. Они зависят от свойств материала, а именно: угла между направлением приложенной нагрузки (растяжения) и пересекающимися нитями основы и утка; жесткости в направлении нитей; модуля сдвига эластомера; коэффициента поперечной деформации. Это свойство носит название «податливость».

Различие податливости наполнителя и связующего приводит к возникновению концентраторов напряжений на их границе со всеми вытекающими отсюда последствиями, а самого материала приводит к неравномерному распределению сопротивления погонным растягивающим нагрузкам в местах стыка раскрытых деталей оболочки. Фактическая прочность материала на стыке значительно

ниже номинальной, что приводит к снижению коэффициента использования прочностных свойств материала, снижению коэффициента запаса прочности конструкции. В результате исследования податливости (зависимости прочности материала от угла приложения растягивающей нагрузки к направлению нитей основы) установлено, что при малых углах (от 0 до 15°) прочность значительно уменьшается (в диапазоне сохранения целостности нитей основы) и носит линейный характер. Далее (до угла 45°), эта зависимость нелинейно возрастает. От 45° до 90° зависимость снижается, зеркально отражая характеристику (рис. 2.4). При традиционном лекальном раскрое, например, коэффициент использования прочности капроновой и арамидной тканей составляют соответственно всего лишь 30 % и 12 %.

Исследования показали, что, изменяя угол между направлением силовой основы и направлением приложенного растягивающего усилия, можно управлять податливостью и увеличивать коэффициент использования прочности материала и швов [18, 37].

Указанные исследования позволили рекомендовать увеличение коэффициента использования прочности соединительных швов за счет снижения угла раскроя (максимальное снижение перерезанных нитей основы) заготовок по отношению к нитям основы.

Таким образом, максимальное использование прочностных свойств конструкционного материала обеспечивается раскроем, то есть формой пневмоконструкции. Наиболее рациональным является прямоугольный раскрой деталей с прямолинейными соединительными швами, что увеличивает величину коэффициента использования прочностных свойств, придает стабильность их физико-механическим свойствам и благоприятствует механизации процессов подготовки и производству оболочечных конструкций в рамках существующей конфекционной технологии элементов эластичной механики.

Выводы

В резиновой промышленности большая часть изделий содержит в своей структуре текстильные материалы. Модуль упругости и прочностные характеристики армирующих материалов значительно выше, чем у резин, поэтому в большинстве случаев армирующие материалы используют для создания прочного каркаса. Для армирования резиновых изделий применяют волокна, нити, кордшнуры, ткани и др. Нити и пряжу в основном используют в производстве рукавов. Нити двойной крутки (кордшнуры) и кордовые ткани – в производстве клиновых ремней, в качестве силового несущего слоя. Одним из основных назначений технических тканей является использование их для изготовления конструкционных материалов с эластомерным покрытием.

Таблица 2.3

Сравнительные характеристики армирующих тканей резинотканевых материалов

Тип ткани	Масса м ² Г	Толщина нити, текс	Число нитей на 10 см, шт		Толщина, мм	Разрывная нагрузка, Н		Удельная прочность	Удлинение при разрыве, %	Переплетение		
			0	у		0	у				0	у
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Хлопчатобумажные												
Перкаль Б Арт. 7018	65	7,5(5,9)	432	495	0,72	24	24	8	8	5	9	полот
Перкаль А Арт. 7021	100	10,8(9,8)	476	454	0,43	43	40	9	9	17	14	полот
Кордпнев Арт. 2256	710	27x13	90	84	1,3	2109	2354	5	6	36	16	саржа
Кордпн кнк Арт2253	500	50x3(93,5)	86	90	1,15	3188	3434	15	13	29	25	саржа
Полиамидные												
Арт. 56004	47	5,0	430	430	0,12	38	21	17	10	21	21	саржа
Арт. 56009 каркас	54	15,6(5,0)	320	320	0,15	50	48	20	19	23	23	полот
Арт. 56026	165	29,0	255	60	–	180	220	23	29	22	24	рогож
Арт. 56027	212	29,0	270	180	0,43	4461	1695	37	21	48	34	полот
АП Арт. 56032	330	29x3	140	183	–	3625	4410	25	23	30	40	рогож
Авиз. Арт. 56039	300	29x2	–	–	0,54	250	200	18	14	45	30	полот
ТК 50 РО	215	93,5	100	114	0,55	2450	3920	24	34	24	26	саржа
ТК 80 РО	340	93,5	80	90	0,75	2940	4410	18	24	26	30	саржа
ТК 100 Арт. 56247	325	93,5x2	98	62	0,75	4900	3240	24	25	28	26	саржа
ТК 120-Р Арт. 56243	480	–	72	86	1,1	6376	7354	29	28	25	28	рогож
ТК 160-Р Арт. 56277	690	–	108	118	1,15	8338	9319	25	25	27	30	рогож
ТК 200-2 Арт. 56265	590	187x2	104	40	1,25	–	3920	–	23	–	24	саржа
ТК 270-Р Арт. 56298	1000	93,5x2x3	84	84	1,9	13244	13734	26	27	35	35	рогож
ТК 300-Р Арт. 56255	1200	93,5	116	118	2,8	14715	15205	24	25	34	37	рогож
Анидные												
ТА-100	326	93,5x2	98	62	0,75	5000	3340	12	26	24	20	саржа

Окончание табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ТА-300	665	93,5	60	34	1,5	–	2840	–	11	–	20	саржа
Полиэфирные												
Арт. 56341	78	12,5	207	297	–	85	85	23	23	27	27	ПОЛОТ
Арт. 56387	200	12,5	154	84	–	2450	2452	18	33	20	20	саржа
Арт. 56408	137	29,4	225	205	–	1508	1421	22	21	27	30	ПОЛОТ
Полипропиленовое												
Арт. 56286	210	29,4	368	132	0,93	1754	725	11	13	44	33	атлас
Арамидные												
Т-160 Арт. 56362	125	29,4	300	200	–	980	882	13	17	14	14	ПОЛОТ
Арамидные												
СВМ обр.5358-87	64	14,3	202	215	0,11	237	295	63	78	5,5	5,9	ПОЛОТ
СВМ обр.5351-89	49	14,3	184	150	0,1	240	187	83	65	4,0	4,0	ПОЛОТ
СВМ обр. 5372-85	74	14,3	240	247	0,18	326	408	75	94	9,1	8,8	ПОЛОТ
СВМ Арт. 56305	115	14,3	280	285	0,17	280	285	41	42	8,0	8,2	ПОЛОТ
СВМ обр. 5357-80	112	29,4	184	180	0,24	470	450	71	63	9,0	6,6	ПОЛОТ
СВМ Арт. 56334	151	29,4	244	220	–	4449	4430	56	61	7	8	атлас
СВМ Арт. 56379	180	29,4	370	180	–	7546	3528	62	59	3	2	атлас
СВМ Арт. 56380	200	58,8	160	130	–	5880	3920	53	43	10	4	ПОЛОТ
Терлоновая												
Обр. 5398-83	76	14,3	248	250	0,13	238	273	53	61	6,7	4,9	ПОЛОТ
Обр. 5387-85	116	29,4	180	200	0,2	380	450	55	66	9,2	3,6	ПОЛОТ
Обр. 5409	60	14,3	360	340	0,2	280	280	51	78	8,0	3,0	ПОЛОТ
Комбинированные												
Арт. 66001 (о - кап+х/б; у – кап)	150	5x2+7,5x2	–	–	–	833	637	–	–	45	45	кмб
Арт. 66004 (кап+х/б)	250	29x2+25x5	222	135	–	1764	2058	–	–	30	25	ПОЛОТ

Примечание. Удельная прочность ткани выражает отношение прочности 1 м ткани к массе 1 м² (с учетом поправочных коэффициентов).

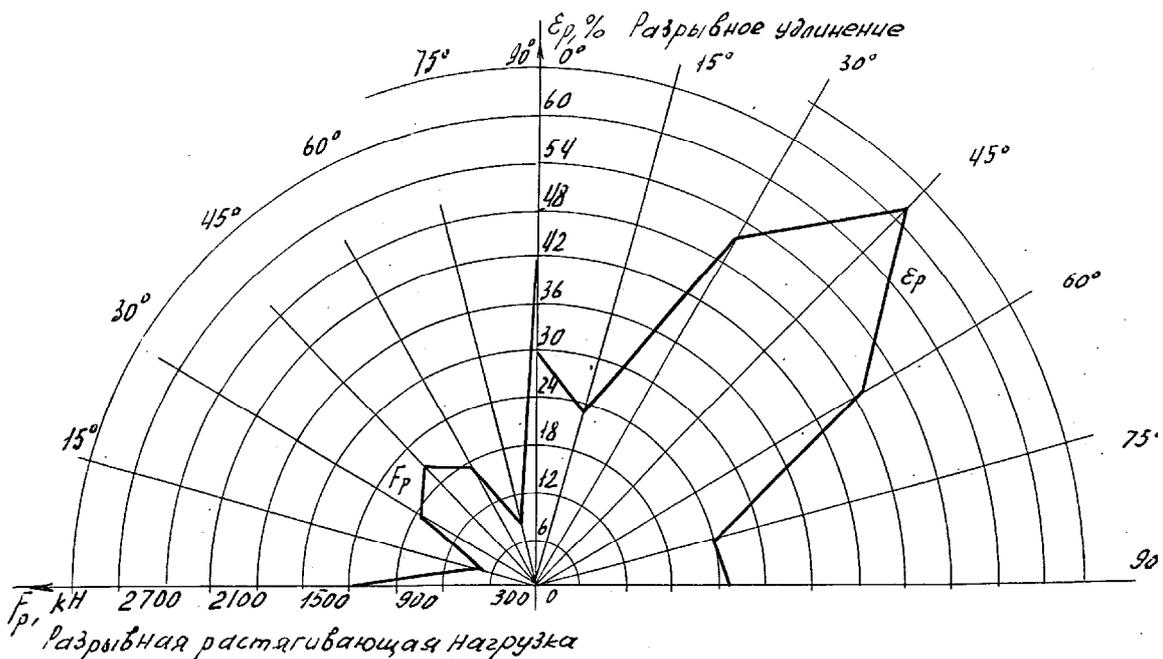


Рис. 2.4. Диаграмма построения разрывной нагрузки F_p , разрывного удлинения E_p и податливости (отношение удлинения к нагрузке) резиноканевого материала

Свойства текстильных армирующих материалов обычно определяются природой исходного волокна: растительные (хлопчатобумажные и льняные); искусственные (вискозные); получаемые при определенной переработке природных материалов (стекляные, угольные, базальтовые) и синтетические (полиамидные, полиэфирные, арамидные).

Композиция армирующего (текстильного) материала со связующим (эластомерной или полимерной основой) приводит к улучшению его физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик. Такая обработка расширяет области его использования за счет защитных свойств связующего, увеличения газо- и влагонепроницаемости.

Эластичные тканые композиты в основном характеризуются нелинейными соотношениями между напряжениями и деформациями вследствие вытягивания искривленных нитей при двухосном растяжении. Разрывное напряжение при испытании на разрыв существенно зависит от жесткости волокон ткани на растяжение.

Ткани с полимерным покрытием используются в качестве основного, воспринимающего нагрузку компонента в надувных и тентовых конструкциях. Структурным элементом таких материалов является ткань с гладким переплетением. В качестве матрицы в тканом композите используются различные каучукоподобные полимеры.

Прорезиненные материалы широко применяются для изготовления многих видов изделий, наполняемых воздухом: медицинские подушки, корсеты, бандажи, поплавки катамаранов, лодки, пневмоопалубка, пневмодомкраты и другие инженерные конструкции.

До недавнего времени выпускались резинотканевые материалы для воздухоплавательной и спасательной техники, как правило, на основе хлопчатобумажной ткани. В настоящее время заводами РТИ выпускается более 600 наименований таких материалов, массой от 80г/м^2 до 5500г/м^2 , на основе искусственного и синтетического волокна с резиновым одно- и двухсторонним покрытием.

При одностороннем резиновом покрытии ткани материал называется водонепроницаемым, а также тентовым. Нанесение защитного покрытия на другую сторону материала обеспечивает расширение его функциональных и технологических свойств и переводит материал в ряд композиционных.

Структура тканей (переплетение, плотность) определяет их силовые свойства. Например, максимальное число перекрытий нитей основы и утка в тканях полотняного переплетения обеспечивает максимум каркасности. Количество числа нитей на единице размера ткани ограничивает ее прочность.

В зависимости от назначения, например, для эластичных механизмов из тканей с резиновым покрытием, в конструкционных материалах целесообразно применять нити комбинированные, армированные, изготовленные из смесовой пряжи, а также разные нити в основе и утке ткани. Кроме того, для расширения функциональных свойств эластичных механизмов, например, введения электропроводных сетей, при изготовлении армирующего материала рекомендуется применять два или три типа волокна одновременно, используя достоинства каждого, а для комбинированных тканей более сложные переплетения из них (многоосновные, многослойные). В некоторых случаях пленочным материалам придают анизотропные свойства, например, для формирования функциональных свойств (электропроводности) связующего.

Таким образом, роль армирующих материалов в эластомерных композитах в первую очередь связана с их силовыми свойствами. Однако с целью расширения функциональных возможностей этих материалов целесообразно использовать специальные свойства и структуры текстильных наполнителей, которые обеспечиваются их геометрическими и физическими характеристиками.

2.4. ЭЛАСТОМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ИХ СВОЙСТВА

Структура эластомеров

Эластомеры – высокомолекулярные соединения, обладающие высокоэластичными свойствами в широком интервале, охватывающем всю область температур их эксплуатации.

К эластомерам относятся натуральные и синтетические каучуки, а также изготовленные на их основе резины.

По химической природе эластомеры делятся на органические, элементоорганические (кремнийорганические) и неорганические.

Наиболее крупным потребителем эластомеров (резин, резинотканевых материалов, искусственных кож, пластмасс, кабельных и строительных материалов) является резиновая промышленность.

Резины – сложный по составу материал, формирование которого происходит путем вулканизации смеси компонентов различного назначения.

Комплекс физико-механических свойств резиновых смесей и технических резин устанавливается под влиянием структуры и реакционной способности матрицы, структуры вулканизационной сетки, а также при изменении структуры под влиянием наполнителя и изменении структуры под влиянием пластификаторов и других ингредиентов резиновой смеси.

По химическому строению (химическим связям) эластомеры относятся, в основном, к классу органических полимеров. Различают карбоцепные (главные цепи которых состоят только из атомов углерода) и гетероцепные (в главные цепи которых входят и другие атомы) полимеры. От природы атомов в звеньях зависит энергия и полярность связей.

Отличительным свойством эластомеров, выделяющих их в особый класс материалов (каучукоподобных полимеров), является их высокоэластичность. Способность к большим обратимым деформациям при малом модуле упругости в широком диапазоне температур их эксплуатации и другие особенности поведения обусловлены их молекулярной структурой.

Все эластомеры относятся к высокополимерам цепного строения. Структура макромолекулы включает в себя химическое строение, пространственное расположение и чередование мономерных звеньев, длину и форму макромолекулы.

Практически все синтетические и природные эластомеры представляют собой смесь макромолекул различной молекулярной массы.

Основными параметрами микроструктуры полимерной цепи являются: строение мономерного звена, характер присоединения мономерных звеньев (ближний порядок), конфигурация цепи (соединением последовательностей и ветвлений).

В зависимости от композиционной неоднородности сополимера и характера чередования звеньев сомономеров в макромолекулах различают: статические сополимеры, блок-сополимеры и альтернантные эластомеры.

Структура полимеров определяет такое важное свойство, как гибкость цепи. Следовательно, каучуки относятся к гибкоцепным полимерам, высокая гибкость которых определяет особенность механического поведения каучукоподобных материалов и все их свойства.

Резина – продукт вулканизации каучука (сшивания линейных макромолекул поперечными связями в трехмерную сетку) [10].

Взаимодействие между эластомером и наполнителем может быть чисто механическим (с захватом эластомера агрегатами наполнителя) и адсорбционным (с образованием связанного каучука). Повысить эффективность взаимодействия каучука с наполнителем можно путем модификации поверхности наполнителя (окисление поверхности, прививка различных функционально активных соединений), либо использованием специальных веществ (промоторов адгезии).

Улучшение механических свойств резин и придание им специфических свойств происходит при введении в резиновые смеси наполнителей (активных,

усиливающих), пластификаторов (растворяющих, нерастворяющих), модификаторов.

Активные наполнители – технический углерод, «белая сажа», силикаты металлов, лигнин и другие органические продукты – изменяют структуру вулканизационной сетки. Усиливающие наполнители (техуглерод) в наибольшей степени влияют на структуру резин.

В резиноканевых, резинометаллических и других конструкционных материалах с фазовыми границами для создания дополнительных межфазных связей на границе эластомер-субстрат в молекулу эластомера вводятся функциональные группы.

Это позволяет использовать реакционноспособные соединения (модификаторы) для регулирования технических характеристик резиновых смесей и вулканизатов, повышения эксплуатационных способностей изделий в целом.

При модификации происходят несколько процессов одновременно. Модификаторы могут оказывать типичный структурирующий эффект.

Они могут оказывать влияние на взаимодействие эластомеров с вулканизирующим веществом, изменяя число поперечных связей; оказывать существенное влияние на эффективность взаимодействия эластомера с наполнителями. При введении в резиновые смеси в качестве модификаторов полимерноспособных соединений (мономеров или олигомеров), совместно с инициаторами радикальной полимеризации, при нагревании происходит образование пространственно-сетчатых агрегатов, распределенных в массе эластомера и химически связанных с его макромолекулами.

Улучшение свойств полимерных материалов, в частности резин, возможно при использовании смесей полимеров, которые имеют некоторые особенности структуры.

Структура смесей полимеров определяется способностью компонентов к взаимному растворению (термодинамической совместимости) и по ряду показателей превосходить лучшие из свойств отдельных компонентов. При этом образование однофазных систем из двух полимеров сопровождается уменьшением свободной энергии.

В резинах на основе смесей каучуков могут создаваться два типа структур: единая пространственная (с прочными химическими связями) и структура двух взаимно проникающих сеток разнородных каучуков.

Сильная зависимость прочности от молекулярной ориентации является основным признаком, отличающим прочностные свойства полимеров от закономерностей прочности других твердых тел.

Таким образом, на физико-механические свойства резин, например прочность и эластичность, большое влияние оказывают тип и микроструктура каучука, тип вулканизирующей системы и характер образующихся при вулканизации структур, концентрация и морфологические характеристики наполнителей, пластификаторов, модификаторов и некоторые другие компоненты, влияющие на функциональные свойства эластомера.

Свойства эластомерных покрытий

Высокоэластичность – комплекс свойств полимеров, характеризующийся способностью к большим обратимым деформациям растяжения, низкими значениями модуля упругости.

Высокоэластичность наблюдается у всех аморфных линейных полимеров, макромолекулы которых имеют цепное строение и достаточно большую гибкость, а также у аморфных пространственно-структурированных полимеров, если количество связей между макромолекулами не слишком велико.

Она возникает при нагревании полимера до температуры стеклования и сохраняется вплоть до температуры, при которой происходит деструкция полимера.

Высокоэластичность возникает благодаря способности макромолекул к изменению формы. Гибкие цепные макромолекулы под влиянием теплового движения непрерывно меняют свою форму, проходя через все возможные конформации. При достаточно большой длине макромолекулы количество скрученных форм подавляющее. При воздействии на них растягивающих сил они распрямляются, а после прекращения воздействия вновь скручиваются вследствие хаотического теплового движения.

Таблица 2.4

Использования материала покрытия в производстве резиноканей и тканепластов (ламинантов)

Материал покрытия			
Пластомер		Эластомер	
без реакционных групп	с реакционными группами	без реакционных групп	с реакционными группами
ПВХ Хлорированный полиэтилен Полипропилен Поливинилиденхлорид Поливинилиденфторид	Полиуретаны	Термоэластопласты Алкрин Термопластичный ХСПЭ	Сшитый полиуретан Полихлоропрен, ХСПЭ Нитрильный каучук ЕРДМ (СКЭПТ) Силикон Фторкаучук

Высокоэластическое состояние отличается своеобразным сочетанием свойств упругих твердых тел, упругих свойств газообразных тел и общих свойств жидких тел.

Таким образом, сопротивление изменению формы обусловлено не изменением их внутренней энергии, а повышением количества распрямленных конформаций макромолекул. Согласно статистической теории высокоэластичности,

все особенности этого состояния являются следствием теплового движения гибких цепных молекул.

В производстве эластомерных конструкционных материалов широко применяются технические ткани с эластомерным покрытием. Это, например, стеклоткани с покрытием из политетрафторэтилена (ПТФЭ). Однако из-за недостаточной эластичности ткани и покрытия материалы на их основе имеют невысокую изгибоустойчивость и атмосферостойкость. В то же время специально для большепролетных тканевых сооружений разработан эластомерный строительный материал – стеклоткань, покрытая тефлоном («ширфилл», «фэбрасорб»).

Для товаров широкого потребления применяют, например, полиэфирные ткани с поливинилхлоридным покрытием (ПВХ). Недостатками этих тканей является пониженная прочность при раздире, миграция пластификатора, ведущая к повышению хрупкости материала (особенно при пониженных температурах), возможность поражения грибками, а также загрязняемость. С покрытием из ПВХ ограничено могут применяться и ткани из алифатического полиамида (нейлона), растяжимость которых в таком сочетании может быть уменьшена.

Более качественным для полиэфирных тканей являются покрытия из хлорсульфированного полиэтилена (ХСПЭ).

Хотя кевлар является относительно новым волокном, известны ткани на основе этого волокна со следующими покрытиями: неопрен, хайпалон, нитрильный каучук, нордель, буна-N, уретановые полимеры, силикон и фторсиликон, поливинилхлорид, тефлон (TFE, FER, поливиниловый спирт, эпихлорогидрин, тедлар, майлар).

Эластомеры, вулканизаты на основе каучуков различного назначения, используются для покрытия тканей в виде: клеев – при клеепромазке тканей; резиновых пластин – при каландровании и/или дублировании.

Одним из основных каучуков, применяемых при обрешивании тканей, является хлоропреновый. Хлоропреновый каучук (неопрен), например, обладает хорошей стойкостью к действию света, кислорода, озона, кислот и щелочей. Он негорюч, достаточно газонепроницаем, имеет высокий показатель эластичности, который приближает его к резинам из натурального каучука.

По газонепроницаемости резины из натурального и дивинилстирольного каучука – равноценны. Эти резины имеют хорошее сопротивление разрушению при многократных деформациях.

Практически важным отличительным свойством карбоксилатных эластомеров является высокая износостойкость, сопротивление проколам, раздиру, маслостойкость, тепло-, озоностойкость, стойкость к тепловому старению.

Изопреновый каучук по эластичности, прочности и температуростойкости вулканизатов почти не уступает натуральному каучуку.

Бутилкаучук в основном применяется в резинах, обладающих стойкостью к действиям кислот, солей и щелочей. Высокую воздухо- и газонепроницаемость, сопротивление действию многократных деформаций изгиба, прочность при растяжении имеют вулканизаты из бутилкаучука. Недостатком их являются низкие эластические свойства и недостаточное относительное удлинение.

Полиуретановый каучук прежде всего обладает высокой прочностью, эластичностью и износостойкостью. Газонепроницаемость уретанового каучука в 10 – 20 раз выше, чем у натурального.

Силоксановые каучуки придают материалу свойства биологической инертности, свето-, озоностойкости, температуростойкости, высокой эластичности при недостаточной износостойкости.

Таким образом, среди эластомерных покрытий (полимерных матриц) наиболее важными по высокоэластичности являются каучукоподобные эластомеры. Другие эластомеры, обладающие рядом специфических свойств позволяют сгруппировать их как по химической природе, так и по функциональным свойствам.

Свойства термоэластопластов

Термоэластопласты (ТЭП) – перспективный класс полимерных материалов, обладающих одновременно свойствами термопластиков и каучуков. Эти материалы при нагревании переходят в вязкотекучее, а при охлаждении в высокоэластическое состояние. Они получают методом полимеризации в растворе, обладают способностью к литью под давлением и экструзии. Некоторые термоэластопласты могут растворяться в обычных растворителях и сохранять свойства после его испарения [76].

ТЭП состоит из двух частей: жесткой и эластичной. Вследствие их несовместимости образуется двухфазная система, свойства которой определяются соотношением этих фаз. Каждая из них имеет независимое сегментное движение, что подтверждается двумя температурами стеклования. Например, в дивинил (изопрен)-стирольном ТЭП сегменты стирола образуют отдельную дискретную фазу в виде доменов, распределенных в сплошной части каучуковой фазы. Фаза каучука придает эластичность, морозостойкость, а фаза полистирола – прочность, твердость, выполняя роль не только сшивок, но и усилителя.

Термоэластопласты применяются для изготовления светлых и темных тканей с покрытиями наряду с вулканизирующимися эластомерами. Причем изготовление их имеет большие преимущества: не требует вулканизации, открывает возможность изготовления ярких, цветных, водостойких, например, тентовых покрытий.

Для изготовления в условиях производства прорезиненных тканей на основе термоэластопластов применяется метод клеепромазки. Метод каландрования также возможен при наличии в производстве высокотемпературных каландров. В настоящее время существуют термоэластопласты: на основе полистирола, полиолефинов, полиэфиров (простых и сложных) и полиуретанов.

Для изготовления, например, надувных лодок обычно используют покрытие на основе хайполон или его смеси с другими полимерами, в частности, с полихлоропреном (неопреном).

Хлорсульфированный полиэтилен (хайполон) – эластомер, который обладает целым комплексом полезных свойств, таких как озono- и атмосферостойкость,

масло-, бензостойкость. Благодаря специфике его производства достигается высокая калорийность окрашивания материала от белого (светопрозрачного) до ярких информационных цветов для спасательной техники.

В последние годы интенсивно развивается производство динамических термоэластопластов. Благодаря высокоскоростному смешению эластомеров с пластиками с одновременной вулканизацией эластомерной фазы сокращается длительность энергоемкой стадии вулканизации; производство является безотходным, благодаря многократной переработке материала; расширяется температурный интервал работоспособности; снижается стоимость этого типа композиционного материала (табл. 2.5) [9, 38].

Таким образом, благодаря новым тонким технологиям расширяются также и функциональные свойства материалов, улучшаются их эксплуатационные свойства, в том числе в условиях длительного хранения. Ряд композиций на основе ТЭП могут изготавливаться на оборудовании заводов отрасли, имеющем некоторые специфические приспособления (например, каландры с подогревом).

Свойства пластомеров (ламинантов)

Расширяется ассортимент полимерных композиционных материалов, например, созданы материалы улучшенных свойств на основе комбинации изопренового и бутадиенового каучуков с поливинилхлоридом.

Покрытия, которые могут быть расплавлены при нагревании, например, пластицированный ПВХ, могут быть нанесены на тканевую основу как пластизол. При этом текстиль сначала грунтуется смесью пластизоля и полимера, содержащего изоцианатные группы.

Для повышения адгезии покрытия к ткани могут быть использованы клеевые составы, содержащие смесь полиуретана и органического изоцианата в подходящем растворителе.

Эти покрытия наносятся методом каландрования, переносным методом или нанесением из расплава. Адгезия достигается обработкой раствором смеси подходящего полиуретана и сшивающего агента, образованного реакцией полиола с изоцианатом.

Традиционная технология производства пластицированного (мягкого) ПВХ предусматривает наличие в нем значительного количества пластификаторов. При нагревании пластизоля выше 50 °С сначала увеличивается вязкость, затем происходит гелеобразование и продукт более не проявляет текучести.

Сравнение свойств перспективных полимеров для производства тканей с покрытием (в сопоставлении с НК)

№ п	Свойства	НК	ПХП неопрен	ХСПЭ хайполон	Алкрин	ПУ десмопан
1	Пределы твердости по твердомеру А, Д	30-90А	40-95А	40-95А	55-87А	85-95
2	Предел прочности при растяжении, МПа чистая смесь саженаполненная	> 20 > 20	> 20 > 20	> 17 > 20	– 7-15	> 30 > 30
3	Удельный вес	0,93	1,23	1,1 – 1,3	1,1 –1,3	1,1 – 1,2
4	Вулканизационные свойства	отл.	отл.	отл.	предвар.	
5	Адгезия к металлу	отл.	отл.	отл.	отл.	хор.
6	Адгезия к тканям	отл.	отл.	хор.	отл.	хор.
7	Стойкость к раздиру	хор.	хор.	хор.	дос. хор.	хор.
8	Износостойкость	отл.	отл.	отл.	хор/отл.	отл.
9	Газопроницаемость	дос.хор.	низ.	низ/оч.низ	низ.	хор.
10	Кислотостойкость	дос.хор.	отл.	отл.	хор/отл	низ.
11	Стойкость к растворителям: алифатическим, ароматическим углеводородам	слаб. слаб.	хор. дос.хор	хор. дос.хор	отл. хор.	хор. хор.
12	Нефтестойкость	слаб	хор	хор	отл	отл
13	Гидролитическая устойчивость	оч.хор	хор	оч.хор.	незаур	низ./уст
14	Озоностойкость	дост.хор	отл	незаур.	незаур.	хор
15	Температурный предел эксплуатации, °С	85	120	135	100-120	100
16	Морозостойкость, °С	-60	-40	-50	-50	-60

Примечание. За счет совмещения эластомеров и пластиков созданы термопластичные резины, обладающие сочетанием свойств резин и пластмасс.

При дальнейшем нагревании происходит окончательное растворение полимера в пластификаторе и образование твердой фазы с эластичными свойствами, сохраняющимися после охлаждения до комнатной температуры.

По данным фирмы «Дюпон» для модификации ПВХ используются хлорированный полиэтилен (алкрин) и сополимеры этилена (элвалой), которые позволяют улучшить атмосферостойкость [46].

Ткани с покрытием пластицированным пластиком используются в производстве надувных оболочечных конструкций (надувных лодок, аттракционов, игрушек) для замены прорезиненных тканей и более дорогостоящих термоэластопластов. Однако из-за дороговизны клеев соединение раскроенных материалов из ПВХ в основном осуществляется методом тепловой или высокочастотной сварки.

Таким образом, покрытия, которые могут быть расплавлены при нагревании, например, пластицированный ПВХ, могут быть нанесены на тканевую основу как пластизоль. Эти покрытия также наносятся методом каландрования, переносным методом или нанесением из расплава.

Градиентные полимерные материалы и композиции

Современные тонкие технологии невозможны без создания нетрадиционных материалов, обладающих уникальным набором свойств. К такому классу материалов следует отнести градиентные полимерные композиции, способные изменять свои характеристики по длине образца.

Примером неорганического градиентного материала является композит на основе нитридов кремния и бора, варьирование исходных компонентов которого, при горячем прессовании, позволяет регулировать прочность на изгиб от 70 до 700 МПа.

Органические градиентные материалы представлены в основном полимерами с неоднородными по составу зонами соотношения сополимеризующихся (или сопликонденсирующихся) компонентов.

Причем неоднородность достигают как с помощью наполнителей, так и посредством регулирования, при этом переменным градиентным параметром могут быть: износостойкость, оптические свойства, электрофизические свойства и даже баллистические параметры некоторых энергетических полимерных систем [96].

Например, ненаполненных полимерных материалов, градиентных по модулю упругости, то есть способных изменять свои свойства в пределах длины одного образца от высокоэластичного (резиноподобного) до жесткого (стеклообразного). Преимущество их перед резиновыми материалами заключается в прочном креплении жесткой (пластмассовой) части к жестким корпусам. Высокоэластичная часть может служить, например, амортизатором.

Перспективным направлением разработки градиентных материалов представляется наполнение полимерных связующих контролируемым количеством наночастиц размером менее 100 нм, меняющемся по длине образца.

Наночастицы могут быть металлическими, образующимися в результате термодеструкции в расплаве полимера соединений, содержащих Mo, Cu, Fe, Ni, Gd, Sm, Nd, Pt, Mn, Co, а также их оксиды и сплавы.

Среди неметаллических наночастиц особенно интенсивно исследуются фуллерены – новые аллотропные модификации углерода состава C₆₀, C₇₀, C₈₄, обладающие необычными химическими и физическими свойствами, в частности, магнитными и электрическими. Полимерными матрицами, как правило, при этом служат полиэтилены высокого и низкого давлений, полистирол, полипропилен, полиамиды.

Достоинства материалов вполне очевидны, так как в одном и том же изделии можно реализовать различные механические свойства в зависимости от инженерных задач, в том числе и приблизить достоинства конструкционного материала по функциональным свойствам к натуральным материалам, например, натуральной коже.

Области применения таких материалов не ограничены. Это может быть радиотехника, электроника, машиностроение, робототехника, медицина.

Перспективным является изготовление имплантатов, центральная часть которых будет обладать механическими свойствами близкими к кости, а наружная – к свойствам хрящей.

Таким образом, показан еще один путь тонких технологий в переходе от конструкционных полимерных материалов, через функциональные, к интеллектуальным.

Свойства полимерных пленок

Наконец, в качестве покрытия тканей используется полимерная пленка (табл. 2.6). Она имеет преимущества перед вулканизаторами в массе, газонепроницаемости, способности к сварке, высоких физико-механических показателях. Различные способы нанесения пленочного покрытия на армирующую основу также являются достоинством данного материала.

Основные виды полимерных пленочных материалов можно разделить на однослойные или комбинированные. Функциональные свойства пленок различны.

Полиэтиленовая, поливинилхлоридная, фторопластовая и полиуретановая пленки имеют достаточно большое удлинение (160 – 700 %).

Тедлар – торговое название поливинилфторидной пленки (США), обладает отличной атмосферостойкостью, инертностью к агрессивным средам, высокой прочностью и гибкостью.

Полиарилатная и полистирольная пленки не стойки к многократным изгибающим деформациям (150 – 180 циклов) и на раздир.

Полиамидные пленки обладают высокой термо- и радиационной стойкостью, но трудно свариваются.

Пленки фторопластовые отличаются хорошей химостойкостью, но сравнительно толстые (50 – 200 мк) и тяжелые.

Отечественной химической промышленностью и за рубежом изготавливается большой ассортимент полиамидов: поликапроамид (поликапролактан, капрон, полиамид 6); полиамид 12(полидодеканамид), аналог рильсана (полиамид 11, Франция); спирторастворимые сополимеры марок П-54 и 51-548. Полиамиды

обладают высокой прочностью, эластичностью, химической стойкостью, теплостойкостью, масло- и бензостойкостью, низкой газопроницаемостью [46, 76].

Наименьшей газопроницаемостью обладают полиамидная и полиэтилентерефталатная двухориентированные пленки.

Полиэтилентерефталат используется для изготовления пленок, известных под названием «лавсан», «мелинекс», «терилен», «хостафан». Эти пленки отличаются прозрачностью, блеском, высокими прочностными показателями, химической стойкостью, тепло- и морозостойкостью, низкой паро-, водо- и газопроницаемостью. Ограничения введены в связи с трудностями получения сварных швов.

Поликарбонатные пленки (дифлон, макролон, лексан) обладают высокими прочностными показателями, устойчивостью к многократному изгибу, низкой паро-, водо- и газопроницаемостью, высокой температуростойкостью (от -100 до +140 °С).

Высокой теплостойкостью характеризуются пленочные материалы на основе полиакрилатов, полиимидов. Для отечественного пленочного материала ПМ-1 диапазон рабочих температур (от -200 до +300 °С).

Известны пленки из поливинилового спирта; из гидрохлорида каучука («полифильм», «эскаплен»): пленки на основе целлюлозы («целлофан»).

Распространенным и доступным полимером является полистирол. Его достоинством являются высокая водостойкость, стойкость к действию водных растворов щелочей, кислот, солей; прозрачность, хорошие диэлектрические свойства. Недостатки - низкая теплостойкость и светостойкость. Большое распространение получил продукт совмещения сополимера стирола с акрилонитрилом с бутадиен-нитрильным каучуком (пластик СНП),

Для нанесения покрытия используются такие материалы как раствор, водная дисперсия, пасты, расплавы, порошок, высоковязкая смесь, пленка и другие, в зависимости от типа имеющегося оборудования. Такие эластомеры, как каучук и термоэластопласты, а также пластомеры и пленки имеют высокую эластичность и физико-механические показатели, обладают повышенными: стойкостью к агрессивным средам, светопогодостойкостью, износостойкостью и другими эксплуатационными факторами. Композиции этих материалов расширяет их функциональные свойства и позволяет создавать многослойные материалы с уникальными свойствами.

Выводы

При создании полимерных композиционных материалов одной из важных задач является выбор или разработка полимерной матрицы (связующего), которая обеспечивала бы достижение максимальных прочностных характеристик композита и удовлетворяла различным технологическим и эксплуатационным требованиям.

Таблица 2.6

Физик - механические свойства пленок

№ п.	Показатели	Ед. измерения	ПЭНП	ОПП	ПВХ пласт	ПВДХ	ПС	ПЭТ	ПА-6	Полиакрилат	Полиимид	Ф-4МБ	Ф-40
1	Плотность	кг/м ³	919 – 929	900 – 910	1200 – 1600	1650 – 1700	1050	1400 – 1140	1040 – 1140	1200 – 1300	1420	2110 – 2200	1700 – 1800
2	Прочность при растяжении	МПа	8 – 18	170 – 200	10–30	45–135	60–90	80 – 240	200	50–70	100–180	10–30	15–45
3	Относительное удлинение при разрыве	%	100 – 700	50 – 80	15–500	20–110	3–10	60 – 100	500	20–30	170–90	100–280	50–350
4	Стойкость к раздиру	г/25мк	100–400	50	30–140	10–30	80–90	30	400	10–16	230	60–100	90–140
5	Температура плавления	°С	108–112	165–170	130–160	–	170–210	255–265	220–225	255–340	380–420	275	260–275
6	Макс. температура эксплуатации	°С	85	120	6–80	143	70	155	200	190	300	200	200
7	Мин. температура эксплуатации	°С	–50	–50	–45	–30	–55	–200	–45	–100	–273	–150	–150
8	Парапроницаемость при 38 °С и 90 % относительной влажности	гмк/м ² сут	500–600	160	375–1000	10–80	3500	600–800	1500	4500	–	–	–
9	Удельное объемное электрическое сопротивление	Ом·м	10 ¹⁵	10 ¹⁷	10 ¹²	10 ¹⁰	10 ¹⁶	10 ¹⁵	10 ¹⁰	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁵	10 ¹⁵

На физико-механические свойства резин, например прочность и эластичность, большое влияние оказывают тип и микроструктура каучука, тип вулканизирующей системы и характер образующихся при вулканизации структур, концентрация и морфологические характеристики наполнителей, пластификаторов, модификаторов и некоторые другие компоненты, которые оказывают существенное влияние на функциональные свойства эластомера.

Среди эластомерных покрытий (полимерных матриц) наиболее важными являются каучукоподобные эластомеры.

В то же время благодаря новым тонким химическим технологиям расширяются также и функциональные свойства материалов, улучшаются их эксплуатационные свойства, в том числе в условиях длительного хранения. При этом большим преимуществом является возможность изготовления ряда композиций на основе термоэластопластов на имеющемся оборудовании заводов отрасли.

По данным печати, полимерным технологиям отводится важнейшая роль в различных отраслях электроники.

Например, ряд изобретений последних лет создали необходимые предпосылки для организации производства модернизированных дисплеев, матриц полупроводниковых транзисторов, электронных книг, кредитных карт, которые можно скатывать в рулон.

При использовании эластомерного материала, подвергающегося обратимой деформации в электростатическом поле, может быть создана система записи голограмм в реальном времени. В этом случае сверху на слой эластомера наносится электрод, который должен быть также способен к деформации, например, жидкий, газовый или тонкая гибкая напряженная металлическая пленка.

Таким образом, роль эластомерного покрытия в конструировании композиционных материалов носит характер функционального, где наиболее простым назначением является придание воздухонепроницаемости материалу. Трудно представить пределы возможностей использования свойств такого конструкционного материала как прорезиненная ткань (армированный эластомерный материал) с покрытием и нет предела инженерной фантазии в создании новых композиций и технологий.

2.5. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯГКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Особенности конструирования мягких композиционных материалов

При конструировании импрегнированных материалов полимерное покрытие и армирующий текстиль выбирают, исходя из обеспечения оптимальных свойств материалу в зависимости от назначения и условий эксплуатации изделия. Кроме того, учитывают способ соединения элементов конструкции и технологию изготовления. В последние годы реже стали применять двухслойные, диагонально дублированные прорезиненные ткани на основе хлопчатобумажных текстилей. У таких тканей нити основы слоев расположены под углом друг

к другу для повышения прочности ткани на раздир и увеличения воздухопроницаемости.

Как показал опыт пневмоконструирования, особенно в семидесятих годах прошлого столетия, определенные трудности в конструировании прорезиненных тканей были связаны с недостаточно полным представлением о свойствах материалов и механизме разрушения оболочек под предельной нагрузкой. Вследствие этого материал использовался неэффективно или к нему предъявлялись явно преувеличенные требования заказчика.

Одним из наиболее существенных недостатков современных материалов мягких оболочек является их недолговечность. Им свойственно старение, как воздействие климатических факторов; ползучесть и усталость, как следствие действия нагрузок.

Старение материала вызывается совместным действием света, тепла, влаги, озона. Наиболее существенное проявление старения – падение прочности при разрыве и раздире по времени. Повышение жесткости покрытия проявляется в его растрескивании.

Факт постепенного понижения прочности оболочки в результате действия факторов светопогоды и нагрузки находит отражение в гарантийных сроках ее службы, которые приближенно оценивают коэффициентом запаса прочности [73].

Ползучесть является медленным течением полимерного материала под действием нагрузок длительного действия. Она присуща синтетическому волокну текстильной основы как упруговязкому телу. Его напряженное состояние является функцией нагрузки и времени и характеризуется коэффициентом длительной прочности, имеющим логарифмическую зависимость.

Усталость как явление, связанное с многократным повышением и понижением растягивающих напряжений, для материалов мягких оболочек исследована слабо и учитывается коэффициентом безопасности по материалу, который принимается на основании нормативных документов.

При расчете и конструировании прорезиненного материала, кроме общих требований, отмеченных выше, устанавливаются специальные, зависящие от особенностей эксплуатации мягкой пневмооболочки.

Например, для мягких строительных конструкций рекомендуются следующие требования к вновь создаваемым материалам [6, 55].

В качестве силовой основы выбирается однослойная ткань из синтетического (или неорганического) волокна полотняного переплетения («рогожка») из нитей низких номеров (8 – 20) и малой крутки. Ширина рулона не менее 150 см, желательна 200 см.

Покрытие рекомендуется двухсторонним с распределением полимера в 60 – 65 % на лицевую сторону и 35 – 40 % на внутреннюю. Адгезия к ткани не менее 15 – 25 Н/см. Окрашиваемость в массу в любые цвета.

Рекомендуется иметь материалы трех групп прочности: легкие, средние, тяжелые. Срок эксплуатации в условиях средних широт – не менее 7 лет (до потери 50 % прочности), в перспективе 10 – 15 лет.

Светопроницаемость (интегральная) должна быть 0 – 20 %. По особому заказу – 40 % с соответствующим снижением срока эксплуатации. Таким образом, импрегнированные материалы, как композиционные, обладают комплексными свойствами армирующей ткани и покрытия. Причем, если роль наполнителя заключается в обеспечении кратковременных свойств конструкционного материала, то роль покрытия, кроме герметичности, заключается в защите свойств силовой основы от длительного воздействия климатических факторов.

Способы изготовления резинотканевых материалов

Общим направлением в создании мягких надувных оболочек является применение текстильных материалов с покрытиями из эластомеров или термопластов.

В качестве основы обычно применяют технические ткани. Эти материалы могут быть изготовлены из промышленных натуральных или химических волокон.

Для покрытий наибольшее распространение получили: из термопластов – пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ), а также политетрафторэтилен (ПТФЭ), из эластомеров – полихлоропрен (наирит).

Прорезинивание ткани осуществляется методами шпрединогования или каландрованием.

Техническая концепция нанесения покрытия состоит из процесса подготовки материала, собственного производства и контроля производства и техники безопасности.

Установка для нанесения покрытия состоит из размоточного устройства для покрываемого текстиля, одной или нескольких шпредино-машин с различными устройствами для нанесения слоев покрытия, сушильной камеры, устройства для охлаждения и замотки.

Современные универсальные штрих-машины состоят из трех различных установок, которые скомбинированы в этой машине и подключаются в зависимости от потребностей. Речь идет о воздушной ракле, ракле для прорезиненной ткани и вальцевой ракле. Для сушки используются агрегаты, обогреваемые электроэнергией или паром. Высушивание должно происходить достаточно медленно в возможно более длинной сушильной камере с незначительным градиентом температур от зоны к зоне. При использовании растворителей следует обратить особое внимание на пожаробезопасность и безопасность работы.

Перед началом нанесения покрытия ткань выравнивается по кромке, проходит через «ширительное» устройство для достижения постоянного натяжения. Покрывающая масса должна непрерывно подаваться на покрывающее устройство. Обработанная ткань через соответствующие направляющие поступает в сушильную камеру и затем на охлаждаемые водой ролики или в «воздушный душ» для охлаждения до комнатной температуры. В заключение ткань наматывается на большой барабан.

Для покрытия тканей используют конструкционные резиновые клеи, которые представляют собой растворы каучуков или невулканизированных резиновых смесей в органических растворителях. В состав клея входят каучуки, вулканизирующие агенты (сера), ускорители вулканизации, модификаторы, наполнители, мягчители. В качестве растворителя используют нефраз, этилацетат и его смеси. Ограниченное применение из-за своей токсичности находят бензол, толуол, ксилол, дихлорэтан. Предпочтительны растворители с широким интервалом температуры кипения для предотвращения вспыхивания в процессе сушки материала.

Клеи по консистенции подразделяются на густые, жидкие и средней концентрации.

Основными частями шпреди́нг-машины (рис. 2.5) являются рабочий вал, нож и паровая плита. При шпреди́нговании (клеепромазке) резиновый клей распределяется равномерно по поверхности ткани на рабочем валу перед металлическим ножом. Первый слой клея пониженной концентрации наносится на ткань для пропитки ткани клеем. Именно первый слой определяет прочность адгезии резины и текстиля, поэтому наносится он при пониженной скорости вращения вала. Обычно для достижения заданной толщины ткани требуется до 20 штрихов промазки клеем. При такой последовательности процесс пропитки осуществляется более равномерно и последовательно для удаления воздушных пузырьков и паров растворителя.

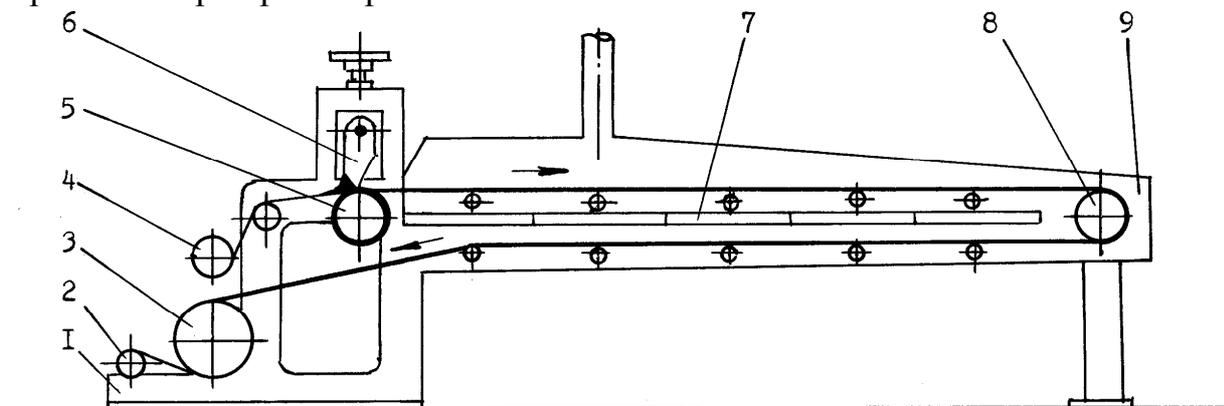


Рис. 2.5. Клеепромазочная машина:

1 – станина; 2 – бобина с прокладочным материалом; 3, 4 – бобины с закатываемым и раскатываемым материалами соответственно; 5 – вал; 6 – нож (ракля); 7 – нагревательная плита; 8 – поворотный ролик; 9 – капсулированное пространство

Скорость движения ткани над обогреваемой плитой выбирают оптимальной для полного испарения растворителя до образования на поверхности ткани плотно прилегающей резиновой пленки. Чем тоньше и плотней слой одного штриха промазки, тем лучшего качества получаются ткани.

Метод каландрования (рис. 2.6) (фрикционная обкладка) отличается от шпредигования тем, что на ткань наносится мягкая резиновая смесь во время ее прохождения между валками каландра.

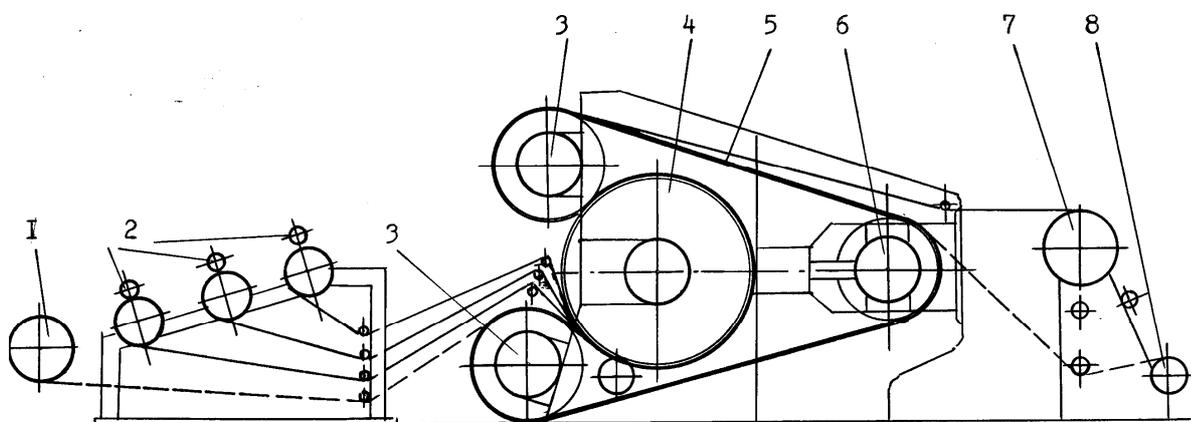


Рис. 2.6. Барабанный вулканизатор непрерывного действия:

1, 8 – рулоны прокладочной ткани; 2 – рулоны дублируемого материала; 3 – вспомогательные барабаны; 4 – основной барабан; 5 – бесконечная (стальная прессующая) лента; 6 – натяжной барабан; 7 – готовый материал

Валки, двигаясь с различной скоростью вращения, более быстрым валком втирают (вдавливают) резиновую смесь в переплетения ткани.

В современном оборудовании возможно совмещение процесса непрерывного нанесения покрытия с непрерывной вулканизацией (вулканизирующий пресс типа «бузулук»).

Иногда процесс каландрования осуществляется после предварительного нанесения 1 – 2 штрихов резинового клея с последующей обкладкой ткани резиновой смесью на каландре.

Существует способ нанесения резиновой смеси на ткань на челюстных прессах. При этом смесь предварительно пропускают через шприц-машину и перемещают под углом к направлению перемещения ткани.

Одним из способов нанесения на ткань полимерного покрытия на основе термоэластопластов и каучуков общего назначения, а также комбинации термоэластопластов с термопластами является метод каширования предварительно разогретого в шприц-машине материала. Термоэластопласты в виде клеевых составов наносятся на ткань так же клеепромазкой на специальных шпредиг-машинах [9,40].

Способ изготовления прорезиненной ткани зависит от вида полотна, характера предъявляемых к ткани требований, а также условий производства.

Марки клеев и их концентрации определяются в зависимости от конструкции прорезиненной ткани.

Перед запуском в производство прорезиненные ткани испытывают на разрывную прочность, прочность на раздир, адгезионную прочность и воздухопроницаемость. Для спецтканей устанавливается программа испытаний на соответствие требованиям к изделию.

Совершенно очевидно, что требования к охране окружающей среды со временем будут расти – против использования токсичных растворителей, в пользу получения тканей с покрытием из расплава, хотя для очень легкого покрытия практически отсутствует степень контроля качества конечного продукта.

Проблемы окружающей среды будут решены либо значительным усовершенствованием эффективности систем регенерации, либо введением безрастворных систем, вулканизирующихся в процессе нанесения.

Таким образом, существуют два принципиально различных по технологии способа нанесения эластомерного покрытия на тканую основу: растворный и безрастворный. Классическая растворная технология ограничивает широкое производство материалов с покрытием из высокоэластичных каучукоподобных полимеров, как экологически проблемное производство. Переход к безрастворным методам покрытия связан с разработкой новой концепции использования эластомерных материалов, разработкой новых систем контроля производства, объединения различных химических отраслей для создания универсального оборудования.

Адгезионные композиции

Технологические свойства сложных многослойных резинотканевых изделий зависят от адгезионных (разрушение по границе соединения) и когезионных (разрушение по субстрату) свойств композиционных материалов. В связи с тем, что в эластомерных композитах на границе матрицы и наполнителя модули упругости различаются по величине на 2 – 6 порядков, возникают значительные напряжения по расслаиванию материала. Поэтому введение адгезионного подслоя между тканевой основой и покрытием является достаточно важной технологической операцией в производстве импрегнированных тканей.

Для создания прочности связи, способствующей совместной работе разномодульных материалов требуется технологическая обработка текстилей различными адгезионными композициями. Состав адгезионных композиций зависит от технологии их применения и не должен ухудшать прочности и эластичности материалов. Различаются латексные и нелатексные композиции.

Согласно принятой схеме, например, несущего слоя клиновых ремней, предусматривается его многостадийная обработка, как нелатексными композициями на основе органических растворителей (сквозная или «жесткая» пропитка, обработка клеевыми составами), так и латексными на водной основе, с последующим удалением влаги или растворителей. Одним из важнейших условий получения однородных армированных материалов является хорошее смачивание наполнителей связующим (увеличение площади адгезионного контакта).

Адгезионная связь на поверхности раздела фаз *армирующий наполнитель – связующее* может осуществляться по следующим механизмам взаимодействия:

- наличие межмолекулярного взаимодействия между функциональными группами;
- наличие электростатического взаимодействия между полярными группами и макроионами;
- образование химических связей;
- наличие шероховатостей и соответственно сил трения между волокном и наполнителем.

В качестве связующих смол для армированных пластиков используются эпоксидные, фенольные, полиэфирные, меламиновые, кремнийорганические полимерные материалы, а также капрон, полиолефины и другие [10, 26].

Характер поверхности волокон также оказывает влияние на прочность связи полимера с тканью. Например, прочность связи резины с волокнами, имеющими ворсистую поверхность (хлопковое, штапельное), выше, чем с гладкими (вискозное, полиамидное, полиэфирное). Увеличение глубины затекания адгезива в субстрат сопровождается повышением адгезионной прочности. Для повышения прочности связи полимеров с волокнами с гладкой поверхностью используются специальные приемы.

Обычно наиболее высокие результаты по уровню крепления пропитанных синтетических материалов к резинам достигается при использовании одного и того же (близкого по природе) полимера в составе резины и в пропиточной композиции. Например, пропиточные составы на основе хлоропренового латекса применяют для крепления к резинам из полихлоропрена или его композиций с бутадиен-нитрильными каучуками. В большинстве случаев совулканизация эластомеров в основной резине и в слое адгезионной композиции происходит благодаря наличию активных функциональных групп в полимере латекса [28].

Роль латекса в пропиточном составе композиции – придание необходимой гибкости и эластичности, а также обеспечение крепления обработанного текстильного материала к резинам в результате совулканизации.

В производстве РТИ используются кроме синтетических латексов (бутадиеновые карбоксилсодержащие, сополимерные винилпиридиновые, бутадиен-нитрильные карбоксилсодержащие, хлоропреновые) также искусственные (бутилкаучук, этиленпропиленовый сополимер и др) и композиции на основе комбинации латексов.

Улучшение адгезионных свойств латексных композиций возможно введением добавок водорастворимых фенольных смол (резорцинформальдегидные, полиэфируретан, производные глицидилового соединения, вещества из класса фенолов, термопластичные смолы, изоционатные соединения) [95]. Основные области применения нелатексных композиций – обработка тонких полиамидных тканей для надувных изделий.

Обработка легких тканей водными растворами эпоксиамидной смолы позволяет при относительной простоте изготовления составов, пропитке и сушке с малым расходом энергоносителей и отсутствием значительных выбросов ток-

сичных веществ достичь достаточного уровня адгезионных свойств наряду с низким модулем изгиба тканей в пропитанном виде.

Растворы органических растворителей (этилацетат с бензином, толуол с циклогексаном), содержащих резиновые смеси, активные по отношению к волокнам и эластомерам соединения (полиизоционаты, клей-лейконат), давно применяются в производстве резинотехнических изделий наряду с водными растворами эпоксидных смол.

Положительно влияют на уровень прочности связи резин с текстильными материалами модификаторы адгезии.

Для склеивания волокон в стренгах используются составы для сквозной пропитки (растворы полиизоционата в органических растворителях).

Прочность связи в системе *резина – текстильный материал* существенно зависит от свойств резин и может быть существенно улучшен при объемной модификации резиновой смеси. Это может быть осуществлено при введении специальных добавок в смесь. В качестве модификаторов, повышающих адгезионные свойства резин, используют химические вещества, содержащие полярные и реакционноспособные функциональные группы, усиливающие взаимодействие на границе раздела фаз путем образования валентных, межмолекулярных и адсорбционных связей. Причем промотеры адгезии способны образовывать связи различной природы (химические, водородные, а также физические) между эластомерной матрицей и волоконообразующим полимером.

Наиболее часто в резиновых смесях применяют модифицирующие системы, содержащие соединения двухатомных фенолов, например, модификатор РУ. При совместном применении с активными кремнеземами и другими гидроксилсодержащими наполнителями содержание модификатора можно снизить при сохранении или даже повышении эффективности его действия, особенно в условиях высоких температур и многократных циклических деформаций. Эффективность действия модификатора РУ дополнительно повышается при введении в резиновую смесь небольших добавок гексахлорпаракисилола (гексола 3В).

Повысить работоспособность резиновых изделий, а также увеличить прочность связи между их элементами можно путем структурно-химической модификации эластомеров реакционноспособными олигомерами, в частности, эпоксидными и фенолформальдегидными смолами, полиаминами, а также системами на их основе. При модифицировании олигомером повышается структурная упорядоченность каучука, облегчаются ориентационные процессы, что снижает дефектность структуры как резиновых, так и резинотканевых и резинотехнических изделий. Количество образующихся на границе раздела шивок определяется не только активностью олигомеров, но и технологией их совмещения с каучуками, особенностями рецептурного строения резин, технологическими параметрами изготовления изделий.

Таким образом, прочность связи регулируется активацией резин различными промотерами адгезии. При этом необходимо учитывать, что тип эластомера, тип и содержание наполнителей, природа волокна в текстильном материале и

наличие поверхностной модификации влияют на функциональные свойства конструкционного материала.

Способы соединения эластомерных армированных материалов

В течение последнего десятилетия при разработке силовых конструкций из эластомерных композиционных материалов применялись высокопрочные высокомодульные материалы, что потребовало реализации их прочностных характеристик в готовых изделиях и обеспечения надежности в соединении отдельных элементов конструкции. При разработке соединений и конструкций из материалов, армированных волокнами, наблюдается несоответствие между механизмом передачи усилия в соединениях и механизмом включения в работу отдельных участков армирующих волокон.

Таблица 2.7

Классификация конструкционных соединений изделий из композиционных материалов

Виды сплошных соединений				
Клеевые (нахлесточное)	Сварные (диффузионное, химическое, комбинированное)	Формовочные	Вулканизированные	Комбинированные
Прямая нахлестка	Нагретым газом	Накладкой	Самовулканизированные	Клеепрошивные открытые
Со скошенными краями	Нагретым инструментом	Намоткой	Клеями горячего отверждения	С пленочным покрытием
С подсечкой	Нагретым присадочным материалом	Напылением	Клеями расплавами пленочными, шприцованными	С защитными лентами
С накладками	Излучением			Шитосварные
С утопленными накладками	Токами высокой частоты			С защитой ниток
Со скошенными накладками	Ультразвуком			С защитой кромок
Двойная	Лазером			
Встык	Трением			
В паз	Растворителем			

Из литературы известно, что, наряду с совершенствованием технологии соединения, ведется поиск и новых видов соединений деталей из композиционных материалов [74].

Резкая анизотропия прочности и относительного удлинения конструкционных армированных материалов, а также гетерогенность структуры вызывают необходимость пересмотра традиционных методов проектирования и технологии изготовления этих соединений. Принятые на практике методы проектирования соединений, аналогичные металлическим конструкциям (по видам разрушающих нагрузок), требуют данных по композиционным материалам.

В связи с их отсутствием для всего многообразия способов армирования определение констант прочности не представляется возможным. С другой стороны, из-за отсутствия пластических деформаций в соединении возникают затруднения в применении традиционных для металла соединений, например, клепаных. Кроме того, отсутствуют данные по зависимости механических свойств, ползучести, релаксации напряжений в соединениях композиционных материалов.

В соответствии с требованиями эксплуатации соединения (по характеру передаваемых нагрузок) делятся условно на монтажные (стыковочные) и несущие (поддерживающие).

В несущих соединениях передача нагрузки на стыке происходит непосредственно адгезионными прослойками или поверхностями, участвующими в соединении.

Все виды соединений условно можно классифицировать по трем классам: сплошные, механические и комбинированные. В зависимости от типа соединяемого материала сплошные соединения могут быть сварными, формовочными, клеевыми, вулканизированными, комбинированными [84].

Таким образом, несущие сплошные соединения композиционных материалов представлены типами материала и его конструктивными особенностями.

Клеевые соединения

Эксплуатационные факторы соединений композиционных материалов определяются уровнем и спектром внешних нагрузок, временем и температурой эксплуатации, требуемым ресурсом работы изделия, состоянием среды.

Наиболее важными конструктивными факторами сплошных соединений являются: длина адгезионной прослойки, толщина соединяемых элементов, параметры жесткости прослойки и элементов. Из технологических факторов следует отметить: предварительное натяжение соединяемых элементов, точность и взаимозаменяемость элементов соединения, качество подготовительных операций, соблюдение технологических режимов.

Достоинства клеевого соединения – в возможности сборки как однородных, так и разнородных материалов с помощью клеевой прослойки без существенного изменения свойств материалов в зоне стыка. Прочность клеевого соединения обусловлена адгезионным взаимодействием соединяемых поверхностей с

инородной прослойкой (преимущественно полимерной природы), когезионной прочностью этой прослойки и прочностью соединяемых материалов.

В зависимости от прочности резинотканевого материала принято собирать оболочечные конструкции на клеях холодного отверждения. Более прочные материалы для силовых конструкций изготавливаются на клеях горячей вулканизации. Для упрочнения клеевого шва можно вводить дополнительную операцию – прошивку, с последующей герметизацией шва лентами.

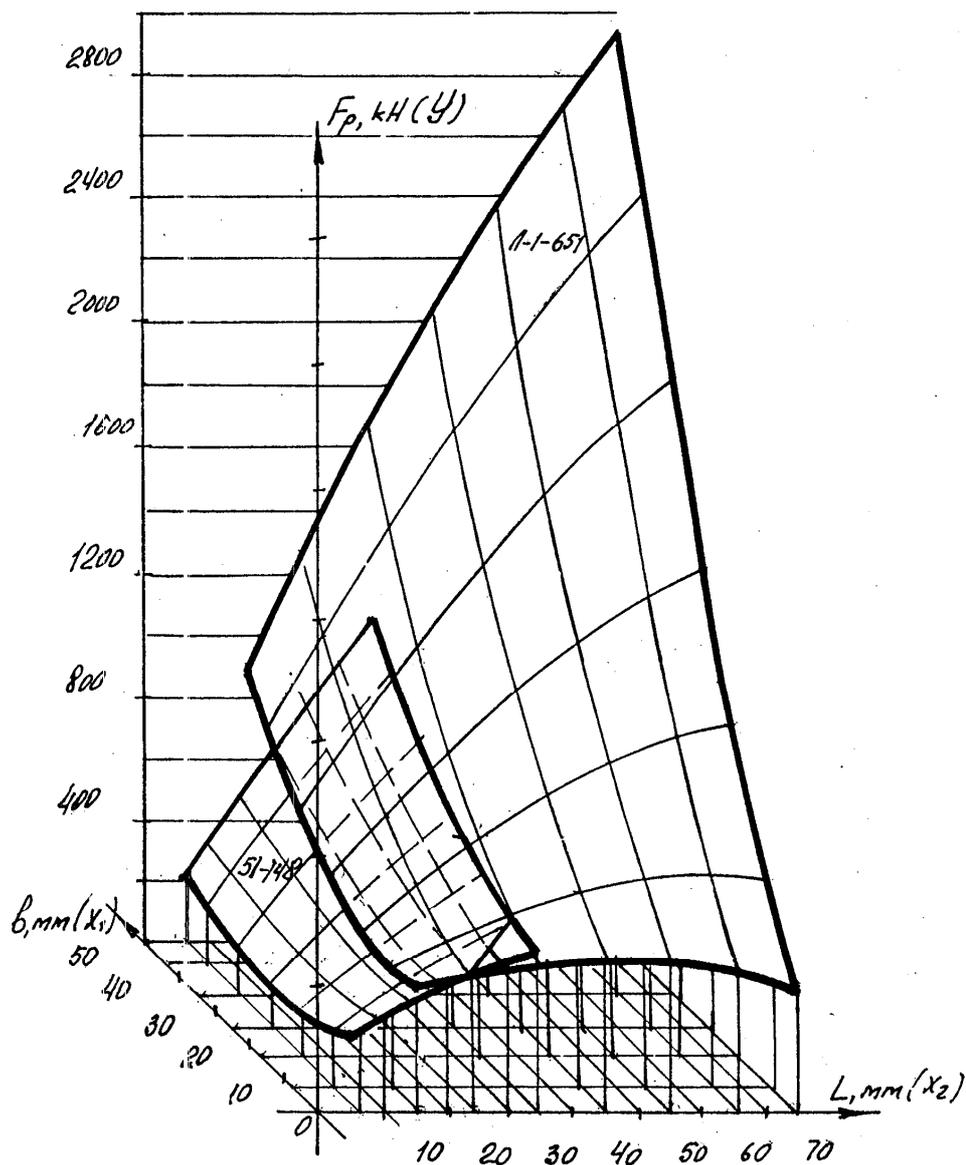


Рис. 2.7. График зависимости прочности клеевого шва (Y) от ширины участка непере-резанных нитей (x_1) и длины нахлеста шва (x_2) для прорезиненных тканей на основе арамида (№ Л-1-651) и капрона (№51-148)

Установлена зависимость прочности клеевого соединения от следующих факторов (рис. 2.7):

- свойства склеиваемого материала (структура макромолекул, растворимость, смачиваемость, состояние поверхности и некоторые другие);
- свойства клея (структура и полярность макромолекул, смачивающая способность, реологические свойства и другое);
- форма соединяемых деталей;
- площадь контакта;
- способ нанесения клея;
- режим склеивания.

Конструктивно клеевые соединения выполняются внахлестку, встык с накладками. Для соединения материалов, различающихся по жесткости (податливости) применяются амортизирующие прокладки переменного сечения для компенсации концентрации напряжений в соединениях.

Потеря прочности соединения под влиянием внешних условий возможна при проникновении в клеевой шов агрессивных веществ, под действием факторов, вызывающих старение, гидролиз, выщелачивание клеевого слоя, растворение клея, коррозию субстрата и хрупкость при низких температурах.

Степень влияния изгиба на прочность клеевых соединений, при прочих равных условиях, зависит от соотношения модулей упругости клея и склеиваемого материала. Если материалы резко различаются по жесткости, то при склеивании рекомендуется исключать возможность повышения концентрации напряжений в соединении. Поиск путей снижения концентрации напряжений в клеевом соединении позволяет повысить эксплуатационные свойства изделий из армированных материалов, в том числе уровень нагружения самих конструкций рабочим давлением.

С целью повышения жесткости клеевого соединения рекомендуется использовать некоторые конструктивные приемы, заключающиеся в механической фиксации соединяемых материалов прошивкой, клепкой или креплением скобами с последующей герметизацией стыка.

Так, например, клеепрошивной шов представляет собой соединение, изготавливаемое в следующей последовательности: разметка, шероховка пересклейки соединяемых материалов, обезжиривание, трехкратное нанесение на склеиваемые поверхности клея (с послойной просушкой растворителя), склейка (с прикаткой), прошивка, заделка шитых строчек герметизирующей лентой. Такой шов является серийным, широко используется при производстве резино-тканевых конструкций на серийных заводах РТИ.

В результате исследований прочности клеевых соединений при варьировании такими конструктивными параметрами, как площадь нахлеста клеевого шва и податливость соединяемого материала, получена математическая модель зависимости. Установлено, что повышение их прочности возможно при увеличении площади склейки или увеличения модульности материала на сдвиг. Повышение жесткости материала и стыка помогает снизить концентрацию напряжений, повысить разрывную прочность клеевого шва, снизить значение коэффициента

запаса прочности, повысить степень использования силовых свойств изделия, повысить стабильность свойств, надежность и работоспособность пневмоконструкций.

Следовательно, прочность клеевого соединения зависит от технологических свойств материала, клея, конструкции стыка и условий производства (производственной и технологической дисциплины), квалификации рабочих.

Сварное соединение

Процесс разработки неразъемного соединения, основанный на тепловом движении или химическом взаимодействии макромолекул полимерной фазы материала, в результате чего между соединяемыми поверхностями исчезает граница раздела, называется *сваркой*. Прочность сварного соединения определяют те же факторы, от которых зависит когезионная прочность полимеров (размер, форма, ориентация макромолекул). Этот метод предпочитают другим способам в тех случаях, когда соединяемые детали изготовлены из одинаковых материалов и не допускается присутствие чужеродных по отношению к применяемым материалам крепежных элементов или клеев. В зависимости от механизма процесса сварка бывает диффузионная и химическая.

Диффузионная сварка используется при соединении термо- и эластопластов. Она осуществляется путем нагрева или с помощью растворителя. При диффузионной сварке материалы в зоне шва приводятся в вязкотекучее состояние. Выбор способа нагрева зависит от формы и размеров детали, свойства материала (теплопроводность, стойкость к деструкции, диэлектрические свойства), а также характера производства.

Тепловая сварка производится по двум схемам: приведение поверхностей в контакт под давлением с последующим их нагревом (схема *давление – температура*); нагрев соединяемых поверхностей с последующим приведением их в контакт под давлением (схема *температура – давление*).

По способу активирования процессов сварки технология может быть принята следующей:

- сварка нагретым газом (с применением или без применения присадочного материала);
- сварка нагретым инструментом (с подводом тепла с внешней стороны деталей – «сварка проплавлением»);
- сварка с подводом тепла инструментом непосредственно к соединяемым поверхностям;
- сварка нагретым присадочным материалом (экструзионная безконтактная или контактная при непрерывной схеме технологического процесса, сварка литьем под давлением при периодической схеме процесса);
- высокочастотная сварка (с односторонним или двухсторонним расположением электродов);
- сварка излучением (контактно-инфракрасная, сварка световым лучом, лазерная сварка);

- сварка трением (вращением, вибротрением); ультразвуковая сварка (контактная, дистанционная);
- сварка с помощью растворителей – «холодная сварка» или «сварка набуханием» [9,74].

Основным недостатком тепловых методов сварки является изменение структуры шва по сравнению со структурой остальной части изделия.

Химическая сварка основана на образовании химических связей между полимерами, приведенными в контакт, или в результате взаимодействия функциональных групп полимеров, или с помощью присадочного материала, введенного в зону шва. При этом, в отличие от склеивания, не образуется самостоятельной непрерывной фазы. Химической сваркой соединяют материалы, не поддающиеся диффузионной сварке, – отвержденные реактопласты, вулканизаты (эластомеры), редкосетчатые полимеры, линейные полициклические полимеры, а также некоторые термопласты с кристаллической и ориентированной структурой, способные соединяться диффузионной сваркой.

Другие типы конструкционных соединительных швов

При производстве конструкций из вулканизованных прорезиненных материалов, например, при производстве высоконапряженных оболочек одинарной кривизны с прямолинейными швами или малогабаритных оболочек плоской раскройной формы, применяют прессовые швы горячего отверждения с вулканизацией на длинномерных прессах серии «П». Прессовый метод соединения обеспечивает удовлетворительное качество изготавливаемых изделий и хорошие эксплуатационные свойства.

При производстве крупногабаритных изделий из стеклопластика и других композиционных материалов широко применяется приформовка.

Сущность приформовки заключается в нанесении на место стыка накладок из стеклоткани или другого материала, который пропитан связующим, с последующим его отверждением и образованием связи между деталями и накладками. Технология этого способа аналогична контактному формованию, отличие заключается в том, что соединяемые детали прошли стадию отверждения. При этом виде соединения применяется ступенчатая конструкция шва, которая имеет такие преимущества, как снижение концентраторов напряжения и уменьшается до минимума сдвиг соединения при формовке.

Механические соединения по виду подразделяются на резьбовые, шарнирные, заклепочные, прошивные, соединения с помощью специальных крепежных элементов. Механическое крепление, как способ соединения, предпочтителен в следующих случаях:

- при необходимости обеспечить разъемное соединение;
- при сборке изделий из деталей с большими сечениями и если к ним прикладываются сосредоточенные нагрузки;

- при сборке деталей, изготовленных из материалов с разными физическими свойствами, когда невозможно применить сварку и трудно подобрать соответствующий клей;
- при проведении монтажных работ для закрепления деталей и узлов насыщения на корпусных деталях.

Сочетание, например, клеевого и механического соединений позволяет устранить недостатки, присущие обоим видам соединений.

Технические и технологические свойства конфекционных клеев

Клеевое сплошное соединение эластомерных композиционных материалов (прорезиненной ткани) осуществляется резиновыми клеями холодной вулканизации; одно- и двухкомпонентными полиуретановыми, а также кремнийорганическими растворными клеями, клеями-расплавами, а также липкими лентами [47, 74].

При выборе оптимальной клеевой рецептуры для склеивания прорезиненной ткани, где необходимо руководствоваться следующими требованиями к клеевому слою и технологии склеивания:

- прочность склеивания должна быть максимальной;
- клеевой шов должен быть эластичным и тонким;
- клеевой слой должен быть герметичным;
- отверждение клея должно производиться при комнатной температуре;
- давление на клеевой слой должно накладываться только в первый момент соединения (прикатка роликом);
- клей должен иметь хорошие конфекционные свойства;
- время отверждения клея должно быть минимальным.

Рассмотрим технологические особенности конфекционных клеев в зависимости от их исходного материала.

В соответствии со справочными данными [28] однокомпонентные клеи холодной вулканизации: клей 109, 4508 (на основе натурального каучука), а также клеи 4НБ, СВ-1, 88НП, 88СА, СВ-2 (на основе хлоропреновых каучуков) рекомендуются для изготовления надувных изделий из резинотканевых материалов. Причем клеи 88НП и 88СА рекомендуются для соединения резины с металлом и другими материалами.

Резиновые клеи перед употреблением тщательно перемешиваются, затем наносят 2 – 3 слоя клея с помощью кисточки на обе склеиваемые поверхности, делая открытую выдержку в течение 10 – 20 мин. После выдержки склеиваемые поверхности соединяют по разметке и прикатывают металлическим роликом для удаления межслойных пузырьков воздуха и сгустков клея. Время отверждения при холодной вулканизации – 16 – 24 часа.

Для придания заданных функциональных свойств (повышенной стойкости к высоким температурам эксплуатации) в клеи добавляют в качестве отвердителя полиизоцианаты (клей Лейконат). Время жизни таких двухкомпонентных клеев резко сокращается (до 1 часа).

Для приготовления кремнийорганического клея с высокой адгезионной прочностью предварительно готовят 30 % раствор каучука Лестосил СМ в этилацетате, затем к нему добавляют катализатор холодного отверждения марки МСН-7-80 в весовом отношении: 100 массовых частей раствора к 5 массовым частям катализатора. Приготовленный клеевой состав может храниться в закрытой посуде несколько часов.

Из полиуретановых клеев с учетом повышенных требований по эластичности и технологичности для решения поставленной задачи целесообразно применять растворные конфекционные клеи: двухкомпонентный АДВ-5к и однокомпонентные: Витур, Ур-Моно, Дисмокол, Уросил.

Клей АДВ-5к для склеивания металлов, полиамидных, хлопчатобумажных тканей, пленочных материалов (на лавсановой, полиамидной, полиимидной и ПВХ основах), фольги и других неметаллических материалов изготавливается из компонентнов А и Б непосредственно перед применением. По физико-механическим свойствам клей водостоек, вибростоек, эластичен, мало токсичен, имеет хорошие конфекционные свойства в диапазоне температур от -60 до $+80$ °С.

Клеи типа Витур-РК получают взаимодействием сложного полиэфира П-515 и толуилنديизоционата, а Витур-РМН – на основе простых полиэфиров (Лапрол 202-3-100 и Лапрол 1052) и дифенилметандиизоционата в присутствии катализатора. Клеи типа Витур-РК могут применяться как однокомпонентные, так и с отвердителем – изоционатом.

Следует отметить, что из-за быстрой высыхаемости клея Витур (2 мин), склеивание больших поверхностей связано с технологическими трудностями.

Подобные трудности отсутствуют у полиуретанового клея Ур-Моно.

Клей Ур-Моно предназначен для склеивания жесткого полиуретана, ДСП, кожи, ПВХ, различных пленочных, тканевых материалов и пластмасс между собой и с металлом. Клей однокомпонентный, не требует дополнительного введения отвердителей для склеивания материалов, водо-, вибростоек, малотоксичен. Интервал рабочих температур: $-60 \dots +70$ °С.

Универсальными клеями, которые можно применять для склеивания различных материалов (металлов, пластиков, эластомеров, стекла, пористых материалов), являются клеи-расплавы. Основными преимуществами клеев-расплавов является быстрота склеивания, способность хорошо заполнять зазоры, возможность склеивания поверхности без специальной обработки, длительный срок хранения, отсутствие отходов. Недостатком этих клеев является ограниченная открытая выдержка после нанесения на поверхность.

Клеи-расплавы можно наносить полуавтоматическим способом (пневмопистолетом) или с помощью двухсторонних липких лент на бумажной или бумагоподобной основе.

С помощью двухсторонних липких клеев можно склеивать такие инертные материалы, как полиэтилен, фторопласт без специальной активации их поверхности. Процессы склеивания с применением двухсторонних липких лент часто не требуют специальной оснастки, являются высокотехнологичными и практи-

чески безотходными. Кроме того, эти клеевые материалы незаменимы при проведении ремонтных работ.

В липких лентах, обеспечивающих высокую прочность склеивания, липкий слой (клей-расплав) состоит из основы – термоэластопласта диметилстирольного разветвленного (ДМСТ-Р) или бутадиенстирольного разветвленного (ДСТ-30Р), агента липкости, пластификатора, адгезива, стабилизатора. Вещества, входящие в состав клея, малотоксичны.

Для склеивания прорезиненных материалов рекомендованы липкие ленты двухсторонние с акриловым клеем на основе нетканого материала. Липкий слой является клеем, состоящим из акриловой дисперсии (Ак 215-23) и загустителя – поливинилового спирта (марки 16/1). Акриловая дисперсия – продукт водоземulsionной полимеризации метакриловой кислоты и бутилового эфира акриловой кислоты.

Склеивание материалов проводится по следующей технологии: на кромку детали (с небольшим отступом от края, около 1 мм) на одну склеиваемую поверхность накладываем липкую ленту таким образом, чтобы защитная силиконизированная бумага, защищающая липкий слой, находилась сверху. Затем на освобожденную от защитной бумаги вторую склеиваемую поверхность накладываем второй склеиваемый материал (также с отступом от края примерно 1 мм). Клеевой шов прикатывается тяжелым роликом несколько раз в направлении края ленты. Для уменьшения толщины и увеличения прочности клеевого шва проводится кратковременный прогрев соединения при температуре 60-80 °С подогретым роликом или нагретым воздухом.

Таким образом, наиболее тонкий и эластичный клеевой слой при высокой прочности склеивания обеспечивают растворные однокомпонентные клеи (Ур-Моно). Для проведения ускоренных (ремонтных) работ рекомендуются ленточные клеи-расплавы.

Прочность клеевого соединения зависит от свойств склеиваемого материала; характеристик клея, формы соединяемых деталей, площади контакта, способа нанесения клея, режима склеивания и соблюдения технологического режима.

Выводы

В процессе проектирования и разработки новой техники повысить эффективность конструкции из эластомерных армированных материалов можно на каждой стадии разработки. Это возможно за счет использования новых подходов к разработке конструкции и технологии сборки; совершенствования методов расчета мягких оболочек с учетом взаимодействия их со сжатой рабочей средой; расширения сферы действия и областей применения мягких конструкций.

Повышение эффективности пневмоконструкций зависит от уровня рабочих давлений, рост которых определяется прочностными свойствами конструкционных материалов и стыков. Следовательно, увеличение прочностных свойств армирующих материалов, а также степени использования этих свойств в конструкции является перспективным способом повышения их работоспособности.

Установлено, что эффективность переработки и применения комплексных нитей армирующей ткани или корда можно значительно повысить путем их физической модификации, выбора новых и комбинированных материалов для формирования волокон, отработки технологических процессов импрегнирования тканей, увеличения прочности связи наполнителя и связующего.

Зависимость свойств адгезива и подложек от физико-механического строения (длины и конформации цепей, наличия в цепях боковых ответвлений, полярных групп, характера их чередования в цепи и другое) значительно влияет на прочность связи.

Для повышения прочности соединения элементов мягких конструкций необходимо исключать те виды нагрузок и такие соединения, при которых на малых площадях или по краям стыков концентрируются локальные напряжения, или концентрации напряжений в них должны быть минимальны. Деструкция или разложение, нарушение нормальной структуры клеевых швов происходит при недопустимых физических, химических или биологических воздействиях на соединения.

Анализ влияния различных конструктивных факторов на прочностные характеристики клеевого соединения внахлестку показывает: с увеличением длины нахлестки концентрация напряжений возрастает, уменьшаясь с ростом модуля упругости (толщины) соединяемых элементов, возрастая с ростом модуля сдвига клея.

Для повышения эффективности пневмоконструкций следует расширить функциональное назначение конструкционных материалов, оптимизировать раскрой, повысить степень использования прочностных свойств конструкционных материалов и соединительных швов, снизить трудоемкость изготовления деталей за счет упрощения раскройных форм элементов оболочек, механизации сборки.

Пути повышения эффективности использования функциональных свойств пневмоконструкций зависят от их конструктивных и технологических свойств. Эффективность эластомерно-армированных конструкционных материалов зависит от диапазона их функциональных свойств, которые на современном этапе развития междотраслевых прикладных наук способны приблизиться к свойствам натуральной кожи с признаками обратной (интеллектуальной) связи.

Глава 3. ТОРОВАЯ (ТОРОИДНАЯ) ТЕХНОЛОГИЯ

Материалов с признаками интеллектуальной (обратной) связи пока нет. Но существуют простейшие элементы эластичной механики – оболочечные конструкции. Они позволяют использовать свойства текучей (рабочей) среды, материалов оболочки и элементов классической механики (рычаги, тяги и тому подобное) для достижения бесступенчатого управления, преобразования энергии сжатой рабочей среды и упругости оболочки для выполнения механической работы.

Более того, сегодняшний уровень химической, радиоэлектронной, легкой промышленности позволяет создать такие материалы.

В радиоэлектронной промышленности существуют модули или блоки аппаратуры с различными конструктивно-технологическими вариантами печатных плат, топологического рисунка, сборки и монтажа на их поверхности радиоэлектронных элементов, различные конструктивно-технологические варианты самих элементов и/или их компонентов как некоего идеализированного конструкционного материала.

В структуру этого идеализированного материала входят:

- интеллектуальный слой – электро- и радиоэлементы, в том числе интегральные микросхемы;
- проводниковый слой – энергетические (экран, питание), информационные каналы связи на печатной плате;
- проводниковый, резистивный, диэлектрический слои на толсто пленочной микросборке;
- «межслойный» слой – межслойные соединения (контактные площадки, металлизированные сквозные и скрытые межслойные отверстия, глухие и скрытые микропереходы) в многослойной печатной плате;
- силовой слой – подложка микросхемы, печатная плата;
- защитный слой – полимерное покрытие, например, интеллектуального слоя.

В химической промышленности существуют композиционные резино-тканевые, пленочные, ткане-пленочные и другие гибкие, мягкие, эластичные конструкционные материалы, пригодные для создания физически единого слоя как некоего идеализированного блока или модуля радиоэлектронной аппаратуры.

Ткани как армирующие слои композиционного материала поставляются предприятиями легкой промышленности в виде плоских, объемных, пространственных структур из различных по структуре нитей и волокон.

Являясь основой для формирования на ней электронных приборов и устройств, ткань формирует энергетические и информационные каналы как в виде ниш и включений в межнитевое пространство, так и крепления, например, с помощью узлов и зацеплений в структуре армирующего материала.

Другим местом расположения, например, чипов, может быть слой покрытия и межслойный материал.

Размеры, вес, электромагнитные, диэлектрические и другие физические характеристики встраиваемых электронных компонентов не должны нарушать работоспособность оболочки в составе эластичной машины или механизма. Поэтому роль этих компонентов необходимо переложить на конструкционный материал, который, в свою очередь, должен быть переформирован из функционального в интеллектуальный композиционный материал.

Таким образом, создание новой – эластичной механики возможно только благодаря синтезу достижений многих областей науки. А все науки, вышедшие самостоятельно из философии материализма, теперь могут быть объединены философией эластичной механики и интеллектуальных материалов.

Одним из характерных признаков оболочечных конструкций является многообразие исходных геометрических форм, которые в зависимости от условий эксплуатации могут исполняться в виде поверхностей вращения или деформированной панели с производным планом. Под действием внешних нагрузок, а также в процессе совершения механической работы наблюдаются значительные перемещения их поверхности, что приводит к изменению геометрии, объема, соотношения размеров деформированных оболочек. При изменении формы конструкции под действием рабочего давления меняется поверхность соприкосновения с опорой или грузом, в результате чего совершается работа давления и объема рабочей среды, изменяются геометрические и физические параметры равновесного состояния нагруженной системы.

Формообразование мягкой оболочки это:

- раскрой (лекальный, плоский);
- каркасирование: внутреннее (арками, стойками, оттяжками, перегородками, поясами, диафрагмами), наружное (канатами, сетями, лентами, монтажными швами);
- деформирование (точечное, распределенное, плоское, кольцевое, по всей поверхности);
- закрепление (в точке, по образующей, по плоскости основания, на разных уровнях вынесенного контура);
- многопролетность;
- двухслойность;
- трансформируемость;
- сочленение сложных форм.

По форме оболочки пневматические конструкции представляют собой осесимметричные поверхности вращения и несимметричные поверхности производные в плане, образующиеся при использовании в конструкции раскрепляющих перегородок, диафрагм, каркасов, разгружающих тросов. Форма оболочки влияет на такие геометрические параметры, как соотношение размеров. От соотношения габаритных размеров основания и высоты оболочки зависят такие эксплуатационные свойства, как несущая способность, объем, высота перемещения, площадь поверхности, габаритные размеры и масса в транспортном состоянии.

Следует отметить, что оболочки с соотношением размеров малой полуоси симметрии к большой, имеющие размерность меньше единицы (сплюснутый овалоид, горизонтальный цилиндр, все виды торов), обладают повышенной грузоподъемностью, так как имеют значительную площадь опоры. Для сравнения, у оболочек увеличенной высоты подъема (вертикальный цилиндр, конус) соотношение размеров вертикальной и горизонтальной полуосей больше единицы. При анализе зависимости грузоподъемности от величины давления установлено, что, например, силовые свойства оболочек не зависят от геометрической формы, а наиболее мощными мягкими подъемниками являются оболочки в форме подушки, квадратные или прямоугольные в плане. Известно также, что мягкие оболочки с прямоугольным раскроем элементов и прямолинейными стыками удобны в сборке, имеют высокий коэффициент использования прочности конструкционного материала и позволяют механизировать технологические операции (склейка, сварка) [9, 51].

Технологические свойства, форма раскройных элементов, способ сборки, трудоемкость операций, количество отходов производства также зависят от формы оболочки.

3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Формообразование методом раскроя

Основные приемы и средства формообразования мягких оболочечных конструкций основаны на их целевом назначении, требованиях эксплуатации (внешний вид, минимальный вес и объем в транспортном положении, максимальная работоспособность). Например, от раскроя зависит грузоподъемность для мягких домкратов или изгибоустойчивость для надувных мачт и антенн. Эти приемы зависят от технических и технологических требований к конструкции, способу сборки, техническим требованиям к материалам. Как правило, искомый способ раскроя должен характеризоваться полнотой использования площади полотнищ (минимальным отходам) конструкционного материала, минимальностью длины соединительного шва, максимальному приближению к выпуклости формы.

В пневматических конструкциях форма и материал связаны между собой раскроем оболочек. Основным требованием является условие соответствия оболочки проектной форме в стадии эксплуатации, когда она напрягается внутренним давлением и соответствующим образом деформирована. Форма раскроя определяется также сложностью плана или архитектурными требованиями. В противном случае такой выбор направлен в сторону упрощения форм.

Наиболее типичной для оболочечных конструкций является поверхность двоякой кривизны, а из них – сферическая.

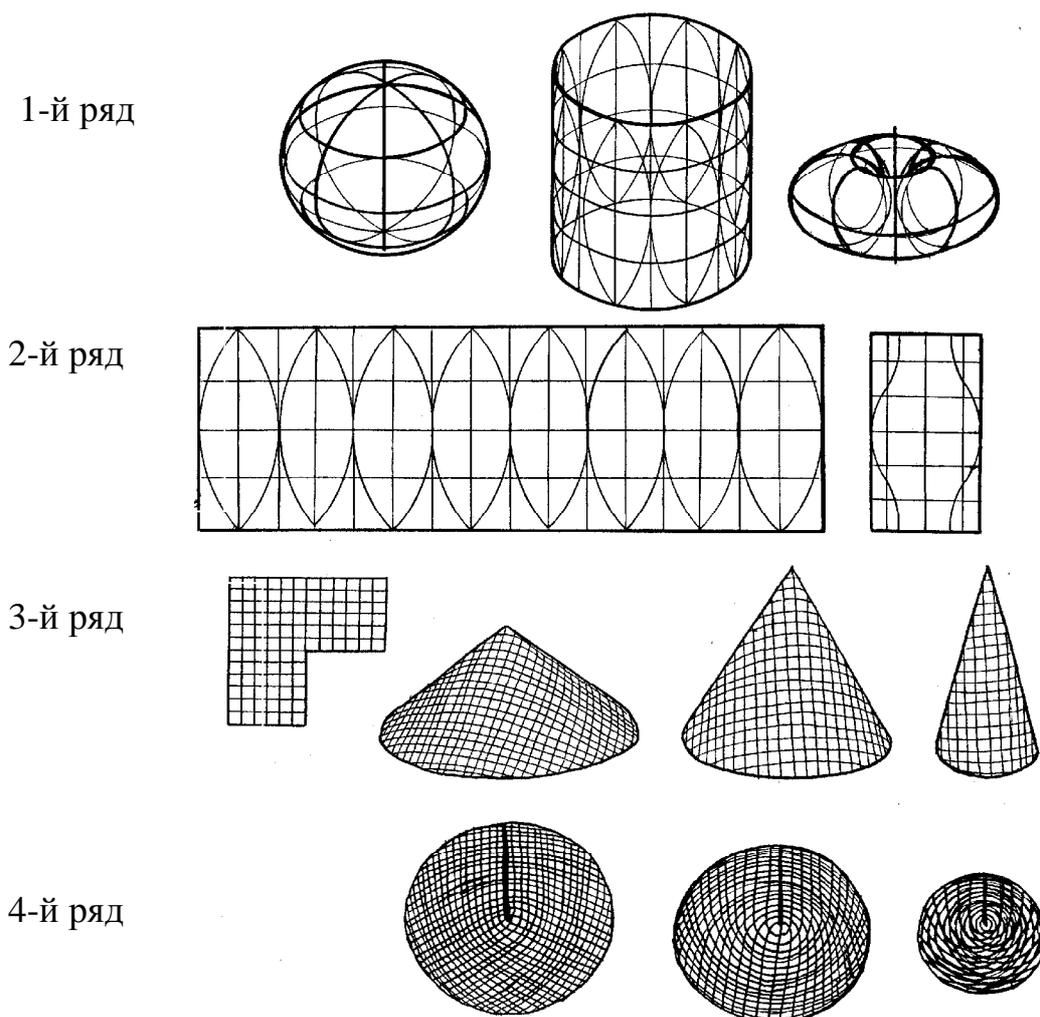


Рис. 3.1. Схемы плоского раскроя пространственных поверхностей:
 1-й ряд – сфера, цилиндр, тор; 2-й ряд – раскрой цилиндрической, торовой поверхностей; 3, 4 –й ряды – конической

Раскрой таких оболочек, как правило, представляет сборку лекальных заготовок – сферических двухугольников, вершины которых находятся в полюсах, а стороны направлены вдоль меридианов (рис. 3.1).

Полусферические купола раскраивают с полюсом в вершине сферы или на горизонтальной оси. Последние оправданы, если в местах стыковки клиньев расположены входные шлюзы или сочленения, позволяющие использовать отходы материала и избегать технологических трудностей.

Известны меридиональный и широтно-меридиональный способ раскроя поверхности двойкой кривизны. К недостаткам меридионального – относится большой процент отходов при кройке (более 36 %), а также технологические трудности при сборке клиньев в вершинах. При широтно-меридиональном – отходы меньше и короче протяженность швов. Однако в связи с уширением клиньев форма этих оболочек становится недостаточно гладкой и рекомендуется увеличивать число клиньев.

Кроме того, разнонаправленность приводит к накладке нескольких швов, что увеличивает жесткость и оказывает влияние на геометрию оболочки.

Так как сферическими часто делают торцевые завершения цилиндрических оболочек, то полюсы полусфер могут быть расположены на вертикальной или горизонтальной (продольной или поперечной) оси. Известны конструкции сферических оболочек с «мнимыми» полюсами. Несмотря на некоторую сложность раскроя, отходы при этом существенно сокращаются.

Конические, цилиндрические, а также линзовидные и подушечные оболочки раскраивают в виде плоских прямоугольных полотнищ. Протяженность швов, отнесенная к единице площади поверхности оболочки, должна быть минимальной.

Тороидальные оболочки выкраиваются из рулонного материала с синусоидальной (лекальной) конфигурацией кромок. Методы развертывания тора представляют собой развертки цилиндрических круговых элементов трубчатого многоугольника, аппроксимирующего круговой тор, а также прямое развертывание криволинейных секторов тора.

Существуют пневмоконструкции, связанные с особенностью ориентирования материала. Для раскроя изделий используют прорезиненные ткани с ортогональной системой нитей силовой структуры (основы и утка), которая в основном и определяет деформационно-прочностные свойства прорезиненного материала. Опыт проектирования этих конструкций показывает, что избежать искривления продольной оси и винтообразной деформации образующей удастся только специальным подбором раскроя диагонально-дублированных тканей. Как правило, линии основы диагонального и продольного слоев составляют угол 45° и 135° . Ткани с таким расположением диагонального слоя условно называют тканями первого и второго направлений. Изделия собираются симметричными из полотнищ обоих направлений [16, 51].

Сложность раскроя криволинейных поверхностей в условиях, не требующих точности формы, приводит к его упрощению. При этом прямолинейный раскрой позволяет упростить форму не в ущерб прочностных свойств. Такими формами, например, являются цилиндры со стянутыми в узел концами полотнищ или с прямоугольными торцами: подушки, линзы.

Существует способ раскроя полотнищ по геодезическим линиям. Раскройная форма полотнищ при этом определяется расчетом расстояний между двумя геодезическими линиями. При сложных планах приходится пользоваться многогранником, а геодезические линии криволинейной поверхности аппроксимировать геодезическими линиями многогранника. Такой раскрой позволяет использовать переходные участки сопряжения, различное направление нитей основы при раскрое заготовок, применять стягивающие накладки и пояса. Как показала практика, раскрой по геодезическим линиям наиболее соответствует технологическому процессу для сборки выпуклых оболочечных конструкций сложного плана.

В воздухоопорных сооружениях с усиливающими элементами (канатами, сетями, канатными оттяжками, тканевыми диафрагмами) применяются линейные

и точечные элементы стабилизации формы, вариации раскроя или изменение рисунка плана.

Основным методом формообразования оболочечных конструкций является раскрой. Эластичные свойства материала играют роль податливого ограничивающего каркаса, придающего оболочке заданную форму. При этом используются свойства как самих нитей и конструкции ткани, так и направления раскроя к нитям основы, что также влияет на податливость материала.

Формообразование методом каркасирования

Мягкая воздухоопорная оболочка, изготовленная из герметичного эластомерно-тканевого материала, обладает раскройной формой при условии только предварительного напряжения избыточным давлением воздуха. Для обеспечения ее работоспособности требуется постоянное наличие избыточного давления в рабочей полости оболочки, причем при наличии внешней силовой нагрузки это давление должно быть компенсирующим.

Воздухонесомые сооружения с пневмоарочным каркасом и тентовым покрытием и пневмопанельные сооружения собираются из трубчатых арок камерного и бескамерного типа, которые изготавливают из рулонного материала клеепрошитым швом или цельнотканых рукавов с воздухонепроницаемыми камерами. Одним из преимуществ пневмокаркасных сооружений является открытое рабочее пространство и достаточная устойчивость ветровым нагрузкам.

Крупнейшим известным пневмоарочным сооружением является павильон Фудзи для выставки ЭКСПО-70 [55]. Сооружение, которое представляет собой самую большую пневмокаркасную конструкцию, состоит из 16 пневмоарок диаметром 4 м и длиной 78 м, расположенных по окружности диаметром 50 м. В результате чего оба торца здания поднялись на 7 м. Через каждые 4 м арки соединяются друг с другом охватывающими их поясами шириной 50 см. Средняя (центральная) арка – полукруглая, остальные, по мере сближения опор, увеличиваются в высоту. В обоих торцах оставлены проемы шириной 10 м в качестве входов. Концы арок заделаны в стальные цилиндры. Все арки присоединены к центральному компрессору с помощью системы стальных труб.

Автономная работоспособность арочных каркасов широко применяется для быстрого возведения спасательных укрытий, надувных спасательных средств, например спасательных плотов, посадочных устройств.

В свою очередь, конструкция и размеры спасательных плотов определяются требованиями Правил Регистра, основанными на Международной конвенции по охране человеческой жизни. Требования определяют вместимость плота, массу, надежность, состав конструкции (укрытие, днище и другое). Как правило, форму плотов определяет камера плавучести, которая принята круглой, многоугольной, овальной, реже квадратной в плане. Форма каркаса зависит от конструкции плота: сбрасываемого типа или спускаемого на воду с пассажирами. Последние снабжены устройством для спуска, центральной стойкой с подъемной скобой и системой растяжек.

Наиболее безопасной эвакуацией пострадавших в спасательные плоты признана посадка с помощью надувных посадочных устройств: трапов, скатов (слипов), рукавов, сходен. Несущей конструкцией устройств служат надувные балки (рис. 3.2 *ж – н, п*). По технологическим причинам применяют балки, составленные из сочлененных замкнутых труб, герметичность которых легче достигается (рис. 3.2 *а – м*). Однако соединенные в монолитную надувную балку каркасы имеют технологические проблемы.

Неравномерные деформации нитей и швов вызывают перекосы и скручивание балок. Из-за этого приходится регулировать величину натяжения, снижая рабочее давление или увеличивая диаметр каркаса. Сечения с внутренними диафрагмами и оттяжками компактнее, но трудно изготовимы (Рис. 3.2 *о – ф*). Скаты и трапы ферменной конструкции состоят из двух надувных ферм, между которыми укреплено полотнище. Фермы могут быть соединены в вантово-стержневую систему.

В конструкции спиральных рукавов для посадки на плоты предусмотрен рукав из прозрачной ткани с внутренними спиралевидными направляющими, а по концам рукав закреплен на надувных кольцах, придающих форму торцам. Ряд преимуществ имеют пневмобалки с вертикальными диафрагмами. Они имеют меньшее сечение, большую изгибную жесткость. Такие каркасные конструкции применялись для изготовления надувных плотов, сходен, перекрытий, понтонов, платформ. Рассмотрим схему поперечного сечения надувного посадочного устройства (рис. 3.2). Трап состоит из 9 надувных рукавов двух типоразмеров. Рукава соединены приклеенными полосами. Устойчивость сечению придают три пары полотнищ, охватывающих бортовые и днищевые секции. От боковых перемещений трап удерживают два каната [48].

Итак, одним из основных способов формообразования мягких оболочечных конструкций является каркасирование. При этом в качестве каркасов могут выступать как надувные (арки, стойки, баллоны), так и жесткие каркасирующие элементы (фермы, трубы, плиты, коробка) из различного материала. Оболочка принимает форму каркаса, а свободная от контакта поверхность стремится к поверхности двоякой кривизны.

Формообразование методом деформирования

Формы оболочек связаны с физическими и геометрическими особенностями при заполнении их сжатым газом. Формальным признаком оптимальности может служить состояние равнонапряженности во всех направлениях на всей ее поверхности. При этом форма мягкой оболочки стремится к наибольшему объему рабочей среды при минимальной поверхности. Под действием избыточного давления и внешних сил оболочка деформируется и принимает другую равновесную форму, которая приводит к изменению равновесия действующих сил.

Различают три состояния (три формы) мягкой оболочки: начальное (давление в оболочке близко к атмосферному и компенсирует лишь собственную массу оболочки); исходное (давление воздуха достигает эксплуатационного уровня);

конечное (равновесное под действием всех приложенных внешних нагрузок). По мере отклонения поверхности оболочки от идеальной, состояние равнонапряженности нарушается. Окончательная (равновесная) форма существенно отличается от начальной. Так как идеальная форма оболочки соответствует определенной комбинации нагрузок, эти отклонения могут послужить причиной перенапряжения или складкообразования поверхности. Ввиду такой неопределенности задачи нахождения оптимальной формы, обычно при проектировании учитываются только постоянные нагрузки (избыточное давление). А при действии переменных – допускается временное образование складок. При этом причины, характер и место образования складок на оболочке подчинены определенной закономерности [23, 48].

Одной из причин деформирования идеальной формы являются эластичные свойства материала мягкой оболочки. Анизотропные свойства текстильной основы создают каркасирующие усилия вдоль главных осей симметрии, причем различных по величине. Кроме этого, направление раскроя и вид переплетения ткани придают различное по величине сопротивление растяжению (податливость) ткани, что приводит к неравномерному перераспределению погонных растягивающих усилий на оболочке. И, наконец, стремление упростить раскрой за счет формы оболочки допускает некоторое искажение геометрии раскройной формы с образованием морщин и складок, не снижая силовых свойств пневмоконтструкции.

В процессе эксплуатации мягкая оболочка испытывает воздействие внешней нагрузки, которое может быть распределенным или сосредоточенным. Учитывая величины удельного давления от силовой нагрузки, характер деформации оболочки может быть локальным или местным (распределенным по ограниченной площади), а форма деформированной поверхности – воронкообразной или плоской.

Контактная деформация поверхности мягкого домкрата под нагрузкой, например, может привести раскройную сферическую форму к форме сплюснутого овалоида или тороида (рис.3.3).

Растягивающая нагрузка, приложенная к полюсам той же сферы, деформирует ее в вытянутый эллипсоид. Всесторонняя деформация, к примеру, сферы под водой изменит ее форму в сплюснутый овалоид. Частичная деформация боковой поверхности кольцевым каркасом приведет поверхность сферы к цилиндрической с полусферическими торцами, и так далее.

Таким образом, формообразование мягкой оболочки путем деформирования ее поверхности внешними силовыми нагрузками возможно благодаря жесткости каркаса и упругим свойствам рабочей среды (газа). Такой метод проектирования новых форм позволяет решать архитектурные и инженерные задачи, а также снимать и перераспределять погонные растягивающие усилия, путем включения в систему напряженности оболочки жестких каркасирующих элементов. Следует отметить, что усиление оболочек канатами, сетями, поясами можно также отнести к формообразующим методам, достигаемым с помощью внешнего деформирования.

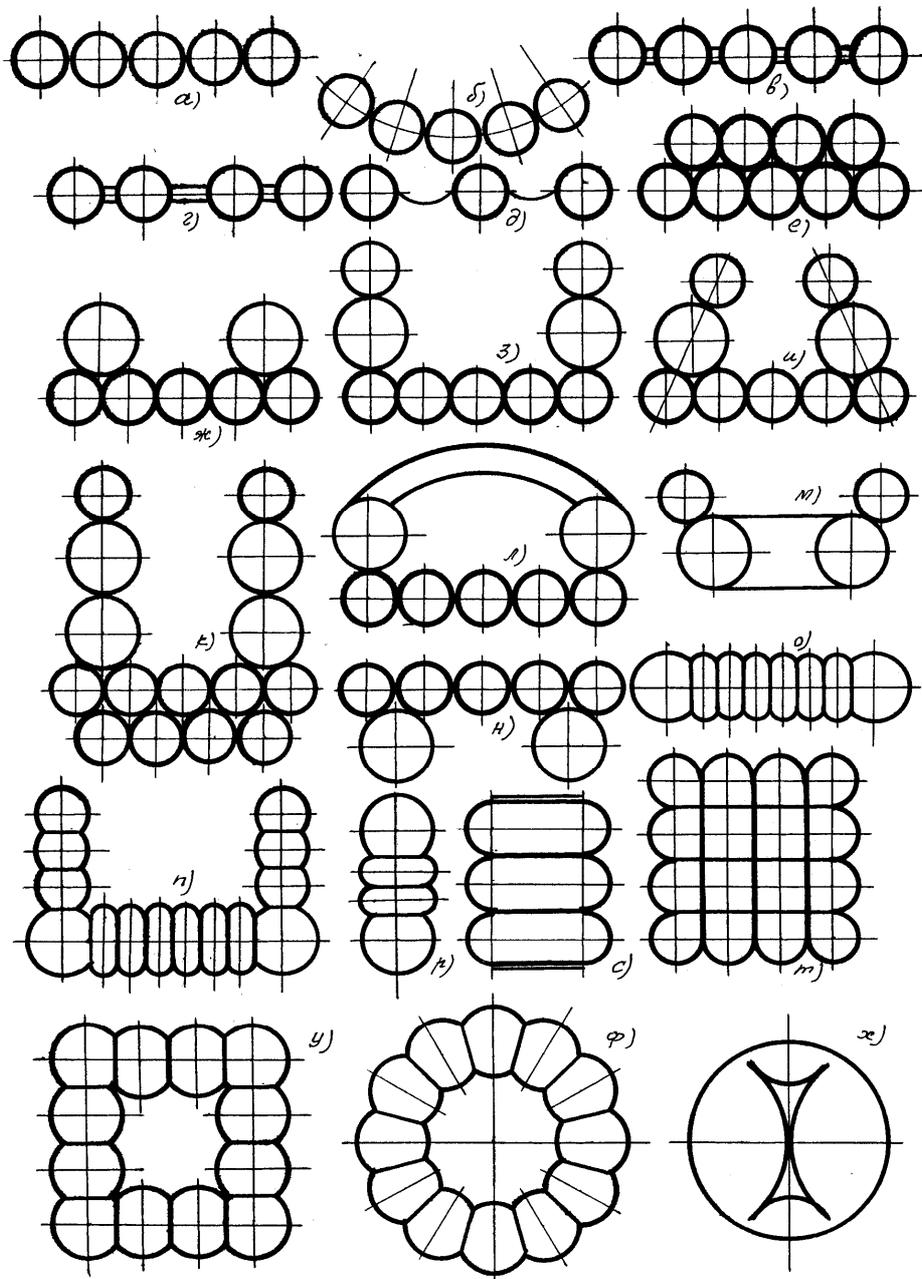


Рис 3.2. Схемы сборки поперечных сечений надувных каркасных конструкций:
а–е – плоские трубчатые; ж – н – желобообразные; о – ф – пневмопанельные;
х – двустенные

Формообразование методом закрепления

В зависимости от способа закрепления элементарные оболочки делятся на свободные (висящие, лежащие), закрепленные (в точке, по образующей, на плоскости, по опорному контуру). Способ их закрепления влияет как на формообразование мягкой оболочки, так и на число степеней свободы.

Важной характеристикой формообразования оболочечных конструкций является число степеней свободы перемещения системы, то есть разложение возможных перемещений на три взаимно перпендикулярные координатные оси. Так, например, свободная оболочка (мыльный пузырь) в пространстве обладает шестью степенями свободы – тремя независимыми поступательными движениями вдоль трех осей координат и тремя вращательными движениями вокруг этих осей.

Так как исследование движения какой-либо части машины рассматривается совместно с ограничивающей ее движения частью, рассмотрим стержневую систему, моделирующую мягкую оболочку.

Взаимосвязь частей пневмоконструкции и ограничивающей ее внешней системы осуществляется через предварительно напряженную оболочку.

По физической природе система *рабочий газ – оболочка – нагружающая среда* есть бесступенчатый кинематический механизм. Следовательно, можно представить, например, сферу в виде замкнутого четырехзвенника в плоскости сечения координатных осей. Звенья кинематических пар цепи, в виду подвижности материала в местах соединения стержней, можно обозначить через подвижный шарнир, а количество неподвижных звеньев определяется степенью закрепления.

Отсюда пространственная стержневая модель сферы может быть представлена стержневым октаэдром. Плоская кинематическая цепь сферической оболочки представляет собой шарнирный четырехзвенник с равными по длине звеньями. Такой механизм характеризуется взаимосвязью звеньев, и его форма зависит от перемещения любого из них на заданный угол.

Свободная сферическая оболочка, как уже отмечалось, имеет шесть степеней свободы перемещения, три поступательных и три вращательных. Закрепление оболочки ограничивает свободу перемещения.

Так, свободнолежащая на плоскости сферическая оболочка может перемещаться в одном направлении (вертикально), то есть число степеней равно одному. Сфера, закрепленная в точке, ограничена в поступательном и вращательном перемещении. Отсюда число степеней ее будет также равно единице (растяжение, сжатие). Закрепление сферы по образующей (экватору) приводит к ее фиксации.

Число степеней свободы перемещения у сферы, закрепленной на плоскости, равно пяти (все перемещения, кроме вращения вокруг вертикальной оси). То же у овалоида (рис. 3.3).

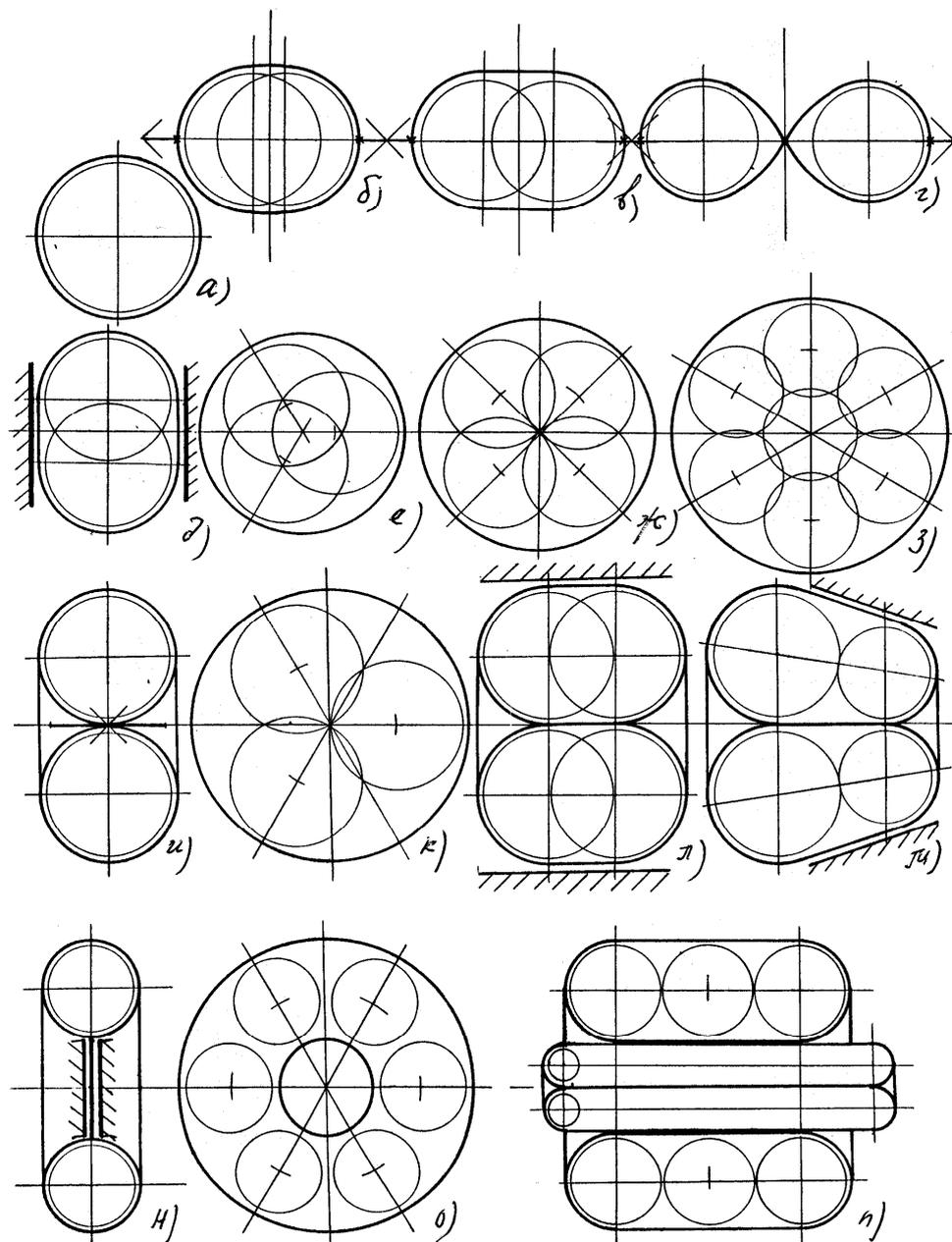


Рис. 3.3. Схема деформирования сферической формы:
 а – недеформированная сфера; б–г – вытянутая сфера; д – сплюснутая сфера (распределенной по плоскости нагрузкой); е–з – сплюснутый оваллоид; и – деформированная сфера (сосредоточенной нагрузкой); к–м – замкнутые тороиды; н–с – деформированная сфера (распределенной по ограниченной площади нагрузкой); о–п – открытые тороиды

Если сферическую оболочку сжать и поместить в полость трубы, то ее поверхность можно представить в виде цилиндра с полусферическими торцами. По характеру закрепления такая поверхность имеет сходство со сферой, закрепленной по образующей, и будет иметь возможность перемещения вдоль оси симметрии. Число степеней свободы перемещения свободно лежащего цилиндра – одна. Если цилиндр закрепить по образующей, например, вдоль меридиана, то он сможет перемещаться только поперек оси перпендикулярной плоскости закрепления. Число свобод – одна.

Интересно отметить, что сжатие цилиндра вдоль оси симметрии снимает продольный распор между вписанными сферами равного напряжения и между ними появляется складка вдоль окружной образующей.

У цилиндра, закрепленного на параллельных плоскостях, число степеней свободы перемещения равно одной, поперек плоскости закрепления. Аналогичная картина перемещений конических оболочек, которые можно представить, как деформированную сферу, заневоленную в жесткую «воронку». Причем, в продольном сечении замкнутого тора, в точке соприкосновения вписанных сфер появляется шарнир, обеспечивающий дополнительную свободу перемещения тороидов (выворачивание или наволакивание).

Действительно, свободнолежащий тороид в виде цилиндра (цилиндрический тороид) имеет число степеней свободы перемещения, аналогично тору, равным пяти, плюс перемещение вдоль оси симметрии. Аналогичная картина и для конического тороида.

По принципу действия метод закрепления оболочек сходен с методом каркасирования. Особенностью этого метода является введение крепежных элементов в конструкцию оболочки. Причем жесткое основание, на котором закрепляются оболочки, ограничивают их перемещения при деформировании и могут частично взять на себя несущие свойства пневмоконструкции.

Закрепление оболочек на плоском основании по площади контакта стабилизируют форму деформированной оболочки, регулируя, например, грузоподъемность мягких домкратов.

Закрепление боковой поверхности сферической оболочки внутри полости трубы ограничивает формоизменение ее в вертикальном направлении. Аналогично ограничивает перемещения оболочки закрепление ее между плоскостями, по образующей или в точке.

На рис. 3.4. изображены конструктивные схемы закрепления мягких оболочек в эксплуатации в зависимости от назначения. Эксплуатационная геометрическая форма оболочек отличается от раскройной. Она зависит от способа деформирования (количества свободной от контакта поверхности), причем как внешней сжимающей нагрузкой, так и внутренними распорными усилиями, распределенными по свободной поверхности оболочки или перераспределенной по узлам крепления на жестком основании.

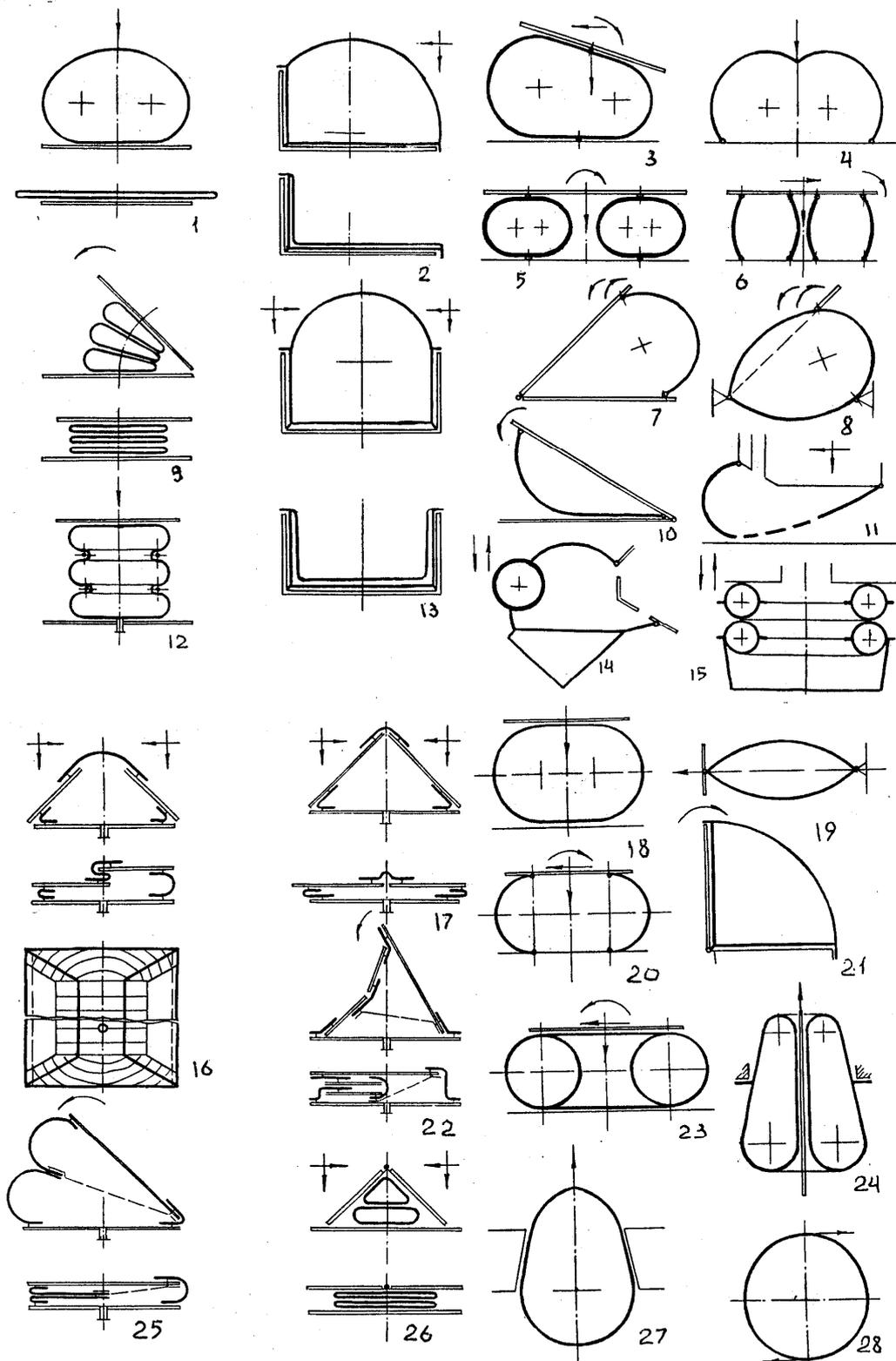


Рис. 3.4. Конструктивные схемы закрепления мягких оболочек в эксплуатации:
 1, 9, 12, 18, 23, 26 – свободнолежащие оболочки; 2, 3, 5, 8, 13, 14, 15, 19, 21, 24, 28 –
 оболочки, закрепленные по образующим; 4, 6, 7, 10, 11, 16, 17, 20, 22, 25, 27 – оболочечные конструкции, закрепленные по плоскости (полужесткие)

Многопролетные строительные сооружения

Воздухоопорные пневматические строительные конструкции обладают существенным преимуществом по перекрытию больших площадей, измеряемых гектарами, без промежуточных опор. Такое решение достигается с помощью установки ряда вертикальных оттяжек между оболочкой и основанием. Если круглую в плане оболочку притянуть к основанию оттяжкой, закрепленной в центре купола, то в центре покрытия образуется воронка, которую также можно выкроить. Продолжая аналогию с классическими схемами перекрытий, можно прийти к более развитой системе, в которой используются канаты между оттяжками, пояса, диафрагмы (рис. 3.5).

Использование сблокированного ряда полусферических куполов с диафрагмами, разделяющими помещения, позволяет создавать многокупольные комплексы, например, жилых или рекреационных сооружений. Применение сетей и канатов в сочетании с оттяжками, закрепленными в грунт, позволяет перекрывать пневматическими оболочками площади любых размеров. Ограничения касаются только расстояния между канатами (рис. 3.6) [22].

Для оболочек с элементами усиления характерны резкие перегибы, переломы и даже «разрывы» формы. Основными схемами расположения усиливающих канатов на поверхности оболочки могут быть такие как одиночный (симметричный, несимметричный) канат (параллельная, радиальная, кольцевая, хордовая, звездчатая схемы) и группы сетчатых схем усиливающих канатов.

Одним из преимуществ оболочек, усиленных канатами и сетями, является совершенно свободное от конструктивных элементов внутреннее пространство. Другие формообразующие элементы усиления (оттяжки и диафрагмы) расчленяют внутреннее пространство сооружения. Достоинством тканевых диафрагм является возможность изменения формы линий пересечения на их поверхности (от кривых до прямых и ломаных линий). Особого внимания заслуживает прием создания разнообразных форм методом «вынесения опорного контура». Этот прием связан с изменением уровня плоского опорного контура сооружения без изменения его рисунка или с развитием опорного контура в пространственный.

Для поднятия опорного контура в качестве средств формообразования могут использоваться стенки или насыпи, а также арки, стойки и тому подобное (например, как у линзообразных сооружений). Нахождение оптимальной формы оболочки, определение перемещений оболочки под нагрузкой, установление картины распределения усилий на поверхности оболочки – основные три задачи пневмоконструирования, представляющие практический интерес для проектирования оболочечных конструкций преимущественно строительного назначения.

С многопролетными строительными конструкциями схожи силовые двухслойные оболочечные конструкции, например панельные, содержащие элементы перераспределения напряжения материала между наружным и внутренним полотнищем.

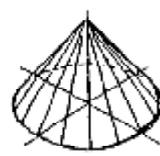
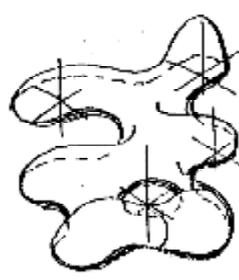
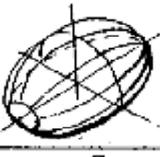
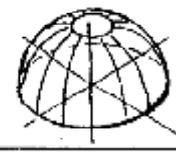
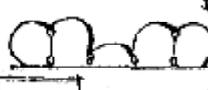
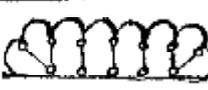
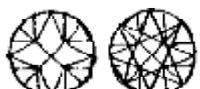
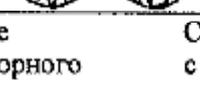
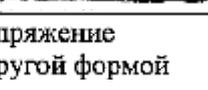
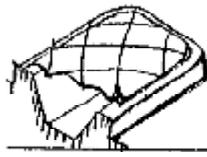
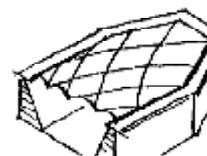
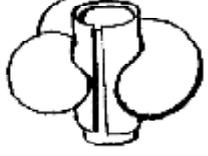
		Приемы формообразования путем изменения		
		Рисунка плана	Раскроя	Рисунка плана и раскроя
Оболочки без элементов усиления				
				
Оболочки с элементами усиления	Длины (величины) элементов усиления Схемы расположения Частоты расположения	Средства усиления		
		Канатами	Оттяжками	Диафрагмами
				
				
				
				
				
				
				
Оболочки на вынесенном контуре опирания	Стоек, стенок, насыпи, рельефа Пространственных конструкций	Изменение уровня опорного контура		
		Сопряжение с другой формой	Построение независимого опорного контура	
				
				

Рис. 3.5. Приемы и средства формообразования воздухоопорных пневмоконструкций [23]

С помощью силовых поясов и диафрагм можно создавать криволинейные поверхности различного радиуса, в том числе нулевой и отрицательной кривизны. Это, например, куполообразные полусферы, надувные колокола, а также двухстенные рукава, воздухопроводы, матрацы, подушки, панели. Примером подобной конструкции также являются панельные пневмоподъемники.

Таким образом, многопролетные и пневмопанельные конструкции относятся к составным, форма которых задается расстоянием между вертикальными оттяжками и собственными размерами.

Двухслойные оболочечные конструкции

Важное значение для формообразования и пневматического конструирования имеют так называемые, двух- и многослойные оболочечные конструкции.

С учетом того, что рабочее давление в мягких пневматических конструкциях является избыточным относительно окружающей среды, изменение его величины возможно ступенчато, от слоя к слою. Для многослойной конструкции расчетное суммарное избыточное давление можно распределить между надувными слоями. Это позволяет увеличивать несущую способность конструкции без увеличения прочности конструкционного материала, сохраняя при этом повышенную герметичность.

Для решения строительных задач перекрытия мягкие оболочки могут иметь двухслойное исполнение. В отличие от двухслойных пневмопанельных конструкций, где избыточное давление поддерживается между оболочками, соединенными друг с другом, стабильность формы воздухоопорных оболочек обеспечивается разностью давления воздуха для каждой оболочки в отдельности.

Внутренняя оболочка поддерживается разностью давлений в помещениях и в межоболочечном пространстве. Эта разность может быть очень незначительной, так как она противодействует всего лишь собственной массе оболочки.

Примером двухслойной воздухоопорной оболочки может быть такая, наружное полотнище которой напряжено с помощью распорных арок, а между наружным и внутренним помещением создано разреженное пространство для образования между распорными арками криволинейных поверхностей отрицательной кривизны. Двухслойным может быть покрытие в том случае, когда внутреннюю оболочку соединяют с внешней в отдельных точках, создавая воздушные прослойки переменной толщины.

Такое покрытие обладает улучшенными теплотехническими показателями и внешневидовыми преимуществами. В любом случае формообразование двухслойных покрытий обеспечивается, как у обычных воздухоопорных или пневмокаркасных сооружениях, так и у комбинированных, в том числе многопролетных. Неоспоримым достоинством двухслойных конструкций является образование отрицательной кривизны поверхности.

Например, в строительстве решение задач перекрытия также возможно при двухслойном исполнении, характерном для мягких оболочек.

Одиночный канат		Параллельное расположение канатов		
Симметричный	Ассиметричный	Равномерное	Ритмичное	Неритмичное
Положение центра		Радиальное расположение канатов		
Внутри контура плана		Равноугольное	Ритмичное	Неритмичное
За пределами контура плана				
Хордовая		Звездчатая		
Параллельная		Сетчатая		
Многоугольная				

Рис. 3.6. Схемы расположения формообразующих канатов на поверхности оболочек [23]

В отличие от двухслойных пневмопанельных тентовых конструкций, где избыточное давление поддерживается между отдельными оболочками, соединенными друг с другом, стабильность формы двухслойных воздухоопорных оболочек обеспечивается разностью давления воздуха для каждой оболочки отдельно. Внутренняя оболочка поддерживается разностью давлений в помещениях и в межоболочечном пространстве (эта разность может быть очень незначительной, так как она противодействует всего лишь собственной массе оболочки).

В то время как наружное – между межоболочечным пространством и внешней средой. Напряжения двухслойных мягких оболочек равномерно распределено между узлами крепления слоев, которыми могут быть: точечная сварка, перегородки, диафрагмы, катенарные пояса, монтажные швы. Одним из эффективных вариантов двухслойных конструкций являются плоскопанельные и рукавные оболочки, изготовленные из ткани объемной пряжи типа «аэрмат».

Другим вариантом двухслойных конструкций являются рукавные с замкнутым межслойным пространством так называемые торовые конструкции (рис. 3.7) [68]. Свойства подобных оболочек будут рассмотрены отдельно. Спецификой формообразования двухслойных конструкций является различное назначение слоев оболочки. Наружный слой – защитный, внутренний – герметизирующий, промежуточный слой – силовой или технологический, на котором крепится оснастка.

Как видно из рисунка, цилиндрический тороид содержит внешнюю и внутреннюю рабочие поверхности. Внутренняя полость оболочек взаимодействует с текучей рабочей средой. Внешняя поверхность тороида разделена на: наружную рабочую поверхность, плавно переходящую в центральную часть тороида или «струну», и замыкающих наружную и внутреннюю поверхности тороида, два торца в виде замкнутых полуторов.

Что же касается рабочей поверхности сферы, то она состоит из одной периферийной части, испытывающей воздействие внешних деформирующих нагрузок и служащей для крепления комплектующих элементов.

Обе оболочки мягкие и способны совершать движение. Однако, если сфера перемещается путем перекачивания в двух направлениях, тороиду присущи перемещения: путем перекачивания в направлении поперечном оси вращения и выворачивание или наволакивание вдоль оси симметрии.

Очевидно, можно сказать, что тороидная оболочка – это модифицированная сферическая оболочка, у которой методом деформирования получена двустенная поверхность, содержащая положительную, нулевую и отрицательную кривизну.

Следует отметить, что если крепление (точечное, по линии, по плоскости) находится на периферии цилиндрического тороида, то оболочка выворачивается относительно неподвижного места крепления, если крепление в центральной части – наволакивается. Если тороид крепится на торце, то перемещение прекращается за счет запора подвижной внутренней части. Конический же тороид в равновесном состоянии стремится переместиться в сторону большего торца.

Меняя определенным образом места крепления и способ каркасирования цилиндрического тороида, можно регулировать его форму, напряжения и направление его перемещения под действием внешней приложенной силы.

С помощью перечисленных перемещений можно создать, например, пневмодвижитель, осуществляющий движения перистальтического насоса.

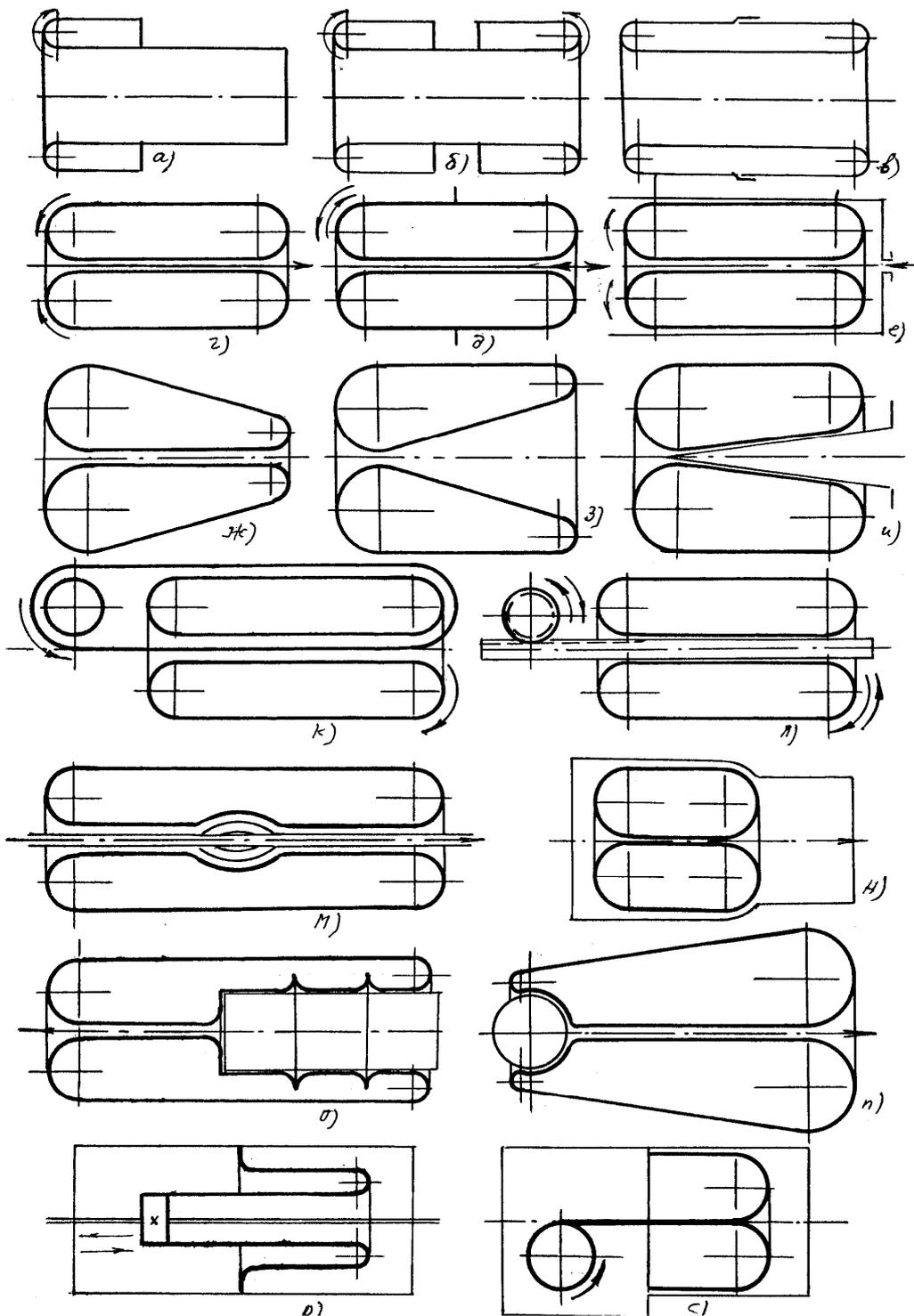


Рис.3.7. Конструктивные схемы двухслойных рукавных торовых оболочек:
 а, б, в – схема сборки торовой оболочки; *выворачивание цилиндрического тороида*: г, д – центральным телом; е – сжатым воздухом; *выворачивание конического тороида*: ж, з – натяжением поверхности, и – изменением радиуса торцев; *виды привода*: к – гибкий, л – реечный; *работа торовой оболочки*: м – сжатие деформируемого объекта, н – распор; *мягкий захват*: о – цилиндрическим тороидом, п – коническим тороидом; *изменение объема*: р – диафрагменным, с – трубчатым торовым элементом

Итак, трансформация мягких оболочек в многослойные повторяет камерные конструкции, существовавшие в прошлом, когда еще не было легких синтетических материалов, покрытие которых герметизирующими материалами позволило отказаться от тяжелых резиновых камер.

В то же время варианты двухслойных оболочек без внутренних стяжек позволили открыть новые свойства оболочек – перемещения слоев относительно друг друга на так называемой воздушной прослойке. Эти перемещения получили название «выворачивание» и «наволакивание».

Трансформируемые мягкие оболочки

Мягкие оболочки обладают подвижностью и силовыми качествами (см. рис.3.4). Представление о их кинематических возможностях дает конструкция мягких сильфонов или мягких шарниров (см. рис. 3.4 9, 12). Мягкие шарниры можно использовать в системах танкеров для передачи топлива на ходу, мойки отсеков, в трапах, компенсаторах. Они нашли применение в гибких ограждениях судов на воздушной подушке (см. рис. 3.4 11,14,15). Распространение получили шарниры гофрированные, цилиндрические из материалов ортотропных «одностороннего растяжения», конструктивно складчатых, присобранных на продольных и кольцевых стяжках.

Торовидные гофры гофрированных шарниров создают по специальной технологии. Впадины подкрепляют кольцевыми стяжками или жесткими кольцами и вставками. От продольных перемещений шарнир удерживает пара стяжек. Силовые элементы удобны для подтягивания и подъема грузов, механизмов и их деталей, например, при шабровке подшипников. Мягкие силовые элементы (см. рис. 3.4 2, 16, 21, 22, 25, 26) применяют в надувных трапах, в устройствах, дистанционно открывающих световой люк, систему вентиляции; в кантователях; для разгрузки кузовов автомашин и железнодорожных грузовых платформ [60]. Если пневматическую цилиндрическую оболочку разделить внутренней продольной перегородкой, то такая конструкция может быть представлена как панель с автономными переборками. Из таких подушкообразных конструкций с замкнутыми камерами можно создавать плоские или управляемые формы, которые могут сворачиваться и расправляться только внутренним давлением.

Из пневматически напряженных подушек с радиальными промежуточными стенками можно создавать куполообразные формы, поскольку они образуют поверхности с положительной и отрицательной кривизной. Использование подкрепляющих тросов в конструкциях с промежуточными стенками позволяет создавать трансформирующиеся сооружения, элементы которых образуют плоские поверхности, например, скрепленные тросами. В этом случае площадь боковых стенок подушек может быть сведена к минимуму за счет плотного прижатия элементов стенок при сборке пространственной конструкции.

Наличие в оболочках замкнутых полостей, способных сохранять индивидуальное давление, позволяет регулировать натяжение стенок, тем самым, создавая условия для изменения формы только от давления. Для трансформирования

(управления) формами пневматическим способом необходимо формировать отдельные камеры (см. рис. 3.4 5, 23) в форме парного силового элемента со стяжками, обладающими большой подвижностью в горизонтальном направлении или закрепленными по плоскости (см. рис. 3.4 6, 20).

Составные геометрические формы мягких оболочек

Пневматические напряженные оболочки можно использовать в соединении с другими конструктивными элементами. Повышение устойчивости конструкции с помощью вертикальных диафрагм, раскрепление с помощью продольных мембран и тросовых сетей, усиление пневмоконструкции сжатыми сетками, стержнями; введение в конструкцию автономных герметичных камер – все это позволяет регулировать силовые свойства оболочечных конструкций.

Примером составных форм являются, например, «шпренгельные» конструкции. Это – рукавные конструкции с боковыми ответвлениями из мягких (надувных) или жестких материалов, раскрепленных между собой тросами или сеткой. Такая пространственная полужесткая конструкция может быть использована для создания плоских несущих перекрытий, мостов, каркасов, арок [18].

Пневматически напряженные арки и каркасы в комбинации с тентами или сетью позволяют создавать разнообразные варианты архитектурных форм. Мембраны и тросовые сетки можно опирать не только на вертикальные арки, но и на наклонные или перекрещивающиеся.

Таковыми конструкциями являются воздухоопорные сооружения, подкрепленные надувными арками. Комбинация этих элементов позволяет использовать их при кратковременной потере давления в рабочей полости при въезде и выезде транспорта через открываемые торцы.

Весьма разнообразны по форме комбинации открытых тентовых конструкций с пневмонапряженными стержневыми или оболочечными опорами. Такие конструкции могут эксплуатироваться отдельно и в комплекте, в зависимости от сезонных климатических условий (павильоны, спортивные сооружения).

Многообразие форм значительно увеличится, если допустить разницу в величине напряжений по поверхности пневматически напряженной оболочки.

В этом случае число сочетаний геометрических форм не имеет ограничений. Существенным признаком пневматических форм являются поверхности двойной кривизны. Другие поверхности, в том числе и с нулевой и отрицательной кривизной, осуществляются в комбинации с распорными каркасами или разгружающими мембранами (сетями) (см. рис 3.6).

Как видим, составные геометрические формы весьма разнообразны. Причем, перспективным, на первый взгляд, кажется сочетание мягких оболочек с жесткими каркасирующими элементами. Однако следует помнить, что все-таки основными причинами разрушения мягких оболочечных конструкций является не разрыв от потери прочности материала, а раздир от контакта с острыми выступами жестких элементов конструкций, то есть жестким оболочкам – жесткие каркасы, мягким – мягкие.

Оболочки управляемых форм

Среди мягких оболочек существуют так называемые перемещаемые оболочки управляемой формы. Это, как правило, многокамерные оболочки, состоящие из сочлененных камер (отсеков), изменение давления в каждой из них оказывает влияние на давление в сочлененной камере.

В зависимости от характера соединения натяжения, возникающие в материале при формоизменении оболочки, равномерно передаются на перемещаемые детали и объекты. Одна из важных функций оболочек управляемой формы заключается в вовлечении в работу той или иной группы внутренних усилий.

Например, цилиндрическая труба, сжатая двумя плоскостями (рис.3.8 *a*), передает на плоскости перегородок распределенные сжимающие усилия, а на внешние боковые поверхности – растягивающие.

Мягкая оболочка (рис 3.8 *c, d*) позволяет передавать усилия сжатия силового цилиндрического элемента, установленного на одной из перемещаемых направляющих, и свободно перемещаться ненапряженному элементу вдоль противоположной направляющей. Это позволяет придавать распорному элементу переменную по величине жесткость сжатия и создавать изгибающий момент вокруг сжатых элементов.

На (рис.3.8 *ж*) представлен подтягивающий цилиндрический (сферический) силовой элемент, высота перемещения груза которого равна разности между половиной длины окружности и диаметром образца.

Оболочка, состоящая из цилиндрических панелей, имеющих в каждой полости продольную диафрагму, позволяет создавать различное давление в полости, тем самым управлять поперечной жесткостью и создавать изгибающий момент (рис. 3.8 *н*).

Аналогичное формоизменение обеспечивают цилиндрические стойки с поперечными перегородками (диафрагмами) (рис. 3.8 *з – м*). При этом форма полости и их количество позволяют создавать различные формы стоек, изгибать их вокруг заданного отсека, обеспечивать несущую способность и компенсировать перемещения. Изменив условия закрепления на опоре, можно получать мягкие оболочки, обладающие заданной жесткостью на изгиб и использовать их в несущих перекрытиях, арках, пространственных конструкциях, растягивающих тентовые экраны и тому подобное.

Рассмотренные типы мягких оболочек различаются по многим признакам: форма, условия закрепления на опоре, вид воспринимаемой нагрузки. Однако, поскольку у мягкой оболочки геометрическая форма сильно изменяется, формоизменение ее следует рассматривать в предварительно напряженном состоянии. Тогда следует различать формы элементов как осесимметричные (сфера, линза, тор, цилиндр, конус) и их элементы.

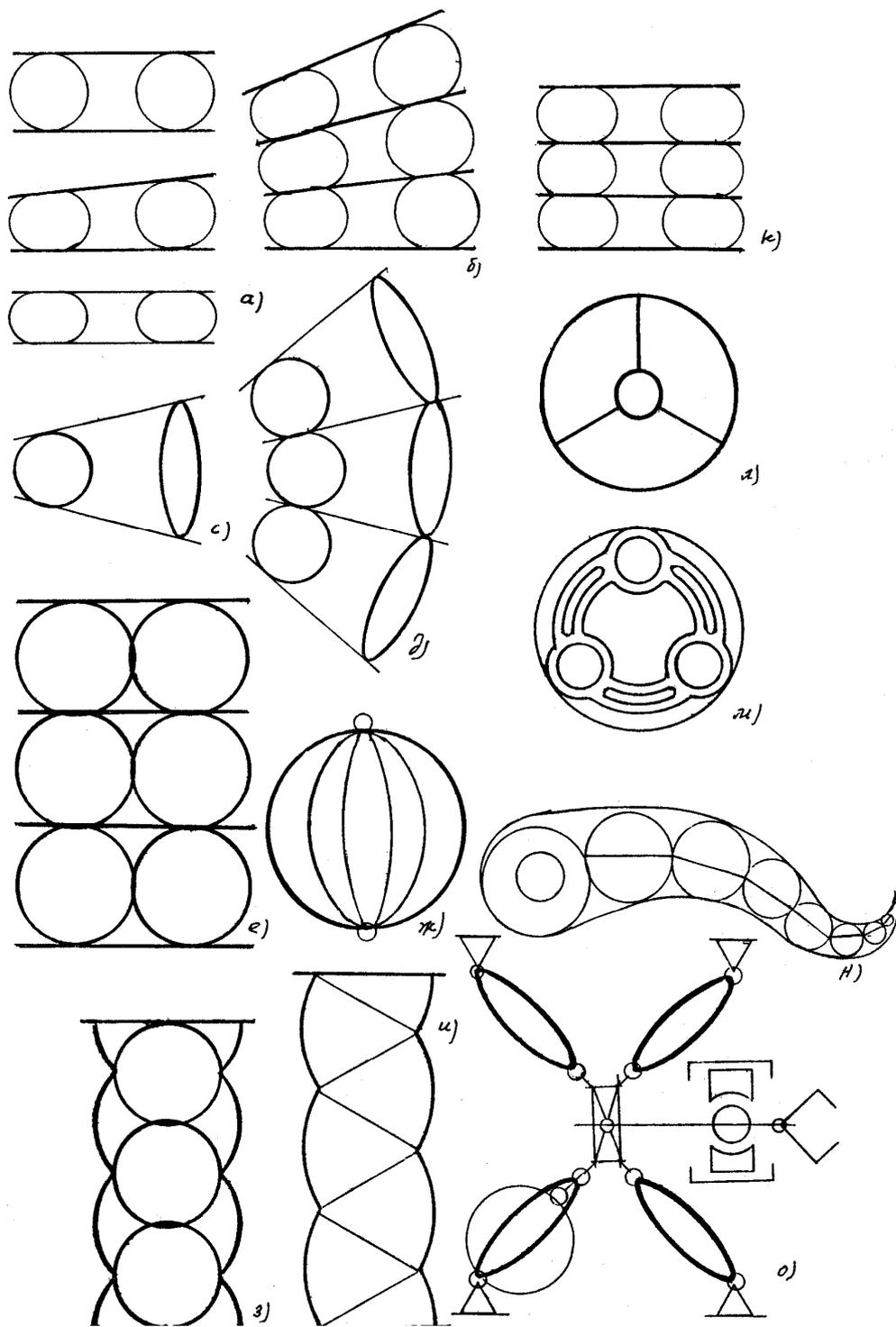


Рис. 3.8. Мягкие оболочки управляемой формы:

а – цилиндрический элемент, работающий на сжатие; б – торовый силфон, испытывающий сжимающие и изгибающие усилия; в – двухсекционная панель с цилиндрическими растягивающими элементами; д – изгибаемый элемент из двухсекционных панелей (в); е – сжимаемый силфон с панелями (в); ж – сферический силовой элемент изменяемой дины; з, и – многосекционные изгибаемые стойки; к, л, м – трехсекционная цилиндрическая стойка; н – изгибающийся элемент ластового движителя; о – оболочечный манипулятор кисти робота

По условиям закрепления: замкнутые, незамкнутые. Креплением по плоскости следует считать такое, при котором все внутренние точки контакта оболочки с опорной поверхностью лежат на этой поверхности либо образуют замкнутую кривую.

Следовательно, оболочки управляемой формы обладают свойством значительно перемещаться под действием натяжения материала. А так как процесс нагружения поверхности отсеков мягкой оболочки управляем, то создаются условия для создания не только формоизменения, но придания оболочечной конструкции движительных функций.

Формообразующие конструкции целевого назначения

С целью создания оболочек целевого назначения, например, пневматических макетов транспортных средств и их элементов, заданные геометрические формы и размеры должны быть максимально приближенными к натурным объектам.

Для создания надувного макета бронетранспортера одна форма может быть достигнута двумя схемами сборки, принципиально отличающимися по конструкции: оболочечной и пневмокаркасной (рис. 3.9, 3.10).

Преимуществом оболочечной конструкции является удобство в эксплуатации, уменьшенная масса, минимальное количество объемов для наполнения рабочим газом, повышенная надежность. Наряду с этим оболочечная конструкция сложна в раскрое, требует значительных трудозатрат при регулировке заданной формы за счет подбора растяжек определенных длин.

Отмеченных недостатков лишена каркасная конструкция. Заданная форма создается путем распора наружного тента внутренними каркасирующими камерами. Однако при этом усложняется условия эксплуатации макета и значительно увеличивается масса изделия.

При выборе решающими стали свойства оболочечной конструкции: удобство при эксплуатации и минимальная масса. Для придания оболочке формы, близкой к объекту, применен ленточный каркас с прямоугольными ячейками пространственной конструкции, узлы ячеек которой снабжены соединительными петлями для стягивания поверхности, снабженной параболическими поясами. В результате регулировки длин поясных петель удалось создать форму, близкую к плоским поверхностям, и имитировать форму натурального объекта. Окончательное внешнее сходство достигалось за счет окраски и наклейки аппликаций на наружный съемный тент.

При создании макета наряду с меридиональным применен раскрой по геодезическим линиям поверхности. Для создания маскировочных укрытий применим метод распора тента формообразующими и формоизменяющими надувными арками и стойками. Для удержания на заданной высоте плоского покрытия потребовались пневматические опоры различной конструкции и длины, воспринимающие распределенную массу тента, в том числе со снежным покровом.

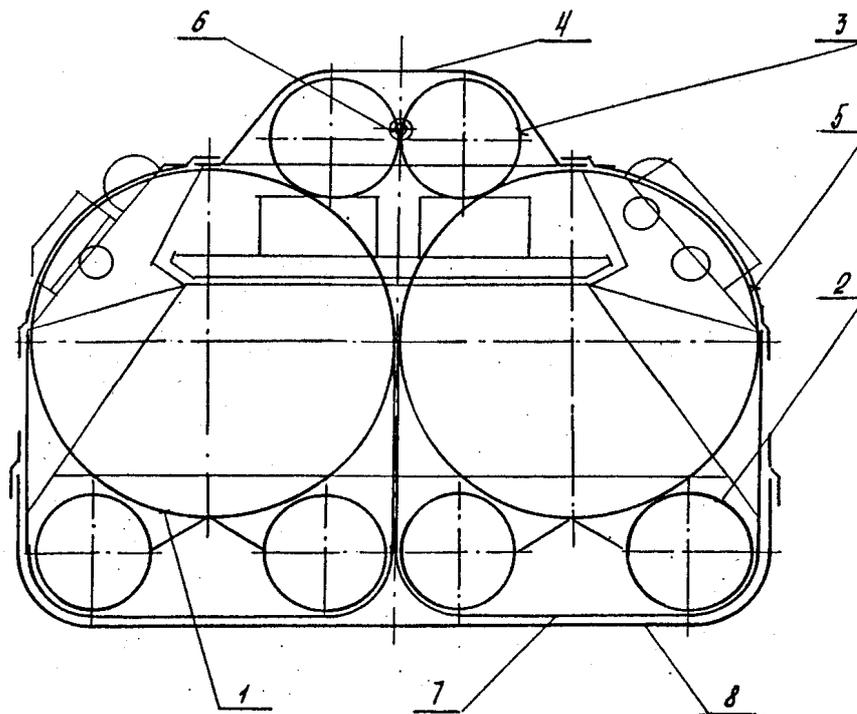


Рис. 3.9. Схема оболочечной конструкции надувного макета бронетранспортера:
 1 – каркасирующий баллон; 2 – опора; 3 – тор; 4 – мягкий колпак; 5 – тент; 6 – стержень; 7 – ленточный пояс; 8 – резино-тканевый поддон

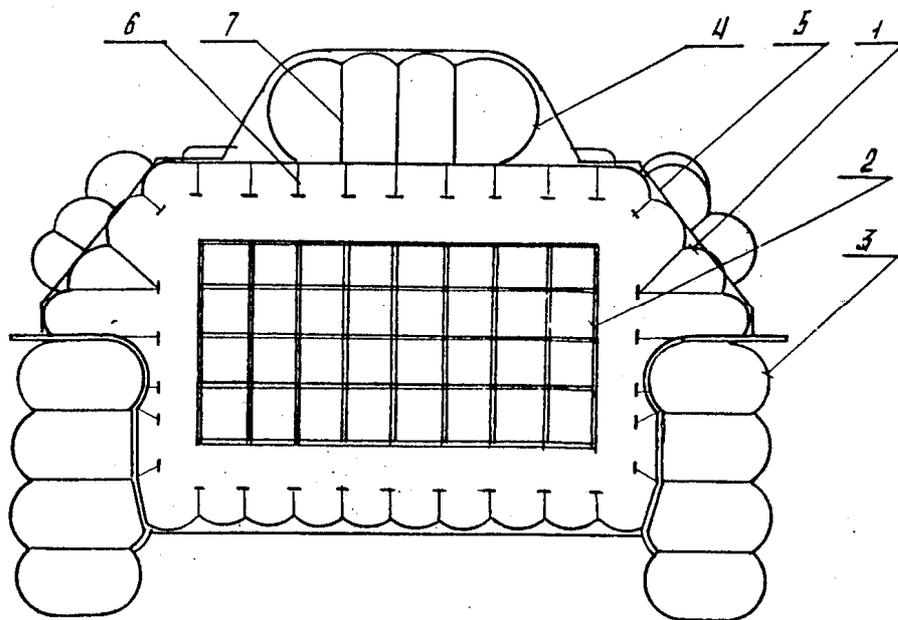


Рис. 3.10. Схема пневмокаркасной конструкции надувного макета бронетранспортера:
 1 – надувной корпус; 2 – ленточный каркас; 3 – колесо; 4 – башня; 5 – тент; 6 – стягивающие силовые пояса; 7 – ленточные стяжки

Таковыми опорами могут быть известные цилиндрические стойки: секционированные, изменяемой длины; торообразные со стягивающими лентами, с компенсатором давления.

С целью изменения внешнего вида и формы укрытия применяется пневматический каркас, двухпозиционные камерные или панельные конструкции, перемещающий подъемник, а также составные каркасы из цилиндрических и других пневмоэлементов (рис. 3.11).

Следовательно, формообразование мягкой оболочки может осуществляться путем раскрытия поверхности оболочек, использования наружного и внутреннего каркасирования и раскрепления, а также натяжения наружного покрытия формообразующими надувными распорными элементами.

Проектирование, например, мягких домкратов связано с обеспечением ими максимальной грузоподъемности или высоты подъема груза. Такие свойства обеспечиваются выбором геометрической формы с определенным соотношением размеров оболочки (основания к высоте). Установлено, что максимальной площадью центрального сечения обладают линзообразные оболочки и квадратные в плане (подушечные), имеющие ряд технологических преимуществ, в частности, плоский раскрой элементов и прямолинейные швы, что дает возможность повысить прочностные свойства конструкций (рис. 3.12).

Аварийные подъемники фирм «RFD» (Англия) и «Vetter» (Германия) представляют собой панельные конструкции, собранные в пакеты. Они обеспечивают заданную высоту подъема. Поперечное сечение элементов сохраняется постоянным благодаря свойствам используемого конструкционного материала типа «аэрмат». Он представляет собой ткань объемного переплетения, верхнее и нижнее полотнища которого соединены между собой уточными нитями заданной длины.

Панельная форма элементов может достигаться при использовании в конструкции оболочки (рис. 3.13) формообразующих силовых поясов и перегородок. Особенностью низконапорных подъемников фирм «Lampe» и «Vetter» (Германия) являются кубическая и бочкообразная формы оболочек (рис. 3.14). Оболочки подводных подъемников имеют форму капли, тороида, цилиндра с креплением по образующим или в точке [60].

Следует отметить, что для силовых пневматических конструкций более важным параметром оболочки является не внешняя форма, а соотношение геометрических размеров, влияние рабочей среды на формообразование оболочечных конструкций.

Таким образом, основными приемами формообразования мягких оболочек являются: раскрой (конфигурация, направление нитей и швов, количество элементов); деформирование, использование разгружающих элементов (лент, канатов, сетей; поясов, диафрагм); каркасирование, закрепление (по образующей, по плоскости); введение многослойности, многопролетности, автономных отсеков и полостей в конструкции, формообразующих элементов.

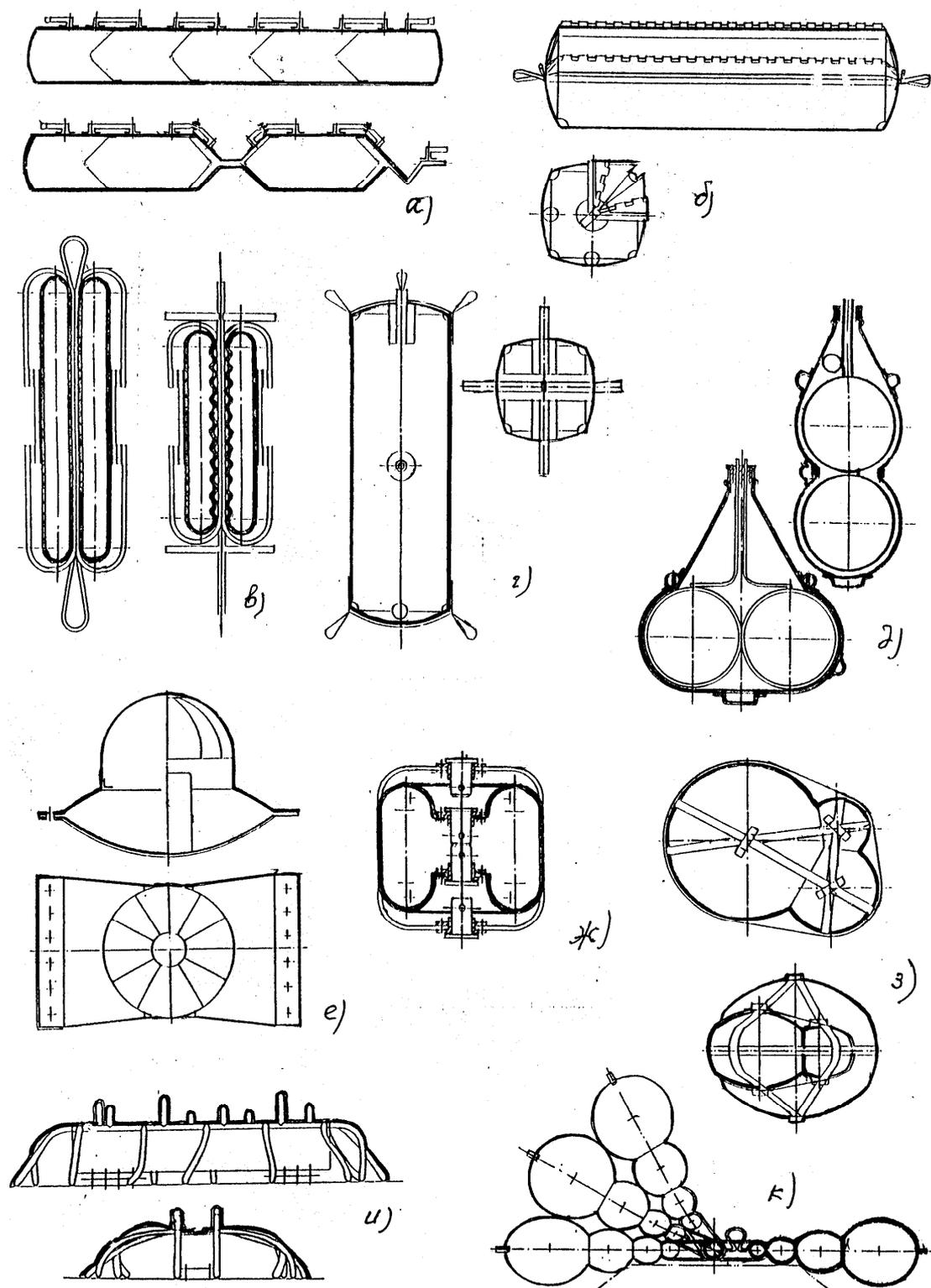


Рис. 3.11. Формообразующие и формоизменяющие надувные распорные элементы:
 а – секционированная пневмостойка; б – пневмостойка с компенсатором давления; в – торообразный цилиндр изменяемой длины; г – пневмостойки разной длины; д – двухпозиционная формоизменяющая оболочка; е – деформирующий элемент; ж – стойка изменяющейся длины; з – оболочечный формоизменяющий элемент; и – пневмокаркасное сооружение; к – формоизменяющаяся панельная оболочечная пневмонакладка

Влияние рабочей среды на формообразование оболочечных конструкций

Кроме пневматически напрягаемых существуют также мягкие оболочки предварительно напряженные жидкостью или сыпучими материалами. Такие емкости существуют и в природе. Примером могут служить плоды, капля вязкой жидкости и другое.

Для резервуаров требования по герметичности оболочки занижены. При этом величина давления растет по мере увеличения глубины жидкости. Давление жидкости, растущее книзу, определяет типичную каплеобразную форму поверхности. В каплях жидкости мембранные напряжения равны в каждой точке поверхности во всех направлениях, пока капля находится в статическом равновесии. При нагружении равномерно распределенным давлением газа в оболочке резервуара возникает напряженное состояние, отличное от случая нагружения жидкостью.

Обусловленная этим деформация резервуара уменьшается при применении малодеформируемых материалов для изготовления оболочки. Резервуар такой конструкции, постоянно нагруженный давлением жидкости или газа, на любой стадии нагружения обладает стабильной формой (рис. 3.15) [60].

В общем случае эластичные емкости могут иметь разнообразнейшие формы. Как правило, напряжения в оболочке возрастают по мере приближения к точке подвеса (капли). Поэтому на практике резервуары конструируют с разгружающими тросами. Примечательно, что резервуары можно не только подвешивать, но и ставить. Это возможно за счет хорошо развитой поверхности нижнего основания резервуара. При проектировании транспортных емкостей необходимо учитывать прямоугольную форму грузовых платформ, в которые лучше вписываются цилиндрические емкости [48].

Таким образом, напряжение мягкой оболочки жидкостью осуществляется гидростатическим напором, формообразование которой происходит под действием массы жидкости и стремится к форме капли, а так как жидкость несжимаема, то перечисленные выше приемы формообразования мягких оболочек, предварительно напряженных упругим газом, неприменимы. Единственным способом формообразования является раскрой частично разгруженный внешними силовыми элементами (тросами).

Выводы

По геометрической форме пневматические конструкции представляют собой либо осесимметричные поверхности вращения, либо несимметричные, производные в плане элементы первых, образующиеся при использовании конструктивных перегородок, диафрагм, каркасов, разгружающих тросов, а также анизотропных оболочек с различным модулем упругости в направлении нитей основы и утка.

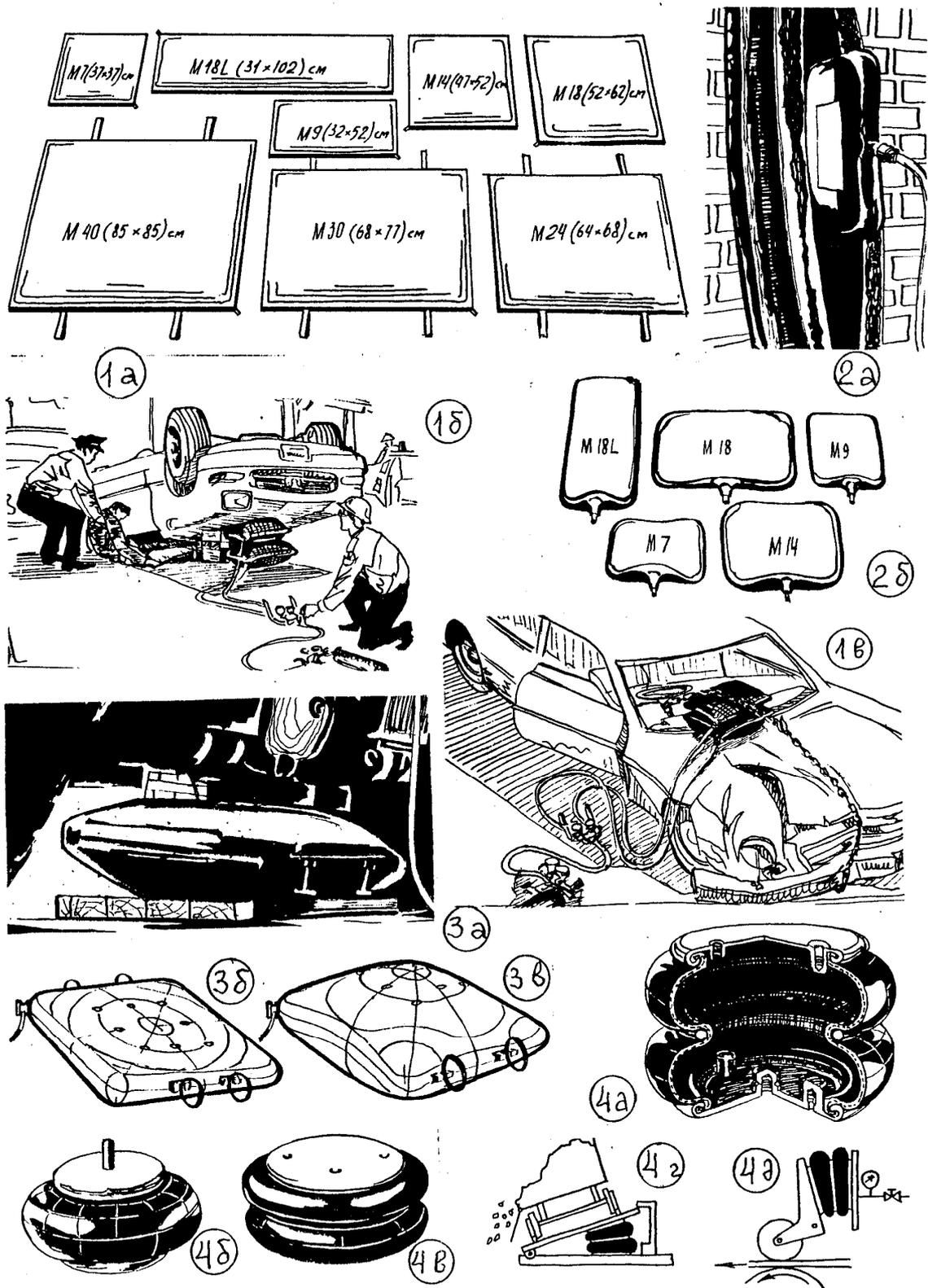


Рис. 3.12. Резино-тросовые высоконапорные эластомерные подъемники: 1а, 1б, 1в – миниподъемники фирмы «Vetter»; 2а, 2б – миниподъемники, изготовленные методом намотки; 3а, 3б, 3в – пневдомкраты фирмы «Kleber»; 4а, 4б, 4в, 4г, 4д – резинометаллические пневмоподвески фирмы «Phoenix»

Основным методом формообразования оболочечных конструкций является раскрой. Эластичные свойства материала играют роль податливого ограничивающего каркаса, придающего оболочке заданную форму. При этом используются свойства как самих нитей и конструкции ткани, так и направления раскроя.

Другим из основных способов формообразования мягких конструкций является каркасирование. При этом в качестве каркасов могут выступать как надувные, так и жесткие каркасирующие элементы. Оболочка принимает формы каркасов, а свободная от контакта поверхность стремится к поверхности двоякой кривизны.

Формообразование путем деформирования поверхности мягкой оболочки внешними силовыми нагрузками возможно благодаря жесткости каркаса и упругих свойств рабочей среды. Такой метод проектирования новых форм позволяет решать архитектурные и инженерные задачи, а также снимать и перераспределять погонные растягивающие усилия в системе напряжения оболочки.

Эксплуатационная геометрическая форма оболочек отличается от раскройной и зависит от способа деформирования, причем как внешней сжимающей нагрузкой, так и внутренними распорными усилиями, распределенными по свободной внутренней поверхности или узлам крепления оболочки на жестком основании.

Многопролетные и пневмопанельные конструкции относятся к составным, форма которых задается как собственными размерами, так и расстояниями между растяжками и каркасами.

Трансформация мягких оболочек в многослойные бескамерные позволили открыть такие свойства оболочек, как перемещение на воздушной прослойке центральной части, так называемое «выворачивание» и «наволакивание» конических и цилиндрических тороидов.

Жидкость и сыпучий материал оказывают влияние на формообразование мягких оболочек, благодаря таким свойствам рабочей среды, как масса и угол естественного скоса.

3.2. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТОРОИДНЫХ ОБОЛОЧЕК

Мягкая пневматическая конструкция работоспособна только при возникновении механического напряжения материала эластичной оболочки. Избыточное давление рабочего газа или жидкости и удельная прочность материала определяют энергетические свойства системы *оболочка – рабочая среда*, геометрическую форму и ее изменение под нагрузкой. Материал оболочки в идеале абсолютно тонок, прочен, эластичен на изгиб, невесом, нерастяжим.

Собственно оболочка в рабочем режиме не имеет постоянной формы и фиксированных геометрических размеров. Если с ее помощью совершается некая механическая работа, то оболочка находится в деформированном состоянии, оптимальном для напряженного равновесия. При этом мягкие оболочки имеют

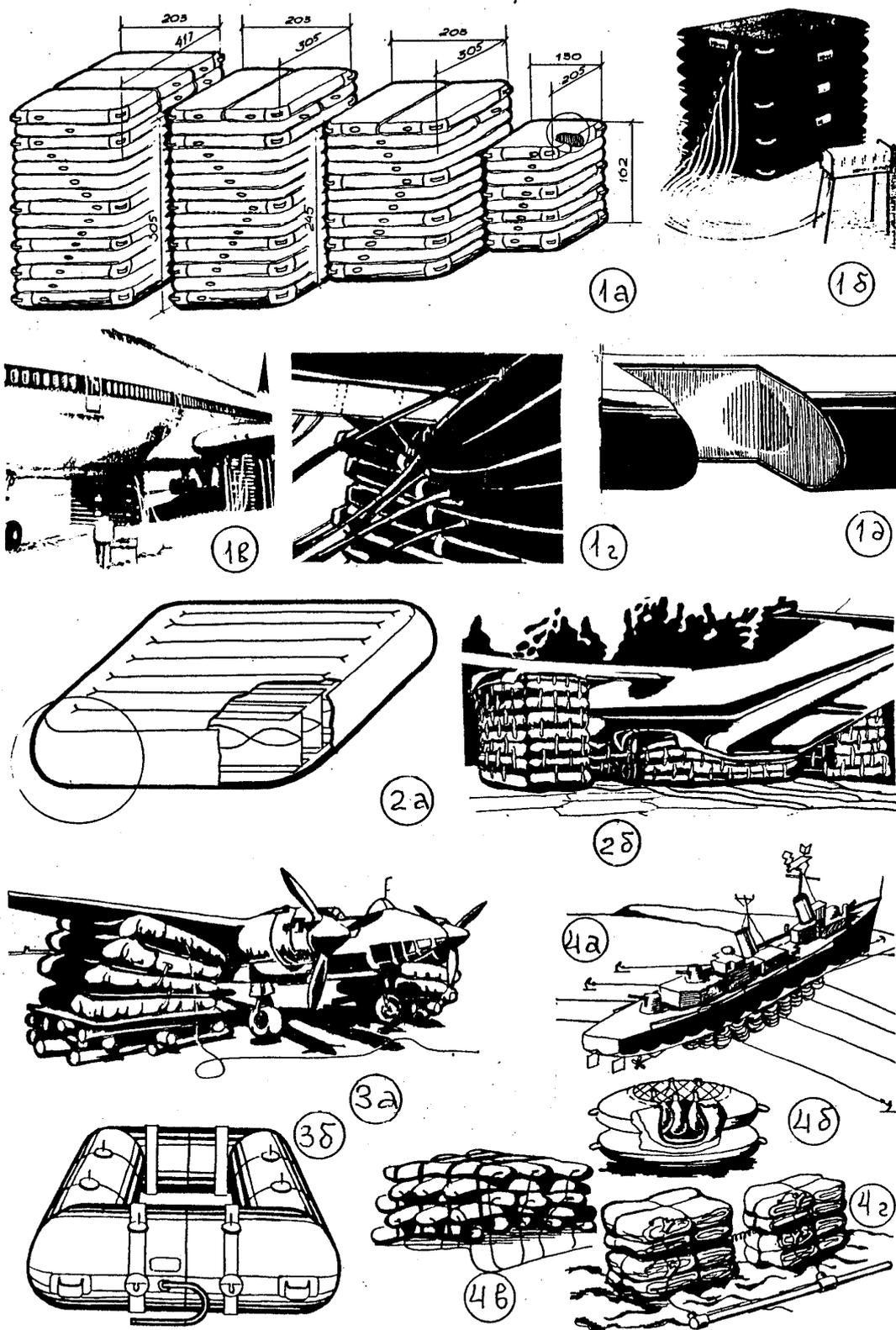


Рис. 3.13. Низконапорные пневмоподъемники повышенной высоты перемещения груза: 1а, 1б, 1в, 1г, 1д – панельные подъемники из объемного текстильного материала типа «аэр-мат»; 2а, 2б – панельные подъемники матрасного типа; 3а, 3б – торообразные пневмоподъемники; 4а, 4б, 4в, 4г – использование пневмоподъемников для снятия кораблей с мели

общие качественные свойства (размерность, число кривых, ограничивающих ее поверхность), а топологическая связность их поверхности остается неизменной. Все формы гомеоморфны, а метрические характеристики изменяются за счет образования складок в ненапряженных зонах. При заполнении рабочей средой геометрические размеры оболочек могут изменяться в пределах от долей миллиметра до десятков и сотен метров. Толщина же оболочки остается постоянной, несоизмеримо меньшей величины перемещений при ее деформировании.

Наиболее интересны с точки зрения комплексных функциональных свойств так называемые кинематически подвижные, замкнутые, двустенные, тороидальные мягкие оболочки.

Систематизация торовых оболочек

Задачами настоящего раздела являются: систематизация условий существования тороидальных оболочек; определение условий формообразования, механизма напряжения оболочки; разработка технологии изготовления на базе «тополого-геометрического» принципа, определяющего допустимые физические преобразования пневмоконструкций, степень свободы их перемещения в зависимости от приложенных нагрузок; отличительные условия их эксплуатации.

Эластомерные конструкции в общем виде отличаются от жестких (гибких, тонкостенных и прочих) пневмоконструкций условиями существования своей пневматической формы. Рабочим элементом этих конструкций является газ в сжатом состоянии, заключенный в герметичную прочную мягкую оболочку. Поэтому в общем виде одним из условий существования тороидальной оболочки является замкнутый объем.

Основными элементами пневмоконструкций являются: эластичная оболочка, рабочая среда (газ), газораспределительная система с трубопроводами, источником газонаполнения, контрольными приборами.

Как отмечалось выше, основные приемы и средства формообразования эластичных оболочек основаны на систематизации их конструктивных особенностей и взаимодействии с окружающей средой.

В строительной практике принята классификация форм поверхностей по гауссовой кривизне: нулевой кривизны (цилиндрические, конические); отрицательной кривизны (торовые), положительной кривизны (сфероиды).

Таким образом, характерным отличием формообразования пневматических конструкций из эластомерных материалов (не жестких) является действие сжатого воздуха (не гравитация и не каркасная жесткость). Эксплуатационные характеристики определяются взаимодействием оболочки с рабочим газом и рабочими органами механической системы, а также функциональным назначением. Тороидные поверхности часто встречаются в технике и характеризуются высокой стабильностью формы при осевом сжатии, подвижностью при качении, осевом перемещении, а также (при определенных геометрических параметрах)

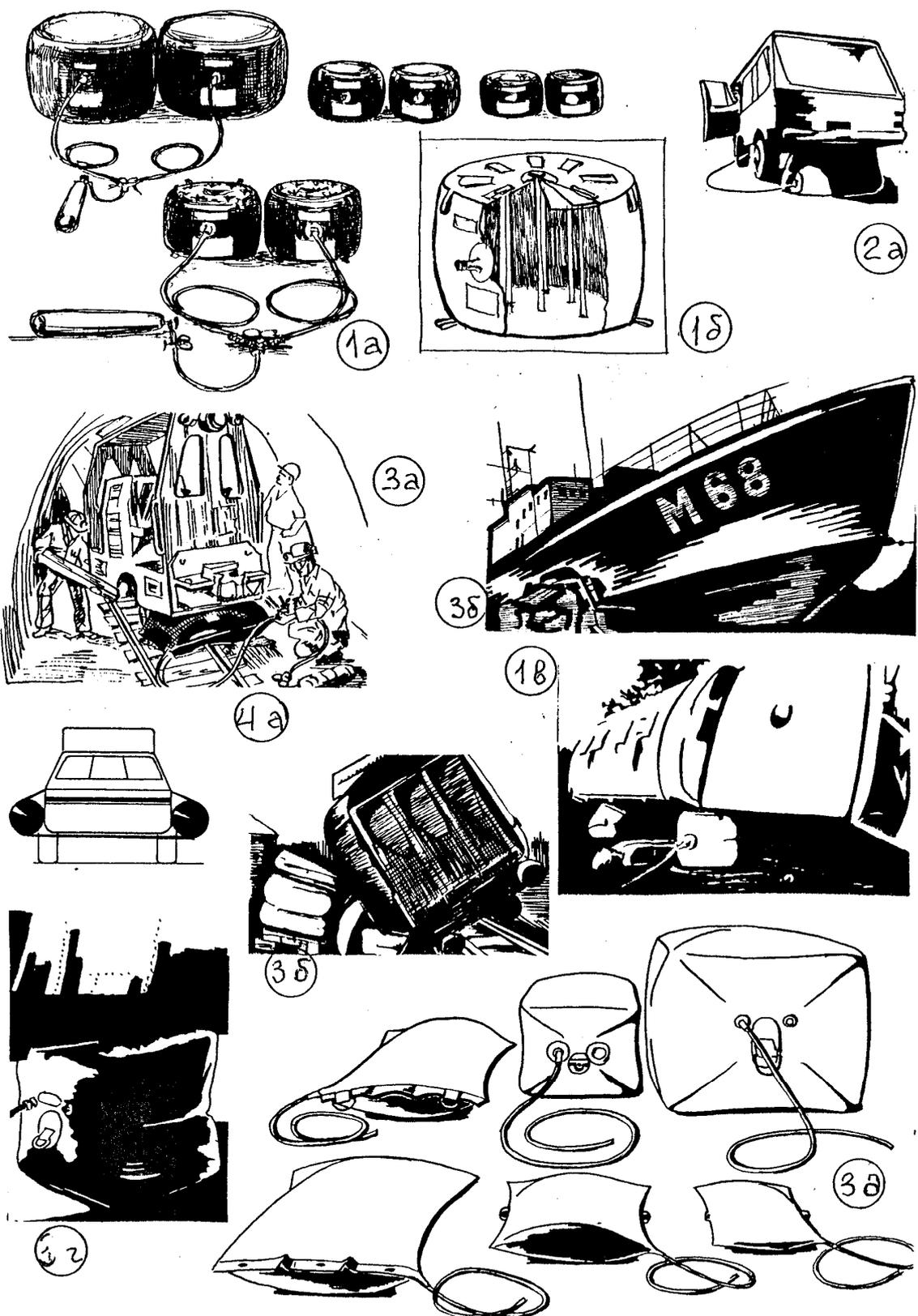


Рис. 3.14. Резино-тканевые пневмоподъемники низко- и высоконапорные: 1а, 1б, 1в – низконапорные (цилиндрические) эластичные подъемники фирмы «Vetter»; 2а – автодомкрат, работающий от выхлопных газов; 3а, 3б, 3в, 3г, 3д – резино-тканевые высоко- и низконапорные подъемники фирмы «Lampe»

выворачиваемостью внутренней поверхности или наволакиваемостью наружной. Такие оболочки выделены в так называемые двустенные, тороидные, с цилиндрической или конической внутренней или внешней формой поверхности (рис. 3.7).

В общем виде, в зависимости от соотношения величин радиуса образующей окружности (r) и расстояния от оси до центра образующей окружности (R) известны три разновидности торов (см. рис. 3.3) [84].

- открытый тор, при условии ($r < R$), когда окружность радиуса (r) не пересекает ось вращения;
- замкнутый тор, при условии ($r = R$), когда окружность радиуса (r) касается оси вращения;
- самопересекающийся тор, при условии ($r > R$), когда окружность радиуса (r) пересекает ось вращения.

При деформировании замкнутого тора цилиндрическим или коническим каркасом (трубой, внутренний диаметр которой меньше диаметра внешней поверхности тора), образуется поверхность с нулевой кривизной, а тор вырождается в так называемый цилиндрический или конический тороид (или тороидный цилиндр и конус).

Тороид состоит из торцевых частей – поверхности замкнутого полутора, внешней и внутренней поверхности (нулевой гауссовой кривизны) различной протяженности. Новая поверхность тора (деформированная) – является тороидной, образованной двумя поверхностями нулевой кривизны, замыкающимися торцевыми замкнутыми полуторами.

Тороид может быть замкнутым, состоящим полностью из мягкой оболочки, или комбинированным (полужестким). Мембранный тороид состоит только из торцевой части, рукавный – из внутренней и наружной поверхности, соединенной одним торцем. Часть тороида рукавной конструкции может быть выполнена из жесткой трубы, образующей вместе с ним замкнутую полость.

Во внутренней части тороида может располагаться центральное тело: жесткий стержень постоянного или переменного сечения, гибкая связь (бесконечный ремень, лента, канат). В полости тороида может быть расположена другая торцевая оболочка или другое геометрическое тело, или механизм (любой формы поверхности), необходимые для создания нового механизма [91].

Принципиальным различием перемещения вдоль оси от известных пневматических конструкций поршневого типа является: качение оболочки тороида относительно наружной или внутренней направляющей, без скольжения за счет воздушной подушки в полости. Поступательный механизм не требует смазки, уплотнения. Отсутствие проскальзывания между оболочкой и опорой позволяет использовать механизм на транспортных средствах, преодолевающих неровности заданной высоты, например, ступеньки и пороги. Тороидные механизмы практически не ограничены в величине рабочего хода.

Благодаря сложению скоростей перемещение их центрального тела происходит вдвое быстрее самого тороида. По наклонной поверхности под действием

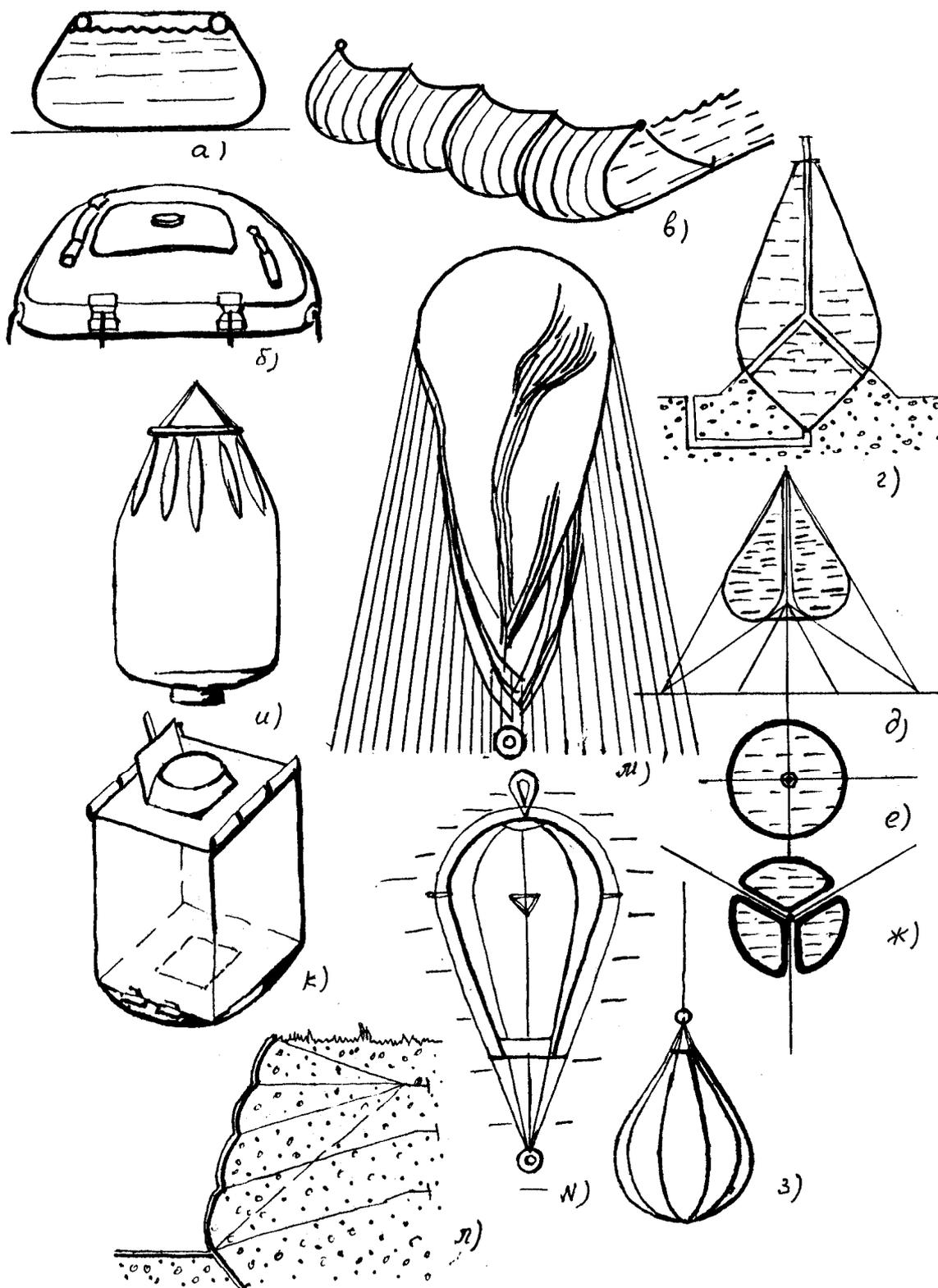


Рис. 3.15. Схемы формообразования оболочечных конструкций для жидких, сыпучих рабочих сред и других грузов:

а, б, г – з – мягкие емкости и резервуары для жидких грузов; и, к – мягкие контейнеры для сыпучих грузов; м – аэростат; н – аквастат; в, л – мягкие плотины, перемычки

силы тяжести происходит самоперекачивание цилиндрического тороида, заполненного жидкостью.

Конический тороид под действием внутреннего давления, напрягающего его поверхность, перемещается в сторону широкого основания. Причем, чем больше угол конуса тороида, тем больше разница в размерах радиуса кривизны торцев, тем больше сопротивление изменению условия равновесия. Аналогичный результат достигается у цилиндрического тороида, деформированного снаружи конической поверхностью (трубы) или по внутренней поверхности конусным центральным стержнем (см. рис. 1.4).

Итак, перемещение тороида путем выворачивания внутренней части существенно отличается от качения колеса катка и аналогично перемещению мягкой гусеницы.

Классификация форм и конструктивных отличий эластичных тороидных механизмов

В табл. 3.1 предложена классификация в том числе и тороидных оболочек по форме и конструктивным отличиям, дающая представление о широких возможностях использования эластичной механики во всех отраслях промышленности.

По принципу формообразования, конструктивным отличиям и технологии изготовления тороидные оболочки можно разделить на деформируемые, перемещаемые, трансформируемые, модифицированные.

Деформируемые тороидные оболочки образуются из оболочек простых геометрических форм, путем приложения к их поверхности деформирующего усилия (сосредоточенная нагрузка, стяжка, гибкая перегородка, жесткий каркас). При этом поверхности приобретают кривизну за счет внутреннего напора, а излишек материала собирается в складки.

Перемещаемые двустенные оболочки, в основном, это цилиндрические или конические тороиды различных конструкций и размещения наружного каркаса и внутреннего тела (свободные, трубчатые, каркасные, рукавные, мембранные) (рис. 3.16).

Трансформируемые оболочки представляют собой, в основном, конические тороиды или системы оболочек различной формы, изменяемой формы и размеров, программируемого действия, различающиеся конструкцией, объемом и способом крепления комплектующих их элементов.

Модифицированные тороиды – это комбинированные мягкие оболочки, с полужестким каркасом или ограничивающими перемещение гибкими тягами.

Основные разделы классификационных признаков тороидных оболочек представлены в табл.3.1

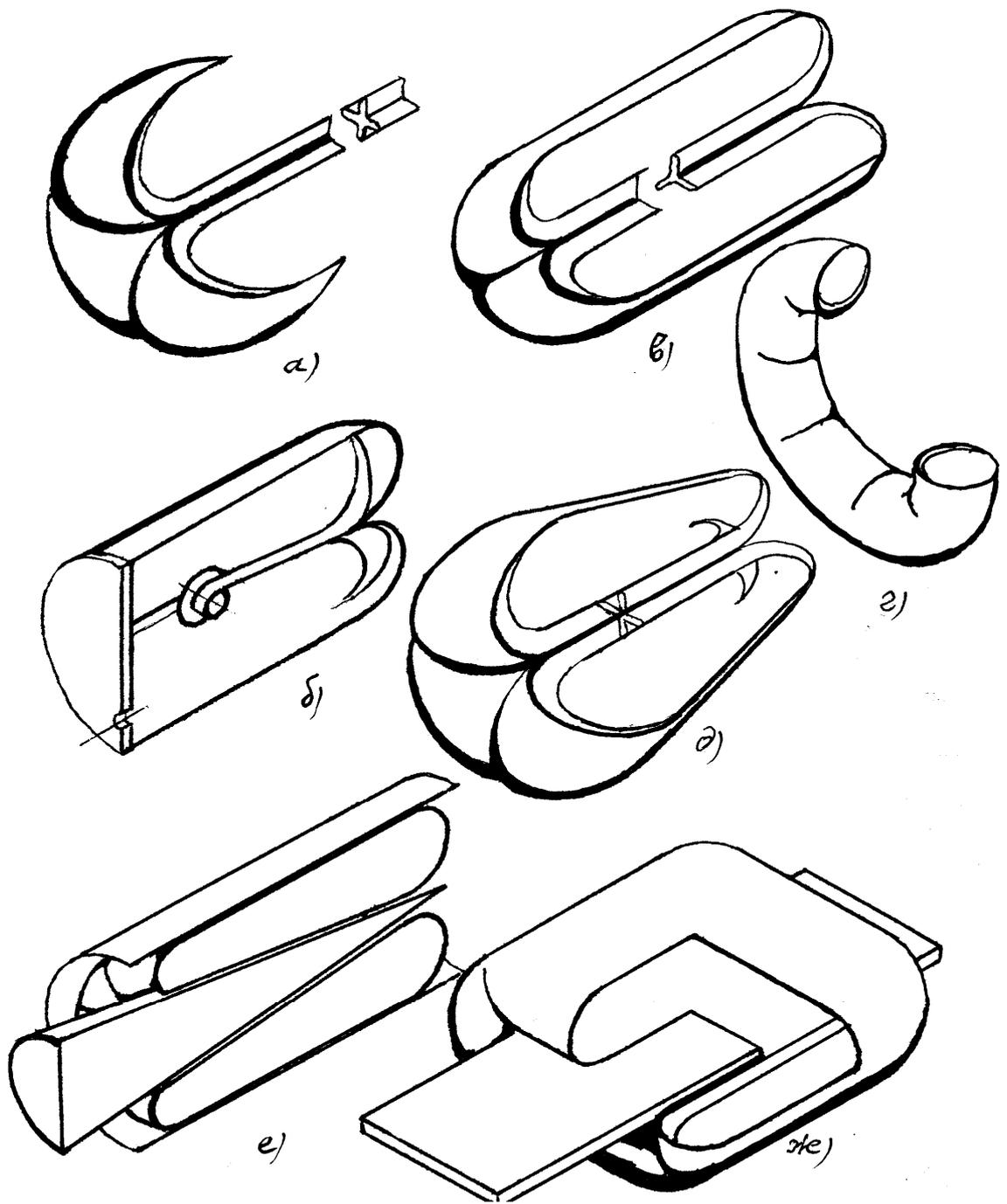


Рис. 3.16. Виды тороидных оболочек:
 а, б – разомкнутые (диафрагменные, рукавные); в, г, д – замкнутые (цилиндрические, трубчатые, конические); е, ж – комбинированные (с внешним и внутренним телом)

Главным элементом мягкого тороида является прочная и герметичная эластомерная оболочка. Постоянный и непрерывный поиск своего равнонапряженного состояния под воздействием внешних и внутренних сил – ее основная функция в составе эластичной машины или механизма. Другими важнейшими конструктивными элементами, расширяющими функциональные возможности эластичного механизма, являются центральное внутреннее и периферийное внешнее тела, взаимодействующие с эластомерным тороидом, функции которого уникальны.

Как видно из рис. 3.16, цилиндрический тороид содержит внешнюю и внутреннюю рабочие поверхности. Внутренняя полость оболочек взаимодействует с текучей рабочей средой. Внешняя поверхность тороида разделена на: наружную рабочую поверхность, плавно переходящую в центральную часть тороида или «струну», и замыкающих наружную и внутреннюю поверхности тороида, два торца в виде замкнутых полуторов. Это касается и тороидного конуса.

Рабочая поверхность сферы состоит из одной периферийной части, которая подвержена воздействию внешних деформирующих нагрузок и служит для крепления комплектующих элементов. Обе оболочки мягкие и способны совершать движение. Однако, если сфера перемещается путем перекачивания в двух направлениях, тороиду присущи перемещения путем перекачивания в направлении поперечном оси вращения и выворачивание или наволакивание вдоль оси симметрии.

Очевидно, можно сказать, что тороидная оболочка – это модифицированная сферическая оболочка, у которой методом деформирования получена двустенная поверхность, содержащая положительную, нулевую и отрицательную кривизну.

Следует отметить, что если крепление (точечное, по линии, по плоскости) находится на периферии цилиндрического тороида, то оболочка выворачивается относительно неподвижного места крепления, если крепление в центральной части – наволакивается. Если тороид крепится на торце, то перемещение прекращается за счет запора подвижной внутренней части. Конический же тороид в равновесном состоянии стремится переместиться в сторону большего торца.

Значит, меняя определенным образом места крепления и способ каркасирования цилиндрического тороида можно регулировать его форму, напряжения и направление его перемещения под действием внешней приложенной силы. С помощью перечисленных перемещений можно создать, например, пневмодвигатель, осуществляющий движения перистальтического насоса [91].

Схемы и задачи устройств и машин с использованием тороидных оболочечных конструкций

Эластичные оболочечные конструкции могут найти свое применение практически во всех областях техники, промышленности и народного хозяйства. Такие конструкции различаются по форме, конструкции, материалам, рабочим средам, условиям функционирования.

Классификация тороидных оболочек

Признаки тороидных оболочек			
Модифицируемые	Деформируемые	Перемещаемые	Трансформируемые
Каркасированные – жестким каркасом – сетью – канатами – лентами – поясами Усиленные Сочлененные	Плоские Пространственные: осесимметричные – сферы – овалоиды – линзы – сигары – тороиды – конусы – цилиндры – бочки неосесимметричные – подушки – панели – звезды составные	Полужесткие рукавные – с жесткой стяжкой торцев – с открытыми торцами Мембранные замкнутые свободные – торы – цилиндры – конусы Каркасные – с наружным каркасом – с центральным телом: – со штоком (конус, цилиндр, тело переменного сечения) – с заглушкой (поршень, мембранная оболочка) – с гибкой тягой (ремень, лента) – с приводом – без привода	Оболочечные – конические – составные Многооболочечные – с одним штуцером – с коллектором – с перегородками – сопряженные С внешними формоизменяющими элементами

Преимущества их очевидны. Они могут быть представлены как мягкие движители, защитные и силовые пневмоконструкции, стационарные строительные сооружения (в том числе рекреационные) и аварийные спасательные средства индивидуального и коллективного использования [92].

Широкое применение конструкции из эластичных материалов нашли на транспорте, как мобильные спасательные средства, так и элементы транспорта воздушного, морского, наземного.

На базе существующих и вновь разработанных технологий созданы конструкции мобильной техники широкого назначения для нужд населения. Это реклама, аттракционы, укрытия для бассейнов и стадионов, сооружения для шоу и отдыха, театральные декорации и другое.

Особенности тороидных (выворачивающихся) оболочек расширили использование мягких конструкций в мобильных системах. Здесь, наряду с защитными и силовыми свойствами оболочек стали возможны и движительные функции. За счет преобразования работы давления сжатого газа в натяжение замыкающей оболочки стало возможным осуществление продольного перемещения объектов, качение по плоскости, захват и удержание грузов, осуществление автоматического управления механизмами, разработка новых видов робототехники. Возможны новые направления разработки эластичной механики при условии создания мягких конструкционных материалов, содержащих в составе текстильной основы или защитного покрытия микроэлектронные приборы.

Предложенная классификация тороидных оболочек по форме и конструктивным отличиям дает представление о широких возможностях использования их в составе эластичной механики во всех отраслях промышленности.

Выворачивающаяся (наволакивающаяся) эластичная тороидная часть избыточного давления в оболочке или сил тяжести перемещается в осевом направлении качением, путем выворачивания внутренней или наволакивания внешней части тороида и обладает функциональными особенностями.

Перемещение под действием внешних и внутренних сил тороида происходит путем выворачивания или наволакивания по жесткой или эластичной опорной поверхности, с обволакиванием ее деформированных участков и различных по высоте выступов. При этом конический тороид самоуплотняется («сам себя находит»).

Широко регулируемая площадь контакта имеет небольшие значения удельного давления на опорную поверхность (0,01) кг/см² при давлении рабочей среды оболочки (0,01 – 0,03) кг/см².

Имеет место формирование тяговых усилий и ударного эффекта.

Возможно преобразование одних видов движения в другие, например, поступательного движения во вращательное.

Осуществляется захват предмета независимо от его формы при наволакивании, удержание и перемещение его внутри тора с регулируемым обжимающим усилием («мягкий» захват).

Возможно выталкивание с различной начальной скоростью находящегося внутри тороида предмета при выворачивании.

При выворачивании или наволакивании происходит переход из одного устойчивого состояния в другое.

В точке «перелома» (поперечной складки) наблюдается возникновение шарнирного образования, по меньшей мере, одного свободного торца.

Скорость движения центральной части тела относительно периферии тора при выворачивании, как и наружной поверхности относительно центральной части при наволакивании, имеет вдвое большую величину.

Возможно перекачивание оболочки в поперечном направлении, подобно кату или колесу [68].

Таким образом, в результате многочисленных исследований и испытаний действующих макетов тороидов, как транспортных средств, элементов роботов, подъемных, амортизирующих устройств, мягких пневмодвижителей на базе конусного тороида установлена их высокая эффективность и работоспособность.

Определение механизма натяжения мягких тороидов

Торовые технологии TORTECH^R основаны на применении выворачивающихся тороидных мягких оболочек, заполненных сжатой рабочей средой (газом) и взаимодействующих с центральным или периферийным телами, элементами привода или формообразующего каркаса.

Анализ научно-технической информации показал, что применяемые оболочки различной формы работают только на растяжение. В процессе деформирования для них характерны большие перемещения поверхности, изменения формы, перераспределения напряжений, изменения давления и объема.

Как было отмечено выше, условие существования мягких оболочек характеризуется равенством работ: внутреннего давления сжатого рабочего газа, внешнего деформирования сосредоточенной или распределенной полезной нагрузки и натяжения материала оболочки.

Известно, что основными приемами формообразования мягких оболочек являются: раскрой, деформирование или каркасирование.

Так как механизм образования формы мягкой оболочки связан с физическими особенностями рабочей среды (газа), заполняющей полость оболочки, в его основе лежит энергетическое равновесие системы: *оболочка – сжатый газ*. Принцип оптимальности формы состоит в стремлении оболочки сохранить минимальную поверхность, а сжатого газа – заполнить максимальный объем. В этом случае, с точки зрения энергетического равновесия, сфера является оптимальной энергосберегающей формой.

Кроме того, сфера является идеальной равнонапряженной модельной формой мягкой оболочки. Сфера отражает действие центральных сил давления сжатого газа, то есть является градиентом силового поля давления, образованного точечным источником напряжения (электрических, магнитных, сил межмолекулярного взаимодействия, гравитации). Однако форма сферы является идеальной для так называемых бесскладчатых оболочек с соотношением геометрических размеров, соответствующих I-му условию складкообразования (одноосности) или бесскладчатости [22, 23].

Приведение оболочки к складчатому состоянию (деформирование), при котором соотношение размеров соответствует запредельному граничному условию II (образованию складок), отражается составной геометрической формой. Такая форма может быть представлена гипотетической камерной конструкцией, внутренняя полость оболочки которой заполнена сферическими оболочками

(плотно упакованными упругими камерами). В связи с тем что материал мягкой оболочки, некоторым образом, является каркасирующим, то есть формообразующим, гипотетические сферические камеры создают на поверхности замыкающей оболочки неравнонапряженные контактные напряжения. Равнонапряженной же будет некоторая эквипотенциальная поверхность, состоящая из поверхности плотно упакованных (в один слой) упругих сфер, цилиндрической или плоской панельной формы.

В соответствие с начальным условием существования равновесного энергетического состояния мягкой оболочки принято, что: рабочая среда имеет дискретную структуру, оболочка – континуальна.

Следовательно, структура рабочей среды, за пределами условия складкообразования, представляет плотно упакованные в оболочку сферы равного напряжения (равного объема), суммарная (эквипотенциальная) поверхность которых также является равнонапряженной.

Таким образом, геометрическая форма оболочки, образованная одной или несколькими равнонапряженными сферами – равнонапряженная. Откуда поверхность, образованная модельными вписанными сферами различного объема, напряжена пропорционально радиусу вписанной сферы.

Механизмом формообразования деформированной мягкой оболочки является энергетическое равновесие между работами: внутреннего давления, внешних деформирующих сил и натяжения материала оболочки, отраженного поверхностью внешних сферических градиентов (сфер взаимодействия) центральных сил давления.

На рис. 3.17 представлена конфигурация деформированного полусферического торца цилиндрической оболочки. Деформирование сферической поверхности происходит путем приложения внешней сжимающей нагрузки вдоль оси симметрии сначала сосредоточенной силой (Q), затем распределенной по некоторой площади контакта (q).

Из рисунка видно, что формоизменение сферы происходит с переходом из одного качественного состояния в другое. Вначале деформация происходит в области бесскладчатости, определяемой соотношением геометрических размеров ($a/b \leq 2$), и сопровождается значительным сопротивлением приложенному усилию сжатия.

При переходе через граничное условие соотношения размеров оболочки в зоне действия сосредоточенной нагрузки образуется воронка. На рисунке этот переход изображен раздвоением вписанной сферы равнонапряжения. Дальнейшее деформирование сопровождается разрывом сплошности сферы напряжения среды и образованием автономных сферических зон напряжения. Количество и размеры сфер зависят от площади контактной поверхности деформирующего центрального тела. А так как образование новой эквипотенциальной поверхности, замыкающей оболочки, происходило в области складчатости, то сопротивление деформированию сведено к минимуму.

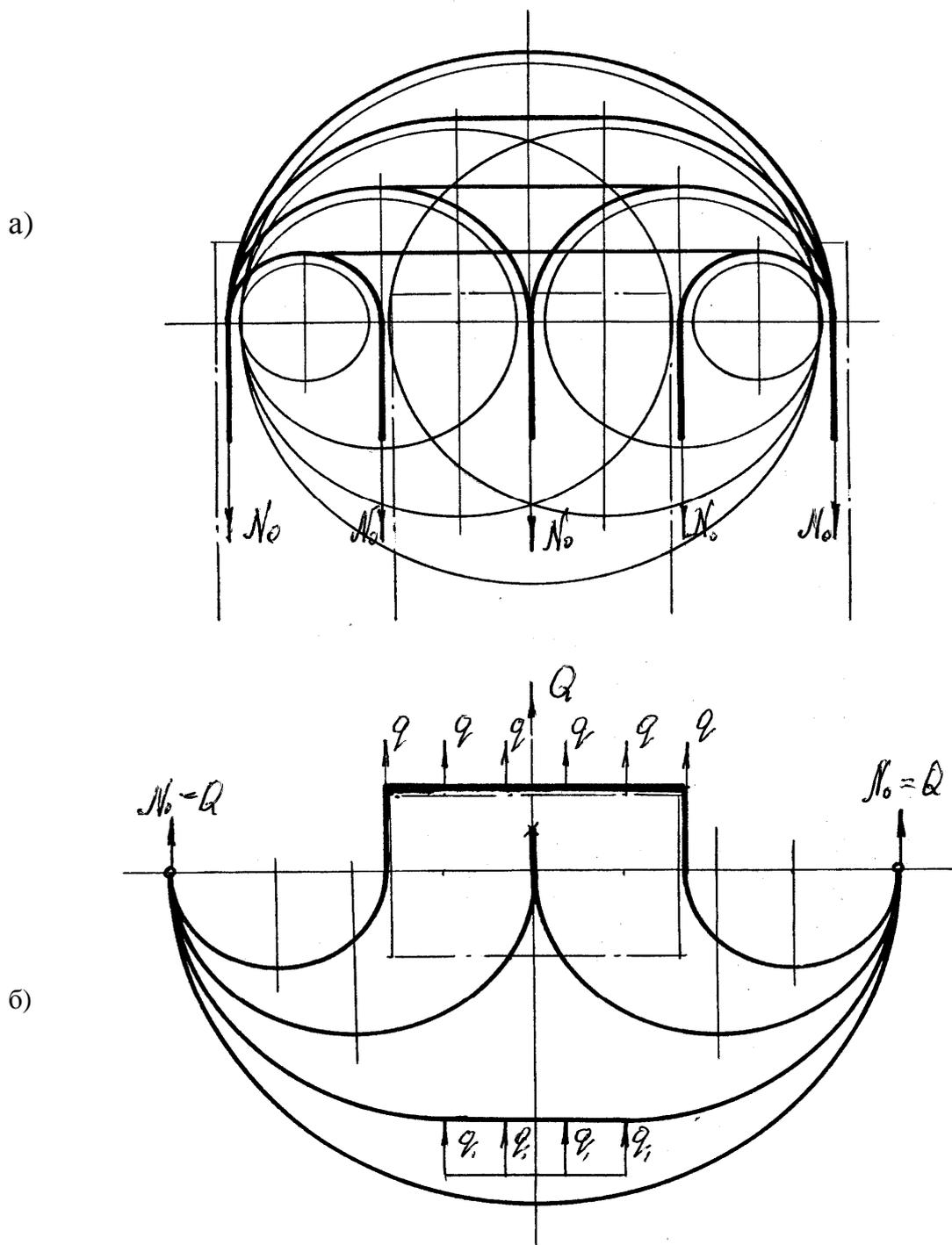


Рис. 3.17. Механизм формообразования деформированной мягкой оболочки:
а – распределение растягивающих усилий меридиональных и окружных в зависимости от действия внутреннего давления и внешнего растягивающего усилия;
б – формообразование сферической поверхности, деформированной внешней сжимающей нагрузкой (сосредоточенной и распределенной)

Таким образом, механизм напряжения мягких тороидов в целом аналогичен механизму нагружения мягких оболочек [85]. Он представляет взаимодействие сфер равного давления между собой и с замыкающей оболочкой. Формообразование тороидной поверхности можно отнести к деформированию. Окружное и меридиональное натяжения оболочек цилиндрического и конического тороидов пропорциональна радиусу вписанных сфер напряженности. Причем на воронкообразной поверхности торцев натяжение уменьшается до нуля, пропорционально расстоянию от осевой линии. Давление внутренней поверхности оболочки на центральное тело нелинейно зависит от расстояния между стенками тороида (обратно пропорционально диаметру вписанных сфер) (рис. 3.18).

Определение физических и геометрических параметров тороидных оболочек

Тороидная оболочка, как и любая оболочка из эластичного материала, принимающая заданную форму при натяжении сжатым рабочим газом, способна совершать механическую работу объема и давления.

Так, изменение замкнутого объема приводит к работе по перемещению оболочки с полезной нагрузкой на некоторую высоту (грузоподъемность). При этом перемещение тороидной оболочки возможно в двух направлениях: вдоль оси вращения за счет высокой подвижности при ее выворачивании; а также поперек оси вращения за счет изменения объема сжатого рабочего газа. Причем во втором случае перемещение возможно за счет распора между опорой и грузом

А в первом случае перемещение обеспечивает разница натяжения торцевых элементов за счет конусности боковой поверхности (при ее наличии) или изменении площади сечения при деформировании внутренней поверхности оболочки центральным телом (рис. 3.19 *а, б*).

Экспериментально установлено, что перемещение оболочки (полное выворачивание) возможно у тороидной оболочки, имеющей цилиндрическую внутреннюю поверхность длиной не менее длины дуги оболочки на торцевой поверхности (для конической не меньше дуги большего диаметра). Наглядное представление процесса выворачивания демонстрирует многозвенный стержневой механизм, моделирующий бесступенчатое перемещение мягкой оболочки под действием внешней сдвигающей и внутренней натягающей силовой нагрузки [15].

Конический тороид, благодаря особенности геометрической формы, имеет максимальный объем замкнутого газа при максимальном диаметре торцев. При этом положении натяжение материала, в том числе по внутренней поверхности (внутренней «струне») оболочки, максимальное.

Попытка вывести коническую оболочку из равновесного состояния приводит к уменьшению объема, то есть совершению работы сжатия рабочего газа, величина которой зависит от геометрических параметров оболочки.

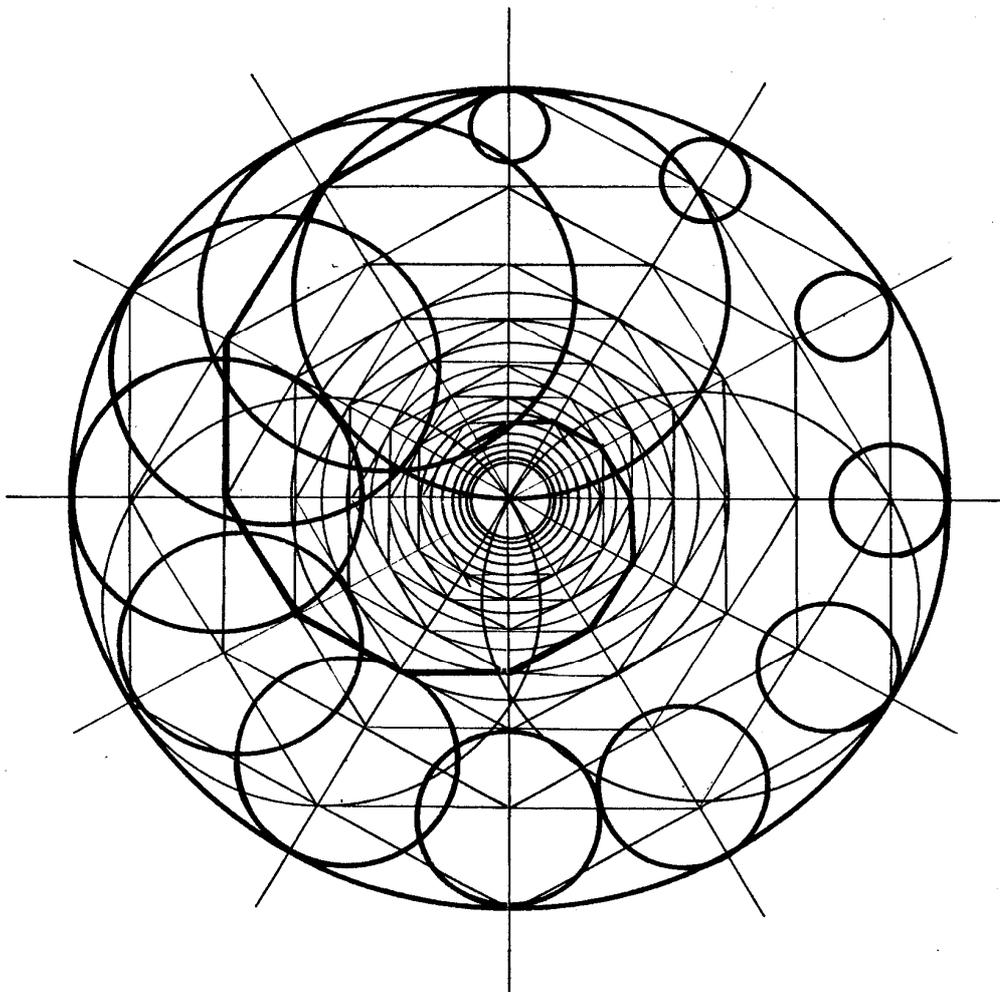


Рис. 3.18. Изменение условий формообразования тороидной оболочки при деформировании ее внутренней поверхности центральным телом различных диаметров сечения ($0 < D_{BH} < D_H$), где кругами обозначены равнонапряженные пузырьковые модели, спиралью – радиусы вписанных модельных сфер, а вписанные в шестиугольники – диаметры центральных тел

На рис. 3.16 приведены некоторые геометрические формы выворачивающихся тороидных оболочек. В зависимости от формы такие оболочки могут выполнять различную по характеру работу: перемещение, подъем, пульсацию, запор, распор, упругое сжатие внутренней полостью.

Итак, для определения величины усилия внутреннего сжатия тороидной оболочкой центрального тела следует рассмотреть деформацию ее поверхности под действием сжимающего усилия. Так как торцы тороидов представляют собой складчатые оболочки и при деформировании преобразуются в распорные поверхности между сферами равного напряжения сжатого газа, перемещения тороидной и сферической поверхностей под нагрузкой аналогичны [84].

Тополого-геометрический принцип классификации поверхностей мягких тороидных оболочек

В основу классификации реальных эластичных оболочек положен комбинированный «тополого-геометрический» принцип, сочетающий топологический язык описания общих свойств поверхностей оболочек с геометрическим их описанием, определяющим допустимые физические преобразования конструкции. Так как топология – раздел математики, имеющий своим назначением выяснение и исследование идеи непрерывности, предметом ее исследования являются свойства фигур и их взаимного расположения, сохраняющиеся взаимно однозначными и непрерывными в обе стороны отображениями (гомеоморфизмами) [90].

Для описания свойств топологических объектов относительно окружающего пространства применяются инварианты: изотопии, зацепленности. Относительно инварианты изотопии торовые конструкции распадаются на три группы.

К первой группе относятся однокомпонентные, коаксиальные и сопряженные тороиды, так как они могут быть преобразованы в несколько независимых, без разрывов их поверхностей, а только за счет разъединения их жестких стыковочных соединений, которые не относятся к собственно тороидам.

Ко второй группе относится вложенный тороид, характеризующийся тем, что пространство, ограниченное поверхностью каждого (n)-го тороида является внешним пространством для каждого ($n-1$)-го тороида. В этом случае тороиды не могут быть разделены без разрезов их поверхностей, то есть без изменения их связности. Можно сказать, что уровень пространственной организации вложенных тороидов выше, чем у коаксиальных и сопряженных, поэтому такой тип многокомпонентных тороидов так широко представлен в природе.

Третий, принципиально отличный вариант, промежуточный между двумя рассмотренными, – зацепленные тороиды. Такой тип многокомпонентных тороидов известен также, как торы-тореды [91].

Откуда два концентрических тора могут быть преобразованы в зацепленные при помощи одного меридионального разреза внешнего тора. Следует заметить, что для полного их разделения поверхность внешнего тора следует разрезать дважды: по меридиональному и экваториальному направлениям.

Все типы многокомпонентных (многополостные, многокамерные) тороидов по топологической теории узлов и зацеплений объединяются в единую систему относительно инварианта их зацепленности между собой.

К «нулевой» или тривиальной зацепленности относятся коаксиальные и сопряженные. К одинарной зацепленности (зацепленности в традиционном понимании), получаемой при помощи одного меридионального разреза поверхности внешнего тора и ее последующем склеивании можно отнести зацепленные тороиды М. Гарднера [15].

К двойной зацепленности, получаемой при помощи двух разрезов и двух последующих склеиваний поверхности внешнего тороида, можно отнести вложенные торы [90].

Итогом такой классификации с учетом используемого материала, системы управления, области применения, выполняемой роли в компоновочной схеме и тому подобное стала n -мерная таблица однокомпонентных тороидов (рис. 3.19).

Различные комбинации взаимодействующих замкнутых поверхностей с различными топологическими характеристиками объединяют начальные условия существования оболочечных конструкций.

Одним из таких условий является сохранение непрерывности кривизны поверхности и неразрывности (континуальности) оболочек в процессе эксплуатации.

Учитывая сложность геометрических форм, представленных здесь оболочек, принята условно гипотеза о самоопределении мягкой надувной оболочкой своей напряженной формы под воздействием силовых полей давления.

Откуда следует, что любая форма мягкой оболочки является производной сферы или нескольких сфер, как правило, собранных в цепочку.

В зависимости от размерности вписанных равнонапряженных сфер оболочки приводятся к цилиндрическим, коническим или составным (цилиндр – конус, конус – конус).

То есть все поверхности однокомпонентных мягких тороидных оболочек гомеоморфны, имеют одинаковую топологию и могут быть объединены общим раскроем, представленным прямоугольным или косоугольным полотнищем, а также их комбинацией, различающимся размерами, способом сборки и формой торцев.

Систематизация многокомпонентных тороидных оболочек представлена на рис. 3.20.

Таким образом, в основе изготовления заготовок однокомпонентных резиноканевых тороидов лежит принцип плоского раскроя, который используется для сборки пространственных конструкций из прямоугольных, косоугольных полотнищ, а также их комбинаций, различающихся размерами и конструкцией торцев.

Выводы

Функциональной особенностью тороидных оболочек является способность конструкции перемещаться не только путем перекачивания по опорной поверхности, но и перемещение вдоль осевой направляющей. Продольное перемещение осуществляется без скольжения по внешней и внутренней поверхности за счет приложенной тяговой нагрузки к центральному телу (стержень, тяга, другая тороидная оболочка).

Сцепление по внутренней поверхности осуществляется за счет распределенных по значительной площади контакта сил давления сжатой рабочей среды.

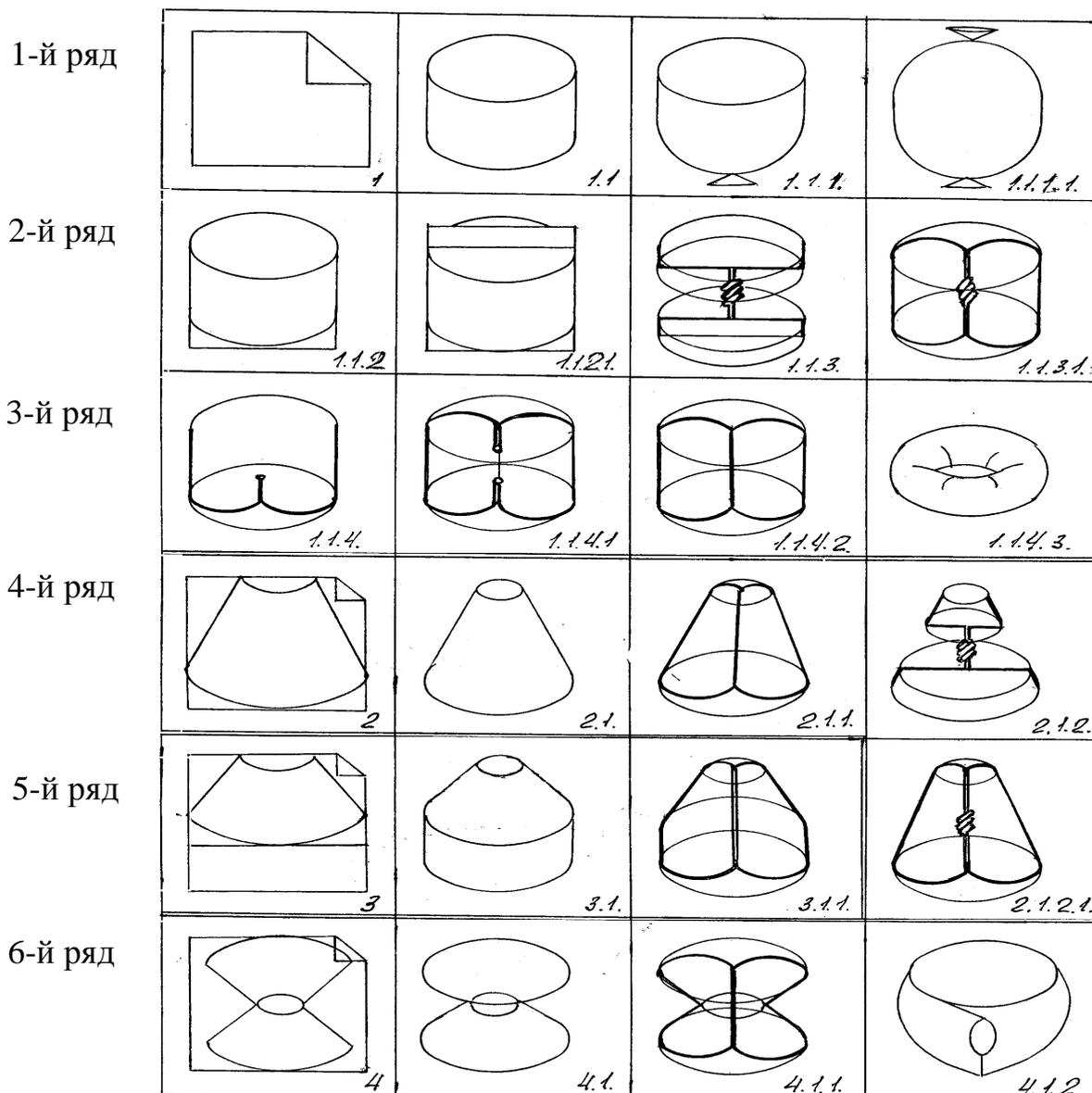


Рис. 3.19. Схема раскроя пространственных поверхностей мягких оболочек из плоских заготовок:

1–3-й ряды – *заготовка цилиндра*: 1.1 – цилиндрический рукав; 1.1.1 – полуцилиндр с полусферическим торцем; 1.1.1.1 – цилиндр с полусферическими торцами; 1.1.2 – полуцилиндр с тубичным торцем; 1.1.2.1 – цилиндр с тубичными торцами; 1.1.3 – цилиндрический рукав с закрученной центральной частью; 1.1.3.1 – цилиндрический тороид с закрученной центральной частью; 1.1.4 – мембранный тороид; 1.1.4.1 – трубчатый тороид; 1.1.4.2 – цилиндрический тороид; 1.1.4.3 – открытый тор;

4-й ряд – *заготовка усеченного конуса*: 2.1 – конический рукав; 2.1.1 – конический тороид; 2.1.2 – конический рукав с закрученной центральной частью; 2.1.2.1 – конический тороид с закрученной центральной частью;

5-й ряд – *заготовка модифицированной поверхности (цилиндр и конус)*: 3.1 – рукав переменного сечения; 3.1.1 – тороид переменного сечения;

6-й ряд – *заготовка составной поверхности (спаренный конус)*: 4.1. – составной рукав; 4.1.1. – конический составной тороид; 4.1.2. – бутылка Клейна

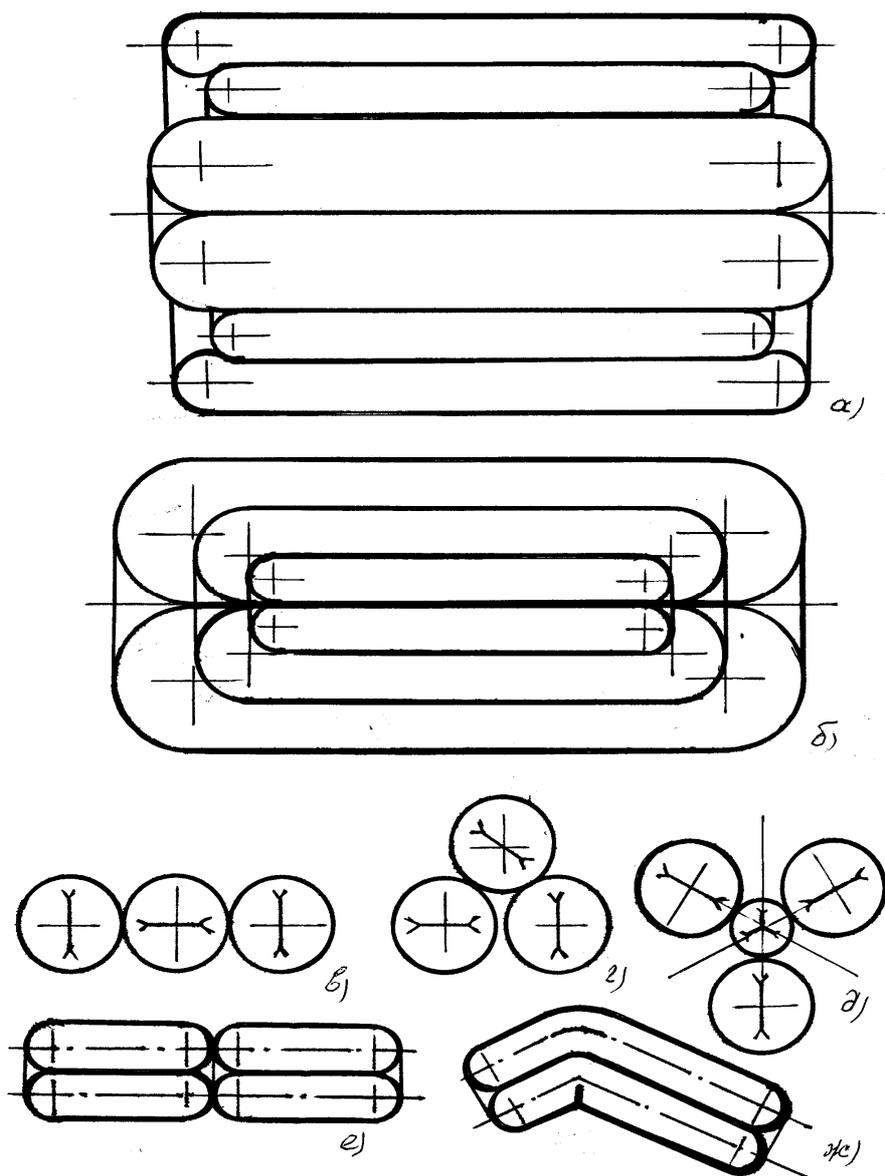


Рис. 3.20. Разновидности многокомпонентных тороидных оболочек:
 а – коаксиальные тороиды; б – вложенные тороиды; в – г – сочлененные тороиды; ж – деформированный тороид

Перемещение осуществляется практически без сопротивления, за счет низкого сопротивления изгибу материала при складкообразовании и образовании криволинейной поверхности, а также наличия между внутренней и внешней стенками оболочки изгибающего момента.

Стабильность зазора между стенками оболочки поддерживается распором избыточного давления («воздушной подушкой»), в том числе при изгибе ци-

линдра с образованием поперечной складки и/или при преодолении выступов и неровностей на опорной поверхности.

Способность конического тороида сохранять равновесную геометрическую форму и сопротивляться ее изменению позволяет использовать его силовые качества в мягких движителях, обладающих заданной энергоемкостью. Перемещение в конических тороидах внутренней поверхности относительно наружной без скольжения используется для грузозахвата, подъема, разжатия и тому подобных операций, характерных для манипуляторов и робототехники.

К конструктивной особенности тороидных оболочек относится наличие двухстенной полости, позволяющей снизить растягивающие усилия от внутреннего давления рабочего газа.

К технологическим особенностям следует отнести простоту геометрических форм (цилиндра, конуса), нулевая кривизна боковых поверхностей которых позволяет использовать при раскрое плоские заготовки. Негативным фактором является повышенный расход материала. Однако при этом снижается и его удельная прочность.

Таким образом, благодаря конструктивным и технологическим свойствам тороидных оболочек функциональные особенности мягких оболочек существенно расширяются. К их защитным и силовым свойствам прибавилась еще и энергоемкость.

3.3. ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЯГКИХ СИЛОВЫХ ОБОЛОЧЕК

Наибольшие значения рабочих характеристик мягких силовых оболочек достигаются при максимальной работе давления и объема, которые обеспечиваются, с одной стороны, высокими прочностными свойствами конструкционного материала (табл.3.2), с другой стороны геометрической формой замыкающей оболочки, стабилизирующей эти характеристики при эксплуатации [11, 79].

Высокие показатели по герметичности материалов и стыков, а также эластичность оболочек обеспечивают минимальные потери давления и объема, то есть энергии.

Так как в процессе эксплуатации силовых оболочек происходят значительные перемещения поверхности и изменения геометрической формы под нагрузкой, то они являются нормально неравнонапряженными, обладающими зонами как одноосного, так и двухосного натяжения. Начальная форма деформированной оболочки представляет собой плоскость контакта, равную площади центрального (максимального) сечения оболочки. В процессе перемещения она преобразовывается в пространственную оболочку заданного объема с изменяющимся соотношением геометрических размеров (высоты и площади контакта), следовательно, работы давления и объема в зависимости от ее раскройной формы.

Технологические особенности производства мягких материалов

Виды		Способы	
связующие	наполнители	покрытия	нанесения
Эластомеры – латексы – резины на основе каучуков (натуральных, органических, синтетических) Термопласты – пластомеры – ламинанты Термоэластопласты – полистироловые – полиолефиновые – полиэфирные – полиуретановые Смеси	Волокна – натуральные – органические – синтетические Нити – моноволокна – крученые – кордовые – комбинированные Текстили – ткани (рогожка, двухосновная, «малимо», «аэромат», многослойная, профилированная, кордовая) –сети –ленты –шнуры Нетканые материалы – трикотаж – пряжа	Растворы Дисперсии Пасты Расплавы Высоковязкие смеси Пластизоли Пленки	Растворный – шпредингование – напыление – пропитка Безрастворный – каландрование – каширование – прессование – дублирование – экструдирование

Примечание. 1. Промежуточными операциями при нанесении покрытия на текстильную основу при необходимости являются: нанесение адгезионного подслоя, просушка, охлаждение. Окончательными – нанесение антиадгезионного покрытия (крахмал, тальк и т.п.), вулканизация. 2. Непрерывные вулканизаторы совмещают операции нанесения и вулканизацию прорезиненной ткани.

Традиционная схема проектирования мягких оболочек, основанная на канонических уравнениях начальной формы поверхности вращения, для силовых оболочек с изменяемой геометрией, чрезвычайно громоздка и требует корректировки проектного расчета для деформированной формы, образующейся в процессе эксплуатации оболочечной конструкции. Тем не менее, в основу тех-

нологии изготовления мягких оболочек заложены следующие традиционные принципы [84].

1. Формальным признаком оптимизации раскройной формы мягкой оболочки является создание равнонапряженной поверхности вращения.

2. Критерием несущей способности силовой мягкой оболочки является условие складкообразования, то есть соотношение размеров полуосей симметрии ($1 \leq a/b \leq \sqrt{2}$). Формально поверхность раскроя должна быть без складок и морщин. Образование морщин рассматривается как признак неправильного раскроя оболочки, при котором не учитываются деформационные свойства материала. А отклонения от равнонапряженности не должны приводить ни к перенапряжению, ни к морщинистости.

3. Оптимальным раскроем оболочки являются минимизация отходов производства с максимальным коэффициентом использования прочностных свойств материала. Целесообразность раскроя определяется простотой и удобством формирования объема мягкой оболочки.

4. Прочность соединительного шва должна равняться прочности основного материала. Протяженность шва должна быть минимальной.

5. Форма раскройных элементов должна позволять максимально механизировать технологический процесс.

6. Материал должен обеспечивать заданные технические свойства мягким оболочкам, быть технологичным, иметь минимальную стоимость, обеспечивать максимальную производительность труда, обладать допустимыми санитарно – гигиеническими характеристиками.

Основой технологии изготовления является зависимость рабочих характеристик, а также напряженного состояния от геометрической формы и размеров деформированной оболочки под действием внешних нагрузок.

Новый подход к разработке промышленной технологии изготовления силовых мягких оболочек

Технологическое проектирование мягких оболочек из эластомерных армированных материалов до настоящего времени производилось в основном опытным путем. Например, раскрой торообразных оболочек осуществлялся по лекальным кривым, максимально приближая заготовку к расчетной схеме. В результате перерезания нитей силовой основы при раскрое прочность ткани вдоль кромки заготовки резко падала.

Разброс модуля упругости у соединяемых полотнищ приводил к концентрации напряжений, неравнопрочности и нестабильности прочности шва. Снижался коэффициент использования номинальной прочности ткани. Для высокомодульных материалов (на основе арамида) потери составляют свыше 87 % , для низко модульных (полиамид) – до 70 %. При этом образуются лишние отходы материала от криволинейного края, увеличивается длительность и трудоемкость операций раскроя и сборки полотнищ [46].

В результате математического моделирования клеевого шва установлена нелинейная зависимость (поверхность гиперболического параболоида) прочности клеевого шва от номинальной прочности материала в месте стыка и длины нахлеста шва.

Следовательно, увеличить прочность клеевых швов можно путем повышения модульности армирующих материалов, жесткости стыков, причем в большей мере за счет регулирования угла наклона нитей, например, при расположении прямых швов вдоль нитей основы, что требует изменения формы раскроя и самой оболочки. Новые формы (прямоугольные в плане) более рациональны, так как имеют следующие преимущества. По раскрою новые формы приводят к минимальным отходам, максимальной степени использования прочности, минимальной протяженности швов и их максимальной прочности. При этом допускается механизация процесса сборки.

По конструкционному проектированию новая технология позволяет в новых формах заложить максимальную площадь опоры, максимальный объем, стабильность площади контакта при изменении высоты перемещения (для призматической формы [18]).

По себестоимости достигается снижение (по нормам времени), повышение производительности труда за счет механизации основных и вспомогательных технологических процессов в промышленном производстве (раскрой, шероховка, нанесение клея и так далее).

Следует отметить, что недостатком неравнонапряженных конструкций является повышенный расход материала (приблизительно на количество отходов при раскрое криволинейных швов). Однако этот расход компенсируется повышением степени использования прочности материала, что равносильно использованию менее прочной (более, чем в два раза) армирующей основы, увеличением уровня рабочего давления, улучшением технических характеристик оболочечных конструкций. Снижение отходов материала, например, на раскрой вышки сферы составляет не менее 36 %.

В табл. 3.3 дано сопоставление критериев традиционного и нового подходов при разработке промышленной технологии изготовления силовых мягких оболочек.

Таким образом, одним из способов увеличения прочности клеевых швов является сохранение номинальной прочности ткани в местах стыка, что достигается использованием прямолинейных кромок заготовок оболочки и приведения формы оболочки к прямолинейной (призматической).

Основные приемы повышения прочностных характеристик силовых мягких оболочек

Совершенствование технологии предусматривает использование конструктивных приемов для повышения прочности силовых оболочечных конструкций, например, с помощью разгружающих силовых элементов (поясов, усилений, накладок и тому подобное), устанавливаемых для перераспределения макси-

мальных растягивающих усилий на большую площадь оболочки. Для повышения разрывной прочности, при проектировании, например, надувных резино-тканевых домкратов, вместо увеличения толщины ниток и усложнения конструкции материала было предложено применение многослойной оболочки. Такая конструкция, состоящая из трех свободно вложенных одна в другую оболочек (типа луковицы), соединяет в себе различные функции материала (герметизирующая, силовая, защитная).

Каждая из оболочек отличается типом тканевой основы и эластичного покрытия. За счет свободной многослойности были сняты внутренние напряжения, имеющие место между слоями сдублированного материала (например, в конвейерной ленте).

Кроме того, многослойность конструкции позволила саморегулироваться оболочкам при нагружении внешними нагрузками. Расположение материала во взаимно перпендикулярном направлении обеспечивает двухосное нагружение конструкции из одноосновной кордовой ткани, позволяет использовать в качестве разгружающих элементов нахлестку соединительного стыка, направленного вдоль действия максимальных (меридиональных) натяжений.

Таким образом, разработка нового подхода к проектированию силовых мягких оболочек позволяет применять с максимальной интенсивностью серийные конструкционные материалы (рациональный раскрой и сборка оболочки, оптимальная по рабочим характеристикам и напряженному состоянию прямоугольная в плане геометрическая форма: призма, подушка).

В общем виде порядок технологического проектирования состоит из следующих разделов.

1. Прогнозирование складкообразования как индикатора распределения натяжения оболочки (управление формообразованием в процессе деформирования нагруженной оболочки).

2. Получение рабочих характеристик расчетно-аналитическим методом.

3. Сравнение общих характеристик различных по форме конструкций, материалов и покрытий и выбор наиболее рациональных.

4. Разделение оболочки на элементы, ответственные за рабочие характеристики (оболочка, рабочая среда, газогенератор).

5. Повышение прочности стыка.

6. Увеличение интенсивности нагружения конструкционного материала.

7. Раскрой, основанный на максимальной экономии материала, сохранении его прочностных свойств и снижении трудозатрат при сборке.

8. Приведение к одноосности (к меридиональным растягивающим усилиям, как максимальным) путем выбора соотношения размеров полуосей симметрии.

9. Подкрепление (разгружение от растягивающих усилий в зонах перенапряжений).

Таким образом, в общем виде представлено научно-экономическое обоснование целесообразности нового подхода к технологическому проектированию силовых мягких оболочек. Такие оболочки, как правило, представляют собой мно-

гослойные плоско симметричные поверхности, прямоугольные в плане с прямолинейными швами, снабженными конструктивными разгружающими элементами.

Способы изготовления рукавных тороидных оболочек

Условием образования торовой поверхности является придание внутренней поверхности выпуклой оболочки отрицательной кривизны.

Создание торообразных цилиндров и/или конусов возможно тремя способами. Одним из способов является сборка тороидной оболочки плоским раскроем из эластомерного армированного материала (прорезиненной ткани, армированной пленки, резинового или пленочного материала).

Таблица 3.3

Сопоставление критериев традиционного и нового подходов при разработке промышленной технологии изготовления мягких оболочек

Критерий	Традиционный подход	Новый подход
Тип армирующего материала	Ткань двухосновная	Кордткань
Раскройная форма	Поверхность второго или четвертого порядка	Неравнонапряженная прямоугольная в плане
Степень использования прочности материала, %	30–15	100
Количество отходов, %	До 60	Нет
Условия раскроя	На раскройных столах	В бухтах
Форма выкройки	Криволинейная	Прямолинейная
Необходимость шаблонов	Да	Нет
Возможность механизации	Малая	Большая
Трудозатраты, %	100	50
Модельная расчетная форма	То же, что и раскройная	Сфера (вписанная)
Ограничения использования	Условия складкообразования	Нет

Примечание. Перечень характеристик технологического процесса может быть расширен для изделий, имеющих дополнительные специальные требования.

Другим способом является деформирование оболочки периферийным наружным и центральным цилиндрическим телом. Третьим путем является приведение выпуклой поверхности оболочки к полужесткой с нулевой кривизной (конической или цилиндрической).

Так как для любых тороидных оболочек (мембранных, рукавных, трубчатых, цилиндрических и конических) характерна эластичность торцев при выворачивании или наволакивании, то технология их изготовления имеет некоторые особенности.

Общим для различных схем тороидных оболочек являются: геометрическая форма, способ крепления, количество раскройных элементов, виды комплектующих и контрольно-исполнительных приборов (клапанов, манометров, штуцеров и переходников).

Условно все виды соединений можно систематизировать по характеру передачи нагрузки на несущие и монтажные. Несущие соединения, как правило, передают нагрузку через адгезионные прослойки, обеспечивающие максимальную работу материала и стыка.

По конструкции соединения разделяются на сплошные (клеевые, приформовочные, сварные), механические (шитые) и комбинированные (клеепрошитые) (рис. 3.21) [9, 46].

Прочностные свойства, например, клеевого шва зависят от свойств склеиваемого материала и клея, формы соединяемых деталей, площади контакта; способа нанесения клея, режима просушки.

Потеря прочности соединения под влиянием внешних факторов возможна при проникновении в клеевой шов агрессивных веществ; под воздействием факторов, вызывающих старение, гидролиз, выщелачивание клеевого слоя, растворение клея, при коррозии субстрата и хрупкости при низких температурах.

От соотношения модулей упругости клея и склеиваемого материала зависит степень влияния изгиба на прочность клеевых соединений, а также концентраторов напряжений.

Склеивание – создание неразъемного соединения элементов конструкции с помощью клеевой прослойки холодной или горячей вулканизации без существенного изменения свойств материалов в зоне швов.

При склеивании между соединяемыми материалами и клеем сохраняется граница раздела. С помощью клеевого соединения возможна сборка как однородных, так и разнородных материалов.

Сущность приформовки заключается в нанесении на место стыка накладок из материала, пропитанного связующим с последующим отверждением при нагревании и под давлением (механическим обжатием).

Прессовые швы горячего отверждения в котлах или на прессах используются при производстве изделий из невулканизированных резин и прорезиненных (резиноармированных) тканей, в основном силовых конструкций.

Сварка – процесс неразъемного соединения, основанный на тепловом или химическом взаимодействии макромолекул полимерной фазы материала, в результате которого между соединяемыми поверхностями исчезает граница раздела. Этот метод предпочитается в тех случаях, когда соединяемые детали изготовлены из однородных материалов. В зависимости от механизма процесса сварка бывает диффузионная и химическая.

Диффузионная сварка используется при соединении термо- и эластопластов. Она осуществляется путем нагрева и с помощью растворителя. При этом материалы в зоне шва приводятся в вязкотекучее состояние с изменением структуры по отношению к структуре соединяемого материала.

Химическая сварка основана на образовании химических связей между полимерами, приведенными в контакт либо в результате взаимодействия функциональных групп полимеров, либо с помощью присадочного материала, введенного в зону шва.

Химической сваркой соединяют материалы, не поддающиеся диффузионной сварке – отвержденные реактопласты, вулканизаты, а также некоторые термопласты, способные соединяться диффузионной сваркой.

Механическое крепление как способ соединения предпочтительно используется при сборке силовых конструкций; при сборке деталей из различных материалов, затрудняющих склейку и сварку; в разъемных соединениях дополнительно к герметичным стыкам.

Раскрой и сборка цилиндрических тороидных оболочек

Как следует из рис. 3.19, любая тороидная оболочка может быть представлена двумя простыми поверхностями: цилиндром, усеченным конусом или их сочленениями: цилиндр – конус и/или спаренный конус.

Тороидная цилиндрическая оболочка (см. рис. 3.7) может быть представлена в виде замкнутых (двустенной) трубчатой и цилиндрической, а также незамкнутой – рукавной конструкции.

Рукавный тороид состоит из внутренней и наружной поверхности, соединенной одним торцем. В основном геометрическая форма рукавных тороидов – цилиндрическая.

Часть рукавной конструкции может быть выполнена, например, из жесткой трубы, образующей вместе с тороидом замкнутую полость. Как правило, рукавные тороиды выполняют функции перегородок, разделителей сред, герметизирующих диафрагм в динамических поршневых механизмах (насосах). Характер нагружения – пульсирующие с различной скоростью растяжения от кратковременных повышений давления рабочей среды. Кроме того, материал оболочки испытывает циклические изгибные нагружения, например, в процессе перемещенного направления хода штока.

С учетом эксплуатационных особенностей рукавные тороиды должны обеспечивать прочный фланцевый разъем и герметичное разъемное соединение.

Замкнутые (тем более вывернутые) тороидные цилиндры до сих пор не изготавливались в серийном производстве. Поэтому для их изготовления еще предстоит создать и оборудование, и технологические процессы.

Для производства же рукавов и шлангов существуют традиционные технологические рукавные линии. В зависимости от технологических особенностей изготовления силового каркаса производят различные рукава: прокладочные, обмоточные, навивочные, круглотканые, с вязанным каркасом, спиральные. А изготовление торовых конструкций известно по шинному производству. Однако, наиболее близкой к тороидным конструкциям из армированных пленок подходит производство пневмоконструкций из прорезиненных тканей. Производство гибких рукавов – воздухопроводов больших диаметров для строительного комплекса, а также газопроводов для транспорта осуществляется по технологии сборки рукавов на пневматической оснастке, путем послойного склеивания полотнищ из герметичного и/или силового материала.

Оболочки простых форм (цилиндрические, конические, сферические) раскраивают двумя способами: меридиональным или широтно-меридиональным. К недостаткам этих методов (из-за резкой анизотропии текстильной основы) относятся: неравная напряженность ткани в направлении нитей основы и нитей утка, а также достаточно большие отходы при лекальном раскрое заготовок. Отсюда, целесообразным следует считать прямолинейный раскрой заготовок вдоль нитей основы.

Для максимального использования прочностных свойств материала (экономии толщины, массы) рекомендуется сборка цилиндрических тороидных оболочек из прямоугольно раскроенных заготовок с последующим усилением материала в зонах перенапряжений шайбами или накладками из основного материала.

В зависимости от площади боковой поверхности и разновидности цилиндрические оболочки раскраиваются из прямоугольных полотнищ, длина которых равна удвоенной длине тороида, а ширина – длине окружности ее по наружному диаметру. Естественно в указанный размер входят все пересклейки и припуски для крепления комплектующих деталей. Из прямоугольного полотнища на дорне склеивается рукав, который затем частично выворачивается наизнанку с двух торцов. Торцы соединяются между собой поперечным соединительным швом, предпочтительно синусоидальной конфигурации для разнесения жесткости соединения вдоль поперечного шва. Такая конструкция имеет минимальное количество швов: один продольный, один поперечный.

В некоторых случаях допускается увеличение швов за счет увеличения заготовок.

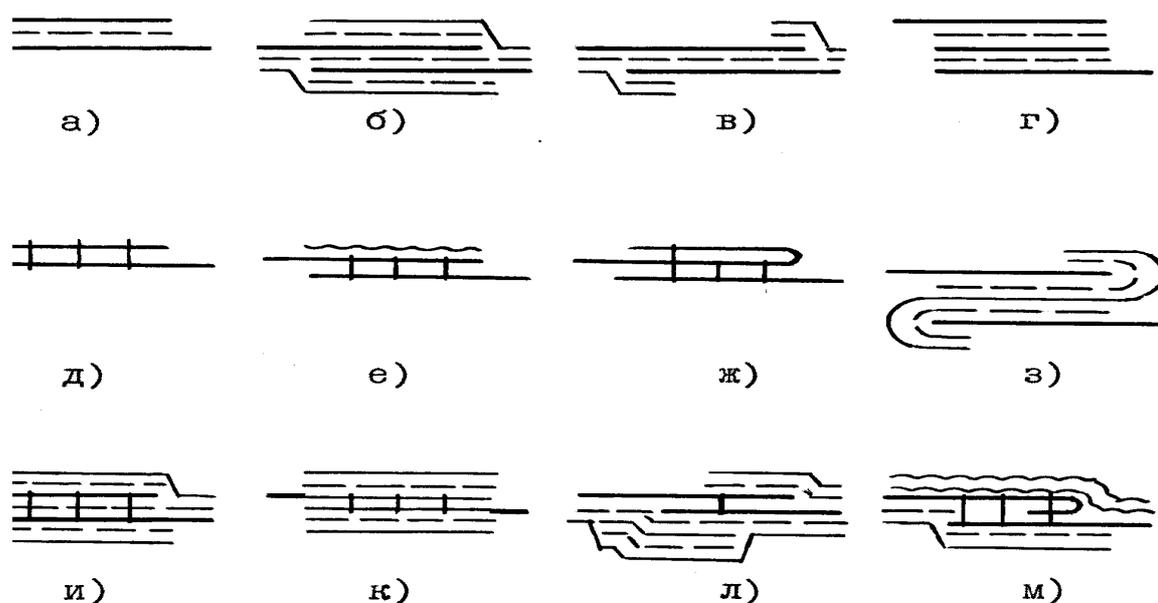


Рис. 3.21. Виды соединительных элементов:

а – клеевой шов; б–в – клеевые с защитными лентами; г – шов прессовой вулканизации; д – шитый шов; е – шитый с пленочным покрытием строчек; ж – шитый с верхней тканевой защитой; з – прессовый с защитой кромок; и – клеешитый при необрезиненных кромках; л – клеешитый с усиленной защитой; м – с односторонней защитой и пленочным покрытием

Например, если режим работы замкнутой цилиндрической оболочки не предусматривает неограниченного перемещения ее вдоль центральной струны, то возможно введение двух поперечных швов. Это увеличит жесткость материала при изгибе, однако при размещении крепежных узлов в районе стыка такая жесткость не повлияет на свойства изделия.

В продольном шве предусматривается технологическое отверстие в виде непроклеенного шва длиной около 200 мм с последующим склеиванием и заделкой дополнительным усилением. Через технологическое отверстие производится заделка клеевых швов оболочки, а также приклейка комплектующих деталей (наполнительного штуцера) с внутренней стороны.

Одной из ответственных и самостоятельных задач, возникающих при создании конструкции из эластичных композитных материалов, является обеспечение прочности и надежности узлов крепления (фланцев) оболочки к неподвижному каркасу, через которые передаются все нагрузки, воспринимаемые несущей конструкцией. Поэтому следует помнить, что сочетание разнородных по жесткости (модулю упругости) материалов приводит к концентрации напряжений во фланцевом креплении, что не допустимо для эластомерных материалов, обладающих высокой эластичностью.

Процесс склеивания рукавных тороидных оболочек (замкнутых или разомкнутых) осуществляется по следующей схеме. Размеченные, отшерохованные (при необходимости), обезжиренные по предполагаемым соединениям заготов-

ки подвергают троекратной промазкой клеем на обе склеиваемые поверхности (с попеременной визуальной просушкой каждой промазки клея «до отлипа тыльной стороны ладони»). Далее производится склейка деталей по разметке, приклейка комплектующих деталей, прикатка шва роликом (для удаления воздушных пузырьков, равномерного распределения клеевого слоя). Прошивка применяется при необходимости обеспечения требований повышенной прочности, например, в силовых конструкциях. Окончательной операцией при склейке деталей рекомендуется заделка клеевого шва герметизирующей защитной пленкой или лентой из легкой прорезиненной ткани, предварительно кошенной под углом 45° для увеличения ее эластичности.

Для свариваемых материалов раскрой проводится с учетом припусков на сварку. Свариваются заготовки участками, в основном гребешковым швом (с двухсторонним припуском на свариваемых полотнищах). При этом последним участком сварки является технологический монтажный шов, который дополнительно усиливается сварным швом. Следует отметить, что из-за жесткости сварного шва и высоких концентраций напряжений, его применение не рекомендуется для силовых конструкций.

По рукавной технологии изготавливают разомкнутые (диафрагменные, рукавные) и замкнутые (трубчатые, цилиндрические и конические) тороиды.

Различие в изготовлении разомкнутых и замкнутых оболочек заключается в наличии фланцевого крепления. У разомкнутых тороидов фланец формируется из основного материала на торцах оболочек путем усиления основного материала накладками для их механического крепления к жесткому каркасу. Замкнутые тороиды, предназначенные для пульсирующего (циклического) перемещения, крепятся к каркасу петлями, поясами и так далее. Незакрепленные цилиндрические тороиды устанавливаются на центральном теле (гибкой бесконечной тяге) и, как правило, не имеют крепежных элементов. Конструктивные отличия замкнутых цилиндрических и конических оболочек приведены на рис. 3.23.

Таким образом, наиболее распространенным является сборка цилиндрических тороидов из заготовок плоского раскроя, причем более экономичной и предпочтительной – с двумя поперечными клеевыми швами.

Раскрой и сборка конических тороидных оболочек

Особенностью эксплуатации конического тороида является его периодическая трансформация из оболочки с минимальным объемом в оболочку с максимальным объемом. Следовательно, целесообразным является раскрой из двух плоских косых полотнищ равного размера, формирующих его наружную и внутреннюю поверхность. Другим способом сборки, аналогично цилиндрическим тороидам является раскрой единого полотнища для внешней и внутренней поверхности и соединение верхнего с нижним основанием по лекальной кривой (рис. 3.22). При этом для большей эластичности количество полотнищ должно быть минимальным, но не менее трех.

В некоторых случаях допускается исключение криволинейного перехода внешней поверхности во внутреннюю. Тогда полотнище большего основания предварительно собирают в сборки, равномерно распределенные вдоль меньшего основания и собирают механическим способом крепления, например, прошивкой с последующей герметизацией стыка (или зажима на оправке, на пальцах).

Для расчета угла раскроя плоской кривоугольной заготовки используют следующий расчет [51]. Усеченный конус относится к числу поверхностей, разворачиваемых на плоскости. Для получения соотношений между его размерами принимаем следующие обозначения (рис. 3.22) [84].

H – высота полного (не усеченного) конуса;

h – высота усеченного конуса;

D_0 – диаметр нижнего основания;

d_0 – диаметр верхнего основания;

L – длина образующей полного конуса;

L_y – длина образующей усеченного конуса;

l – длина образующей отсеченной части конуса;

α – угол между образующей конуса и его вертикальной осью.

Разницу диаметров нижнего и верхнего основания находим из:

$$C = (D_0 - d_0) / 2. \quad (3.1)$$

Тогда соотношения, связывающие основные размеры полного и усеченного конуса, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= (D_0 - d_0) / 2 h = C / h; \\ L_y &= L - l = \sqrt{\{(D_0 - d_0) / 2\}^2 + h^2} = \sqrt{C^2 + h^2}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

На основании рассмотренных подобных треугольников получаем последовательно следующие соотношения:

$$\begin{aligned} L_y / L &= 2 C / D_0; \\ L_y D_0 / 2 &= C L; \\ L &= L_y D_0 / 2 C \end{aligned} \quad (3.3)$$

Подставим (3.1) в (3.3):

$$L = D_0 / 2 C \sqrt{[(D_0 - d_0) / 2] + h} = D_0 / 2 C \sqrt{C^2 + h^2}. \quad (3.4)$$

Длина образующей отсеченной части конуса определяется из:

$$l = L - L_y = D_0 / 2 C \sqrt{C^2 + h^2} - (C^2 + h^2) = (C^2 + h^2)(D_0 / 2 - 1). \quad (3.5)$$

Если известен угол, можно получить еще ряд соотношений, которые могут быть полезными в практической работе:

$$L = D_0 / (2 \operatorname{Sin} \alpha); \quad l = d_0 / (2 \operatorname{Sin} \alpha). \quad (3.6)$$

Форму развертки определяют радиусы развертки, длина образующей полного конуса (L), длина образующей отсеченной части конуса (l) и угол раствора развертки (φ).

На основании равенства длин периметра оснований конуса и соответствующих длин дуг развертки (AB) и (ab) получим два равноценных выражения, определяющих угол раствора развертки (φ):

$$\begin{aligned} \pi d_0 &= l \varphi; & \pi D_0 &= L \varphi; \\ \varphi &= \pi d_0 / l; \\ \varphi &= \pi D_0 / L; \end{aligned} \quad (3.7)$$

или в градусах:

$$\begin{aligned} \varphi &= 180^\circ d_0 / l; \\ \varphi &= 180^\circ D_0 / L. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Если угол (α) определен, выражение (3.8) удобно записать в виде:

$$\begin{aligned} \varphi &= 180^\circ (2 \operatorname{Sin} \alpha) = 360^\circ \operatorname{Sin} \alpha; \\ \varphi &= 2 \pi \operatorname{Sin} \alpha. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Схема построения развертки приведена на рис. 3.22 а. Радиусы развертки (L) и (l) определяют по формуле (3.6).

Таким образом, все поверхности однокомпонентных мягких тороидных оболочек имеют одинаковую топологию, относятся к разворачиваемым на плоскости, объединяются общим подходом к раскрою и сборке прямоугольных, косоугольных и составных плоских полотнищ.

Сборка цилиндрических тороидов преимущественно осуществляется на надувных (торовых) дорнах клеями холодной вулканизации по технологии изготовления мягких пневматических конструкций (рис. 3.19).

Конические тороиды рекомендуется собирать в районе сочленения большого и малого основания трапеции с помощью герметичного механического зажима, исключая криволинейный лекальный переход внешней поверхности во внутреннюю (рис. 3.23).

Образующиеся после сборки тороидов складки и гофры являются индикаторами напряженности оболочки.

Выводы

Технические свойства мягких пневматических конструкций зависят от свойств конструкционного материала, соединительных швов и условий эксплуатации, требования которых накладываются на свойства пневмоконструкций.

Материал мягких пневматических конструкций должен быть герметичен к рабочему газу (воздуху), прочен, стоек к локальным нагрузкам.

Прорезиненная ткань должна быть эластичной, минимальной толщины и обладать устойчивостью к циклическим изгибам и образованию складок.

Резиновое покрытие может вызывать снижение прочности за счет деструкции материала в процессе вулканизации под воздействием компонентов резиновой

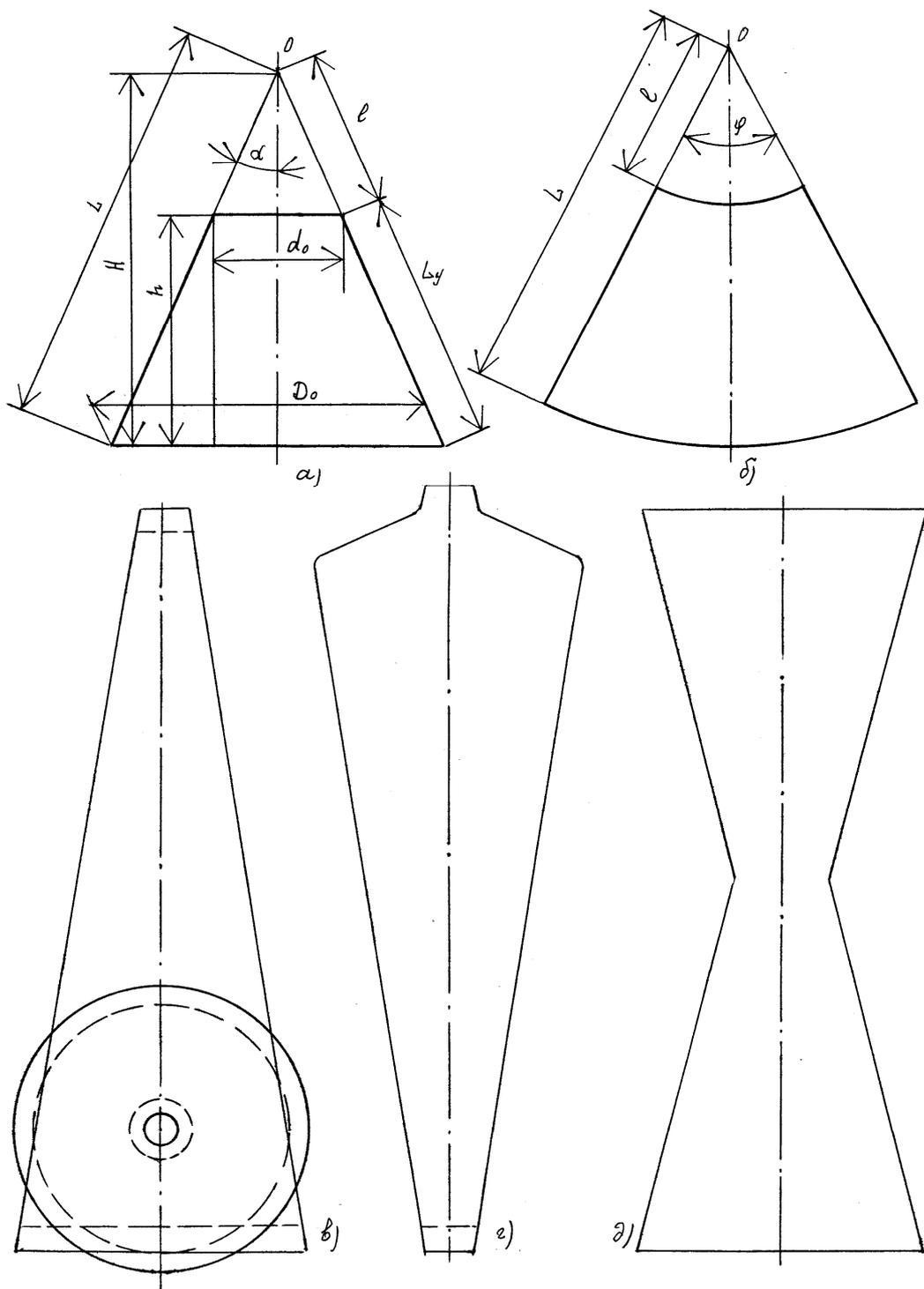


Рис. 3.22. Схема раскроя и сборки усеченного конического тороида:
 а – б – расчетная форма выкройки; в – д – варианты выкроек

Прорезиненная ткань должна быть эластичной, минимальной толщины и обладать устойчивостью к циклическим изгибам и образованию складок.

Резиновое покрытие может вызывать снижение прочности за счет деструкции материала в процессе вулканизации под воздействием компонентов резиновой смеси или соединений, выделяющихся из резины в процессе производства. Раздирающая нагрузка зависит от прочности ткани, свойств резинового покрытия, степени проникновения резины в ткань.

Чем плотнее ткань (больше число нитей на единицу площади), чем она более плоская, тем выше герметичность. Кроме того, герметичность прорезиненных тканей на основе синтетических текстилей выше, чем на основе хлопчатобумажных нитей. Чем выше газонепроницаемость каучука и качество, толщина резинового покрытия, тем выше герметичность. Герметичность зависит и от прочности связи, так как снижается количество дефектов материала, через которые может происходить не только диффузионная, но и фазовая проницаемость.

Стойкость к многократному изгибу зависит от стойкости к изгибу ткани, эластичности покрытия.

Жесткость ткани зависит от типа ее переплетения, массы и наличия пропитки, а также от свойств резины и толщины покрытия.

Регулировать свойства конструкционного материала можно путем повышения разрывной прочности нитей, их количества на погонной ширине образца, а также повышения коэффициента неоднородности за счет уменьшения угла наклона армирующих нитей к линии (направлению) приложения растягивающей нагрузки. Прочностные свойства материала и рабочие характеристики изделий можно также повысить, совершенствуя технологию их производства. В то же время при любом раскрое заготовок из-за резкой анизотропии материала не удастся достичь равнонапряженности поверхности оболочки.

С целью снижения отходов и более рациональному использованию раскройной формы рекомендуется применять для изготовления цилиндрических тороев плоские или тубичные торцы, а также прямолинейный раскрой вдоль нитей основы ткани. Такой раскрой легко механизировать, использовать универсальные методы сборки, снижать количество отходов при раскрое.

В результате проведенных исследований установлены следующие технологические требования к изготовлению эластичных конструкций из вулканизованных эластомерных армированных материалов на клеях холодного отверждения.

Оптимальным следует считать раскрой оболочки с максимальным коэффициентом использования прочностных свойств материала, снижающий до минимума отходы материала. Целесообразным принят раскрой прямоугольных элементов с направлением нитей основы вдоль действия максимальных растягивающих усилий.

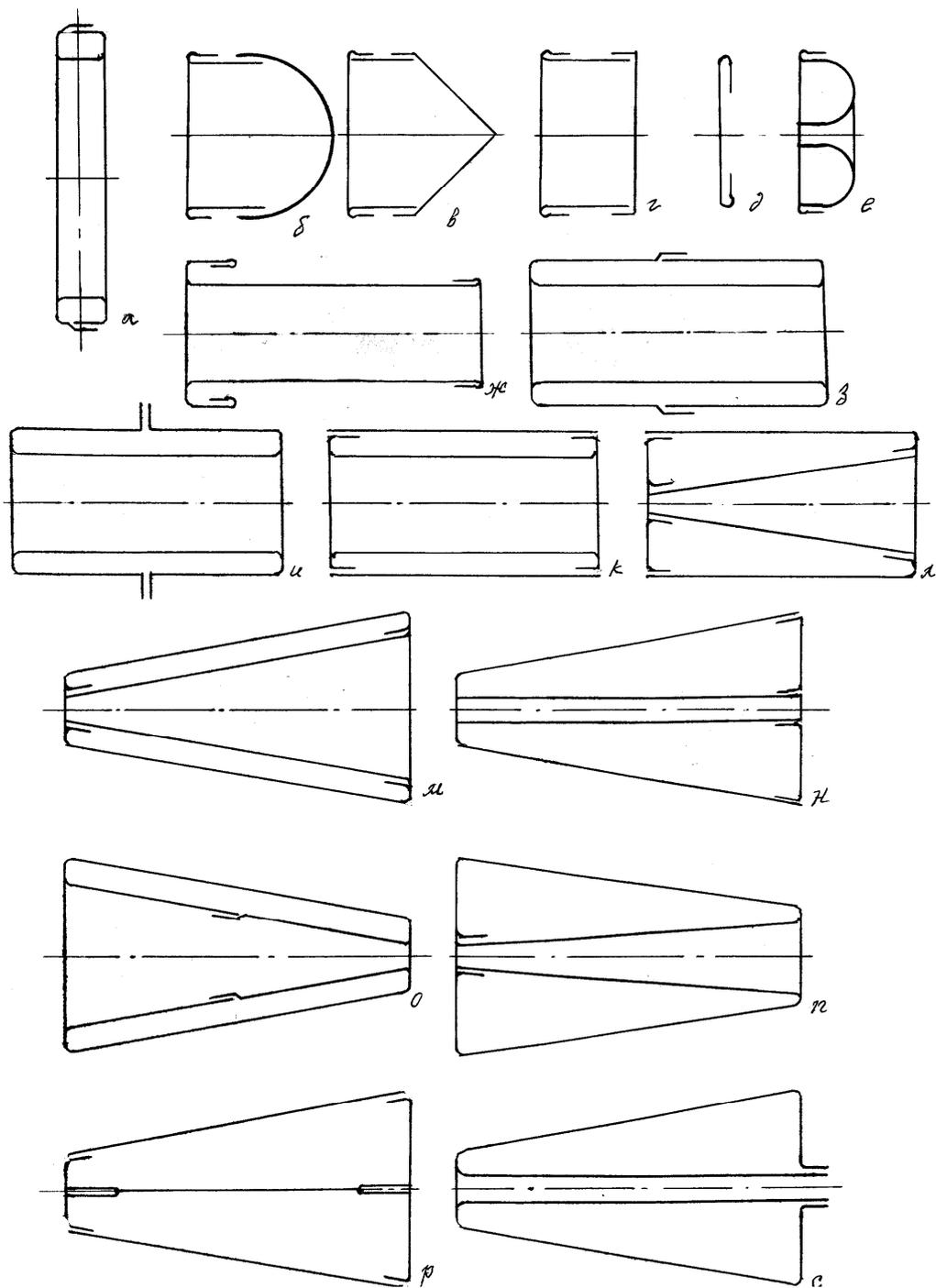


Рис 3.23. Схемы сборки:

а – трубчатых; б – е – мембранных; ж – рукавных; з – к – цилиндрических ; л – с – конических тороидов

Соединительный шов должен быть равнопрочным с основным материалом и иметь минимальную протяженность. Повышение прочности клеевых швов достигается путем увеличения модульности армирующих материалов, усиления конструкции стыка, например, с помощью прямых швов вдоль нитей основы, что требует соответственно прямоугольных в плане форм оболочки и плоского раскроя.

Конструкционный материал должен обеспечивать заданные технические и технологические свойства изделий. Он должен обладать способностью склеиваться, свариваться или дублироваться с другими материалами для создания объемных мягких конструкций, без изменения своих основных свойств. Материал должен иметь товарный вид, не загрязняться и не выделять вредных летучих компонентов.

Согласно технологическому регламенту все материалы и комплектующие детали проходят проверку на соответствие технологической и нормативной технической документации.

Раскрой всех деталей производят по разметке или шаблону на закройных столах ножницами или механическими ножами. Мелкие детали и отверстия на раскроенных деталях вырубаются штанцами или пробойниками на вырубном прессе или вручную.

Шаблоны располагают при разметке таким образом, чтобы на выкраиваемые детали не попадали дефектные места, а также соблюдалось направление нитей основы, указанное в чертежах.

Разметку под швы, контрольные метки, а также наклеиваемые детали производят цветным карандашом (восковым мелком) в зависимости от цвета прорезиненной ткани. Участки деталей, указанные в чертежах под пересклейку, подвергают шероховке на шероховальном станке или вручную с помощью наждачной бумаги, соблюдая правила техники безопасности.

Склейку раскроенных деталей производят строго по контрольным меткам. Все места деталей, подлежащие склейке, предварительно обезжиривают, протирая растворителем, и просушивают. Детали склеивают согласно режиму, указанному в инструкции на данный вид клея. Заделочную (защитную) ленточку на клеевой шов накладывают таким образом, чтобы осевая линия ленты проходила по кромке шва. Склеенные швы прикатывают роликом или на прикаточном станке для равномерного распределения клея и удаления пузырьков воздуха из области шва.

Собранные изделия после технологической выдержки проверяют на соответствие требованиям технических условий и чертежей. Готовые изделия упаковывают и согласно технологическому регламенту передают на склад.

В итоге, предлагается промышленный подход к разработке технологических требований на производство мягких тороидов различной формы. Критерии конструирования мягких пневматических конструкций можно применить и для создания тороидных оболочек, которые формулируются следующим образом.

1. Существующие формы мягких оболочек формализованы, если к ним не предъявляются специальные требования, поэтому рекомендуется выбор геометрической формы исходя из технологичности изделия.
2. С целью упрощения расчета реальной оболочки произвольной формы рекомендуется приведение их к единой модельной расчетной форме – вписанной в оболочку сфере.
3. Рекомендуется расчетным путем, с помощью вписанной сферической модели, определять зоны перенапряжения, которые в дальнейшем конструктивно разгружают, например, с помощью усиления и силовых поясов.
4. Для максимального использования прочностных свойств материала рекомендуются прямоугольные в плане геометрические формы оболочек с плоским раскроем, с прямолинейными соединительными швами на клеях холодного отверждения.

Такой подход к промышленной технологии является наиболее экономичным, позволяет максимально использовать прочностные свойства материала, при этом снизить его толщину, вес, трудозатраты, себестоимость.

Глава 4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛАСТИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Нелинейные зависимости между действующими усилиями и возникающими деформациями, деформациями формы и перемещениями поверхности оболочки приводят к сложной системе дифференциальных уравнений, решение которых не имеет выхода к практическим задачам.

В инженерных расчетах отработан ряд элементарных форм мягких оболочек. Поверхности оболочек различаются по так называемой гауссовой кривизне.

Она может быть положительной (эллипсоиды вращения, сфера), отрицательной (тороиды) или нулевой (цилиндры и конусы) кривизны, на которые разбиваются сложные и составные формы при расчете их напряженного состояния.

Основными принципами формообразования является совпадение главных направлений кривизны с направлением приложения главных напряжений в оболочке, а также технологичность раскроя. Так как механизм образования формы мягкой оболочки вытекает из физических особенностей рабочей среды (газа), заполняющей полость оболочки, в его основе лежит энергетическое равновесие системы *оболочка – сжатый газ*.

То есть газ стремится заполнить максимальный объем, а оболочка стремится сохранить минимальную поверхность. Оптимальной в этом случае является форма сферы.

Если предположить, что сферическая форма отражает действие центральных сил давления сжатого газа, то она является функцией сферы действия силового поля давления. Идеальной (модельной) равнонапряженной геометрической формой мягкой оболочки является сфера, отражающая действие центральных сил давления при минимальных энергетических затратах материала оболочки.

Однако материал и его свойства, погрешности раскроя, способы подкрепления, виды закрепления, внешние воздействующие (сжимающие) нагрузки изменяют идеальную форму сферы. При определенном соотношении размеров происходит деформирование оболочки, разрывность среды, образование новых сфер взаимодействия частиц газа (центральных сил давления), замыкающихся в эквипотенциальную равнонапряженную поверхность (рис. 4.1). При соотношении размеров оболочки за пределами граничного условия складкообразования форма оболочки является составной и может быть представлена несколькими вписанными модельными сферами.

При этом появляются новые условия для перераспределения напряжений. Например, у цилиндра с соотношением размеров длины к диаметру как 2 : 1, в продольном направлении появляется область распора (стяжка между двумя вписанными модельными сферами), погонные натяжения которого равны половине меридионального.

По той же причине для тора с соотношением размеров полуосей как 3 : 1, оболочку можно представить в виде трех сопряженных сфер.

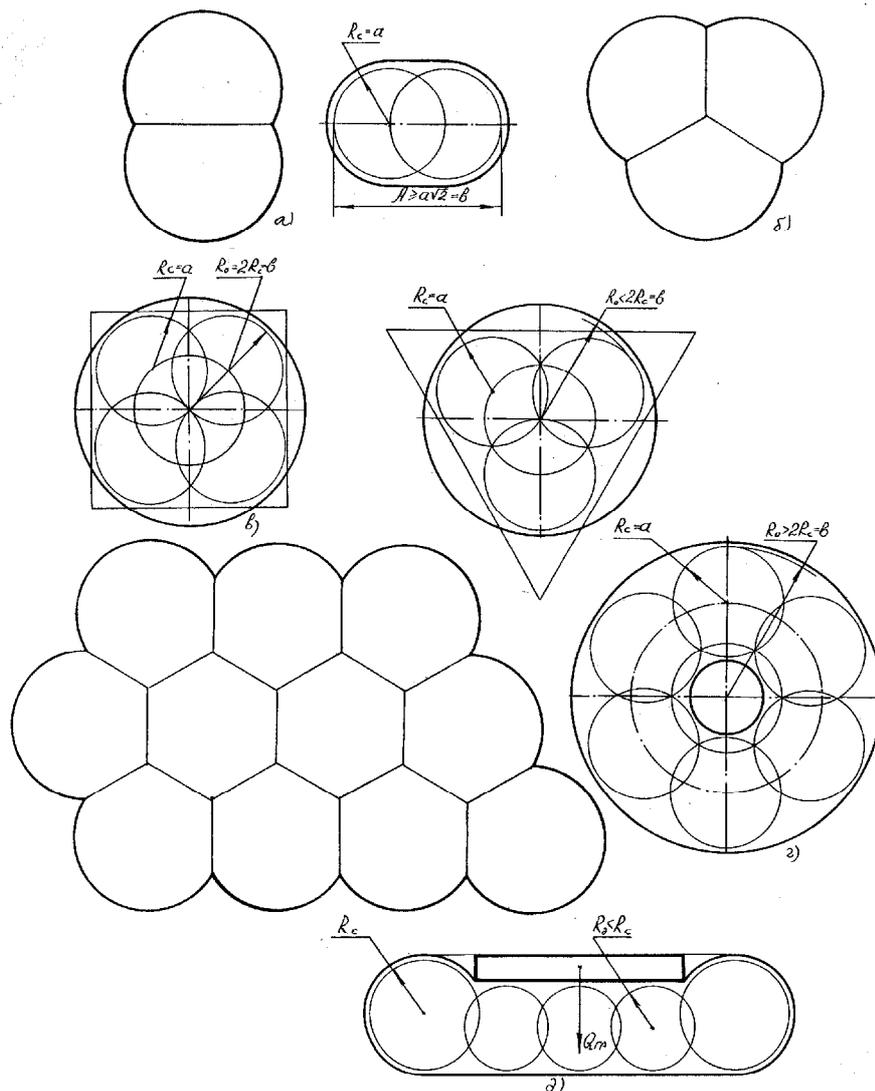


Рис. 4.1. Схема формообразования мягких оболочек с помощью равнонапряженной пузырьковой модели:

а – цилиндр; б, в – сплюснутые овалоиды; г – тор; д – пневмопанель

При соотношении $n : 1$ равнонапряженная оболочка является эквипотенциальной поверхностью, образованной вписанной панелью из n сопряженных сфер (рис. 4.1 г, д).

- Значит, основными приемами формообразования мягких оболочек являются:
- раскрой (конфигурация, направление нитей и швов, количество элементов);
 - деформирование, использование разгружающих элементов (лент, канатов, сетей, поясов, диафрагм);
 - каркасирование, закрепление (по образующей, по плоскости);
 - введение многослойности, многопролетности, автономных отсеков и полос-тей в конструкции, формообразующих элементов.

Следовательно, форма оболочки является отражением ее эксплуатационных, энергетических и технологических свойств. В то же время с помощью пузырьковой модели любую форму мягкой оболочки можно привести к равнонапряженной сфере или блоку сфер, распирающих замыкающую мягкую оболочку с определенной закономерностью как в области бесскладчатости, так и складкообразования.

Пузырьковая модель позволяет упростить проектный расчет, определить механизм напряжения мягкой оболочки, установить зоны перенапряжения, перераспределить натяжения оболочки за пределы опасной зоны концентрации напряжений.

Теория мягких оболочек развивалась на методологических идеях классической теории пластин и оболочек с использованием математических, технических и элементарных подходов [2, 89]. В ее основе лежат уравнения колебаний мембран Эйлера, упрощенное уравнение изгиба пластин Бернулли, одно из уравнений равновесия безмоментной теории оболочек вращения Лапласа [37].

При решении частных прикладных задач разрабатывались упрощенные модели оболочек и численные методы расчета. Создана общая линейная теория гладких тонких упругих оболочек, подверженных статическому воздействию нагрузки. Изучаются сложные конструктивные формы оболочек. Получила развитие контактная задача и задача локальных воздействий, исследуется напряженно-деформированное состояние и задачи устойчивости. Развивается геометрическая нелинейная теория, теория больших перемещений.

Исследуются мягкие конструкции в статических и динамических условиях эксплуатации, а также гидро- и аэроупругость при взаимодействии оболочек с рабочей средой.

Наряду с теоретическим используется экспериментальный путь исследования; применяются численные и дискретные расчетные модели. Особое внимание уделяется следующим свойствам материала: нелинейная упругость, анизотропность, пластичность, вязкость.

Анализ методов проектного расчета мягких оболочек позволил определить начальные условия применения каждого из них и оценить степень точности расчетов.

Все варианты линейной теории тонких оболочек, выбранных в качестве аналогов для мягких оболочек, основаны на следующих гипотезах [37].

Перемещения считаются малыми, и используются линейные геометрические соотношения, связанные с перемещением и деформацией.

Прогибы предполагаются настолько малыми, что могут быть приняты линейные выражения для изменения кривизны.

Справедливы гипотезы Кирхгоффа – Лява, согласно которым элемент нормали к срединной поверхности в процессе деформации не изменяет своей длины, остается прямым и нормальным к деформированной поверхности. Срединной называется геометрическое место точек, равноудаленных от внешней и внутренней поверхности оболочки.

Оболочка является достаточно тонкой и находится в условиях обобщенного плоского напряженного состояния. Толщина и термомеханические свойства материала не изменяются по координатам, измеряемым в срединной поверхности.

Используются линейные физические соотношения, то есть материал считается линейно упругим.

В зависимости от формы срединной поверхности, характера закрепления и вида внешнего воздействия оболочка рассматривается в трех различных напряженных состояниях: смешанном, безмоментном и изгибном (моментном).

Наиболее предпочтительно для мягких оболочек безмоментное состояние, к которому приводят обычно форму и способ закрепления оболочки.

Мягкие оболочки относятся к безмоментным, так как их относительная толщина мала и незначительна изгибная жесткость. Следовательно, эластичный механизм не может нести какую-либо нагрузку без предварительного натяжения оболочки избыточным давлением рабочей среды. Этими величинами можно пренебречь.

Под действием внешней приложенной силы поверхность оболочки перемещается благодаря упругим свойствам среды, а так как оболочка не способна сопротивляться изгибу и сжатию, то избыточное давление принимается как давление объемного растяжения или формообразования. В результате этого наблюдается линейная зависимость изменения физических и геометрических соотношений от напряженного состояния рабочей среды.

4.1. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЯГКИХ ОБОЛОЧЕК

Физические свойства рабочей среды

Принято считать, что в области сверхнизких (лапласовских) давлений газа имеют место как пустоты, так и флуктуации. Все воздушное пространство состоит из точечных частиц, взаимное расположение которых при сжатии ограничено условием взаимодействия.

К таким условиям относятся притяжение и отталкивание под действием сил давления, электромагнитных (кулоновских), химических (ионных), сил молекулярного взаимодействия (ван-дер-ваальсовых). В процессе взаимодействия вокруг центров напряжения формируются структуры по принципу рационального энергетического взаимодействия: минимальная поверхность при максимальном объеме.

Следует отметить, что в сплошной среде идеальных газов, частицей принято называть весьма малый элемент объема среды, размеры которого в то же время во много раз больше межмолекулярных расстояний [94].

Под реальным газом понимается дискретная структура, силы межмолекулярного взаимодействия которой оказывают существенное влияние на ее формирование. Такие системы построены по силовой зависимости, имеют сферическую область взаимодействия и могут создавать устойчивые структуры.

Принимаем модель реального газа карпускулярной и волновой одновременно, имеющую электромагнитную и квантовую природу межмолекулярного притяжения и отталкивания. По определениям гидроаэростатики отличительной особенностью жидкостей и газов, по сравнению с твердыми телами, является их текучесть – малое сопротивление сдвиговым деформациям.

Различием между жидкостью и газом является зависимость их плотности от давления, то есть жидкость практически несжимаемая, газ в условиях низких и сверхнизких давлений – линейно упругий.

Для простых жидкостей, состоящих из сферически симметричных молекул, взаимодействие между ними носит парный характер, и осуществляется центральными силами, имеющими сферический потенциал (рис. 4.2.)[84].

А так как пневмоконтрукция – эластичный механизм, обладающий упругостью сжатого газа, замкнутого в мягкую оболочку, рассмотрим его состояние.

Элементарная частица газа обладает собственным полем сил притяжения (взаимодействия), аналогичных центральному полю точечной частицы электромагнитного поля.

Для обеспечения силовых свойств эластичных механизмов под действием внешней сжимающей нагрузки используется низкое и сверхнизкое избыточное давление рабочей среды.

Установлено [90], что от уровня давления зависят параметры состояния газа. «Очень низкий» уровень (до 1 мм рт. ст.) относится к так называемым «нулевым» давлениям; «низкий» (от 1 мм рт. ст. до 10 атм) характеризуются линейной зависимостью; а «высокий» (свыше 10 атм) – нелинейной зависимостью сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния между частицами среды (газа).

При низком уровне рабочего давления (ΔP_p), соответствующего эксплуатационным условиям силовых оболочечных конструкций, количество частиц в единичном объеме составляет:

$$n = \Delta P_p / kN = 3 \times 10^6 \Delta P_p, \text{ шт/см}^3 \quad (4.1)$$

Расстояние между частицами рабочего газа рассчитывают по формуле:

$$l = 1/n = kN / \Delta P = 1 / \Delta P \times 1/3 \times 10^6 \cong 1/10^{6-7}, \text{ см}$$

Взаимодействия такого порядка относятся к упругим или Ван-дер-Ваальсовым. Потенциальная энергия взаимодействующих частиц зависит от межмолекулярного расстояния и имеет тот же порядок [94].

Следовательно, внутренняя энергия среды, которой нельзя пренебречь, величина значимая.

Молекулярные силы, действующие между фиксированными центрами пар молекул (частиц), являются центральными и формируют поле центральных сил давления, потенциальная функция которого сферически симметрична.

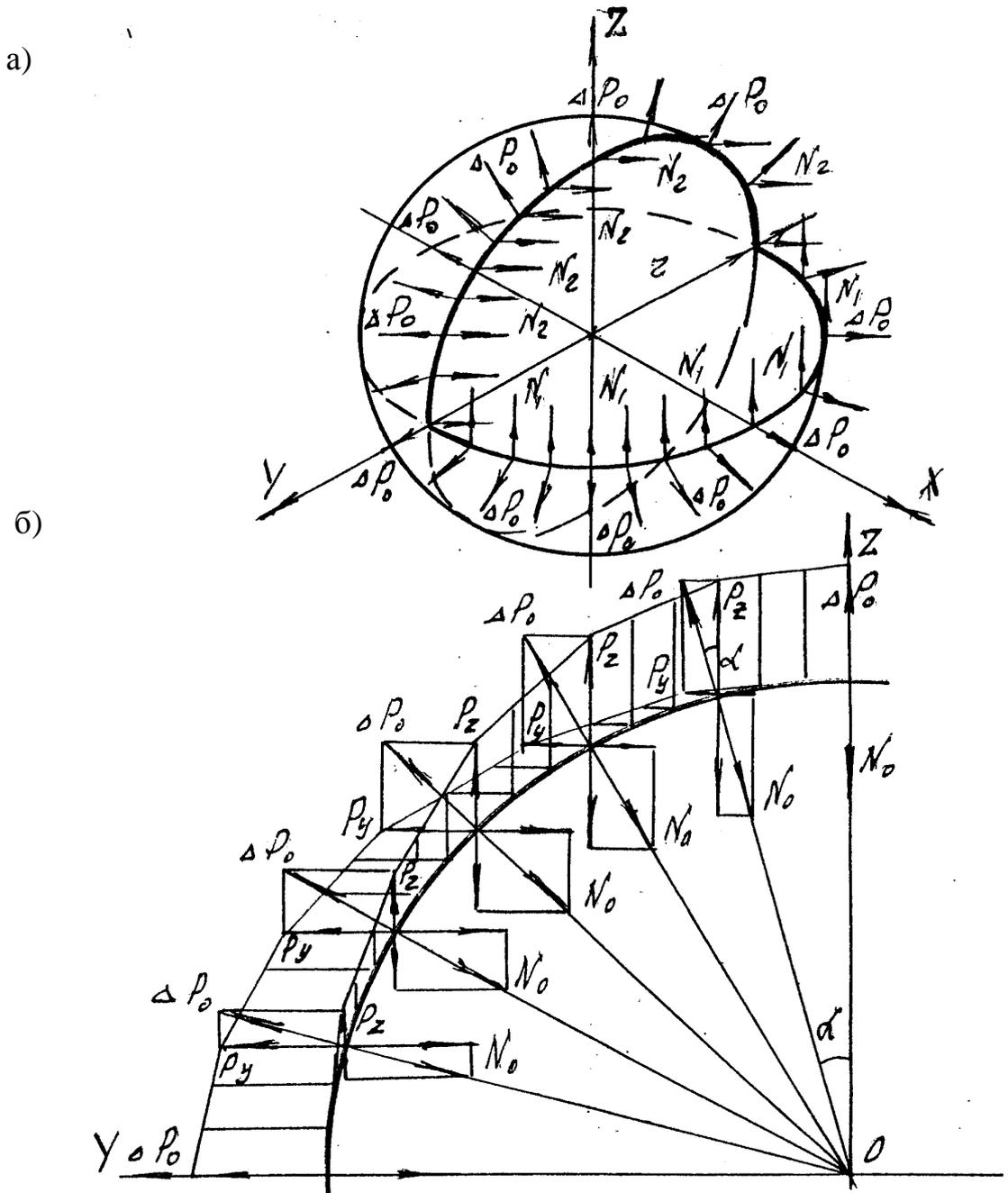


Рис. 4.2. Распределение растягивающих усилий (N_1) и (N_2) и их горизонтальных и вертикальных реакций, распределенных по оболочке от действия: а – центральных сил (N_0); б – внутреннего избыточного давления (ΔP_0)

В соответствии с молекулярно-кинетической теорией моделью упругого взаимодействия частиц является система упругих сфер, вписанных в замыкающую мягкую оболочку, диаметр которых равен высоте оболочки, в том числе и

деформированной, что представляет собой пузырьковую модель, обладающую свойствами мыльной пленки.

Так как для сферически симметричной функции векторное поле центральных сил зависит только от расстояния от начала координат (или центра напряжения), то потенциальные силы равны градиенту силовой функции (Рис. 4.1.):

$$F = \partial U / \partial X i^{\otimes} + \partial U / \partial Y j^{\otimes} + \partial U / \partial Z k^{\otimes} = \text{grad } U. \quad (4.2)$$

Следовательно, движение материальной точки (частицы) под действием центральных сил обратно пропорционально квадрату расстояния от этого центра, то есть аналогично взаимодействию точечных зарядов электромагнитного поля:

$$F = - r^{\otimes} \alpha / r^3, \quad (4.3)$$

где $\alpha \gg 0$ – постоянная величина, связанная с взаимодействием частиц или зарядов силового поля;

r^{\rightarrow} – радиус-вектор центральных сил, см;

r – расстояние от центра до материальной точки, см.

Потенциальная энергия среды обратно пропорциональна радиусу сферы взаимодействия:

$$U = - \alpha / r \quad (4.4)$$

и имеет физическую аналогию с уравнением Лапласа

$$DP_o = 2/3 N S_o / V_o = 1/2 N / R. \quad (4.5)$$

Отсюда, действия центральных сил давления аналогичны действию электростатических сил, между ними установлена связь зависимости напряженности и потенциала от расстояния до начала координат (или центра взаимодействующих частиц).

Следует заметить, что при низком и сверхнизком сжатии существуют как плотные, так и разреженные структуры. Это приводит к их перемещению, как прямолинейному, так и вихревому. Разница напряжений, аналогичная разности потенциала, устанавливает направление действия их центральных сил, формирующих силовое поле давления. Эти поля обладают градиентностью векторных сил притяжения и отталкивания, емкостью, напряженностью. Структура газа, скорее всего, носит флуктуационный характер. Значит, для определения параметров состояния частиц газа в центральном поле давления можно использовать физические зависимости геометрически тождественной системы точечных зарядов электростатического поля.

По закону аддитивности физические закономерности частиц на молекулярном уровне сохраняются для моделей на их макроуровне.

Отсюда, любое замкнутое пространство, заполненное сжатым газом, можно представить сферическим полем или блоком взаимодействующих сферических силовых полей равного потенциала (диаметра), вписанных в это пространство.

Так как геометрическую форму любой замкнутой мягкой оболочки задает силовое поле сжатой рабочей среды, взаимодействующее с ее внутренней поверхностью, то именно поле центральных сил давления формирует геометрическую форму мягкой оболочки. Под действием сжатия внешняя и внутренняя поверхности оболочки деформируются.

Изменение соотношения геометрических размеров деформированной внутренней поверхности оболочки приводит к изменениям: объема, давления, напряженности поверхности оболочки внутренним давлением. Преобразование конфигурации внутренней поверхности приводит к изменению эквипотенциальной поверхности силового поля давления, которая в точках касания с внутренней поверхностью оболочки имеет равные напряжения.

Таким образом, оболочечные системы построены по силовой зависимости, имеют сферическую область взаимодействия и могут создавать устойчивые структуры. Отсюда постулируем первое начальное условие существования напряженного состояния оболочки.

Первый постулат – сжатая среда формирует силовое поле, в области лапласовских величин рабочих давлений существуют силовые поля давления, имеющие предположительно флуктуационную природу.

Роль энергетического состояния среды в процессе формообразования мягкой оболочки

Для рассмотрения энергетических параметров напряжения мягкой оболочки газовой средой (первое положение) представим оболочку в виде физической модели с минимальными компонентами. Ее моделью выбираем свободно висящий равнонапряженный мыльный пузырь, массой которого пренебрегаем из-за ее малой величины.

Источником растяжения мыльной пленки является работа сил давления сжатой газовой среды. Это давление можно рассматривать как сумму: атмосферного (P_0); давления формообразования, компенсирующего деформационные свойства материала при изгибе (лапласовское P_l), а для силовых оболочек еще и рабочего давления (P_p), необходимого для обеспечения функционального назначения, в частности, грузоподъемности. Избыточное давление (DP) рассчитывают по формуле:

$$DP = P_l + P_p - P_0. \quad (4.6)$$

При отсутствии работы массы груза избыточное давление равно лапласовскому:

$$DP = P_l. \quad (4.7)$$

Работу давления газа (A_g) определяют по формуле:

$$A_g = 3/2 DP_0 V, \quad (4.8)$$

где V – объем оболочки.

Работа растяжения мыльного пузыря (A_p) в условии энергетического равновесия связана с натяжением его погонными растягивающими усилиями (N) и площадью поверхности напряжения (S_0):

$$A_p = N S_0. \quad (4.9)$$

Связь между параметрами напряжения среды и натяжением оболочки рассчитывают по формуле:

$$N S_0 = 3/2 DP_0 V. \quad (4.10)$$

Уравнение (4.10) является уравнением Лапласа и имеет другую интерпретацию:

$$N = 3/2 DP_o V/S_o = 3/2 DP_o (4/3 pR^3) / 4 pR^2 = 1/2 DP_o R, \quad (4.11)$$

где R - радиус сферы.

Таким образом, уравнения (4.10) и (4.11) отражают энергетическую взаимосвязь рабочего давления и натяжения замыкающей оболочки и являются энергетической моделью мягких оболочек.

В общем случае энергетическое равновесие деформированной мягкой оболочки в условиях воздействия внешней сжимающей нагрузки (Q) определяется зависимостью:

$$3/2 DP V - Q H = N S, \quad (4.12)$$

откуда

$$N = 3/2 DP V/S - Q H/S = 1/2 DP R - 1/2 Q H/S_k = 1/2 DP (R - H); \quad (4.13)$$

где H , S – высота и боковая поверхность деформированной оболочки, соответственно;

S_k – площадь контакта оболочки с грузом.

Так как при действии внешней сжимающей нагрузки часть работы давления среды расходуется на сопротивление внешнему воздействию, то работа натяжения оболочки снижается пропорционально площади боковой поверхности, свободной от контакта с грузом.

При растяжении мыльной пленки на каждом этапе раздувания пузыря его стенки становятся тоньше, сохраняя строение и постоянство поверхностного натяжения, уравновешивающего лапласовское давление ($N = const$):

$$DP_o = 2/3 N S_o/V_o = 1/2 N/R. \quad (4.14)$$

Таким образом, уравнение Лапласа устанавливает предельное состояние напряжения оболочки, учитывает влияние упругих свойств материала и размеров оболочки на ее формообразование, а для жидкой рабочей среды еще и гидростатического давления. Для силовой оболочечной конструкции это уравнение является условием равновесия, энергетическим балансом работ давления, массы нагружающего груза и растяжения оболочки.

Следовательно, уравнение Лапласа – энергетическая модель мягкой оболочки.

Роль энергетических свойств материала в процессе формообразования мягкой оболочки

Источником растяжения мыльной пленки, имеющей адсорбционную картину растяжения, является работа сил давления сжатой газовой среды.

В то же время, нагнетая газ в резиновый шарик, мы создаем двухосное напряжение материала (s), обладающего упругим сопротивлением растяжению, в первом приближении пропорциональным достигнутой деформации:

$$s = 1/2 DP_o R/H \rightarrow DP_o = 2s H/R. \quad (4.15)$$

Очевидно, что при растяжении упругого резинового материала требуется большее усилие, чем при растяжении абсолютно эластичной мыльной пленки, зависящее от физических соотношений материала:

$$N = 1/2 DP R (1 - m) / E_p, \quad (4.16)$$

где E_p – модуль упругого растяжения материала;
 m – коэффициент поперечного сжатия.

Аналогично, природа натяжения резиноармированных материалов в области упругого напряжения условно подчиняется закону Гука [4], а растягивающие усилия и радиусы кривизны рассматриваются как двухосные: вдоль меридиана оболочки – меридиональные (N_1, R_1) и вдоль ее широты – окружные (N_2, R_2). То есть, формула (4.16) принимает вид:

$$N_1 / R_1 - N_2 / R_2 = 1/2 DP R (1 - m) / E_p. \quad (4.17)$$

Упругие свойства материалов реальных мягких оболочек, а также соединительных стыков приводят к дополнительным сжимающим газ усилиям, перераспределению натяжения поверхности оболочки.

Мягкий материал оболочки представляет собой композит из тканевой арматуры и эластомерного связующего. Поэтому в той или иной мере его упругость зависит от материала, степени напряжения и носит нелинейный характер.

Деформирование равнонапряженной сферы в овалоид вращения с различным соотношением размеров полуосей симметрии зависит от величины внешней сжимающей нагрузки.

Таким образом, поле давления сферически градиентно, формы оболочек – производные сферы. Величина избыточного давления, форма и размеры (радиус кривизны) оболочки являются определяющими параметрами напряженного состояния мягкой оболочки и потенциальной энергии системы. Постулируем второе условия существования напряженного состояния оболочки.

Второй постулат – среда дискретна, материал однороден, форма оболочки приведена к сфере равного напряжения.

Обоснование расчета главных напряжений мягких оболочек

Механическое равновесие системы *оболочка-рабочая среда* под воздействием внешних нагрузок определяется энергетическими свойствами рабочей среды и мягкого конструкционного материала. Такими материалами являются импрегнированные ткани, то есть комбинация силовой основы и защитного связующего – эластичного полимерного (эластомерного) покрытия. Прочностные показатели мягких материалов зависят от свойств исходного сырья, структурных и технологических показателей.

Принято считать, что материал, изготовленный из технических тканей, может находиться в состоянии двухосного натяжения при равномерном распределении нагрузок, или в одноосном – при действии сил в плоскости изделия по какой-либо прямой. При одноосном растяжении вдоль нитей основы или утка прочность тканей, характеризуемая равной нагрузкой, зависит прежде всего от прочности и числа продольных нитей в испытываемом образце, непосредственно воспринимающих нагрузку.

Основным условием равновесного состояния мягкой оболочки, предварительно напряженной избыточным давлением сжатого газа, является равенство

работ: растяжения материала оболочки, стремящейся сжаться и уменьшить площадь поверхности, и давления газа, направленного на расширение и увеличение поверхности, ограничивающей его объем. Рассмотрим метод расчета мягких оболочечных конструкций, в том числе составных форм, а также деформированных внешней сжимающей нагрузкой, с помощью пузырьковой модели.

При разработке метода расчета главных натяжений мягких оболочек предлагается использовать пузырьковую модель, не зависящую от соотношения геометрических размеров, раскройной формы или формоизменения в процессе эксплуатации. Так как любое замкнутое газовое пространство дискретно, и оно структурно может быть представлено блоком соприкасающихся упругих сфер, вписанных в эту полость, то можно принять сумму объемов этих сфер (пузырьков равного диаметра) в качестве модели объема, замыкающей мягкой оболочки. При этом простые, составные и деформированные оболочки отличаются друг от друга лишь количеством сопряженных пузырьковых элементов и их размерами (диаметром).

Составные оболочки можно разделить на пузырьковые модели: одинарные (сфера); сдвоенные (цилиндр, оваллоид) (рис.4.3 б), строенные (линза, оваллоид сплюснутый) (рис. 4.3 в); а также состоящие из четырех (тороид, подушка) (рис. 4.3 г) или шести (тор) (рис. 4.3 д). Их взаимодействие между собой может осуществляться по плоскости или в точке. Блок равных по диаметру пузырьков (панель) больше четырех не ограничен условием сочленения.

Зависимость формообразования и напряженного состояния оболочки от энергетических свойств позволяет привести геометрические и физические ее параметры к вписанной модели – сфере уровня напряженности (поля сил давления) рабочей среды в замыкающей ее оболочке (рис.4.4).

Геометрическим параметром вписанной модельной сферы принимается ее диаметр, равный высоте составной или деформированной оболочки, а физическим – потенциал силового поля центральных сил давления, определяемый также радиусом сферы напряжения.

Следовательно, диаметр равнонапряженной вписанной в оболочку модельной сферы определяет главные напряжения мягкой оболочки.

В случае поверхности вращения с соотношением полуосей симметрии в пределах условия складкообразования (бесскладчатости) меридиональные натяжения определяют из уравнения Лапласа (4.11).

$$N_M = DP r_M / 2 = DP R_C / 2 = DP H / 4 = N_O, \quad (4.18)$$

где N_M – усилие меридионального натяжения;

DP – избыточное давление рабочей среды;

$r_M = R_C$ – радиус кривизны поверхности распределения давления;

$R_C = H/2$ – радиус вписанной сферы;

N_O – усилие окружного натяжения.

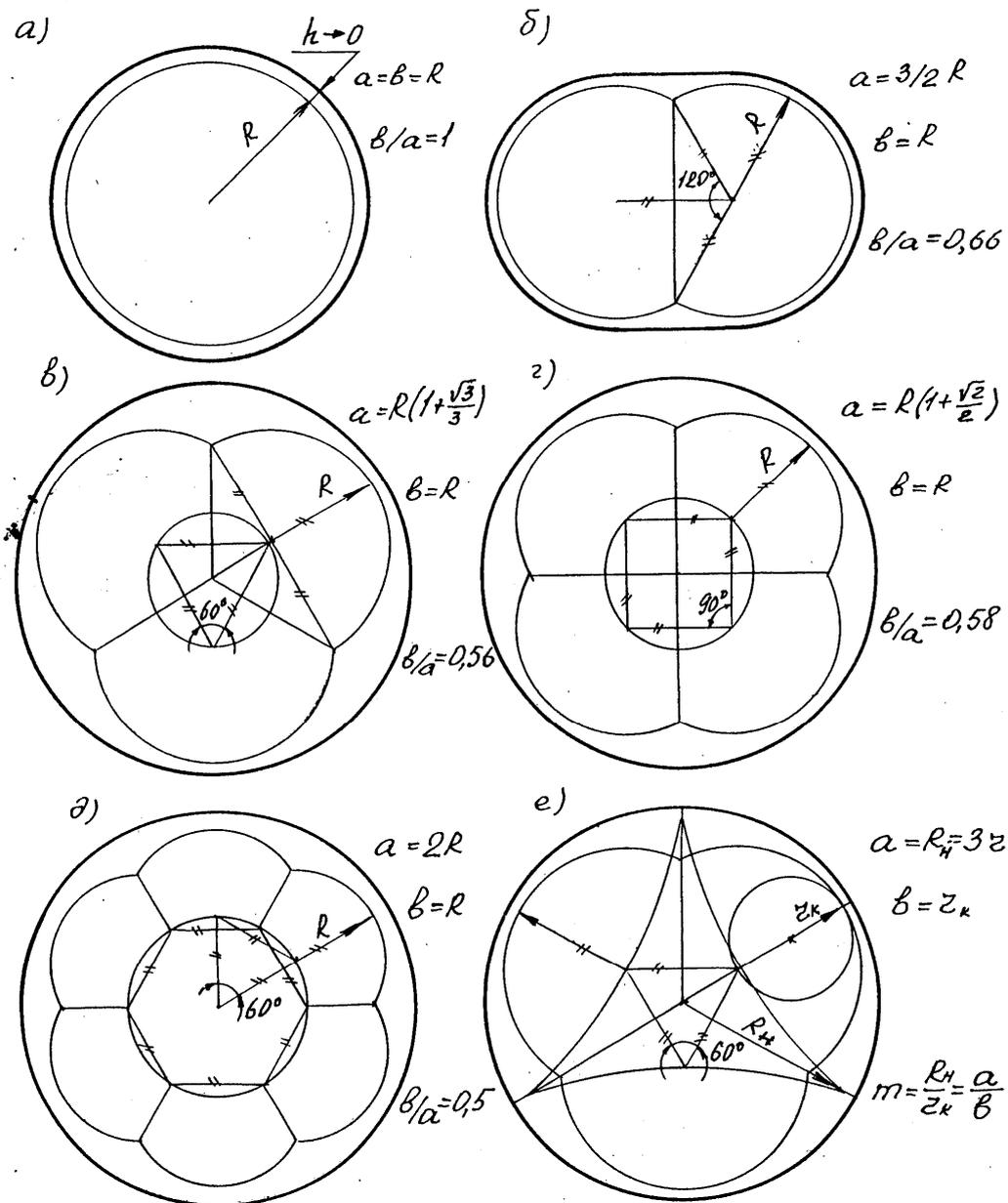


Рис. 4.3. Формообразование мягких оболочек с помощью моделей мыльных пузырей:
 а – сфера; б – цилиндр; в, г – сплюснутый оваллоид; д – тор; е – схема складкообразования с
 помощью уравнения гипоциклоиды

Натяжения вдоль образующей мягкой оболочки (окружные) зависят от соотношения геометрических параметров, в частности, для сферы они равны меридиональным, для всех других поверхностей вращения, в пределах условия складкообразования, меньше меридиональных. Для составных и деформированных мягких оболочек окружные натяжения, как натяжения распора между парой вписанных сфер, меньше меридиональных в два раза:

$$N_M - N_O = DP R_C / 4. \quad (4.19)$$

Меридиональные натяжения боковой поверхности, свободной от контакта со сжимающим грузом, деформированных мягких оболочек, определяются по радиусу кривизны, которой принимается равным радиусу вписанной сферы равного напряжения.

Так как уравнение (4.18) имеет энергетическую природу, то его можно представить в виде уравнения энергетического равновесия работ давления и натяжения оболочки [16].

$$N_M = DP H / 4 = DP R_C / 2 = 3 DP V / 2 S_O, \quad (4.20)$$

где V – объем оболочки (сферической);

S_O – площадь поверхности нагружения.

В соответствии с законом Бойля – Мариотта связь между изменениями работ давления газа и натяжения замыкающей оболочки должна учитывать соотношение:

$$DP_1 V_1 = DP_2 V_2 \quad (4.21)$$

В случае воздействия на мягкую оболочку деформирующей ее сжимающей нагрузки, уравнение (4.20) принимает следующий вид:

$$3 DP V / 2 - Q H = N_M S_O, \quad (4.22)$$

где Q – масса груза (распределенная сжимающая нагрузка);

N – суммарное натяжение оболочки.

Таким образом, уравнения (4.18), (4.20), (4.22) являются основными для расчета главных напряжений мягких оболочек, в том числе составных и деформированных внешней сжимающей нагрузкой.

Все осесимметричные мягкие оболочки – производные от сферы.

Следовательно, модельная равнонапряженная сфера, вписанная во внутреннюю полость, является расчетной формой оболочки. Реальная оболочка всегда неравнонапряженная и может быть представлена вписанной и описанной модельными сферами, напряжение которых обратно пропорционально их объемам.

Таким образом, всегда существует равнонапряженная сфера, которая, будучи вписанной в реальную оболочку, в точках касания с реальной оболочкой будет иметь равные с ней напряжения.

Зависимость натяжения мягкой оболочки от соотношения геометрических размеров

Рассмотрим зависимость натяжения замыкающей оболочки от уровня напряжения рабочей среды (третье положение).

Так как напряжение рабочей среды зависит от поверхностей уровня сферически симметричного силового поля центральных сил давления, то любая реальная оболочечная конструкция ($R_{эс}$) может быть представлена моделью – поверхностью уровня напряженности сжатой среды, вписанной ($R_{сс}$) (максимальной) или описанной ($R_{сд}$) (минимальной) вокруг реальной оболочки (рис. 4.4).

Пересечение таких линий уровня напряженности с поверхностью реальной оболочки позволяет определить изменение ее напряженного состояния в зависимости от расстояния до центра силового поля. Для частиц, взаимодействующих внутри замкнутой системы, соотношение размеров которой находится за пределами условия складкообразования ($R_{сс} \geq R_{сд}$), в соответствии с принципом наложения напряженность деформированного силового поля равна векторной сумме напряженностей из точечных зарядов.

Например, наложение конфигураций линий уровня пары взаимодействующих частиц (точечных зарядов) представляет суммарную линию, имеющую форму сплюснутого или вытянутого овала с соотношением размеров полуосей симметрии соответственно больше или меньше единицы.

Для определения зависимости натяжения деформированной мягкой оболочки от напряжения рабочей среды рассмотрим усилия, при действии которых два мыльных пузыря, прижатые друг к другу, находятся в равновесии. Если сдвоенные пузыри свободно висят в воздухе, сохраняя сферическую форму, то в этом случае сближение центров сфер, равное ($2m$), мало по отношению к первоначальному межцентровому расстоянию, равному ($2R$), площадь контактного пятна эквивалентна радиусу сферы [18].

Определим силу, с которой притягиваются прикоснувшиеся два мыльных пузыря:

$$F = - DU_n / m = 4 p R m T @ 2x^2 T. \quad (4.23)$$

Установлено, что сила притяжения прикоснувшихся пузырей пропорциональна их радиусу и первоначальному межцентровому расстоянию ($2R$), то есть площади пятна контакта (x^2), где ($x^2 @ 2R m$). Формообразование мягких оболочек с помощью моделей мыльных пузырей показано на рис. 4.2 [86]. Следует отметить, что при слиянии пузырей образуется мембрана, а слившиеся пузыри теряют сферическую форму, и замыкающая оболочка приобретает форму вытянутого овалоида (рис. 4.3 б). Такую форму принимает также цилиндрическая оболочка с соотношением размеров длины к диаметру ($1 < a/b < \sqrt{2}$).

В соответствии с принятым ранее условием любая полость замкнутой оболочки может быть представлена пузырьковой моделью, то есть блоком соприкасающихся упругих сфер, диаметр которых равен высоте (диаметру) замыкающей оболочки.

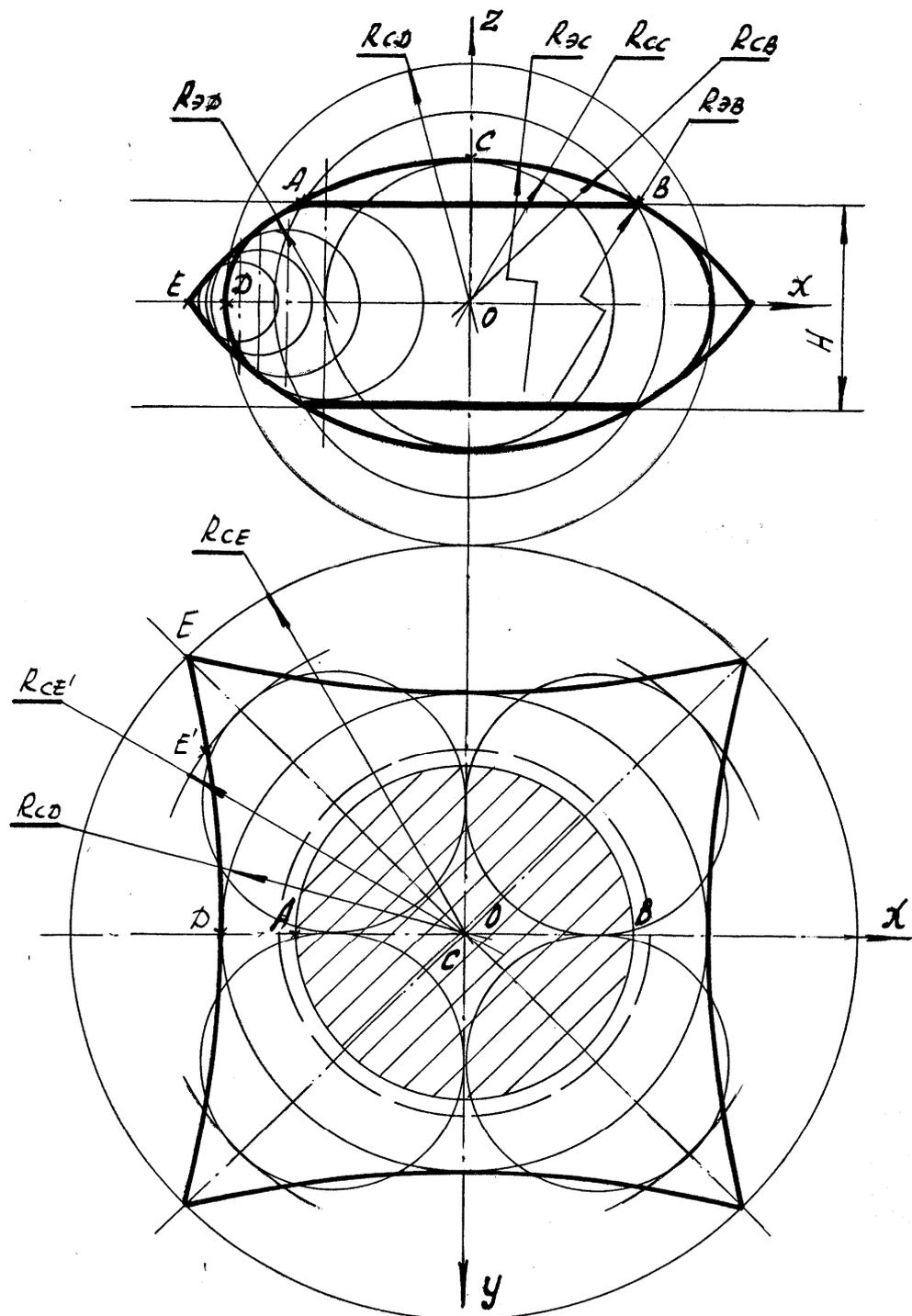


Рис. 4.4. Зависимость уровня напряженности сжатой рабочей среды от расстояния до центра напряжения (пузырьковой модели, вписанной (R_{cc}) и описанной (R_{cd}) вокруг реальной оболочки)

Для этого впишем пару взаимодействующих упругих сфер в мягкую оболочку с заданным соотношением размеров, затем станем надуть их избыточным давлением газа. Повышение давления в сферах приведет к увеличению межцентрового расстояния, уменьшению диаметра и площади мембраны, перераспределению напряжений пропорционально радиусам кривизны.

При увеличении соотношения размеров замыкающей оболочки в пределах ($\sqrt{2} < a/b < 2$) произойдет взаимное отталкивание упругих сфер, пропорциональное площади мембраны и уровню давления в них. При этом кривизна замыкающей оболочки между вписанными сферами обратится в нулевую, а в торцах станет близкой радиусу вписанных сфер.

Кольцевые и окружные (меридиональные) натяжения будут иметь различную природу: кольцевые образуются при взаимодействии оболочки с упругой сферой (со сжатой средой), а окружные – за счет распора двух вписанных упругих сфер.

Следовательно, окружные усилия не зависят от количества вписанных сфер.

Условием разрыва среды (полного отрыва сфер) является такое соотношение размеров длины к диаметру ($a/b = 2$), которое совпадает с условием складкообразования [48] и одноосности напряжения мягкой оболочки.

Следует отметить, что мягкие оболочки с соотношением размеров ($a/b \leq 2$) относятся к бесскладчатым оболочкам.

Если соотношение размеров находится за пределами условия бесскладчатости, то их геометрическая форма – складчатая, что затрудняет их расчет из-за отсутствия определенной начальной формы. Так, напряженное состояние сжатого овалоида (тороида) с соотношением размеров за пределами условия бесскладчатости требует приведения к простым формам и может быть определено с помощью пузырьковой модели.

Представим поверхность сплюснутого овалоида в виде замыкающей, в которую вписаны упругие сферы (см. рис. 4.3 в).

По аналогии со сдвоенными пузырями устойчивое формобразование

«строенных» пузырей возможно при соотношении размеров высоты и диаметра, равном ($a/b \approx \sqrt{2}$). При этом условием разрыва среды, очевидно, будет соотношение размеров ($a/b = 3$).

Установлено [86], что это условие является уравнением гипоциклоиды и может быть использовано для определения модели составных форм, а также условия складкообразования. При этом параметры (R_n) и (r_n) являются радиусами направляющего и производящего кругов соответственно (рис. 4.3 е). Количество складок в зависимости от соотношения размеров деформированной мягкой оболочки определяется уравнением гипоциклоиды:

$$a = b R_n / r_n = m b. \quad (4.24)$$

На рис. 4.1 б – д показаны схемы формобразования мягких оболочек составных форм с помощью модельных пузырей, сопряженных по принципу плотной упаковки.

Так как, в соответствии с законом аддитивности [18], объем тела равен сумме объемов его структурных элементов, то любой объем мягкой оболочки

можно представить в виде суммы объемов составляющих упругих сфер пузырьковой модели. Составные оболочки по количеству сопряженных пузырьковых элементов можно разделить на сдвоенные, строенные, состоящие из четырех, а также множества (блока) пузырей, взаимодействующих по плоскости (мембране) или в точке.

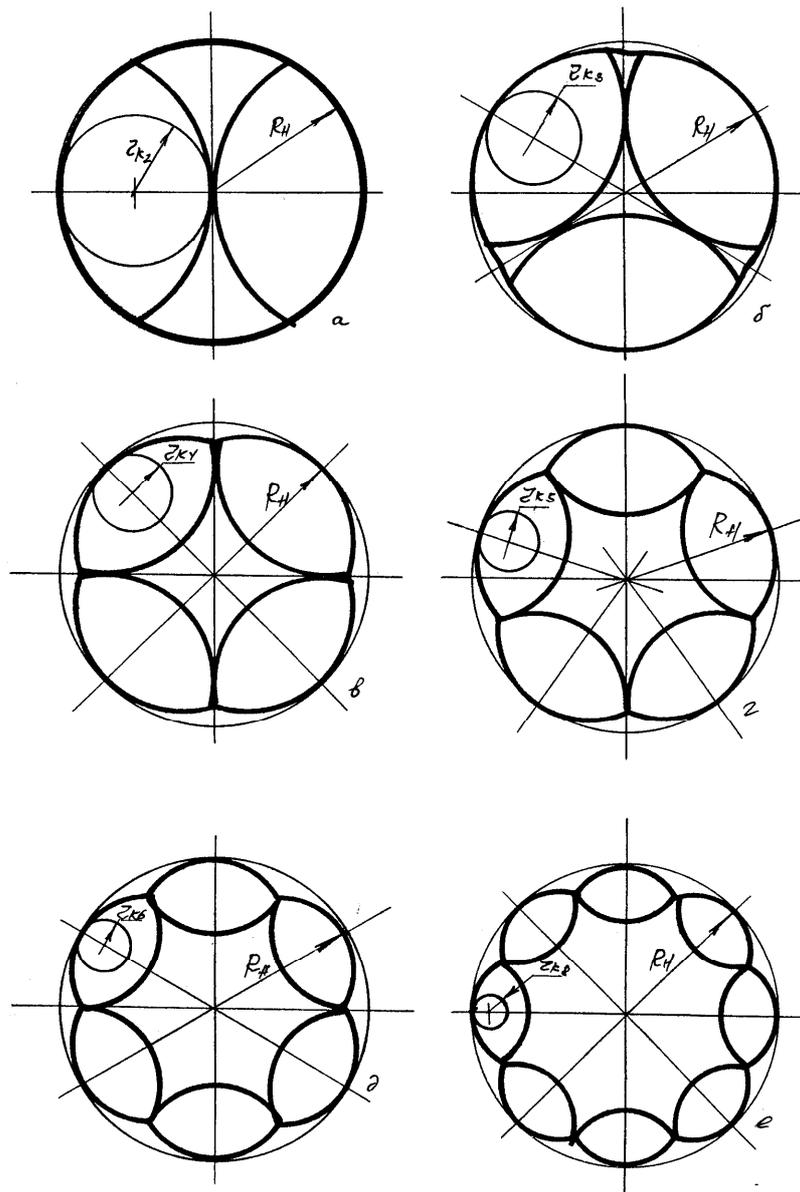


Рис. 4.5. Закономерность формообразования складок деформированных мягких оболочек и кривых гипоциклоид

Плоскости, ограниченные замкнутой кривой, плотно и во все стороны могут быть заполнены лишь теми правильными многоугольниками, у которых углы кратны, а сумма углов в точках стыка равна 360° , то есть шестиугольниками, треугольниками и квадратом.

Таким образом, объем замыкающего мягкой оболочкой всего многообразия форм, в том числе и деформированных, можно моделировать с помощью пузырьковой модели, которая является геометрической моделью мягких оболочек. Натяжение эластомерной силовой конструкции не зависит от геометрической формы оболочки, а зависит от соотношения ее геометрических размеров.

Определение условия складкообразования

При составлении методики расчета главных напряжений мягкой оболочки следует учитывать случаи нагружения оболочек простой геометрической формы (бесскладчатых), составных форм (с соотношением размеров за пределами условия складкообразования), в том числе деформированных распределенной сжимающей нагрузкой по всей поверхности оболочки и по площади контакта, меньшей площади опоры оболочки.

Например, оболочка нагружена избыточным давлением рабочего газа; соотношение размеров соответствует условию бесскладчатости; форма оболочки любая (сфера, оваловид, усеченный конус, цилиндр).

Для определений главных напряжений приведем реальную мягкую оболочку к расчетной модели – вписанной сфере равного натяжения с диаметром, равным высоте оболочки (см. рис. 4.4.).

Тогда в точке контакта со сферической моделью мягкая оболочка будет испытывать те же растягивающие нормальные усилия от действия центральных сил давления рабочей среды, что и сама модель.

Работа давления в точках контакта одинакова и характеризуются объемом (радиусом) модельной сферы. Другие точки мягкой оболочки, более удаленные от центра сферы, характеризуются работой давления сферы большего объема, а значит большей поверхностью, по которой распределено то же, что и на вписанную, действие центральных сил давления:

$$DP_2 = DP_1 V_1 / V_2 = DP_1 R_C^3 / (R_C + Dr)^3, \quad (4.25)$$

где Dr - расстояние любой точки на поверхности реальной оболочки от поверхности вписанной модельной сферы.

Используя уравнения (4.18) и (4.25), главные погонные натяжения мягкой оболочки простой геометрической формы рассчитывают по формуле:

$$N_M = DP R_C^3 / 2 (R_C + Dr)^2 = N_O. \quad (4.26)$$

Для определения главных напряжений мягкой оболочки составной формы, то есть конструктивно складчатой с соотношением размеров за пределами условия складкообразования (цилиндр, тор, линза, панель), нагруженной только избыточным давлением рабочего газа, оболочку приводят к пузырьковой модели (блоку вписанных сфер, диаметр которых равен ее высоте).

Поверхностью равного давления составных оболочек является эквипотенциальная поверхность силового поля центральных сил давления сжатого газа, суммированная из уровней (сфер) единичных полей. В этом случае меридиональные натяжения составной оболочки для боковой поверхности определяются из уравнения (4.26), а окружные, как натяжения распора пары вписанных сфер, из уравнения (4.19).

Деформированная внешней сжимающей нагрузкой мягкая оболочка может принимать форму как бесскладчатой, так и конструктивно складчатой. Поэтому решение задачи определения главных напряжений состоит в приведении формы поверхности оболочки к вписанной модельной сфере или блоку сфер.

Особенностью постановки задачи для деформированной оболочки является изменение высоты, что приводит к формоизменениям под действием внешней сжимающей нагрузки, как например, при работе мягкого подушечного пневмодомкрата. В этом случае принимают дополнительное условие: при увеличении соотношения размеров замыкающей оболочки под действием внешней сжимающей нагрузки происходит структурное преобразование сплошности среды с образованием сфер меньшего диаметра.

Граничным условием деления является условие складкообразования ($\dot{\sigma} < a/b < 2$).

После снятия нагрузки или подъема груза за счет совершения работы давления против воздействия массы груза, объем и размеры модельных сфер соответственно восстанавливаются при тех же граничных условиях.

Перемещения и формоизменения деформированных мягких оболочек не влияют на зависимость главных напряжений от диаметра вписанных сфер. Если деформирование оболочки внешней сжимающей нагрузкой носит локальный характер, то меридиональные усилия на боковой поверхности определяют с учетом перераспределения работы давления и объема газа на свободную от контакта с грузом поверхность по уравнению (4.26):

$$N = 3 DP V / 2S - DP S_K H / S, \quad (4.27)$$

где S_K – площадь контакта оболочки с грузом.

Так как окружные натяжения составных форм оболочек вдвое меньше меридиональных, то их можно записать в следующем виде:

$$N = N_M + N_O = 1,5 N_M. \quad (4.28)$$

С помощью уравнений (4.27) и (4.28) меридиональное натяжение рассчитывают по формуле:

$$N_M = DP R / 3 - 2 Q H / 3 S. \quad (4.29)$$

Рассмотрим пример использования пузырьковой модели при определении предельной высоты деформированного мягкого домкрата из резинотканевого материала совершающего работу по подъему груза. Номинальная прочность ткани $N = 200$ кгс/см; коэффициент запаса прочности домкрата $K_{3П} = 4$, рабочее давление газа $DP = 10$ кгс/см².

Используя уравнение (4.18) для определения радиуса равнонапряженной вписанной сферы при заданных условиях нагружения запишем:

$$[R] = 2 [N] / K_{з.п.} DP = 2 \times 200 / 4 \times 10 = [10 \text{ см}]. \quad (4.30)$$

Из уравнения (4.30) видно, что он не зависит от массы поднимаемого груза.

Таким образом, при составлении методики расчета главных напряжений мягкой оболочки с помощью пузырьковой модели значительно упрощается расчет геометрических и физических параметров состояния среды, механического и энергетического равновесия. Кроме того, наглядно представлен механизм взаимодействия мягкой замыкающей оболочки со сжатой, в том числе в условиях формоизменения, под действием деформирующей сжимающей нагрузки.

Приведение различных форм мягких оболочек к пузырьковой модели

Установлена аналогия напряжения и формообразования силовых мягких оболочек под действием избыточного давления как следствие наложения сферически симметричных полей центральных сил давления, образующих пространственную поверхность равного потенциала (равного давления), моделирующую геометрическую форму мягкой оболочки.

Предлагается приведение оболочек различных форм, в том числе составных, к пузырьковой модели, которая представляется в виде упругих шаров, плотно заполняющих внутреннюю полость, причем погонное натяжение поверхности такого шара обратно пропорционально квадрату его радиуса как тензора напряжения [86].

Это позволит установить связь между геометрическими и физическими параметрами нагружения, упростить расчет, разработать основные принципы конструирования и технологического проектирования пневматических конструкций.

В качестве исходной модели авторами найдена равнонапряженная замкнутая бесскладчатая поверхность непрерывной кривизны – сфероид вращения.

Моделью равнонапряженной поверхности трех и более точечных частиц является эквипотенциальная поверхность взаимодействия их сфер напряженности, площади их поверхностей и объемы.

Напряженность материала эластичной силовой конструкции совпадает с эквипотенциальной поверхностью равного напряжения сжатой рабочей среды.

В общем случае пузырьковая модель – это безызгибный овалоид, то есть энергетически равновесная оболочка вращения, деформированная внешними сжимающими усилиями в пределах условия бесскладчатости.

У деформированной оболочки вращения отсутствует определенная геометрическая форма, а значит, присутствуют геометрические параметры для расчета поверхности и объема.

Согласно описанию пузырьковой модели, деформированная за пределы этого условия складчатая мягкая оболочка представляет собой поверхность распора плотно упакованных упругих сфер, заключенных между плоскостями опоры и контакта с грузом, диаметр которых равен высоте оболочки.

Следовательно, ее боковая поверхность представляет собой полуцилиндрическую поверхность распора, радиус кривизны которой равен половине высоты

оболочки, а площадь контакта – суммарной площади граней (центральных сечений) плотно упакованных призм.

Известно, что плоскость, ограниченная замкнутой кривой, равномерно и плотно во все стороны может быть заполнена лишь тремя правильными многоугольниками: шестиугольником, треугольником (как составляющим правильного шестиугольника) и квадратом [18].

У этих многоугольников углы кратны, а сумма углов в стыковочных точках равна 360° . Другие правильные геометрические фигуры, в том числе окружность, при упаковке оставляют зазоры. В табл. 4.1 даны результаты сравнительного расчета параметров плоских геометрических фигур компактной (плотной) упаковки, приведенных к радиусу окружности, вписанной в полость деформированной мягкой оболочки.

Таблица 4.1

Элементы геометрических фигур равной высоты, используемые для плотной упаковки полости деформированной мягкой оболочки (приведенные к радиусу сферы)

Параметры	Сфера	Призма трехгран- ная	Призма шести- гранная	Куб
Соотношение сторон	R	$a = 3,46R$	$c = 1,15 R$	$b = 2,0 R$
Высота	2,0 R	0,57a	1,73 c	b
Периметр се- чения	6,28 R	10,4 R	6,9 R	8,0 R
Площадь се- чения (цен- трального)	$3,14 R^2$	$5,15 R^2$	$3,46 R^2$	$4,0 R^2$
Поверхность	$15,57 R^2$	$20,6 R^2$	$18,8 R^2$	$16,0 R^2$
Объем	$4,18 R^3$	$17,85 R^3$	$6,88 R^3$	$8,0 R^3$
Площадь се- чения, при- веденная к сечению сферы	1,0	1,64	1,1	1,28

Из таблицы видно, что из рассмотренных многогранников пространственное плотное заполнение без просветов наиболее предпочтительно у кубов. Следовательно, исходя из формы реальных мягких оболочек, целесообразно выбирать ту или иную конфигурацию плотной упаковки, которая является подобной форме центрального сечения деформированной оболочки.

Например, для оболочек прямоугольных в плане наиболее плотной является упаковка из вписанных кубов. А у оболочек, близких к круглым в плане, – из шестигранных призм (сотовая упаковка).

Объемы полостей реальных пневмоконструкций могут быть представлены плотно упакованными упругими сферами. Их моделями являются прямоугольные призмы, длина ребра которых равна высоте деформированной оболочки. Параметры модели плотной упаковки могут быть использованы не только для расчета рабочих характеристик, но и для определения прочностных свойств оболочки под нагрузкой.

Таким образом, если соотношение полуосей фигуры, ограниченной ветвью гипоциклоиды и дугой направляющей окружности, соотносится как 5:7 (0,707), то эти окружные напряжения претерпевают разрывность непрерывности, образуются складки, по количеству ветвей гипоциклоиды.

Выводы

В связи с незначительной величиной, по сравнению с ее геометрическими размерами, толщиной материала оболочки пренебрегаем. Отсюда, растяжение материала оболочки под действием сжатой рабочей среды следует рассматривать как плоское (двухосное). Кроме того, из-за высокого порядка (10^{-2}) относительной величины толщины оболочки, что превышает допустимые погрешности расчетов (10^{-1}), расчеты следует проводить на более высоком (2-4 степени) уровне.

Следовательно, взаимодействия материала и среды следует рассматривать по законам квантовой механики, отражающей механизм, в отличие от статистической, которая рассматривает закономерности взаимозависимостей.

Принимается условие аддитивности процессов взаимодействия частиц сжатой рабочей среды на микро- и макроуровнях.

Следует отметить, что модель неразрывной среды в математических теориях принята условно, для обеспечения решений дифференциальных уравнений, и физически не обоснована. Отсюда принимаем геометрическую форму поверхности оболочки как функцию взаимодействия силового поля давления сжатой рабочей среды (газа) с замыкающей оболочкой.

Для исследования закономерностей формообразования эластичных механизмов используем принцип аналогии. Силовые поля давления следует рассматривать аналогичными электрическим (электромагнитным).

Силовые функции точечных источников напряженности, частиц сжатого газа и электрических зарядов обладают физической аналогией, характеризуются

градиентом напряженности и отражаются сферическим потенциалом (сферой равного напряжения).

Физической и геометрической (формальной) моделью единичного силового поля частицы является мыльный пузырь. Моделью блока равнонапряженных силовых полей точечных источников является мыльная пена.

Мыльный пузырь представляет собой идеальную модель мягкой оболочки, материал которой не зависит от геометрических размеров, а поверхность его является равнонапряженной.

В силу адсорбционной природы взаимодействующие пузыри имеют равный диаметр. При соприкосновении с большим пузырем маленькие адсорбируются на его контуре, перераспределяя поверхностное напряжение и объем мыльной воды между собой.

Блоки мыльных пузырей представляют собой несколько пузырей равного диаметра, лежащих в плоскости деформации в один слой.

Блоки мыльных пузырей могут состоять из двух и трех взаимодействующих между собой через общую плоскость равнонапряженных элементов. Четыре пузыря имеют общее точечное касание. Блоки пузырей, например, цилиндр численностью более двух пузырей, не имеют общих границ, поэтому являются составными и не ограничены количеством составляющих.

Внутренняя поверхность замыкающей мыльной пленки такого пространства является сопряженной, полисферической геометрической конфигурации, равнонапряженной (равной по напряженности) поверхности вписанной единичной сферы.

Известно определение главных напряжений плоского напряженного состояния оболочек в форме сферических, цилиндрических, конических и тому подобных поверхностей вращения методом сечения. Однако их зависимость от геометрической формы ограничивает применение метода для деформированных мягких оболочек, поверхности которых отличаются от оболочек вращения. Сложность расчета заключается в применении математических методов решения уравнений равновесия в усилиях и перемещениях [89].

Для упрощения расчета используют различные способы, например, метод коллокаций для решения составных пневмооболочек, метод моделирования геометрии поверхности с помощью уравнений эластик Эйлера, а также овалов Кассини [92, 93].

Авторами предложен метод расчета мягких оболочек, основанный на энергетическом взаимодействии оболочки с объемно-напряженной чистой сжатой рабочей средой (газом). Для эксплуатационных режимов мягких оболочек напряженное состояние рабочей среды, замкнутой в оболочку, принимается как всесторонне равномерно сжатое, характеризуемое шаровым тензором напряжения силового поля центральных сил давления. Градиент центрально симметричного поля зависит только от расстояния точки на поверхности уровня равного напряжения до начала координат.

Поэтому замыкающая мягкая оболочка отслеживает форму равнонапряженной поверхности уровня поля давления среды в форме сферы. А так как любому полю присущ принцип суперпозиции, то деформированная мягкая оболочка должна отражать ту эквипотенциальную поверхность поля равного давления, которая образуется при наложении сферических поверхностей нескольких полей напряжения [18].

Любая геометрическая форма оболочек эластичных механизмов является производной сферы. Мыльный пузырь представляет собой идеальную модель мягкой оболочки, материал которой не зависит от геометрических размеров, а поверхность его является равнонапряженной.

Кроме расчета натяжения материала с помощью пузырьковой модели можно определять зоны перенапряжений, зависящие от величины избыточного давления. Эти зоны являются и потенциальными местами разрушения, поэтому должны быть усилены конструктивными способами.

Таким образом, приведение деформированной оболочки к пузырьковой модели, позволяет представить составную форму оболочки в виде ряда равнонапряженных сферических структур, геометрические параметры которых могут быть использованы для расчета работ давления и натяжения при определении силовых параметров пневмоконструкции и номинальной прочности конструкционного материала.

4.2. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МЯГКИХ ОБОЛОЧЕК

Исследование влияния геометрических параметров мягкой оболочки на конфигурацию силовых линий напряженности сжатой газовой среды

Геометрические параметры дифференцируемых форм мягких оболочек приведены в табл. 4.2.

Отмечено, что напряженность деформированного силового поля сжатой рабочей среды (газа) равна векторной сумме напряженностей каждого из взаимодействующих точечных зарядов (частиц), что графически изображается силовыми линиями равного напряжения.

Авторами установлена закономерность построения и конфигурации силовых линий электростатического силового поля, представляющих геометрическое место точек, для которых произведение удаления от этих точек до концов межфокусного расстояния равно квадрату данного отрезка, аналогичных семейству овалов Кассини [85].

Для плоских задач декартовой системы координат овалы Кассини представлены уравнением четвертого порядка с постоянной величиной межфокусного расстояния ($f = \text{const}$) и переменным соотношением размеров полуосей симметрии:

$$(a^2 + b^2)^2 - 2f^2 (a^2 - b^2) - (d^4 - f^4) = 0, \quad (4.31)$$

где d – расстояние от точки на овале до фокуса, см;

f – межфокусное расстояние, см.

При ($0 \leq d \leq \infty$) конфигурация овалов принимает форму от двух точек на концах межфокусного расстояния, до окружности. Преобразованное из плоского в пространственное уравнение (4.31) принимает вид:

$$(a^2 + b^2 + c^2)^2 - 2f^2(a^2 + b^2 - c^2) - (d^4 - f^4) = 0. \quad (4.32)$$

Установлено, что уравнение (4.32) может быть преобразовано в так называемое уравнение деформированной сферы, если принять условие переменности межфокусного расстояния в зависимости от соотношения размеров овалов ($0 = f \neq 2a, 2a = const$) (рис. 4.7). Это соответствует условию получения сжатого эллипсоида вращения, как поверхности, образованной равномерным сжатием сферы к ее экватору. Следует отметить, что в зависимости от соотношения констант уравнение (4.32) принимает вид одной из дифференцируемых поверхностей вращения второго и четвертого порядка (сферы, овалоида, цилиндра, конуса-капли, тороидов) (рис. 4.6).

Так, например, одним из предельных состояний нагружения мягкой силовой оболочки (мягкого домкрата) является его начальное рабочее положение, когда работа давления практически полностью компенсируется работой возмущающей нагрузки, распределенной по площади центрального сечения (сферы). При этом собственный объем и высота перемещения груза близки к нулю, и ими можно пренебречь; распределенная нагрузка от действия массы груза уравновешена давлением среды по плоскости контакта; боковая поверхность вырождается в линию окружности.

То есть, условием нагружения являются равенства: ($f = R; d \rightarrow 0; h = c \rightarrow 0; a = b$). После подстановки в уравнение (4.32) последнее принимает вид поверхности плоского круга:

$$a^2 + b^2 = R^2. \quad (4.33)$$

Другим предельным состоянием нагружения мягких домкратов является режим, при котором оболочка напряжена только избыточным давлением рабочего уровня без воздействия массы груза, при этом ($f \rightarrow 0$). Конечное уравнение принимает вид канонического уравнения сферы:

$$(a^2 + b^2 + c^2) = d^4 \text{ @ } a^2 + b^2 + cz^2 = d^2. \quad (4.34)$$

Итак, при определенных условиях нагружения можно получить любую из поверхностей вращения меридиана деформированной сферы и соответствующее им уравнение поверхностей.

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы: проектирование мягких оболочек должно базироваться на четырех основных научных положениях, приведенных в настоящей работе; существует возможность моделирования механизма формообразования мягких оболочек, в том числе в условиях геометрической изменчивости. Установлено, что пузырьковая модель отражает геометрическую, а силовые линии напряженности (овалы Кассини) – физическую модель формообразования мягкой оболочки.

Исследование овалов Кассини как математической модели формообразования мягких оболочек

Нами рассматриваются закономерности изменения конфигурации меридиана мягких оболочек, деформированных внешней нагрузкой в пределах как области бесскладчатости, так и в запредельных областях с помощью модельных поверхностей вращения овалов Кассини.

Мягкие силовые оболочки способны оказывать сопротивление действию внешней сжимающей нагрузки и совершению работы по перемещению поверхности оболочки, деформированной внешней нагрузкой. Характерной особенностью их является трансформация начальной геометрической формы в процессе перемещения под нагрузкой в диапазоне от складчатого (запредельного) состояния к бесскладчатому.

Наряду с традиционным подходом к расчету мягких силовых оболочек известны модельные описания их формы специфичными кривыми (эластиками Эйлера), очерчивающими меридиан поверхности вращения наибольшего объема при его заданной длине [48], а также с помощью дифференциальных уравнений, определяющих радиусы кривизны безызгибных оболочек вращения под действием равномерного давления [18].

Однако применение разомкнутых кривых Эйлера для моделирования замкнутых поверхностей вращения приводит к необходимости введения граничных условий, частных расчетных схем, а использование модели, основанной на дифференциальных уравнениях, имеет ограничения только действием в области бесскладчатости. Поэтому первым условием создания математической модели является ее замкнутость и непрерывность кривизны. Другим условием создания модели является обобщенность начальной формы мягких оболочек.

При условии абсолютной эластичности материала наиболее рациональной формой является равнонапряженная сфера или в общем случае овалоид (вытянутый или сплюснутый) равного давления, соотношение размеров которого соответствует условию бесскладчатости. Для запредельного состояния в качестве начальной может быть принята составная (эквипотенциальная) поверхность равного напряжения (пузырьковая модель), представляющая блок равнонапряженных, плотно упакованных упругих сфер [86]. Поэтому третьим условием создания модели является возможность приведения изменяемых геометрических форм мягких оболочек к общему уравнению.

Таким условиям моделирования соответствует семейство овалов Кассини. Особенностью этих плоских кривых является их геометрическая аналогия с эквипотенциальными линиями электромагнитного силового поля, образованного двумя точечными зарядами. То есть кривые Кассини очерчивают меридиан поверхности равного напряжения потенциального поля сил давления сжатой среды, заключенной в деформированную мягкую оболочку.

Таблица 4.2

Геометрические параметры дифференцируемых форм мягких оболочек

Конфигурация мягкой оболочки	Объем	Площадь поверхности	Площадь центрального сечения
Сфера	$V_c = 4/3 \pi R_c^3$	$S_c = 4\pi R_c^2$	$S_{цс} = \pi R_c^2$
Оваллоид	$V_o = 2\pi^2 (a-b)b^2$	$S_o = 4\pi^2 (a-b)b$	$S_{цс} = \pi a^2$
Цилиндр	$V_{ц} = \pi R_{ц}^2 h_{ц}$	$S_{ц} = 2\pi R_{ц}^2 h_{ц}$	$S_{ц} = \pi R_{ц}^2 + R_{ц} h_{ц}$
Конус	$V_k = 1/3 \pi R_k^2 h_k + 4/6 \pi R_k^2$	$S_k = \pi R_k l_k$	$S_{цс} = \pi R_k^2$
Тороид	$V_m = 2\pi^2 R_{m1} r_m^2$	$S_m = 4\pi^2 R_{m1} r_m$	$S_{цс} = \pi [(R_m + r_m)^2 - (R_m - r_m)^2]$

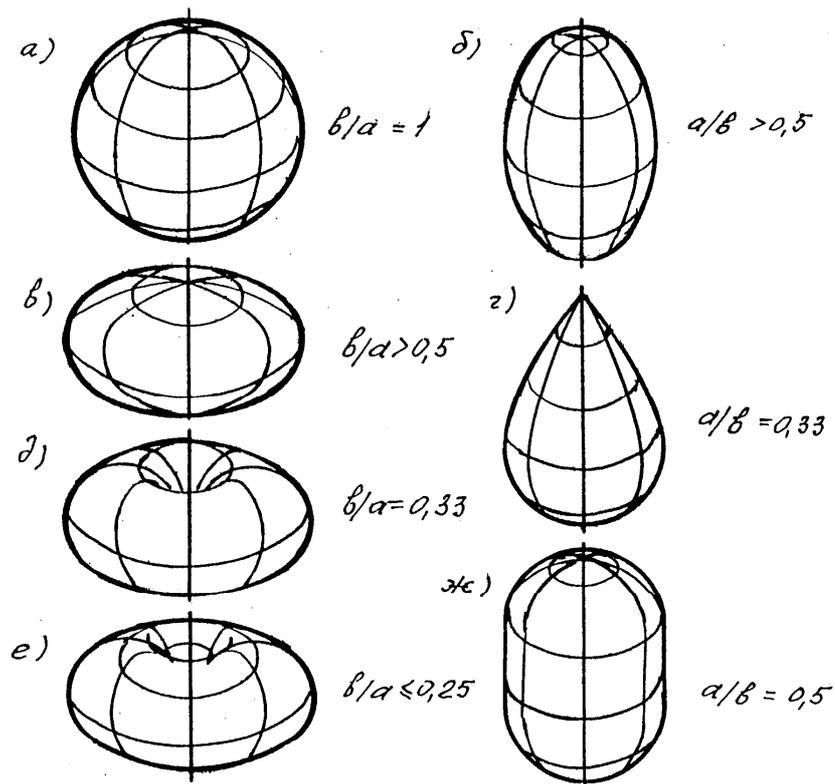


Рис. 4.6. Поверхности вращения овалов Кассини:

а – сфера; б, в – овалоиды (вытянутый, сплюснутый); г – капля-конус; д, е – тороиды; ж – цилиндр

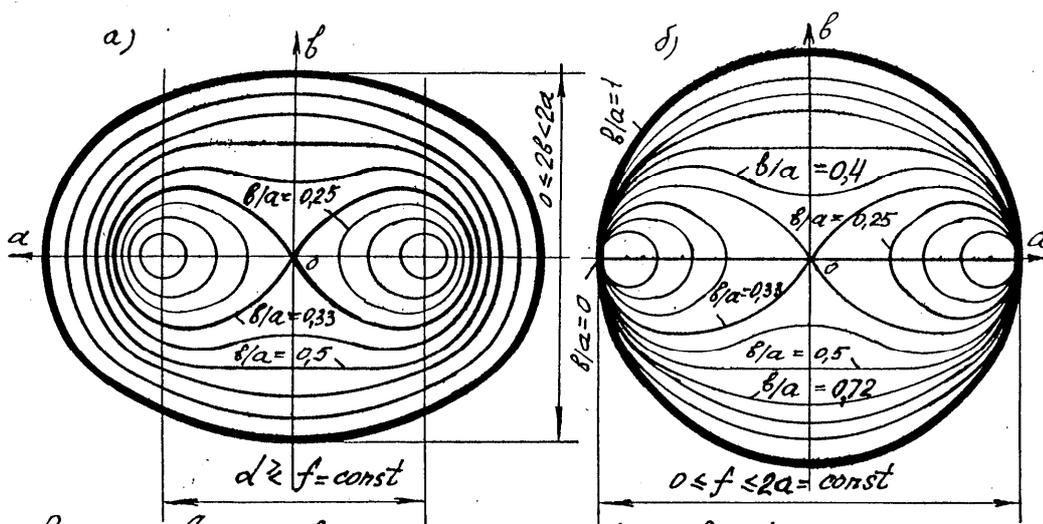


Рис. 4.7. Сопоставление конфигураций кривых Кассини (а) и меридиана деформированной сферы (б)

Овалы Кассини при определенных значениях констант уравнения являются частным случаем спирических кривых Персея-алгебраических линий четвертого порядка, для которых оси координат служат осями симметрии [69].

Линиями Кассини называются геометрические места точек (M), для которых произведение расстояний $F_1M \times F_2M = d^2$, где $F_1; F_2$ – фиксированные фокусы, d – постоянная. Уравнение, определяющее форму овала в декартовой системе координат, имеет вид (рис. 4.8):

$$(x^2 + y^2)^2 - 2f(x^2 - y^2) = d^4 - f^4, \quad (4.35)$$

где $f = const$ – межфокусное расстояние;

$0 < d < \infty$ – характерная константа овалов Кассини.

В полярных координатах уравнение Кассини имеет вид (рис. 4.9):

$$r^2 = f^2 \cos 2j \pm \frac{d^4}{f^2} \cos^2 2j + (d^4 - f^4). \quad (4.36)$$

В зависимости от соотношения параметров (f) и (d) следует рассматривать четыре основные формы овалов, используемых для моделирования геометрической формы мягких оболочек. При $d > f$ – кривые имеют формы замкнутых, симметричных относительно координатных осей линий овалов, стремящихся к окружности, кривизна в точках G и E положительная. При $d = f$ – граничный овал с нулевой кривизной, в точках C_1' и C_2' разделяет семейство овалов положительной и отрицательной гауссовой кривизны. При $d = f$ – граничный овал в точке O неразрывности кривизны формы кривой. При $d < f$ овал состоит из двух замкнутых линий, точки A и B стремятся к точкам фокуса.

Отсюда, при различных значениях геометрического параметра (d) можно получать различные по форме кривые, вращение которых вокруг осей симметрии приведут к поверхностям вращения, традиционным для дифференциальной геометрии (сфере, овалоидам, цилиндру, конусу, тороидам), (рис. 4.6 а). Все эти поверхности описываются преобразованным уравнением (4.35) кривых Кассини в пространстве:

$$(x^2 + y^2 = z^2)^2 - 2f^2(x^2 + y^2 - z^2) - (d^4 - f^4) = 0. \quad (4.37)$$

Следовательно, поверхности вращения плоских кривых Кассини могут представлять геометрическую модель мягких оболочек, а пространственное уравнение (4.37) является математической моделью мягких оболочек изменяемой формы. Причем, если уравнение (4.35) моделирует область бесскладчатых поверхностей, то уравнение (4.36) в полярных координатах – запредельную область деформирования мягких оболочек (рис. 4.8, 4.9). Состояние бесскладчатости напряженной оболочечной конструкции зависит от соотношения размеров ее осей. Рассмотрим их значение в зависимости от параметров f и d .

При условии $d > f$ кривые имеют продольную ось $2a$, равную

$$a = \frac{d^2 + f^2}{2}, \quad (4.38)$$

а наибольший поперечный размер:

$$\text{при } (d > f) \quad b = \frac{d^2 - f^2}{2}, \quad (4.39)$$

$$\text{при } (f \leq d < f) \quad b = d^2 / 2f. \quad (4.40)$$

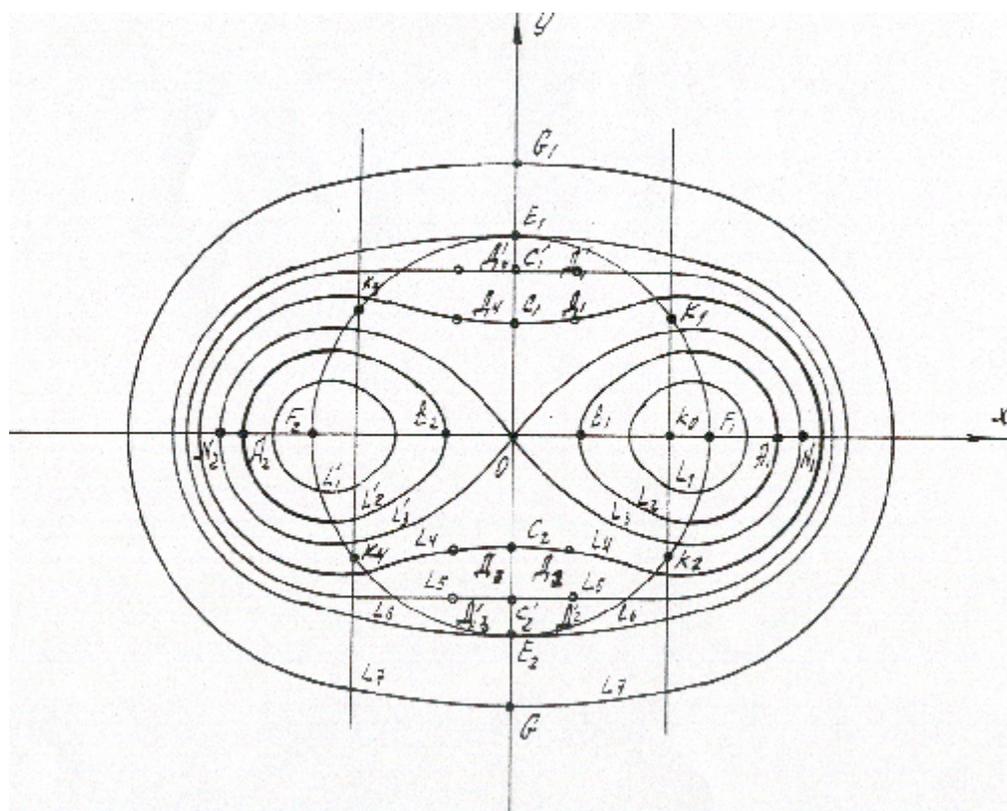


Рис. 4.8. Кривые Кассини в прямоугольных координатах

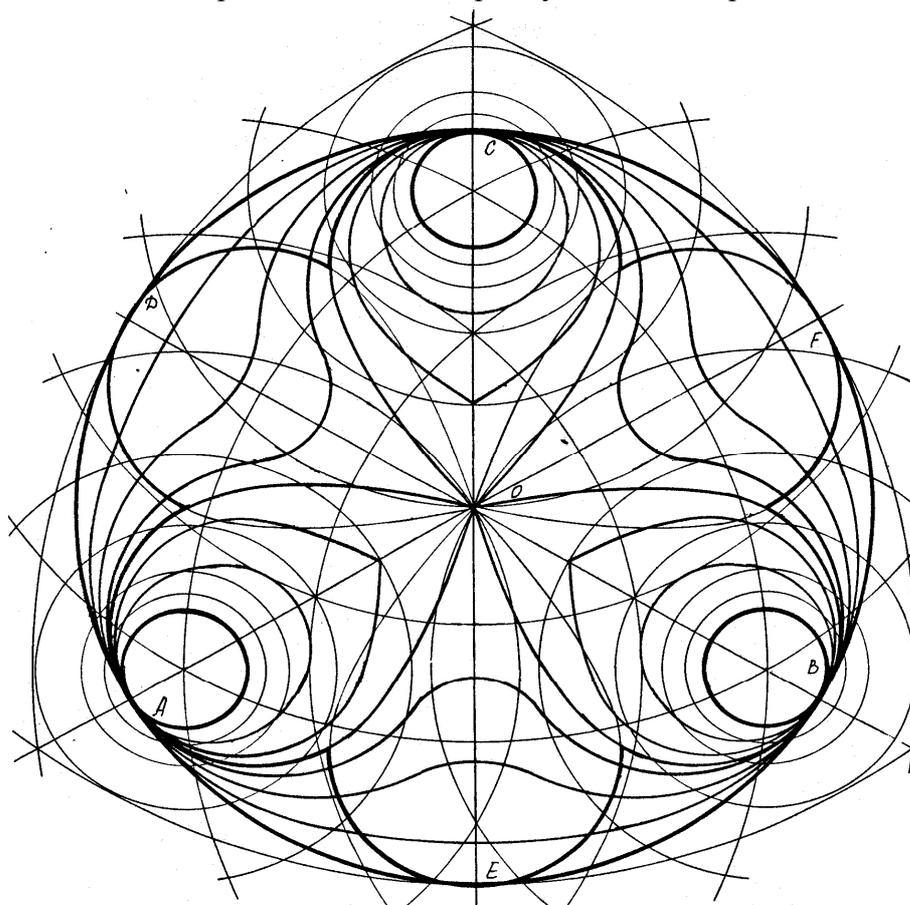


Рис. 4.9. Кривые Кассини в полярных координатах

При $f \leq d < f \leq 2$ кривые имеют четыре точки перегиба; при ($d < f$) кривые распадаются на две отдельные замкнутые ветви с соотношением продольной внешней и внутренней осями соответственно:

$$a = \sqrt{d^2 + f^2}, \quad (4.41)$$

$$a_{вн} = \sqrt{f^2 - d^2}. \quad (4.42)$$

Так как кривые Кассини являются частным случаем спирических кривых, то есть характеризуемых наличием эксцентриситета радиусов кривизны, чистые овалы стремятся к окружности либо при возрастании $d \rightarrow \infty$, либо при $f = 0$.

Следует отметить, что одним из условий моделирования напряженных оболочечных конструкций является общность начальной модельной формы оболочки, предложенной авторами в виде равнонапряженной сферы, то есть приведем овалы Кассини к предельному уравнению окружности.

При этом эксцентриситет кривизны меридиана изменяется в пределах

$0 < f \leq d$, то есть кривизна изменяется в соответствии с уравнением (4.33) от окружности до двух точек, лежащих на плоскости центрального сечения сферы, а межфокусное расстояние – от нуля до его диаметра.

Продольная ось деформированной сферы равна диаметру центрального сечения и является величиной постоянной. Значение размеров продольной и поперечной осей совпадают с установленными в уравнениях (4.38) – (4.42).

Таким образом, меридианы деформированной сферы по сути являются овалами, описываемыми уравнением (4.33), а по содержанию – «мягкими» окружностями, отслеживающими поверхность равного напряжения потенциального поля давления, деформированными распределенной сжимающей нагрузкой и напряженными внутренним напором рабочей среды.

Построение меридиан деформированной сферы

Для построения меридиан деформированной сферы воспользуемся известным графическим способом построения овалов Кассини (рис. 4.10) [8].

Задавая параметры f и d (табл. 4.3), находим положение фокусов, затем проводим из точки, лежащей на пересечении оси абсцисс с начальной окружностью, луч, который пересекает окружность, описанную из начала координат, с радиусом, равным d . Если теперь из фокусов описать окружность радиусами, равными отрезкам от точки пересечения оси абсцисс с начальной окружностью до конца радиуса d , то точка их пересечения будет принадлежать меридиану деформированной сферы. Меняя направление луча, можно построить любое число точек.

Таблица 4.3

Значения констант уравнения овалов Кассини при перемещении
координат точек фокусов.

$$[\text{Уравнение Кассини: } (x^2 + y^2) - 2f(x^2 - y^2) = d^4 - f^4]$$

№ п/п	$d, \text{ см}$		$f, \text{ см}$	$h, \text{ см}$	$h', \text{ см}$	$r, \text{ см}$
1	0	0	10,0	0	–	10,0
2	$0,5f$	4,5	8,9	2,3	–	7,8
3	$0,8f$	6,2	7,8	5,0	–	4,7
4	$0,9f$	6,7	7,4	6,0	–	3,3
5	$1,0f$	7,0	7,0	7,0	0	0
6	$1,1f$	8,1	6,7	9,8	9,7	–
7	$f\sqrt{2}$	8,2	5,8	11,6	11,6	–
8	$f\sqrt{3}$	8,7	5,0	–	14,2	–
9	$2f$	9,0	4,5	–	15,6	–
10	$f\sqrt{13,6}$	9,6	2,6	–	18,5	–
11	$f\sqrt{123}$	9,9	0,9	–	19,7	–
12	–	10,0	0	–	20,0	–

Очевидно, поверхности вращения меридиан деформированной сферы по конфигурации подобны поверхностям вращения овалов Кассини. Однако введение определенности в соотношение размеров продольных и поперечных осей вращения позволяет рассматривать семейство этих кривых в качестве модели для определения закономерностей формоизменения расчетной сферы, например, условия складкообразования линзообразных оболочек плоского раскроя и т. п.

Рассмотрим примеры определения уравнения деформированной сферы по заданным условиям нагружения:

1. При начальном положении (первое предельное состояние) оболочка мягкого домкрата полностью деформирована распределенной внешней нагрузкой.

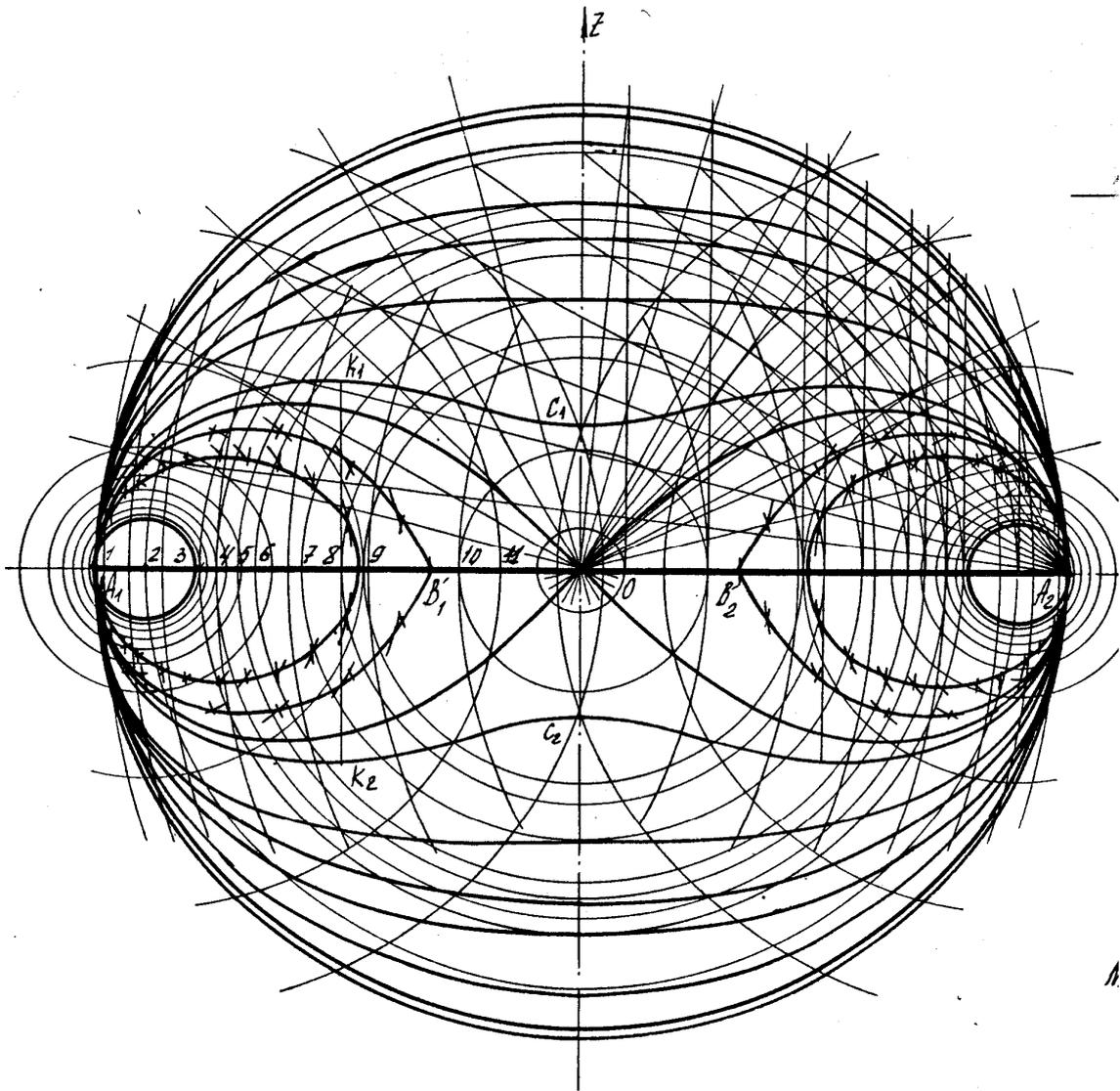


Рис. 4.10. Схема построения меридиан деформированной сферы

Начальные условия должны удовлетворять параметрам сферической поверхности при $f = R$; $d = 0$; $h = z = 0$; $x = y$. Подставляя заданные условия в уравнение (4.35) последнее принимает вид плоского круга:

$$x^2 + y^2 = R^2_1. \quad (4.43)$$

2. При втором предельном состоянии (оболочка мягкого домкрата напряжена рабочим давлением газа, нагрузка массы не действует) начальные условия соответствуют равенству $f = 0$. При этом конечное уравнение принимает вид сферы:

$$(x^2 + y^2 + z^2) - d^2 = 0 \rightarrow x^2 + y^2 + z^2 = d^2. \quad (4.44)$$

Примечание. 1. Условие существования деформированных меридианов: ($a = R = \text{const}$, $0 \leq f \leq a$).

2. $R = a = A_1 A_2 / 2 = \sqrt{f^2 + d^2} = 10 \text{ см.}$

3. $h = 2b = K_1 K_2 = d^2 / f^2.$

4. $h' = 2b' = C_1 C_2 = 2 \sqrt{d^2 - f^2}.$

5. $r = B_1 B_2 / 2 = \sqrt{f^2 - d^2}.$

3. При третьем предельном состоянии, при котором деформированная оболочка (мягкого домкрата) совершает работу по преодолению воздействия растягивающих усилий сжатой рабочей среды и нагрузки массы, дополнительно сжимающей среду; начальные условия соответствуют одному из промежуточных условий ($0 \leq d \leq R$), что сохраняет порядок исходного уравнения, а форма оболочки принимает вид тора.

Таким образом, очевидно, что поверхности вращения меридиан деформированной сферы по конфигурации подобны поверхностям вращения овалов Кассини. Однако введение определенности в соотношении размеров продольных и поперечных осей вращения позволяет рассматривать семейство этих кривых в качестве модели для определения закономерностей формоизменения расчетной сферы, например, условия складкообразования линзообразных оболочек плоского раскроя и т. п.

Анализ кривых деформированной сферы

Следует отметить, что построенные по уравнению деформированной сферы (4.35) меридианы хорошо вписываются в так называемые кривые изменения радиуса меридиана, деформированного без изгиба. Данные получены с помощью дифференциального уравнения, основанного на условиях безызгибности деформации [18]:

$$(3 - R_2 / R_1) x (d R_2 / d \Theta) - (R_2 d / d \Theta) x (R_2 / R_1) = 0, \quad (4.45)$$

где R_1 и R_2 – соответственно меридиональный и окружной радиусы кривизны оболочки вращения;

Θ – угол приложения тангенциальных усилий.

Кроме того, по данным работы [48], меридианы оболочек, построенных с помощью эластик Эйлера, практически совпадают с аналогичными меридианами деформированной сферы. При этом одна из кривых Кассини (лемниската) также является циклоидой и имеет тот же порядок функциональной зависимости, что и эластики.

Модифицированное уравнение (4.37) не зависит от формы деформированной оболочки и выражается соотношением размеров осей симметрии. Следовательно, для расчета предельных состояний оболочек различных форм достаточно, подставляя значения констант, определять геометрические и физические параметры.

Установленные физические и геометрические аналогии позволяют использовать их при проектировании оболочечных конструкций для определения напряженности состояния, мест концентрации напряжений, требующих усиления разгружающими элементами, предполагаемых мест разрушения под нагрузкой, а также областей складкообразования.

Классическим примером двух и трехосной конфигурации формы деформированной мягкой оболочки является наполнение ее воздухом при внешнем воздействии сжимающей нагрузки сыпучей средой или жидкостью.

В качестве параметра использована величина $p = PR_0^3 / D$. Кривые построены в безразмерных координатах $\zeta = z / R_0$; $\eta = y / R_0$.

На рис. 4.11 представлены формы краев, погруженных в воду, в процессе заполнения водой в свободном плавании и опертых на жесткое основание [56].

Эволюция развития формоизменения оболочки под нагрузкой поле напряжения сил давления рабочей среды позволяет вскрыть механизм разрушения оболочек, а также определить запасы прочности и предельные состояния нагруженных оболочечных конструкций.

Вывод: общие закономерности формоизменения напряженных оболочечных конструкций с изменением кривизны овалов Кассини позволяют использовать последние для моделирования процессов формоизменения оболочечных конструкций в процессе их деформирования под нагрузкой.

Круги Мора как модель одноосного напряженного состояния

Для анализа прочности материала при двухосном напряженном состоянии мягких оболочек удобно пользоваться вписанными и описанными равнонапряженными сферами (действия центральных сил давления). Известно, что главные напряжения мягкой тонкостенной оболочки распределены вдоль меридиана и образующей линии, пропорционально ее радиусу кривизны и величине избыточного давления.

Так как, по условию существования мягкая оболочка испытывает только растягивающие нагрузки, то единственным напряжением такой оболочки будет растяжение, которое определяется по уравнению (4.11). Другим условием существования мягкой оболочки является непрерывность кривизны ее поверхности.

Известно также, что реальная оболочка является неравнонапряженной, растягивающие усилия таких оболочек могут быть представлены равнонапряженной сферой, вписанной в полость оболочки в области максимальной кривизны поверхности (центрального сечения).

Из определения можно сделать вывод, что любая реальная замкнутая оболочка может быть представлена вписанной и описанной сферой, характеризующей изменение напряженного состояния оболочки, предварительно напряженной избыточным давлением.

С учетом соотношения размеров оболочки разделяются на бесскладчатые и конструктивно складчатые. Кроме того, при деформировании любая бесскладчатая оболочка переходит в область складчатых. Для подобных условий моделирование напряженного состояния с помощью вписанной сферы представляется возможным построить как область безопасного нагружения, так и предельного напряженного состояния, а также установить зоны перенапряжений.

Следует отметить, что с помощью вписанных сфер легко определить области одноосного напряженного состояния так называемой области складчатости, имеющей нулевую кривизну поверхности.

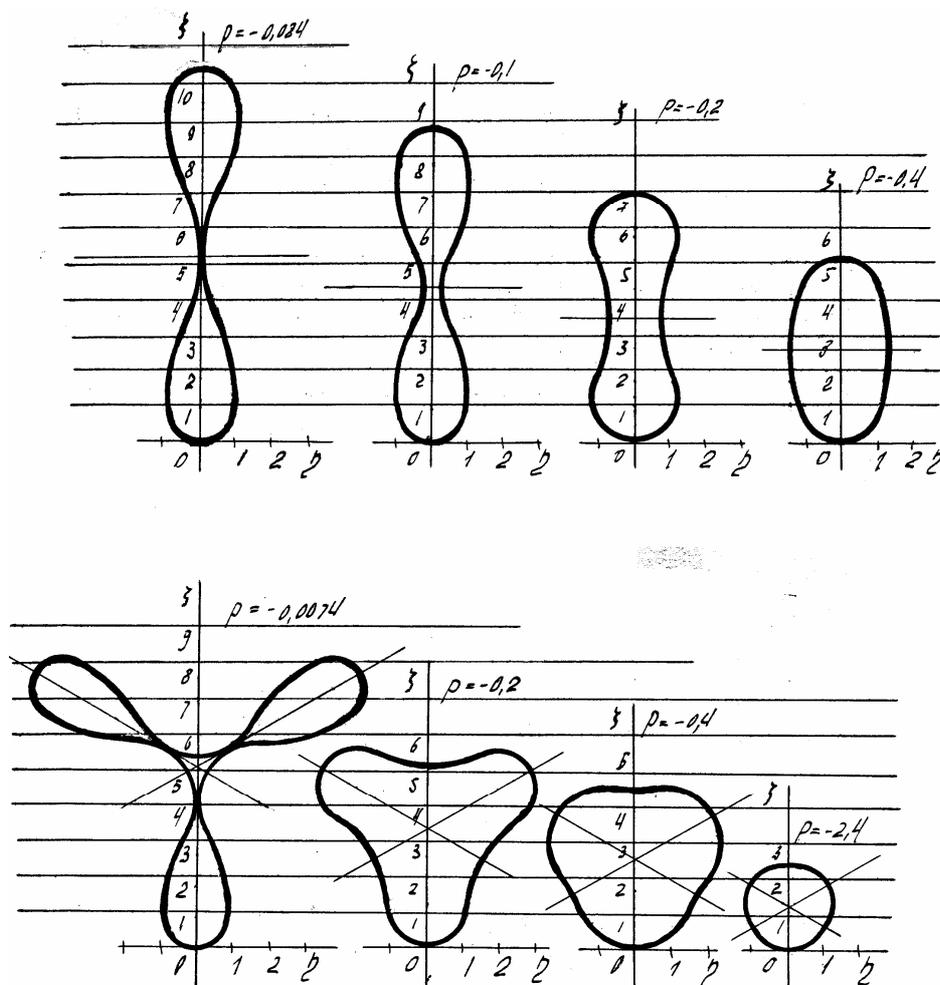


Рис. 4.11. Конфигурации сечений пневмогидравлических кранцев в процессе заполнения их водой после вакуумирования (предельного сжатия). Перегибные кривые – при малой степени заполнения, бесперегибные (вплоть до окружности) – предостаточной степени заполнения вплоть до полного: а - оболочка соприкасается с опорной поверхностью; б - оболочка всесторонне обжата гидравлическим давлением

Очевидно, такими областями могут обладать складчатые оболочки в условиях снятия продольных растягивающих напряжений, что возможно, например, при продольном сжатии цилиндрической оболочки.

Так как источником формообразования мягкой оболочки являются сворачиваемые силовыми полями давления поверхности равнонапряженных сфер, то условием двухосного напряжения растяжения по главным меридианам является сферический градиент напряжения (или равнонапряженная вписанная сфера).

Таким образом, объемное или пространственное напряжение мягкой оболочки можно аналитически определить с помощью вписанных и описанных равнонапряженных сфер. То есть любая реальная предварительно напряженная мягкая оболочка может быть представлена вписанной в ее полость и описанной вокруг ее поверхности касательных сфер, в точках касания которых напряженности равны.

В инженерных расчетах считается достаточным определять прочность материала наибольшим и наименьшим главным напряжением, для этого удобно пользоваться кругами Мора [21].

Если для какого-то материала имеются данные о его опасных состояниях при нескольких различных соотношениях между главными напряжениями (главными размерами), то, изображая каждое опасное напряженное состояние при помощи круга Мора, получаем некоторое семейство таких кругов. Если к этому семейству кругов провести огибающую, то круги, характеризующие прочное состояние материала, будут располагаться внутри огибающей, а характеризующие опасное состояние – касаться ее. Уменьшив эти круги в (n) раз (где n – коэффициент запаса прочности), можно получить зону допускаемых напряжений.

Для точного построения огибающей требуется достаточно большое количество проверочных данных, поэтому в практике ее заменяют двумя прямыми, которые являются касательными к кругам Мора, полученным при растяжении и сжатии материала.

Аналитическое выражение условия прочности можно получить при построении круга Мора, соответствующего допускаемому напряжению, на соответствующие условию прочности (касающиеся прямые). Это упрощенная теория Мора, в которой предельные (допускаемые) огибающие заменены прямыми, проведенными по известным значениям опасных (или допускаемых) напряжений при простом растяжении.

При одноосном напряженном состоянии чистого (объемного) растяжения цилиндра огибающая кругов Мора – параллельные оси симметрии: сферы, овалоида – круг; тора – кольцо.

Таким образом, в инженерных расчетах считается достаточным определять прочность материала наибольшим и наименьшим главным напряжением, для этого удобно пользоваться кругами Мора, в том числе и в нашем случае, когда мягкая тонкостенная оболочка испытывает только растягивающие нагрузки, причем в одноосном напряженном состоянии.

Выводы

Условием механического равновесия системы «оболочка – сжатый газ» является равенство потенциальной энергии рабочей среды и энергии растянутого материала оболочки.

Под действием внутренней энергии сжатый газ стремится увеличить свой объем; оболочка, компенсируя эту энергию, старается сохранить минимальную площадь поверхности. Отклонение от оптимальной сферической формы возможно лишь при нестабильности упругих свойств материала (резины, резино-тканевого материала) или при наличии внешней силы, дополнительно сжимающей сферу. При исследовании механизма взаимодействия оболочки с рабочей средой пренебрегаем влиянием материала на условие равновесия системы. Для этого рассмотрим мягкую оболочку из мыльной пленки.

Мыльный пузырь обладает следующими свойствами [16]:

- независимо от внутреннего давления мыльный пузырь стремится принять по возможности круглую форму в сечении;
- с ростом размера пузыря дополнительное давление в нем падает обратно-пропорционально радиусу кривизны;
- усилие, необходимое для увеличения поверхности жидкой пленки пузыря, практически не зависит от ранее достигнутого растяжения.

Рассматривая равновесия избыточного давления газа в пузыре и давления пленки пузыря на газ выводится уравнение Лапласа, из которого легко определяется величина энергии газа в пузыре и натяжения в мыльной пленке, то есть условие напряжения оболочки:

- давление, создаваемое газом, зависит только от поступательного движения молекул, так как именно оно является носителем импульса, передаваемого газом той поверхности, на которую он оказывает давление;
- под влиянием внешней нагрузки частицы газа должны взаимодействовать;
- согласно теории близкого действия [8] взаимодействие между частицами осуществляется через посредство физических полей, создаваемых этими частицами в окружающем пространстве.

Следовательно, механизмом напряжения мягкой оболочки является работа сил, действующих на частицы газа, распределенные вдоль поверхности равного напряжения, геометрическое место точек которой совпадает с поверхностью взаимодействия оболочки со сжатым газом. В этом случае физической моделью сжатого мягкой оболочкой газа является силовое поле давления (взаимодействия частиц), характеризуемое размерами замкнутого пространства и напряжением поля.

Геометрической моделью мягкой, предварительно напряженной сжатым газом оболочки является эквипотенциальная поверхность равного напряжения (с одним или несколькими центрами напряжения), которая точно воспроизводится пузырями из мыльной пленки.

Авторами предложена пузырьковая модель мягкой оболочки в условиях больших перемещений под действием формоизменяющей внешней сжимающей нагрузки.

Пузырьковая модель – трехмерный блок из большого количества одинаковых мыльных пузырьков, соизмеримых с высотой деформированной оболочки, взаимодействие между которыми подобно притяжению и отталкиванию частиц газа в замкнутом пространстве. Эта модель имеет физический смысл, а структуру только плотной упаковки.

Установлено, что геометрическое место точек линий равного напряжения силового поля давления (электромагнитного, кулоновского) графически изображается кривыми четвертого порядка, известными как овалы Кассини.

Отсюда геометрической (графической) моделью деформированной мягкой (пузырьковой) модели принята поверхность вращения геометрического места точек, для которых произведение расстояний от этих точек до концов межфокусного расстояния равно квадрату данного отрезка – овалоида Кассини.

Уравнение поверхности вращения овалов Кассини принято математической моделью деформированного мыльного пузыря (поверхности равного напряжения).

Таким образом, с помощью вписанных сферических моделей можно представить любую из сложных деформированных мягких оболочек, приведение которых к поверхности второго порядка упрощает расчет максимальных натяжений в зонах контакта с реальной оболочкой, позволяет прогнозировать места образования складок и конструктивно их устранять.

4.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЭЛАСТИЧНЫХ ТОРОИДНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Разработка методики проектного расчета конического тороида

На основании дискретности рабочего газа натяжение тороидной оболочки осуществляется сжатой рабочей средой, по величине пропорциональной радиусу вписанной в торец оболочки R_k сферы R_u , отражающей напряженность силового поля давления (рис. 4.12).

Как было отмечено, тороидные оболочки относятся к складчатым, у которых натяжение оболочки происходит путем ее распора вписанными упругими сферами напряженности силового поля давления. Поэтому для определения картины напряженности впишем условно в оболочку сферы натяжения, поверхности которых равны натяжению тороидных оболочек в точках контакта [86].

Отсюда окружные натяжения тороидных оболочек представляют распор между вписанными сферами и равны по величине половине величины натяжения в этих сферах. Причем, так как в тороидных оболочках внутренняя поверхность имеет отрицательную кривизну, то окружные натяжения на внутренней поверхности отсутствуют и материал напряжен только меридиональными натяжениями.

В то же время меридиональные натяжения тороидных оболочек также представляют собой распор между вписанными сферами напряженности. Поэтому у цилиндрических тороидов величина натяжения пропорциональна радиусу вписанной сферы, а у конических тороидов – среднему арифметическому суммы радиусов вписанных в торцы сфер. Величина распора зависит как от радиуса вписанных сфер, так и от величины давления сжатого газа. Кроме того, роль рабочей среды в натяжении тороидной оболочки аналогична натяжению в традиционных мягких оболочках. То есть для жидких рабочих сред распор оболочки возрастает на величину собственной массы среды. А распор оболочек, заполненных газом легче воздуха, уменьшает распор от собственного веса и сопоставим по величине с натяжением от массы оболочки.

Следовательно, методика проектного расчета основывается на гипотетическом представлении механизма напряжения мягкой оболочки и вписанными в ее полость упругими сферами напряженности, напряженность которых в точках контакта с оболочкой равна по величине напряженности в сфере и является наибольшей, пропорциональной радиусу вписанной сферы.

Определение предельного натяжения от внутреннего давления

Пусть тороидная оболочка имеет форму конического тороида. Обозначим: рабочее давление – Δp , минимальный объем – V_0 , радиус верхнего тора цилиндра и конуса – $R_K = R_{Ц} = R_C$, радиус нижнего тора конуса – r_K , высоту (длину центральной струны – h , собственную массу оболочки – G_C , подъемную силу рабочего газа – (гелия) G_T .

Рассмотрим рис. 4.12: максимальное натяжение от действия внутреннего давления оболочка испытывает в местах максимальной кривизны и на поверхности вписанной сферы максимального диаметра R_C , то есть на торцах. Натяжения в оболочке от действия сжатой рабочей среды распределяется вдоль кольцевой образующей N_{10} и вдоль меридиана N_{1M} . Так как толщина оболочки относительно габаритных размеров незначительна ($h \gg \delta$), то ею можно пренебречь.

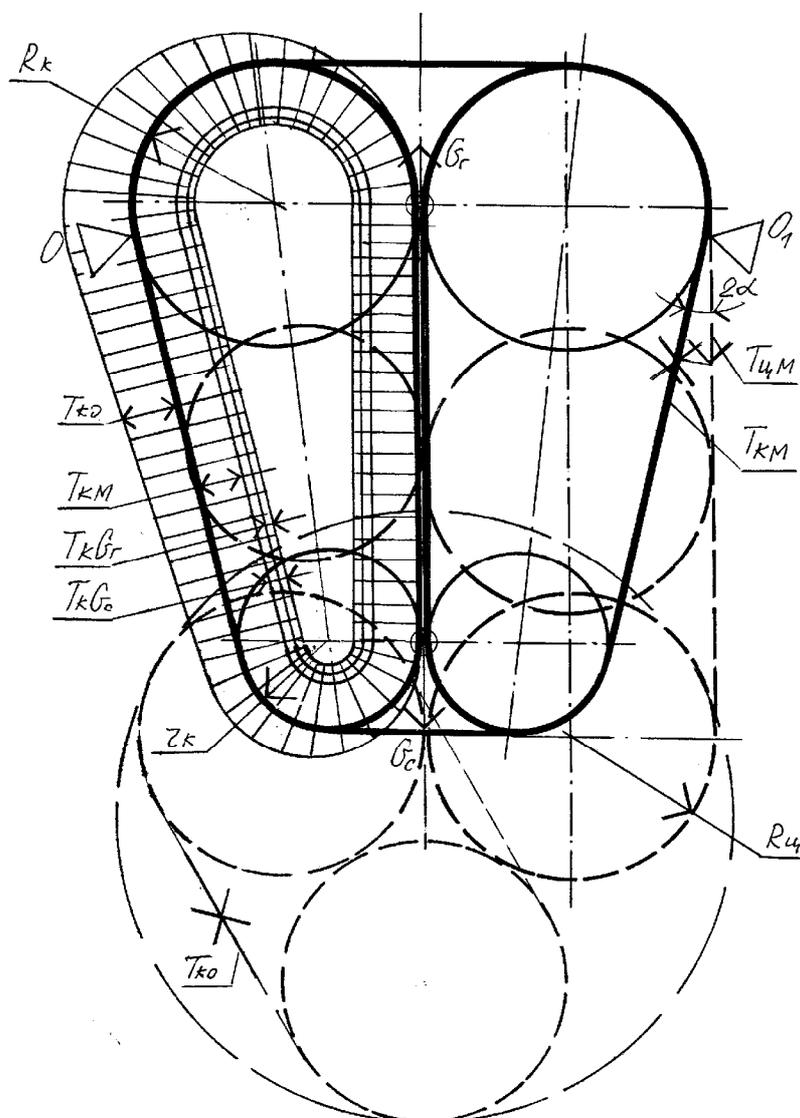


Рис. 4.12. Эпюры напряжения конического тороида от действия внутреннего давления T_{k0} , T_{kM} , собственного веса T_{kGr} и плотности рабочего газа T_{kGo}

Отсюда окружное усилие (N_{IO}) на вписанной сфере можно выразить через условие равновесия как [18]:

$$3/2 \Delta p V_C = N_{IO} S_C, \quad (4.46)$$

где $\Delta p = \Delta p_a + \Delta p_l$ – избыточное давление в оболочке;

Δp_a – атмосферное давление;

Δp_l – лапласовское давление, уравнивающее жесткость материала при искривлении поверхности (изгибе);

$S_C = 4\pi R_C^2$ – площадь поверхности вписанной сферы;

$V_C = 4\pi R_C^3 / 3$ – объем вписанной сферы.

Тогда из (4.46):

$$N_{IO} = 3 \Delta p V_C / 2 S_C = 3 \Delta p 4\pi R_C^3 / 2 \times 3 \times 4\pi R_C^2 = \Delta p R_C / 2. \quad (4.47)$$

Зависимость (4.47) представляет уравнение Лапласа для сферы [16].

А так как торцы тороида представляют собой складчатую форму замкнутого тора, то окружные натяжения образованы распором между вписанными парами сфер, то есть по величине равны половине окружного усилия в сфере:

$$N_{KO} = N_{CO} = 1/2 N_{IO} = \Delta p R_C / 4. \quad (4.48)$$

Относительно напряжения на внутренней поверхности тороида следует заметить, что благодаря взаимному касанию вписанных сфер центральная струна тороидной оболочки разгружена контактными напряжениями от кольцевых натяжений, которые по величине близки к нулю (рис. 4.12).

Конфигурация материала оболочки в жгуте (струне) принимает форму двух многолучевой звезды по количеству складок на внутренней поверхности. То есть формообразование струны тороида зависит от соотношения диаметров внутреннего тела, деформирующего поверхность тороида изнутри и наружного диаметра. Это соотношение определяется из условия образования ветвей гипоциклоиды [86].

Отсюда можно построить эпюру кольцевых напряжений, которые показаны на рис. 4.12. Кольцевые напряжения в районе торцев нелинейно изменяются по величине от нуля до максимального значения, пропорционального радиусу вписанной сферы, затем для цилиндрического тороида без изменения, а для конического, – уменьшаясь от большего торца к меньшему, далее до нуля в районе начала нижней струны.

Эпюра меридиональных напряжений, изображенная на рис. 4.12, состоит из трех частей. Так как продольное (меридиональное) напряжение цилиндрического и конического тороида задается распором между вписанными сферами, то по величине оно должно быть равно половине среднего арифметического кольцевых натяжений оболочки сферы на верхнем и нижнем торце.

Для цилиндра оно неизменно, а для конуса имеет зависимость:

$$N_{KM} = 1/2 N_{CO} = 1/2 \Delta p (R_K / 4 + r_K / 4) = N_{CM}. \quad (4.49)$$

С учетом угла конусности уравнение (4.49) будет иметь вид:

$$N_{CM} = 1/2 \Delta p R_K / 4 \cos \alpha. \quad (4.50)$$

Таким образом, с целью упрощения расчета оболочек сложной конфигурации, достаточно определить напряженность вписанных расчетных сфер, кото-

рая будет не меньше расчетной напряженности, определенной традиционными методами расчета.

С помощью вписанных сфер также определяются места максимального напряжения и наиболее слабое место для ожидаемого разрушения. В нашем случае таким местом является кольцевая образующая, по которой осуществлено крепление конической оболочки на опоре.

Определение натяжения от собственной массы

Система *оболочка – рабочая среда*, как правило, имеет незначительную по величине массу, которая будучи приложенная к центру тяжести, увеличивает составляющую распора оболочки на величину собственной массы (G_C)

$$N_{ЦМ}' = N_{ЦМ} + G_C / 2\pi R_K = (1/2 \Delta p R_K / 4 \cos \alpha + G_C / 2\pi R_K). \quad (4.51)$$

Отсюда собственная масса оболочки играет значительную роль при совершении работы, совместимой с работой массы оболочки.

Определение натяжения от разности плотности рабочей и окружающей среды

Так как величина массы системы зависит в основном от массы комплектующих элементов, можно уменьшить величину ее влияния на меридиональные напряжения оболочки, например, уменьшив плотность рабочей относительно окружающей среды (газ гелий в воздушной среде или воздух в водяной среде).

Из основного уравнения кинематической теории газов определим зависимость давления от плотности рабочего газа

$$\Delta p_1 V_1 = 2W_K / 3, \quad (4.52)$$

где $W_K = M c^2 / 3$ – суммарная кинетическая энергия поступательного движения молекул газа;

$M = n m$ – масса газа.

Откуда

$$\Delta p_0 = 2W_{K_0} / 3 = 1/3 n_0 m c^2 = 1/3 \rho c^2, \quad (4.53)$$

где $n_0 = n / V_0$ – число молекул газа в единице объема;

$\rho = n_0 m$ – плотность газа.

При сохранении равенства давления ($\Delta p_1 = \Delta p_2$) из (4.52) получим

$$\Delta p_1 V_1 = \Delta p_2 V_2 \rightarrow 1/3 \rho_{\text{воздуха}} c^2 V_1 = 1/3 \rho_{\text{гелия}} c^2 V_2; \quad (4.54)$$

где

$$V_2 = \rho_{\text{воздуха}} \cdot V_1 / \rho_{\text{гелия}} \quad (4.55)$$

От действия подъемной силы газа гелия уменьшится распор от собственной массы системы: *оболочка – рабочая среда* и составит величину.

$$N_{ЦМ}'' = N_{ЦМ} - (G_C - G_G) / 2\pi R_K, \quad (4.56)$$

где $G_G = V_0(\rho_B - \rho_G)$ – подъемная сила гелия с плотностью (ρ_G), относительно плотности воздуха (ρ_B).

Следовательно, при незначительной собственной массе оболочки подъемная сила гелия может совершать определенную работу, например, подъем аппарата легче воздуха.

Определение натяжения от температуры окружающей среды

Используем зависимость Менделеева – Клайперона [86].

$$\Delta p_1 V_1 / T_1 = \Delta p_2 V_2 / T_2 = B, \quad (4.57)$$

где

B – удельная газовая постоянная;

$T_2 > T_1$ – температура нагретого рабочего газа.

Определим изменение давление рабочего газа из (4.57) за счет нагревания его до температуры (T_2) при сохранении равенства, например, объема за счет не-растяжимости оболочки.

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 V_1 T_2 / V_2 T_1 = \Delta p_1 T_2 / T_1. \quad (4.58)$$

Отсюда при нагревании рабочего газа давление в оболочке растет прямо пропорционально разнице температур.

Определение геометрических параметров тороидных оболочек

В соответствии с классификацией тороидные оболочки бывают замкнутого и незамкнутого объема. Для определения объема тороидной оболочки рассмотрим замкнутые дифференцируемые поверхности (см.табл. 4.2).

Трубчатый тороид представляет собой замкнутую цилиндрическую поверхность, торцы которой соединены между собой (без выворачивания). Наружная образующая такой оболочки представляет собой замкнутый круг, а внутренняя поверхность, имеющая ту же длину образующей, собрана в складки и образует составную поверхность со складками. Особенностью такого тороида является наличие двух осесимметричных поверхностей вращения вокруг оси симметрии оболочки и оси вращения цилиндрической (тороидной) поверхности. Фактически форма такой поверхности близка тору.

Поверхности вращения цилиндрического и конического тороидов имеют по одной оси вращения. Замкнутые тороидные оболочки характеризуются площадью поверхности и объемом как параметрами работоспособности.

Для определения зависимости геометрических параметров конических тороидных оболочек рассмотрим площадь поверхности и их объем.

Воспользуемся рис. 4.13, на котором представлено сечение тороидной оболочки в двух положениях: с минимальным и максимальным объемом.

Для определения параметров конического тороида рассмотрим его сечение в первом положении. Объем конического тороида состоит из суммы объемов усеченного конуса и полуобъемов торцевых торов

$$V_1 = V_{ук} + 1/2 V_{T1} + 1/2 V_{T2}, \quad (4.59)$$

где

$V_{ук} = \pi h_1 (R_1^2 + r_1^2 + R_1 r_1) / 3$ – объем усеченного конуса;

$V_{T1} = 2\pi^2 R_1^3$ – объем большего торца;

$V_{T2} = 2\pi^2 r_1^3$ – объем меньшего торца;

$h_1 = (R_1 - r_1) / \operatorname{tg} \alpha$ – высота усеченного конуса.

Подставим значения объемов в формулу (4.59) и после произведенного перемножения получим:

$$V_1 = \pi(R_1^3 - r_1^3) / 3 \operatorname{tg} \alpha + \pi^2(R_1^3 + r_1^3). \quad (4.60)$$

Таким образом, зная величины радиусов верхнего и нижнего тора, можно с помощью угла конусности определить объем конического тороида. Разница объемов в крайних деформированных (вывернутых) положениях конического тороида определяет его потенциальную энергию при совершении, например, перемещения (подъема) груза. Поэтому важно знать зависимость объема (V_{II}) оболочки от ее высоты выворачивания (H_{max}) после перемещения.

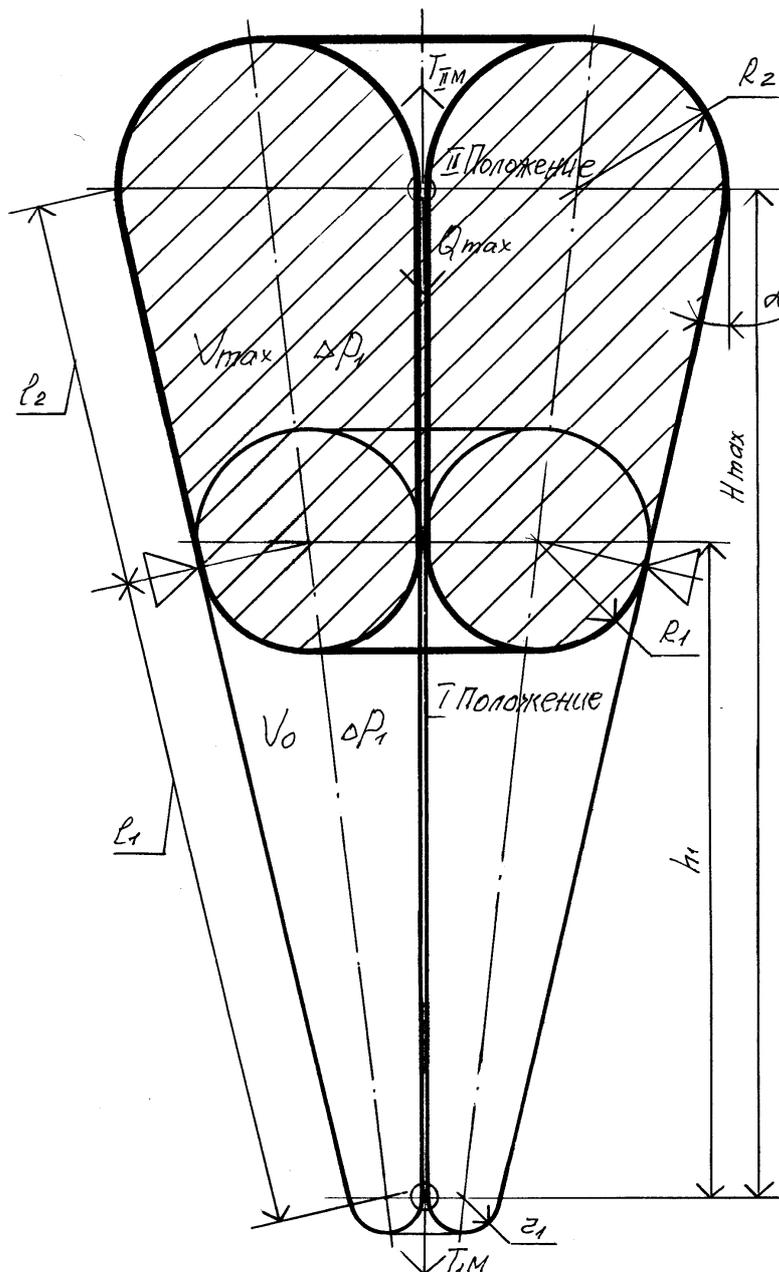


Рис. 4.13. Схема перемещения конического тороида из положения I с минимальным объемом (V_I) в положение II с максимальным объемом (V_{II})

Для определения высоты усеченного конуса воспользуемся известными геометрическими параметрами (рис. 4.13).

Длины меридианов оболочки в первом и втором положении равны, угол конусности (α) постоянный и равен:

$$\operatorname{tg} \alpha = (R_2 - r_2)/h_2 = (R_1 - r_1)/h_1 = (R_2 - r_1) / H_{\max} \quad (4.61)$$

где R_2 ; r_2 – радиусы большего и меньшего торцов;
откуда

$$R_2 = r_1 + H_{\max} \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.62)$$

Зная (4.61) и (4.62), можно определить остальные геометрические параметры тороидной оболочки во втором положении.

$$h_2 = H_{\max} - h_1; \quad (4.63)$$

$$r_2 = R_2 - h_2 \operatorname{tg} \alpha = r_1 + h_1 \operatorname{tg} \alpha = R_1. \quad (4.64)$$

Разница объемов в крайних деформированных (вывернутых) положениях конического тороида определяет его потенциальную энергию при совершении, например, перемещения (подъема) груза. Поэтому важно знать зависимость объема (V_{II}) оболочки от ее высоты выворачивания (H_{\max}) после перемещения.

Теперь из (4.60) определим максимальный объем конического тороида

$$V_{II} = \pi(R_2^3 - r_2^3)/3 \operatorname{tg} \alpha + \pi^2(R_2^3 + r_2^3). \quad (4.65)$$

Определим разницу объемов оболочки во втором и в первом положении.

$$V_{II} - V_I = (\pi/3 \operatorname{tg} \alpha + \pi^2)(R_2^3 - 2R_1^3 + r_1^3), \quad (4.66)$$

или

$$V_{II} - V_I = (\pi/3 \operatorname{tg} \alpha + \pi^2)[(r_1 + H_{\max} \operatorname{tg} \alpha)^3 - 2(r_1 + h_1 \operatorname{tg} \alpha)^3 + r_1^3]. \quad (4.67)$$

Определим отношение этих объемов

$$V_{II}/V_I = [\pi(R_2^3 - r_2^3)/3 \operatorname{tg} \alpha + \pi^2(R_2^3 + r_2^3)]/[\pi(R_1^3 - r_1^3)/3 \operatorname{tg} \alpha + \pi^2(R_1^3 + r_1^3)]. \quad (4.68)$$

Отсюда

$$V_{II}/V_I = [3 \pi \operatorname{tg} \alpha (R_2^3 + r_2^3) + (R_2^3 - r_2^3)]/[3 \pi \operatorname{tg} \alpha (R_1^3 + r_1^3) + (R_1^3 - r_1^3)], \quad (4.69)$$

или

$$V_{II}/V_I = [(r_1 + H_{\max} \operatorname{tg} \alpha)^3 (3 \pi \operatorname{tg} \alpha + 1) + (r_1 + h_1 \operatorname{tg} \alpha)^3 (3 \pi \operatorname{tg} \alpha - 1)] / [(r_1 + H_{\max} \operatorname{tg} \alpha)^3 (3 \pi \operatorname{tg} \alpha + 1) + r_1^3 (3 \pi \operatorname{tg} \alpha - 1)]. \quad (4.70)$$

Таким образом, максимальный объем тороида зависит от угла конусности и высоты выворачивания оболочки в соответствии с (4.60) и (4.65).

Объем цилиндрического тороида можно определить как сумму объемов цилиндра и двух полуторов (целого тора) (рис. 4.13).

$$V_{CT} = V_{Ц} + V_T = \pi R_{Ц}^2 h + 2 \pi^2 r_T^2 R_T, \quad (4.71)$$

где $R_{Ц} = r_T + R_T$ – радиус цилиндрической поверхности;

$r_T = R_T$ – радиус сечения торцевого тора;

откуда
$$V_{CT} = 4 \pi r_T^2 h + 2 \pi^2 r_T^3. \quad (4.72)$$

Определение площади поверхности тороидов

Особенностью определения площади поверхности тороидов является наличие у них внутренней поверхности, представляющей собранный в жгут материал оболочки, напряженный меридиональным усилием растяжения, по площади равный внешней поверхности усеченного конуса. Поэтому условно заменим внутренний жгут струной, к которой прикреплены воронки торцовых торцев.

Для определения площади боковой поверхности конического тороида просуммируем поверхности усеченного конуса и две половины торцевых торцов. Воспользуемся для этого рис. 4.13 и формулами:

$$S_{KT} = M_{KT} + 1/2 S_{T1} + 1/2 S_{T2}, \quad (4.73)$$

где $M_{KT} = \pi l (R_1 + r_1)$ – площадь боковой поверхности усеченного конуса;

$S_{T1} = 4 \pi^2 r_1^2$ – площадь поверхности нижнего тора;

$S_{T2} = 4 \pi^2 R_1^2$ – площадь поверхности верхнего тора;

$tg \alpha = (R_1 - r_1) / h_1$ – зависимость угла конусности от высоты;

$h_1 = l_1 \cos \alpha$ – зависимость высоты от длины образующей.

$$S_{KT} = \pi l (R_1 + r_1) + 2 \pi^2 r_1^2 + 2 \pi^2 R_1^2. \quad (4.74)$$

Следует отметить, что при перемещении (выворачивании) конического тороида часть боковой поверхности расходуется на складки. Поэтому целесообразно полную его поверхность (площадь расходуемого материала) рассчитывать через длину образующей тороида (в ненаполненном рабочим газом состоянии).

Откуда полная поверхность конического тороида равна:

$$S_{KT}' = l (2 \pi r_1 + 2 \pi R_1) + 4 \pi^2 R_1^2 + 4 \pi^2 r_1^2. \quad (4.75)$$

Полная площадь поверхности цилиндрического тороида, по аналогии с полной поверхностью конического тороида, определяется через нахождение длины образующей. То есть

$$S_{цт} = 4 \pi R l + 4 \pi^2 R^2, \quad (4.76)$$

где $S_{\text{обц}} = 2 (2 \pi R) l$ – суммарная площадь внутренней и внешней боковых поверхностей цилиндрической части тороида;

$S_{\text{ом}} = 2 \pi R 2 \pi R$ – суммарная площадь полотнища для раскроя полуторцов (с учетом площади складок);

R – радиус цилиндра; $2l$ – длина образующей.

Таким образом, определение геометрических параметров тороидных оболочек связано с установлением зависимости радиусов тороидных торцов, углом конусности и протяженностью их боковой поверхности или высоты.

Выводы

Условие напряженности тороидных оболочек, представленное как распор поверхности от вписанных в их полость модельных сфер, позволяет упростить методику инженерного расчета независимо от формоизменения тороидов под нагрузкой.

Особенностью тороидных конструкций является их двустенная поверхность, напряженность внешней и внутренней поверхности которой осуществляется

различным способом. Если наружная поверхность подвергается двухосному растяжению от действия внутреннего давления (меридиональным и окружным или экваториальным), то внутренняя – только меридиональным растяжением. Причем избыток материала на внутренней поверхности, не испытывающей растягивающих окружных растяжений, компенсируется радиальными складками на торцах.

Для наглядности можно представить тороидные оболочки в виде емкости заданной формы, полость которой плотно заполнена упругими сферами. Независимо от формы и размеров оболочки растягивающие усилия от внутреннего давления представляют усилия распора от вписанных упругих сфер в продольном и поперечном (кольцевом) направлениях. При этом наружная поверхность растягивается в двух направлениях, а внутренняя – в одном (вдоль оси симметрии). Окружные натяжения внутренней поверхности снимаются взаимодействием вписанных сфер, саморазгружающих поверхность в точках контакта или центральным телом, разгружающим растягивающие усилия по площади контакта.

Кроме того, механизм напряжения оболочки всегда наглядно демонстрирует места перенапряжений и слабых мест в конструкции, которые можно устранить еще в процессе проектирования. Предложенная методика также позволяет представить структуру напряженной рабочей среды для исследования динамики процесса формообразования под нагрузкой или в процессе перемещения (выворачивания или наволакивания тороидов).

Приведение геометрических форм к производной сфере не только упрощает расчет геометрических и физических параметров оболочек, но и включает математический аппарат обработки проектного расчета. Выше была представлена математическая модель формообразования мягких оболочек под действием сжимающей осесимметричной нагрузки и предложено общее уравнение деформированной сферической оболочки.

Таким образом, вместо громоздкой системы дифференциальных уравнений с переменными величинами деформаций материала и перемещений оболочки под воздействием внешних нагрузок мы имеем взаимодействующие равнонапряженные осесимметричные упругие сферы, картина напряжений которых легко определима во всевозможных режимах нагружения и деформирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построить поверхности равного напряжения для оболочек различных геометрических форм и установить их максимально напряженные зоны.

2. Исследовать влияние на напряженное состояние упругих свойств материала (мыльная пленка, резина, прорезиненная ткань).

3. Исследовать влияние на напряженное состояние эластомерных силовых конструкций замкнутой в оболочке рабочей среды (газ, жидкость, сыпучий материал).

4. Установить энергетическое равновесие взаимодействия сжатой рабочей среды и материала оболочки эластомерной силовой конструкции без внешней силовой нагрузки и под действием сжимающей внешней силы.

На основании результатов расчета можно вывести формулы зависимости натяжения материала от величины действующих нагрузок: внешних сжимающих сил и внутреннего избыточного давления.

С помощью выведенных формул могут быть произведены расчеты прочности, несущей способности, устойчивости (складкообразования).

Для определения механизма напряжения эластичных механизмов используется метод моделирования.

Физической моделью эластичных механизмов принимается пузырьковая модель Брегга – Ломера – Ная [16], представляющая собой блок мыльных пузырей равного диаметра и равного натяжения, замкнутых внутри оболочки заданной формы. Часть пространства, замкнутого в полости эластичной оболочки, способного упруго сопротивляться внешним силовым воздействиям, является мягкой оболочечной системой или мягкой оболочкой.

В отличие от тонкостенных жестких оболочек, мягкие способны воспринимать только растягивающие усилия от действия избыточного давления на их внутреннюю поверхность и не оказывают сопротивления внешним сжимающим, изгибающим, скручивающим, растягивающим воздействиям.

Таким образом, силовой функцией мягкой предварительно напряженной оболочки является сжатая рабочая среда в диапазоне (0,001 – 1,0) МПа. В области лапласовских величин избыточных давлений сжатого газа существуют силовые поля давления (межмолекулярного взаимодействия) как следствие дискретности среды. Каждая частица, входящая в структуру рабочей среды, как потенциальный точечный источник центральных сил взаимодействия обладает сферическим силовым полем равнодействия или сферическим потенциалом этих сил. Величина сферического потенциала изменяется в соответствии с тензором напряжения, зависящим, в частности, от радиуса сферы действия.

Механизмом натяжения мягкой оболочки сжатой рабочей средой является работа распределенных по поверхности замыкающей оболочки сил давления. Условием статического равновесия является стремление сжатого рабочего газа занять максимальный объем, а замыкающей мягкой оболочки – сохранить минимальную поверхность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амфибийные внедорожные транспортные средства.
<http://hybridcar.fromru.com/> .
2. Амфибийные внедорожные транспортные средства.
<http://voenavto.almanacwhf.ru/exotica/e4047.jpg>.
3. Анизотропная токопроводящая резина «зебра». MVS.BY. Microvideo-systems co.Ltd, 2004.
4. Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике: В 7 т. –М.: Наука, 1981.
5. Белицин М.Н. Текстильное материаловедение: Учеб. пособие. – М.: Изд-во ВЗМИ, 1983. – 82 с.
6. Берд У. У. Стеклоткань, покрытая тефлоном, - уникальный новый материал для тканевых сооружений. // Пневматические строительные конструкции /Под ред. В.В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983.-С.239-261.
7. Богуславский Л.И., Винников А.В. Органические полупроводники и биополимеры. Электропроводность и физико-химические свойства. - М.: Наука, 1968. – 180 с.
8. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1980 – 976 с.
9. Бубнер Э. Материалы и конструктивные формы пневматических сооружений и их применение в ФРГ // Пневматические строительные конструкции / Под ред. В. В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983 – С. 83 – 112.
10. Васильев В., Барынин В., Бунаков В., Марцыновский В., Резина. Композиты – материалы XXI века // Химия и рынок. – 2000. – №1. – С. 70 – 74.
11. Вознесенский С. Б., Полуян В. А. Совершенствование конструкций тентовых сооружений производственного назначения.// Совершенствование и оптимизация конструкций, изготавливаемых с применением мягких оболочек: Тез. докл. Седьмая Дальневост. конф. по мягким оболочкам. ДВВИМУ. – Владивосток, 1983. – 190 с.
12. Воробьев-Обухов А., Сачков М. «Живой» пневмопривод.
(<http://www2.zr.ru/zrmagazine/zr0101/58.htm>) .
13. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука.1977. – 871 с.
14. Газета «Труд». <http://www.trud.ru/030Foto/Foto15.htm> .
15. Гарднер М. Математические досуги. / Пер. с англ. М.: Мир, 1973. – 496 с.
16. Гегузин Я. Е. Пузыри. – М.: Наука, 1985. – Вып. - 46. 176 с. (Библиотечка «Квант»).
17. Герон Александрийский. <http://erudite.nm.ru/GeronF.htm> .

-
18. Горелик Б. М., Шальнев О. В. Основы проектирования эластомерных домкратов: Тематический обзор/ ЦНИИТЭНефтехим. – М., 1994 – 117с.
 19. Гудвинс Р. MIT совершил квантовый скачок в сфере дисплеев.ZDNet UK, 2003.
 20. Гулин Б. В. Локальная регуляризация численного решения задач динамики нелинейно упругих мягких оболочек // Совершенствование и оптимизация конструкций, изготавливаемых с применением мягких оболочек Тез. докл. //Седьмая Дальневост. конф. по мягким оболочкам ДВВИМУ им. адмирала Г. И. Невельского. – Владивосток, –1983. – С.143 – 147.
 21. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопротивление материалов. – М.: Высш. шк., 1975 – 654 с.
 22. Ермолов В. В. Воздухоопорные здания и сооружения. – М.: Стройиздат, 1980. – 304 с.
 23. Ермолов В. В. Прошлое, настоящее и будущее пневматических строительных конструкций // Пневматические строительные конструкции /Под ред. В.В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983 – С. 3–47.
 24. Злотина Э., Петров В. Введение в теорию решения изобретательских задач. http://www.trizminsk.org/e/23110_331.htm.
 25. Ильгамов М. А. Аэрогидроупругость.(www.kcn.ru/tat_en/science/ans/Journals/ansi_cnt/04_2_8/04_2_8/html/).
 26. Искусственные кожи и пленочные материалы: Справ. / А. Т. Литвиненко, Б. Я. Кипнис, Л. Я. Брук и др. / Под ред. В.А. Михайлова и Б. Я. Кипниса. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Легпромбытиздат, 1987. – 400 с.
 27. История дельтапланизма. Дельтаклуб «Орион» . <http://orionclub.narod.ru/hanggliding/hghistory.htm> .
 28. Кардашов Д. А. Конструкционные клеи. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
 29. Кожевников Р. З. и др. А. с. 1048069 приор.10.04.81. Устройство для подачи грузов в пневм-опорное сооружение.
 30. Кожевников Р. З. и др. А. с. 1068648 приор. 23.01.84. Передвижная пневмоопора трубной плети.
 31. Кожевников Р. З. А. с. 392579 приор. 19.07.70. Пневматическая мачта.
 32. Кожевников Р. З. А. с. 493422 приор. 18.06.71. Грузозахватное устройство для подъема штучных грузов.
 33. Кожевников Р. З. и др.А. с. 513899 приор. 01.09.72. Движитель транспортного средства.
 34. Кожевников Р. З. А. с. 535642 приор. 21.11.72. Пневматическое устройство для затягивания кабельных изделий в трубопроводы.
 35. Кожевников Р. З. и др.А. с. 590198 приор. 29.09.76. Элеватор для транспортировки штучных грузов.
 36. Кожевников Р. З.А. с. 644908 приор.15.04.77. Ударное устройство.
 37. Колкунов Н. В. Основы расчета упругих оболочек. – М. : Высш. шк.,

-
1980. – 296 с.
38. Компаунды «Сиэл» для электронной техники. Химия и рынок. 2000. №3(10).–С.44–45.
39. Композиционные материалы и изделия из них под воздействием различных видов энергии: Тез. докл. межотрасл. науч. конф., совещ., семинаров. Фирма «Мангуст».1995. С.6 – 10, 12 – 14, 20 – 21, 24 – 25, 44, 104 – 106.
40. Коновалов В. И., Коваль А. М. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование. – М.:Химия, 1989. – 224 с.
41. Королев А. Н. Разработка надувных пневмокаркасных изделий специального назначения из армированных полимерных материалов: Дис. канд. техн. наук. / ЯГТУ. – Ярославль, 2002.
42. Королев А.Н., Жохов В.П. Надувные лодки. – Л.: Судостроение, 1989.– 288 с.
43. Космические новости.
http://kuasar.narod.ru/news/2003-07/04-07_2003.htm;
44. Космический парашют.
http://www.rpm-novation.com/PressCenter/Reviews/Cosmo_par.htm/;
www.laspece.ru/rus/ptu_construction.php .
45. Крайнев А. Ф. Словарь-справочник по механизмам. – М.: Машиностроение, 1981. – 438 с.
46. Круммхойер В. Свойства тканей с покрытием из ПВХ, применяемых в пневматических конструкциях // Пневматические строительные конструкции. / Под ред. В. В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983.- С.224 - 238.
47. Логачева Е. П., Деркачева Е. С., Боков В. М., Польсман Г. С. Новые клеи для склеивания резин // Тез. докл. семинара «Клеи и клеевые соединения в народном хозяйстве». – М.: ВНИИЭМИ, 1992. – 40 с.
48. Магула В. Э. Судовые эластичные конструкции. – Л.: Судостроение, 1978. – 268 с.
49. «Марш» по бездорожью.
<http://www2.zr/zrmagazine/zr0398/030--/031.htm>
50. Материалы для пневматических конструкций и инженерного имущества. Каталог-справочник. – М. 5 ЦНИИТЭнефтехим, 1990.–100 с.
51. Методы расчета разверток геометрических элементов резинотканевых пневматических изделий. / Под общ. ред. А. С.Миловидова В. М. Щегловой, М.: ЦНИИТЭНефтехим 1978. – 93 с.
52. МиленьтьевА. Б., Абрамов Э. П., Талачев А. С., Тихонов О. А., Фрид Е. С. Разработка защиты объектов подвижной наземной техники и средств индивидуальной защиты персонала, применяемых при проведении аварийно-спасательных работ и работ по ликвидации последствий радиационных аварий.//Средства спасения – основные тенденции развития, состояние разработки и изготовления современных аварийно-спасательных средств и технология проведения поисково-спасательных

-
- работ. / Под ред. С. В. Дементьева: Сб. тез. докл. науч.-практ. конф. М., 1994. – 142с.
53. Мортон В. Е., Херл Д. В. С. Механические свойства текстильных материалов. – М.: Легкая индустрия, 1971. – 182 с.
54. Мудрых П. А. Способы и технические устройства отбора волновой энергии по материалам патентных исследований// Сообщения ДВВИМУ, Владивосток, 1979.
55. Мурата Ю. Пневматические сооружения на международных выставках. Пневматические строительные конструкции / Под ред. В. В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983 – с. 188 – 200.
56. Непейвода В.Г. К расчету заполнения кранца с упругой цилиндрической оболочкой. / Тр. НКИ им. адмирала С.О.Макарова. – Вып.78. – Николаев, 1973. С. 42-47.
57. Норден А.П. Теория поверхностей. – М.: 1956. – 259 с.
58. Орта Ю. Н. Особенности архитектуры пневматических воздухоопорных сооружений // Пневматические строительные конструкции / Под ред. В. В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983. – С. 383 – 435.
59. Остапенко Л. Пауэрлифтинг.
<http://members.fortunecity.com/trb77/body/power/baza/htm>
60. Отто Ф., Тростель Р. Пневматические строительные конструкции. – М.: Стройиздат, 1967. – 320 с.
61. Предшественники танка. <http://armor.kiev.ua/lib/tank/1-2/t2.html>
62. Предшественники танка. <http://armor.kiev.ua/tanks/wwi/kolesa/t12/gif>
63. Природные движители. <http://www.ll-propulsive.narod.ru/riba.htm> .
64. Р. П. Энергетика. <http://user.ru/~balandr/rp/class.html> .
65. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
66. Роговин З. А. Основы химии и технологии химических волокон. М.: Химия, 1974. – Т. 2. – 344 с.
67. Роторный движитель.
<http://www.korabel.ru/dictionary/detail/18/1033391540.html> .
68. Рукавные и торовые преобразователи. Возможность и целесообразность их применения в машинах и устройствах широкого назначения. / Под общ. ред. А. И. Коробова, В. Н. Шихирина. М.: ВИМИ, 1995. – 84 с.
69. Савелов А. А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применения. Справ. руководство / Под ред. А. П. Нордена. – М.: гос. Изд-во физмат лит., 1960. 293 с.
70. Сергеев Б.И. Основы расчета и применения мягких конструкций гидротехнических сооружений // Теория мягких оболочек и их использование в народном хозяйстве/ Под ред. И. И. Воровича. – Ростов Н/Д: Изд-во. Рост. Ун-та, 1976. – С. 72 – 81.
71. Сичкарев В. И. Классификация мягких силовых конструкций / Труды НКИ. – Николаев, 1973 – Вып. 78. – С. 76 – 78.

-
72. Соловьев А. Н. Изменения и оценка свойств текстильных материалов. – М.: Легкая индустрия, 1976. – 234 с.
 73. Соловьев А. Н. Изменения и оценка свойств текстильных материалов. М. Легкая индустрия, 1976. – 234 с.
 74. Справочник по клеям . – Л.: Химия, 1980.
 75. Старжен Д. Л. Г., Уардл М. В. Улучшенные высокопрочные материалы для оболочек. // Пневматические строительные конструкции /Под ред. В.В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983.-С. 261 – 272.
 76. Сухотина Т. М., Борисова Н. Н. Свойства этиленпропиленовых каучуков и резин на их основе: Обзор. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1973. – 84 с.
 77. Танк Менделеев. <http://armor.kiev.ua/Tanks/WWI/Mendeleev/Tmc.gif> .
 78. Термоэластопласты/Под ред. В. В. Моисеева – М.: Химия, 1985. – 184 с.
 79. Тихонов И. В., Скворчевский А. К., Новиков А. Б., Орел А. М. Разработка волоконно-оптических измерительных систем (ВОИС) для исследования характеристик опорно-двигательного аппарата человека. / Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова, РАН. – М. 2004.
 80. Тканые конструкционные композиты / Под ред. Т.-В. Чу и Ф. Ко, М.: Мир, 1976.- 430 с.
 81. Усюкин В. И. Техническая теория мягких оболочек и ее применение для рсчета пневматических конструкций. // Пневматические строительные конструкции /Под ред. В.В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983.-С.299-333.
 82. Фурне Ф. Синтетические волокна. – М.: Химия,1970. – 683 с.
 83. Харнах Р. Расчет воздухоопорных сооружений на ветровые нагрузки. // Пневматические строительные конструкции / Под ред. В. В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1983 – С. 383 – 435.
 84. Шальнев О. В. Конструктивные особенности тороидных оболочек. Материалы докл. междунар. науч.-прак. конф. Торové технологии. – Иркутск: Изд-во: ИрГТУ 2004. – С.63 – 73.
 85. Шальнев О. В. Овалы Кассини и пузыри в моделировании мягких оболочек. 2005. www.erudition.ru/referat/printref/if.46216_1.html.
 86. Шальнев О. В., Горелик Б. М. Проектирование напорных мягких оболочечных конструкций с использованием физических и геометрических аналогий. // Производство и использование эластомеров. – М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1994. – №6 – С. 15-22.
 87. Шальнев О. В., Горелик Б. М. Пути повышения эффективности пневмоинструмента из эластомерных армированных материалов: Обзорная информация / ЦНИИТЭНефтехим. – М., 1995.– № 1-2.– 116 с.
 88. Шихирин В. Н. Цивилизации брошен вызов. По материалам сайта scite-clibrary.ru .(www.inventors.ru/index.asp?mode=1339).
 89. Шихирин В. Торové технологии.

-
90. Шихирин В. Эластичная механика. Основа машин и механизмов будущего. // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. –2001. – №5, С 10-15.
 91. Шихирин В. Эластичные машины и механизмы будущего. // Сумма технологий. Обзор российских технологий. – 2000. – №3. С.52 - 53.
 92. Шпаков В.П. Классификация пневматических конструкций. // Применение РТИ в народном хозяйстве: Справ. пособие / под ред. Д. Л.Федюкина – М.: Химия, 1986 – 240 с.
 93. Эдвардс Дж. Пластиковые полупроводники. OSP.RU. Изд. «Открытые системы» // Computerworld. 41/2000.
 94. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1974. – 942 с.
 95. Ягнятинская С. М., Гурленя Г. Н. Состояние и перспективы работ в области крепления резин к синтетическим текстильным материалам в РТИ. Тем. обзор. №5.. М.: ЦНИИТЭнефтехим 1992. – 56 с.
 96. Holden D.W.J. Ткани с покрытием и дублированные материалы. некоторые тенденции развития // Coat Fabr. т7 - 1982. - с. 46-49.
 97. NASA разрабатывает надувные космические антенны.
<http://epizodsspace.testpilot.ru/bibl/getland/05.html> ;
http://scripts.online.ru/misc/spacenews/00/08/11_489.htm .
 98. Smart Dust. У пыли уже хватает ума помочь человеку. Membrana.ru. 2003.
www.evg-ars.narod.ru/tor_technology.htm .

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Валерий Николаевич Шихирин
Валентина Федоровна Ионова
Олег Васильевич Шальнев
Владимир Иванович Котляренко

**ЭЛАСТИЧНЫЕ
МЕХАНИЗМЫ
И КОНСТРУКЦИИ**

Редактор

Л.Н. Заступова

Подписано в печать 8.08.2006. Формат 60 x 84 / 16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,0.
Уч.-изд. л. 18,25. Тираж 100 экз. Зак. 504. Доп. план.

ИД № 06506 от 26.12.2001
Иркутский государственный технический университет
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83