

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ И СООРУЖЕНИЯ

С.Н. КРИВОШАПКО, д-р техн. наук, профессор

Российский университет дружбы народов,

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6; sn_krivoshapko@mail.ru

Цель настоящей статьи – дать краткую информацию о состоянии дел в области проектирования, применения и классификации пневматических сооружений с максимальным привлечением иллюстративного материала. Приводятся примеры воздухоопорных и воздухоносных покрытий. Рассматриваются как первые пневматические конструкции 40-х годов XX века, так и конструкции различных модификаций, форм и различного назначения, предложенные в XXI веке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пневматические конструкции, воздухоопорные покрытия, воздухоносные сооружения, пневмокаркасы, пневмоматы, пневмолинзы, фторопласт.

Создание прочных тканей и пленок, не пропускающих воздух, дало толчок появлению пневматических конструкций. *Пневматическими конструкциями (оболочками)* называются мягкие безмоментные оболочки, форма которых



Рис. 1. Выставочный центр агрокомбината «Московский». 35×35 м. (www.vector-in.com)

обеспечивается за счет избыточного давления воздуха, нагнетаемого непрерывно под оболочку, или за счет герметичных несущих пневмобаллонов, наполненных воздухом и служащих несущими конструкциями для водонепроницаемой ткани покрытия. Таким образом, пневматические оболочки разделяются на *воздухоопорные (воздухонадувные)* оболочки (рис. 1) и *воздухоносные* покрытия (рис. 2). В безмоментных оболочках, т.е. в оболочках с очень малой изгибной жесткостью, возникают только тангенциальные (мембранные) усилия, а именно, нормальные и касательные усилия. Воздухоопорные конструкции относятся к категории неустойчивых, и при их расчете необходимо рассматривать два этапа: 1) определение первоначальной геометрии под действием внутреннего давления и постоянной нагрузки; 2) анализ статической и динамической реакции оболочки, обладающей первоначальной геометрией, на прилагаемые внешние нагрузки. Оба этапа являются геометрически нелинейными задачами. Воздухоопорные оболочки чаще всего применяют цилиндрической или сферической формы (рис. 3).



Рис. 2. Надувная мобильная палатка «Арка» (компания «Пневмо Сибирь»)



Рис. 3. Пневматическая оболочка сферической формы

Воздухоопорная оболочка состоит из шлюза для перехода, оболочки, вентилятора и калорифера (рис. 4). Калорифер требуется, если необходимо поддерживать внутри температуру более высокую, чем

снаружи. В нижней части оболочки устраивается силовой пояс, с помощью которого оболочка крепится к основанию. На ленточных бетонных фундаментах крепление мягкой оболочки можно выполнять, используя прижимные пластины, скрепленные с фундаментом.



Рис. 4. Воздухоопорная оболочка [playtennis.ru]

Крепление оболочки к грунту можно осуществить посредством штырей или винтовых свай. Избыточное давление под оболочкой обычно не превышает 500 Н/м^2 и человек его не ощущает. Считается, что пневматические конструкции изобретены в 40-х годах XX века, их начали применять в качестве несущих и ограждающих конструкций для спортивных сооружений (теннисные корты, хоккейные площадки, бассейны), на выставках, в цирках, аквапарках, производственных зданиях. Однако некоторые считают родоначальником пневмоконструкций Ф.У. Ланчестера (Frederick William Lanchester), получившим патент на пневматическую архитектуру. Вначале появились воздухоопорные оболочки. Впервые пневматическая конструкция из пластика была применена в 1946 при сооружении обтекателя радиолокационной антенны в США инженером У. Бэрдом (Walter Bird, Cornell University). Первая строительная пневматическая конструкция с размерами в плане $60 \times 20 \text{ м}$ и высотой 6 м для проектного бюро появилась также в 1946 году в г. Хемел-Хемпстед, Англия. В здании было предусмотрено электрическое отопление ввиду слабых теплоизоляционных свойств материала оболочки. Здание использовалось в течении 2-х лет.



Рис. 5. Павильон США на ЭКСПО-70 (Осака, Япония)

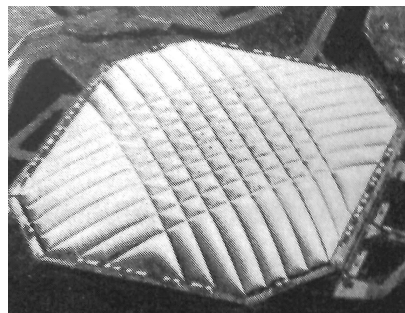


Рис. 6. Двухслойное покрытие в Сибар-Фолсе (США)

В США впервые применили однослойное пневматическое покрытие из стекловолоконистой ткани толщиной $2,4 \text{ мм}$, подкрепленное 12 стальными тросами диаметром 48 мм , для павильона США на выставке ЭКСПО-70 в Осаке (рис. 5). Овальное в плане здание имело размеры $138 \times 78 \text{ м}$ со стрелой подъема $6,1 \text{ м}$. Избыточное давление воздуха – $0,27 \text{ кПа}$, которое могло быть поднято до $0,63 \text{ кПа}$ при сильных порывах ветра. Покрытие в Сибар-Фолсе (США) выполнены уже двухслойными с теплоизоляционным промежуточным слоем (рис. 6). Оболочка усилена сеткой из стальных тросов, расположенных параллельно диагоналям прямоугольного плана. Концы канатов заанкерены в железобетонном опорном контуре. Позже стали возводить двухслойные пневматические конструкции и в виде куполов. Воздухоопорные двухслойные оболочки представля-

ют собой оболочку в оболочке. В такой конструкции пространство между оболочками часто заполняется воздухом, что обеспечивает существенное снижение теплопотерь и соответственно расходы на отопление, а также защиту от образования конденсата на внутренней поверхности оболочки в холодное время года и перегрева в жаркое. При снегопаде воздух между оболочками стравливается и вследствие этого обеспечивается подогрев наружной оболочки и таяние на ней снега.

Считается, что Всемирная выставка ЭКСПО-70 в Осаке (Япония) дала сильный импульс развитию строительства пневматических конструкций по всему миру, т.к. многими странами на этой выставке были представлены воздухоопорные (рис. 7) и воздушноносимые пневматические конструкции, крупнейшей из которых был павильон США.



Рис. 7. Fuji Film Pavilion, photo Tom Krause, “ЭКСПО-70 (Осака, Япония, 1970 г.)

Ермолов В.В., Бэрд У.У., Бубнер У. и другие крупнейшие специалисты мира, известные своими трудами в различных областях проектирования и использования пневматических строительных конструкций, в работе [1] обобщили опыт возведения сооружений из пневматических конструкций в мировой практике, привели сведения о последних разработках в области создания эффективных материалов оболочек, новых пневматических строительных конструкций и современных методов расчета за период 1945 – 1980 годы.

Развитие пневматических конструкций в СССР проходило в три этапа: начальный период (1959 – 1970 гг.); период подготовки выпуска серийных воздухоопорных пневматических сооружений (1970 – 1975 гг.) и период их серийного выпуска после 1975 г. [2]. Лаборатория пневматических конструкций ЦНИИСКА, являясь головной организацией этого направления в системе Госстроя СССР, координировала выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для нужд строительства. Решающую роль в начальном и последующих периодах развития пневматических конструкций сыграл Загорский филиал НИИ резиновой промышленности, взявший на себя разработку материалов, конструкций и технологии изготовления многих оригинальных сооружений. Проектированием, разработкой и испытаниями ряда уникальных пневматических сооружений успешно занимался ВНИИмонтажспецстрой. Одним из примеров пневмоарочных конструкций начального периода является передвижной кинотеатр на 200 мест с широким экраном, который в течение ряда лет обслуживал сельские поселения на Украине. Воздухоопорная конструкция склада сахарной свеклы в г. Яготине Киевской области построена в 1970 году. В оболочке размером 24 × 48 м в зимний период хранилось 1500 т сахарной свеклы. В 1973 г. в Магадане было смонтировано воздухоопорное сооружение, которое использовалось в качестве мастерской. Пролет оболочки 16 м, длина 60 м, высота 8 м, размер шлюза 14 × 4 × 5 м.



Рис. 8. Воздушноносимое покрытие для летнего кафе (aero-k.narod.ru)

Пролет оболочки 16 м, длина 60 м, высота 8 м, размер шлюза 14 × 4 × 5 м.

Оболочка выполнена из дублированной капроновой ткани с каучуковым покрытием.

Пневмокаркасы, пневматы и пневмолинзы, наполненные воздухом с избыточным давлением до 100 кН/м^2 , появились позже в 1980-х годах. *Пневмокаркасы* (рис. 2) и *пневматы* (рис. 7 – 9) используются в форме арок, а *пневмолинзы* (рис. 10) – в форме подушки.

Пневмоарки (пневмокаркасы и пневматы) устанавливают вплотную друг к другу (рис. 7 – 9, пневматы) или с шагом 3–4 м (рис. 2, пневмокаркасы), а для придания устойчивости связывают между собой растяжками. По верху примыкающих друг к другу арок или арок с растяжками укладывают покрытие из водонепроницаемых ткани или армированной пленки. Для обеспечения общей устойчивости пневмоарочных систем их крепят оттяжками к анкерам у торцов сооружения. Диаметр цилиндров пневмоарок от $1/55$ до $1/25$ перекрываемого пролета, а величина пролета от 12 до 18 м.



Рис. 9. Модуль воздушносомого сооружения (пневматы), ООО ТЕНТ ПЛЮС



Рис. 10. Ботанический сад «Eden project», г. Сент-Остелл, Англия, год открытия – 2001.

Пневматы и пневмолинзы изготавливаются из цельных воздухопроницаемых полотнищ. Они одновременно являются несущими и ограждающими конструкциями, так как не имеют сверху покрывающих элементов в отличие от пневмокаркасов, а пневмолинзы устраиваются в виде дисков.

Более дешевые воздухоопорные оболочки требуют непрерывной подачи воздуха и существует опасность падения всего покрытия только при одном порезе оболочки. Правда, этот недостаток исправляется внедрением двухслойных или многослойных покрытий. Эти оболочки невозможно использовать для сооружений с постоянным движением, например, для гаражей. Пневмоарочные конструкции дороже воздухоопорной оболочки, но зато отсутствует необходимость в непрерывной подаче воздуха.

Рассмотрим некоторые наиболее известные пневматические сооружения, сыгравшие важную знаковую роль в их распространении по всему миру.

Воздухоопорный павильон США на ЭКСПО-70 (рис. 11), усиленный канатами, имеет габариты $78 \text{ м} \times 138,6 \text{ м}$ на овальном плане и стрелу подъема – 7 м. Он запроектирован инженерами компании «Geiger Berger Associates». Низкая стоимость, качество проекта и используемых материалов, эстетика

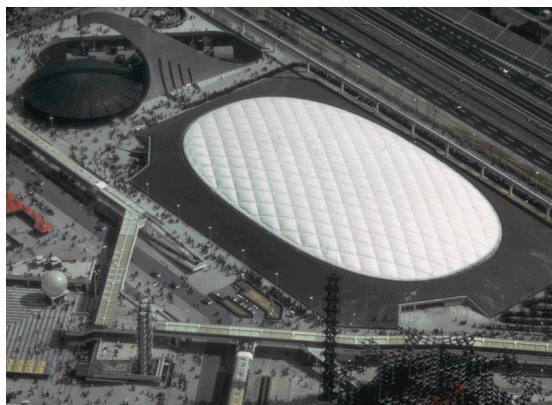


Рис. 11. Воздухоопорный павильон США на ЭКСПО-70 (Осака, Япония, 1970 г.)

всего сооружения, совпадение теоретических и экспериментальных результатов исследования привело к расширенному воспроизводству этого типа сооружений, даже для больших пролетов, например, стадион «Silverdome» в Понтиаке (Pontiac Stadium, Pontiac, Michigan, USA, 1975) с размерами в плане 220 м × 168,3 м и высотой 15,2 м [3], купол «Hubert H. Humphrey Metrodome», 1982 в Миннеаполисе (Minneapolis).

Ажурные купола ботанического сада «Eden Project» (Англия) похожи на пчелиные соты (рис. 10), каждая ячейка которых представляет собой пневмолинзу из ЭТФЭ (ETFE), современного полимерного материала, состоящего из сополимера, этилена и тетрафторэтилена. История этого материала, изобретенного компанией Dupont в 1972 г., началась с авиации и космонавтики. Как строительный материал ЭТФЭ стали воспринимать после строительства британского центра изучения экологии «Eden Project». Многослойные системы состоят из пневматических мембран-подушек, которые заключены в алюминиевые профили и поддерживаются легкой несущей конструкцией. Чтобы обеспечить должный уровень теплоизоляции и сопротивляемости, внешним нагрузкам, в пневмолинзы под низким давлением периодически поступает воздух. Эта технология идеальна для использования в районах с повышенной сейсмической активностью, а также высокими ветровыми и снеговыми нагрузками.

Одним из самых известных объектов, созданных с использованием Teflon (ETFE) является Национальный плавательный центр, рис. 12 (National Swimming Centre), проект ПТВ Аркитектс (PTW Architects) совместно с Китайской государственной корпорацией строительства и инженерии (China State Construction & Engineering Corporation). Это сооружение выглядит колоритно и очень современно именно благодаря удачно выбранному материалу. Ячейки из пластика, специально разработанного под данный проект, – это своеобразные батареи, улавливающие солнечную энергию, которая потом нагревает воду в самом бассейне. Светопронускающие стены и крыша экономят до 30% электричества на естественном освещении.



Рис. 12. Национальный плавательный центр, Пекин, Китай, 2008 год, для пекинской Олимпиады



Рис. 13. Футбольный стадион «Альянс Арена», Мюнхен, ФРГ, строительство закончено в 2005 г.

Чуть раньше с использованием ЭТФЭ (ETFE) был возведен футбольный стадион «Альянс Арена» в Мюнхене (рис. 13), чье строительство было завершено в 2005 г. Фасад из пневмолинз был запроектирован архитекторами Херцогом и Мауроном, состоит из 2760 ромбовидных подушек из ЭТФЭ на общей

площади 66 тыс. кв. м. Позади пневмолинз располагаются люминесцентные трубы, обеспечивающие красную, голубую или белую подсветку здания.

Главная заслуга в популяризации ЭТФЭ (ETFE) принадлежит немецкому инженеру-архитектору Стефану Ленерту, основавшему в 1981 г. компанию Vector Foiltec, которая в настоящее время выпускает под брэндом Texlon светопрозрачные конструкции на основе ЭТФЭ и является крупнейшим его производителем, имеет почти два десятка представительств в разных странах мира. ЭТФЭ изготавливает и его первооткрыватель – компания DuPont (марка Tefzel), японский концерн Asahi ICI (марка Aflon), компании Saint-Gobain и 3M (марка Novofol). В России ЭТФЭ выпускается под маркой «Фторопласт-40», серьезно занимается выпуском этого материала ОАО «Галоген» [4].

Как видно из вышеуказанных примеров, воздухоопорные сооружения условно подразделяются еще на два типа: *сооружения с гладкими куполами* (рис. 14) и *сооружения, усиленные сетями из стальных тросов* для устойчивости к ветру и снегу (рис. 11, 15).

Современные технологии позволяют делать пневматические воздухоопорные сооружения из прозрачного материала (рис. 16). Купол может быть как прозрачный, так и любого цвета, по желанию заказчика.

Если сравнивать пневматические сооружения 1970-1990 годов с современными, то, в основном, повышение качества этих сооружений и увеличение срока их эксплуатации произошло благодаря новым синтетическим тканям покрытия.

Что касается форм пневматических конструкций, то они, практически не претерпели изменения. Самые востребованные формы это – купола и своды, т.е. поверхности вращения и цилиндрические поверхности. В воздухоносимой конструкции базового лагеря для экспериментов (рис. 17) имеется и поверхность вращения диаметром 60 м, высотой 32,5 м и цилиндрическая поверхность радиусом 40 м. По-видимому, это самая большая воздухоносимая конструкция в мире.

Все типы рассмотренных пневматических сооружений широко применяются при строительстве объектов различного назначения. Архитекторы и конструкторы, работающие в этой области, считают,



Рис. 14. Воздухоопорное пневматическое сооружение над Мавзолеем В.И. Ленина на Красной площади, Москва, февраль 2013



Рис. 15. Воздухоопорное пневматическое сооружение компании «GRABO-PLAN» из двухслойного воздухопроницаемого материала с утеплителем и сетью металлических оцинкованных тросов



Рис. 16. Воздухоопорное пневматическое сооружение компании «GRABOPLAN» из прозрачного невоспламеняющегося материала, устойчивого к ультрафиолетовому излучению, с противогрибковым и грязеотталкивающим покрытием



Рис. 17. Базовый лагерь для экспериментов снаружи и изнутри, Индонезия

что именно их творения являются знаковыми сооружениями XXI века. В XX веке пневматические конструкции часто применялись как временные или сезонные сооружения. Но преимущества пневматических конструкций (быстрота возведения, достаточно низкая стоимость строительства, светопрозрачность) очень скоро были подвергнуты сомнениям в связи с проблемами уборки снега, потенциальных возможностях накопления воды, провисаниях покрытия и относительно высокой стоимостью эксплуатации. За период с 1974 по 1993 год на 10 крупных объектах, построенных в США, произошло 15 случаев провисания покрытий. Теперь же в связи с появлением нового материала для оболочек – стекловолоконистой ткани с покрытием из тефлона – во всем мире наблюдается возрастающий интерес к использованию их в стационарных сооружениях в качестве покрытий спортивных залов или всего стадиона (рис. 18).



Рис. 18. Воздухоопорное сооружение над футбольным полем

Очень интересное применение для воздухоопорного сооружения (ВОС) нашли в Казани (рис. 19). Площадь покрытия воздухоопорного сооружения – 3000 м², назначение: теннисные корты, заказчик: ООО «Академия тенниса им. Шамиля Тарпищева». Случай монтажа ВОС на крыше прямоугольного в плане здания встречается на практике довольно часто.



Рис. 19. Воздухоопорное сооружение на крыше спортивного комплекса г.Казань,

Непросто подобрать геометрические параметры воздухоопорного сооружения. На рис. 20 показано куполообразное сооружение «АСАТИ», где габариты выбраны оптимально: длина 45м, ширина 40м, высота 13,5м. Купол имеет простую форму, но смотрится эффектно. Сооружения «АСАТИ» доставляются к месту установки полностью готовыми для монтажа, что значительно сокращает время и трудозатраты по возведению; они выдерживают снеговые нагрузки 250 кг/м² поверхности купола. Гарантия, предоставляемая АСАТИ на современные материалы оболочек – до 20 лет.

Сторонники расширенного применения пневматических сооружений считают, что в настоящее время воздухоопорные сооружения по своим характери-

стикам приблизились к капитальным строениям, а по некоторым параметрам даже превосходили их. Правда, некоторые специалисты не так категоричны, например, Д. Кампбелл (D. Campbell), США.



Рис. 20. Иркутский район, п. Никола. Предназначение: для проведения спортивных, учебно-тренировочных и общественно-массовых мероприятий.

(Air Supported Structures) утверждают, что сейчас воздухоопорные покрытия незаменимы для спортплощадок для игры в теннис, волейбол, бейсбол, гольф, для покрытий бассейнов, гимнастических залов (рис. 21). По-видимому, они правы в перечислении сфер применения рассматриваемых пневмоконструкций на ближайшее будущее.

В настоящее время имеется очень много фирм и компаний, предлагающих на рынке пневматические конструкции различных модификаций, разных форм (рис. 22) и различного назначения. Ещё не упоминались, но имеются на рынке пневмокаркасные резервуары открытого типа, пневмоангары (рис. 23), которые можно эксплуатировать в любой климатической зоне в интервале температур $-65^{\circ} < t < 70^{\circ}$, мягкие резервуары, надувные палатки-бани (ПневмоСибирь, Новосибирск), аттракционы на воде, многоэтажные воздухоопорные здания [6].

Некоторые к пневматическим конструкциям относят также *комбинированные пневматические конструкции*, которые состоят из воздуонесомых и воздухоопорных фрагментов. К этой группе относят и *смешанные пневмоконструкции*, основным несущим элементом которых является жесткий каркас из дерева, алюминия, стали или каркас малой изгибной жесткости из канатов или оттяжек. По каркасу укладывают мягкую оболочку, под которой создается избыточное давление.



Рис. 22. Пневмоконструкции компании «ПневмоСтрой-СПб»

На разработке пневматических конструкций сконцентрировали усилия некоторые сторонники продуктивизма, рис. 7. Они считают пневмоконструкции, вантовые и тентовые конструкции архитектурой высоких технологий [5]. С точки зрения *продуктивизма* архитектурным произведением считается только элегантная инженерия – продукт промышленного дизайна. Идеи продуктивизма сформулированы К. Фремптоном.

Специалисты компании YEADON



Рис. 21. Купол спортивного воздухоопорного сооружения $183\text{ м} \times 66,8\text{ м} \times 18\text{ м}$, Ecole Louis Riel Ottawa, Ontario



Рис. 23. Пневмокаркас ангара, Производственная компания «АЗАРТ»

Что касается проектирования пневмоконструкций, то здесь необходимо решить следующие основные задачи:

1. Задать форму поверхности и описать метод ее получения при равномерном натяжении внутренним давлением.
2. Раскрой в соответствии с требуемой формой.
3. Статический расчет на снеговую нагрузку, ветер и внутреннее давление методом конечных элементов в геометрически нелинейной постановке.
4. Динамический расчет на базе метода конечных элементов для определения основных характеристик колебаний конструкции.

Сейчас около ста тысяч пневмосооружений и конструкций смонтированы на всех континентах мира, их изготавливают во всех технически развитых странах. История формообразования пневмосооружений и совершенствования строительных технологий возведения безмоментных пневматических сооружений позволит обобщить накопленный десятилетиями опыт и выдать принципиально новое решение. В противном случае, архитекторы и инженеры будут вынуждены повторять уже достигнутое в строительстве и архитектуре [7].

Л и т е р а т у р а

1. Ермолов В.В., Бэрд У.У., Бубнер У. и др. Пневматические строительные конструкции. – Под ред. В.В. Ермолова. - М.: Стройиздат, 1983. - 439 с., ил.
2. Вознесенский С. Б., Ермолов В. В. Проектирование пневматических конструкций в СССР и за рубежом. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1975.
3. Geiger David. Low-profile air structures in the USA// Building Research and Practice. – 1975. – March-April. – P. 80-87.
4. ЭТФЭ – новое слово в архитектуре// www.playground.ru (2014).
5. Грек Ев. Пневматические конструкции и продуктивизм в архитектурном дизайне// vselim.com, 2014.
6. Jens G. Pohl. Multi-Story Air-Supported and Fluid-Inflated Building Structures – Revised Edition: Concept, Design Principles, and Prototypes. – California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California: 2014. – 406 p.
7. Кривошапко С.Н., Галишникова В.В. Архитектурно-строительные конструкции: Учебник. – М.: Изд-во «ЮРАЙТ», 2015. – 476 с.

References

1. Ermolov, V.V., Bird, W.W., Bubner, W. (1983). *Pneumatic Building Structures*. Moscow: Stroyizdat, 439 p.
2. Vozsenskiy, S.B., Ermolov, V.V. (1975). *Design of Pneumatic Structures in the USSR and Abroad*. Moscow: TzINIS Gosstroya USSR.
3. Geiger, David (1975). Low-profile air structures in the USA. *Building Research and Practice*, March-April, p. 80-87.
4. ETFE is a new view in architecture (2014), www.playground.ru.
5. Grek Ev. (2014). Pneumatic structures and productivizm in architectural design, vselim.com.
6. Jens G. Pohl (2014). *Multi-Story Air-Supported and Fluid-Inflated Building Structures: Revised Edition: Concept, Design Principles, and Prototypes*, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, 406 p.
7. Krivoshapko, S.N., Galishnikova, V.V. (2015). *Architectural-and-Building Structures: Text Book*, Moscow: Izd-vo “URAIT”, 476 p.

PNEUMATIC STRUCTURES AND BUILDINGS

S.N. KRIVOSHAPKO

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

Brief information on the state of affairs in the area of design, application, and classification of pneumatic buildings with maximum attraction of illustrative materials is the aim of the paper. Examples of air-supported and air-bearing coverings are presented. Both the first pneumatic structures of the 40th years of the XX century and the structures of different modifications, forms, and diverse purposes presented in the XXI century are given.

KEYWORDS: pneumatic structure, air-supported covering, air-bearing building, pneumoframe, pneumomat, pneumolens, ETFE.