

**ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ
КОНСТРУКЦИИ
ВОЗДУХООПОРНОГО
ТИПА**

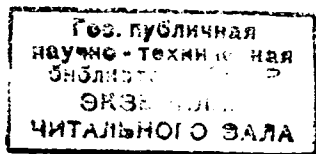


ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУХООПОРНОГО ТИПА

Под редакцией
д-ра техн. наук, проф. В. В. ЕРМОЛОВА



Москва
СТРОЙИЗДАТ
1973



73-18719

Авторы: В. В. ЕРМОЛОВ, А. С. ВОБЛЫЙ, А. И. МАНЬШАВИН, М. И. ПЕТРОВНИН, Ю. И. ХРУЩЕВ

Пневматические конструкции воздухоопорного типа. М., Стройиздат, 1973. 288 с. На обороте тит. л. авт.: В. В. Ермолов, А. С. Воблый, А. И. Маньшавин [и др.]

В книге излагаются вопросы проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации пневматических сооружений (сокращенно ПС) воздухоопорного типа. Кроме детального рассмотрения основной части ПС — мягкой оболочки с тентами шлюзов, воздуховодами, основ их конструирования и расчета — уделяется внимание жестким конструкциям сооружения — шлюзам, анкерам и др., входящим в состав комплекта ПС. Рассматриваются такие важнейшие элементы оборудования, обеспечивающие функционирование ПС и температурно-влажностный режим под оболочкой, как вентиляторные и отопительные установки с системами автоматического регулирования. Приводятся рекомендации по эксплуатации ПС и данные по их экономике.

Книга предназначена для инженеров, архитекторов, научных работников, преподавателей вузов и студентов.

Табл. 45, рис. 368, список лит.: 140 назв.

Не так давно пневматические сооружения считались новинкой, неизбежно сопровождавшейся в популярной печати сенсационными заголовками. Сейчас трудно встретить инженера, незнакомого с этими конструкциями хотя бы по литературным данным, а многие видели их и в натуре.

Идея пневматического сооружения (ПС) настолько проста, что на первый взгляд кажется удивительным столь позднее обращение к ней. Однако ничего удивительного в этом нет. ПС — своевременный и современный продукт высокой техники второй половины XX века. Несмотря на простоту конструкции, массовое изготовление ПС стало возможным не раньше, чем синтетические волокна и смолы стали массовой продукцией химии полимеров. Надо было освоить промышленный выпуск пленочных материалов, обладающих несовместимыми ранее качествами: высоким сопротивлением разрыву и истиранию, легкостью, долговечностью, воздухо- и водонепроницаемостью, свето- и радиопрозрачностью, негорючестью, дешевизной. Только в наши дни эта задача оказалась по плечу химической промышленности, и сейчас мы являемся свидетелями появления нового полноправного вида строительных конструкций.

Директивами XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства предусматривается строительство резинового комбината в Ангрене (Узбекская ССР), в состав которого войдет завод пневматических конструкций. В текущей пятилетке резко возрастет выпуск исходных материалов для пневматических оболочек: синтетических смол в 2, каучуков в 1,7 раза.

ПС полностью отвечают современной тенденции строительной техники — максимальному облегчению конструкций, созданию «бестяжестной» архитектуры, характерной для эпохи технического прогресса наших дней. ПС — легчайшие конструкции из всех созданных человеком за всю его историю. Отдельные специалисты-энтузиасты рассматривают ПС как пример самого выдающегося применения сжатого воздуха со времени изобретения пневматической шины и предсказывают им такое же влияние на строительство, какое шины оказали на колесный транспорт.

Действительно, область применения пневматических конструкций, особенно в нашей стране, чрезвычайно широка. Рас-

сматривая только строительные аспекты, можно назвать как временные, так и постоянные здания: цехи и склады промышленности; хранилища продуктов сельского хозяйства, кормов, удобрений, воды, горючего; зрелищные, культурно-просветительные, торговые, медицинские, спортивные и другие помещения; строительные тепляки, оранжереи и теплицы для овощей. Появляются проекты перекрытий поселков, городов и районов, поселений на иных планетах и на морском дне.

В этой обстановке очень важно избежать крайностей в оценке новых конструкций. С одной стороны, не увлечься «проектами», основанными на не совсем правильном убеждении, что пневмооболочками можно перекрыть любые пролеты и превратить Арктику и Сахару в райские сады. С другой стороны, печальный опыт эксплуатации ПС некоторыми незадачливыми хозяйственниками (авторы с этим уже столкнулись), уровень технической культуры которых не соответствует уровню техники, породившей эти сооружения, может внести ноты разочарования и даже дискредитировать эти прогрессивные конструкции.

В предлагаемой книге делается попытка всесторонне рассмотреть проблемы пневматических строительных конструкций применительно к их основной разновидности — сооружениям воздухоопорного типа.

В основу книги положен опыт авторов по разработке и испытанию конструкций ПС, а также их эксплуатации.

Проблема ПС — комплексная, распадающаяся на ряд частных задач, порой не менее сложных, чем задачи, связанные с основным элементом ПС — мягкой оболочкой. Поэтому в книге уделяется должное внимание системам обеспечения функционирования ПС — вентиляторным и отопительным установкам, жестким конструкциям — каркасам шлюзов, воротам, анкерам. Излагается методика расчетов — статического, теплотехнического, воздухооборудования.

Введение, главы 1 и 4 написаны д-ром техн. наук, проф. В. В. Ермоловым; глава 2 — канд. техн. наук М. И. Петровным; главы 3 и 6 — инж. А. С. Воблым; глава 5 — инж. А. И. Маньшавиным и В. В. Ермоловым совместно; глава 7 — канд. техн. наук Ю. И. Хрущевым.

Графический иллюстративный материал выполнен А. Н. Зуевой и А. И. Маньшавиным. Фотографии любезно предоставлены В. Б. Муравьевым (1.1, б), З. Л. Майлером (1.4, а), Б. И. Сергеевым (1.6, а), В. П. Шпаковым (1.12, а, 1.13, в, 1.16, а), С. Б. Ермоловым (1.12, б), А. С. Белозеровой (1.39, а, б).

Авторы выражают свою признательность д-ру техн. наук, проф. С. А. Алексееву и канд. техн. наук С. Б. Вознесенскому за ряд ценных советов, учтенных при доработке рукописи.

Пневматическими конструкциями называются мягкие оболочки, предварительное напряжение которых, обеспечивающее их противодействие внешним нагрузкам, достигается благодаря нагнетаемому в них воздуху.

Оболочки делают главным образом из мягких материалов — материй с воздухонепроницаемым полимерным покрытием или из синтетических армированных пленок — и нагнетают воздухом. Отсюда и термин «пневматические» (с греческого *πνευματικός* — воздушный). Однако не исключается применение в качестве оболочек жестких материалов — армированных пластиков, листового металла, а воздух может быть заменен газом, жидкостью или даже сыпучим телом.

В книге рассматриваются собственно пневматические конструкции, т. е. напругаемые воздухом. Однако ряд выводов и рекомендаций, относящихся к конструктивным решениям или методам расчета, полностью сохраняется и при использовании иной напрягающей среды или иных материалов оболочки, например тонколистового металла.

Свойство воздуха, заключенного в мягкую способную сопротивляться только растяжению оболочку, противостоять действию внешних нагрузок приводит конструкторскую мысль к очень разнообразным и интересным техническим решениям. Можно смело утверждать, что осталось очень мало областей техники, где бы ни применялись в тех или иных масштабах пневматические конструкции.

Плавсредства пневматической конструкции теперь не ограничиваются такой традиционной номенклатурой, как спасательные жилеты, плоты, лодки. Появились довольно крупные суда (в том числе и на воздушной подушке) с надувным корпусом. Достаточно упомянуть судно неутомимого исследователя подводного мира Ж.-И. Кусто «Амфитрит», корпус которого размером 20×8 м сделан из прорезиненной нейлоновой ткани. Оно развивает скорость до 30 узлов (рис. 1.1, а). По морям и рекам буксируют мягкие емкости, наполненные горючим. Их объем может составлять несколько тысяч тонн. В морских глубинах ставят пневматические «палатки», давление воздуха в которых уравнивает гидростатическое давление. В них живут и работают люди. Группа советских акванавтов во главе с А. Б. Королевым находилась в подводном доме «Спрут»

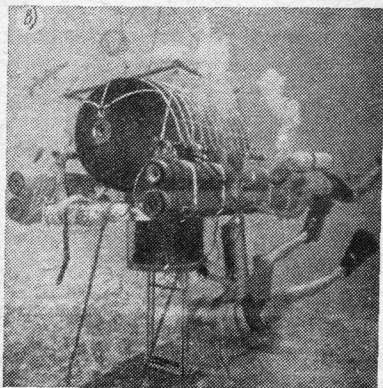
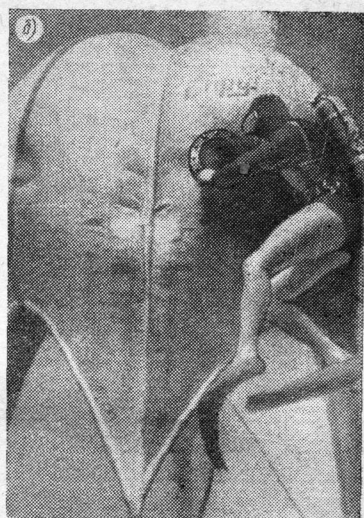
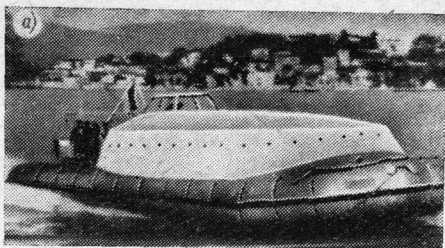


Рис. 1.1. Плавающие и подводные пневматические конструкции

а — «Амфитрит» капитана Кусто — самое большое в мире надувное судно;
б — «Спрут» — советский подводный пневматический дом;
в — пневматический дом американских акванавтов на дне океана;
г — подводное жилище паука-серебрянки

(рис. 1.1, б) 14 суток [7]. Рекорд глубины погружения пневматического подводного дома принадлежит американцам Р. Стеню и И. Линдбергу [27], прожившим в нем на глубине 132 м двое суток (рис. 1.1, в).

Воздушные шары, аэростаты, стратостаты мягкие и полужесткие дирижабли — это еще не вся техника завоевания воздуха, куда проникли пневматические конструкции. Уже испытано в воздухе несколько самолетов разных типов, в которых все (кроме мотора) надувное (рис. 1.2, а). Крыло, фюзеляж, оперение выпол-

нены из особой прорезиненной материи и непрерывно поддуваются сжатым воздухом от компрессора, соединенного с мотором. Такому самолету не страшны утечки воздуха даже через пулевые пробоины. Существуют буксируемые самолетом грузовые планеры-змеи с пневматическими несущими балками (рис. 1.2, б).

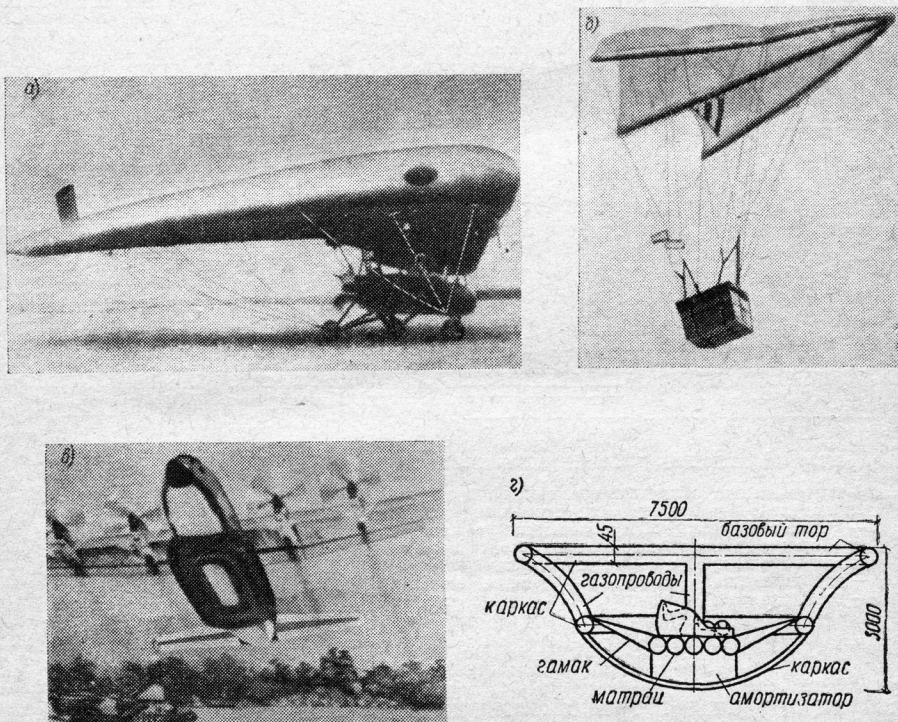


Рис. 1.2. Летящие пневматические конструкции

а — надувной самолет типа «летающее крыло»; б — грузовой планер-змея с тремя пневмобалками; в — самолет с пневматической посадочной подушкой; г — средство возвращения космонавтов на Землю — надувной «волан»

Механический безрельсовый транспорт всего мира пользуется пневматическими колесами. В последние годы начинают проектироваться пневматическими не только колеса, но и весь комплекс посадочных органов самолета. Многотонные воздушные корабли снабжаются вместо колесного шасси пневматическими посадочными подушками, в чем усматривается путь решения проблемы полетов с летных полей без искусственных покрытий (рис. 1.2, в).

По геоцентрическим орбитам вращаются надувные спутники связи [30]. Разработан проект возвращения человека из от-

крытого космоса с помощью гигантского «волана» (рис. 1.2, з) надувной конструкции. После гашения космической скорости он безопасно приземляется или приводняется, сначала падая, а затем, после входа в атмосферу, парашютируя [31].

Пневматические жилища, очевидно, наиболее рациональны для устройства станций в космосе или на Луне. Обладая минимальными весом и транспортным объемом, они в условиях вакуума будут всегда напряжены внутренним давлением дыхательной смеси для космонавтов.

Перечень возможных направлений в применении пневматических конструкций можно было бы продолжить. Однако в соответствии с тематической направленностью книги перечислим лишь строительные аспекты использования пневматических конструкций: подъемники, опалубка, плотины, здания.

Пневматические подъемники эффективно используются при монтаже строительных конструкций, особенно про-

странственных. В последние годы в СССР и за рубежом появился ряд проектов сборных складчатых сводов из треугольных панелей, поверхность которых разворачивается в плоскость. Если соединить все панели свода прямо на предварительно разложенном на земле мешке из воздухопроницаемой материи, а затем, подав в мешок воздух, поднять всю систему панелей, свод сформируется сам собой (рис. 1.3, а). При сборке стандартных панельных домиков в США и во Франции с успехом используются надувные баллоны, которые при собственном весе 36 кгс поднимают панели весом около тонны, заменяя собой монтажный кран или труд 16 рабочих.

Особенно эффективен пневматический подъемник при монтаже металлических куполов из сравнительно небольших элементов, которые присоединяют к нижней кромке постепенно поднимаемой конструкции [29], причем монтажные работы ведутся только с уровня земли. Пневмооболочку приклеивают к потолку центральной части купола в виде огромного занавеса (рис. 1.3, б). При потравливании удерживающих канатов

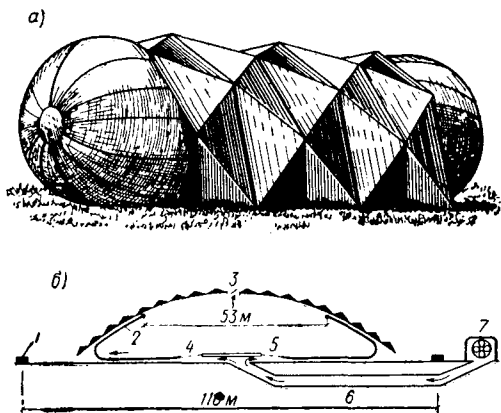


Рис. 1.3. Пневматические подъемники

а — для монтажа складчатых сводов из треугольных панелей; б — для монтажа стального купола: 1 — кольцевой бетонный фундамент; 2 — занавес (стрелка показывает направление его движения при подъеме купола); 3 — стравливающий клапан; 4 — удерживающий канат; 5 — опорное кольцо; 6 — воздуховодный тоннель; 7 — вентиляционная установка

купол поднимается и монтажники получают возможность подсоединить очередной ряд панелей. Другой вариант пневмоподъемника для монтажа металлических сборных куполов может состоять из двух баллонов, поставленных один на другой и наполняемых воздухом по мере подсоединения панелей.

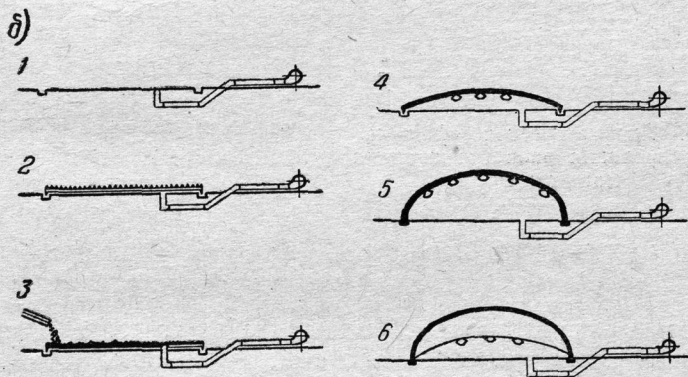
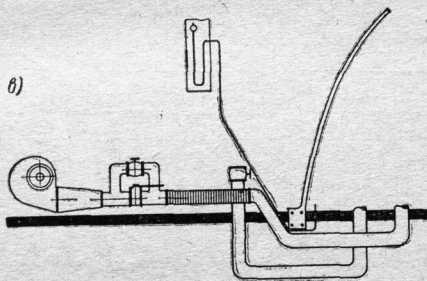
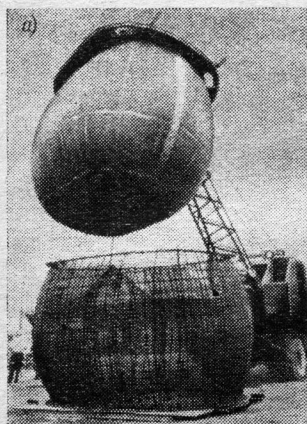


Рис. 1.4. Пневматическая опалубка

а — железобетонных конструкций двоякой кривизны; *б* — последовательность бетонирования куполов по способу Д. Бини; *в* — деталь к схеме *б*; *1* — подготовка основания и подключение воздухопроводов; *2* — укладка резиновой мембраны и спиральной арматуры; *3* — укладка бетонной смеси; *4* — подъем системы «мембрана — арматура — бетонная смесь» сжатым воздухом; *5* — выдерживание бетонной смеси до набора прочности; *6* — отрыв мембраны от бетона вакуумным способом

Несущая способность сжатого воздуха, заключенного в мягкую, но прочную оболочку, позволяет использовать пневматические баллоны в качестве опалубки тонкостенных пространственных строительных конструкций. Пневматическая опалубка для бетонирования железобетонных сводов, предложенная

советским инженером А. Э. Лопатто в 1950 г., представляет собой плоский конверт, закрепленный по периметру бетонируемого свода [2]. После подачи воздуха конверт превращается в подушку, на поверхность которой сперва наносят торкрет-корку в 2—3 см, а затем выполняется вся остальная толщина свода. Аналогичная система применялась ранее Уоллесом Нэффом [17], применяется и теперь в ряде стран (США, Чехословакия, Португалия).

В СССР для бетонирования сборных железобетонных конструкций двойкой кривизны используют пневматическую опалубку (рис. 1.4, а), разработанную З. Л. Майлером и Е. А. Васильевым [8] в виде баллона из листовой резины.

Предварительно устанавливают арматурный каркас, обтянутый тканой сеткой. Затем баллон, введенный внутрь каркаса, по мере наполнения воздухом (0,08—0,1 атм) прижимается к каркасу. Бетонную смесь наносят способом пневмобетонирования.

Итальянским архитектором Д. Бини [28] запатентован оригинальный способ бетонирования куполов. Опалубка в виде неопреновой мембраны и спиральная арматура купола могут сильно растягиваться. Это дает возможность укладывать бетон-

Рис. 1.5. Пневматическая «фашина» для форсирования рвов гусеничными машинами

а — «фашина» надутая до 0,0175 атм;
б — форсирование рва бронетранспортером (рисунки с кинокадров по П. Балсону)

ную смесь на горизонтальной площадке, а затем всю систему «мембрана—арматура—бетонная смесь» при помощи нагнетаемого под нее воздуха поднимать до проектной отметки, образуя купол. Такое положение системы сохраняется до окончания схватывания бетонной смеси. Выполняется это все в порядке, показанном на схеме рис. 1.4, б, в.

На первый взгляд кажется невероятным, что по надувным баллонам могут проходить бронетранспортеры. Однако в Англии уже испытаны баллоны диаметром 3 м и длиной 8 м, изготовленные из высокопрочной нейлоновой ткани. Сброшенный в ров глубиной 1,5 м и шириной 4,5 м баллон давал возможность гусеничной машине форсировать этот ров, что показано на рис. 1.5, выполненном по одному из кадров фильма. В сложном виде баллон имеет размер 1,1×0,6×0,3 м, что при весе 47 кгс позволяет перевозить его в багажнике транспортера.

Мягкие баллоны, наполненные воздухом или водой (или и тем и другим в определенных пропорциях), неоднократно использовались в качестве плотин. Обычная плотина, даже малой высоты, представляет собой дорогое капитальное сооружение, которое возводится в продолжительные сроки. Ту же роль может сыграть пневматический баллон, устанавливаемый за несколько часов. Сейчас достигнута высота плотины 3 м; она

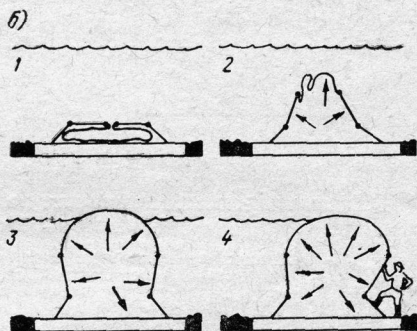
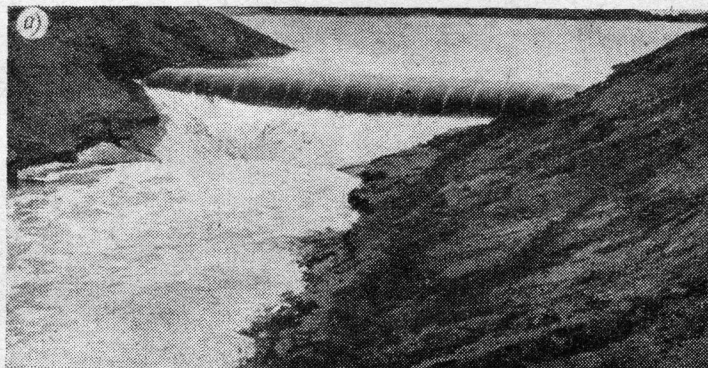


Рис. 1.6. Пневматические плотины и затворы

а — общий вид плотины на р. Белой (Ростовская обл.);
б — механизм действия гидротехнического затвора (Голландия)

может быть доведена до 4,5—6 м. Надувные и наливные плотины позволяют легко регулировать сток воды: их высота переменна и зависит от давления напрягающей среды — воздуха или воды (рис. 1.6).

Следует указать на ряд возможностей использования пневматических элементов при испытаниях строительных конструкций. Пустой баллон помещается между испытуемой моделью и опорной поверхностью и после подачи воздуха создает требу-

емое давление. Такой метод особенно эффективен там, где требуется имитировать нагрузку, распределенную по сложной поверхности, которую обычно имеют современные пространственные конструкции. Надувной баллон позволяет обеспечить равномерное, одновременное и непрерывно растущее давление по всей загружаемой площади испытываемой конструкции.

Скроенные соответствующим образом баллоны, будучи наполнены воздухом, сами по себе являются испытательным приспособлением для исследования двухосного напряженного со-

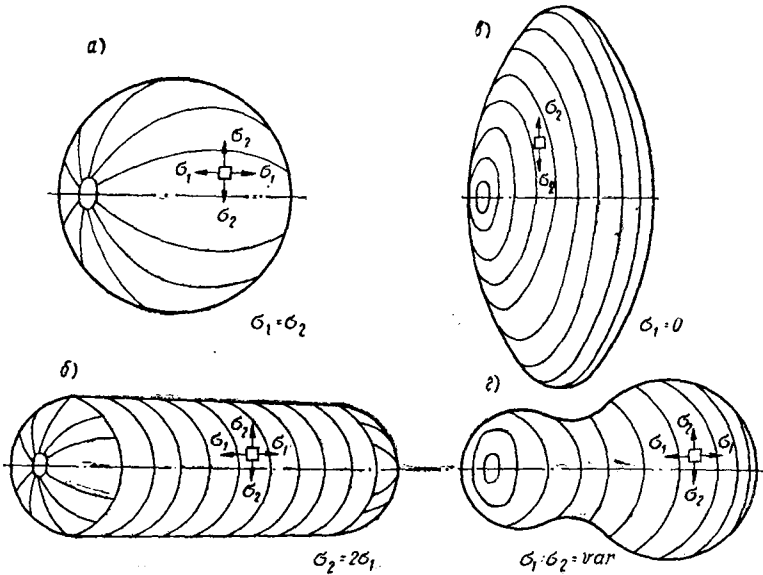


Рис. 1.7. Пневматические баллоны для долговременных испытаний материалов пневмооболочек

а — сфера; б — цилиндр; в — тело вращения специальной формы; г — тело вращения со сложной образующей

стояния материала оболочек при долгосрочных испытаниях в условиях открытой экспозиции [18]. Соотношение напряжений по направлениям главных кривизн оболочек может варьироваться в зависимости от придаваемой им при раскрое формы (рис. 1.7). Оболочка пневматического сооружения сама может служить датчиком для измерения интенсивности ветрового давления на ее поверхность. Описанный в главе 7 способ пересчета измеренных деформаций цилиндрической оболочки в ординаты эпюры ветрового давления может быть распространен и на другие, более сложные формы пневматических строительных конструкций.

Однако наиболее важным направлением использования пневматических конструкций для целей строительства остаются наполненные пневматические сооружения — большепролетные, наполненные воздухом оболочки, в которых могут находиться и работать люди; в них можно располагать технологическое оборудование цехов и мастерских, хранить сырье и изделия промышленности, продукты сельского хозяйства. Этот вид пневматических строительных конструкций, точнее их наиболее распространенная разновидность — ПС воздухоопорного типа, и являются основным предметом рассмотрения в книге.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ — НОВЫЙ ВИД СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Идея пневматических конструкций, как и многие другие, подсказана человеку природой, давно создавшей ряд их прототипов — биологических форм. Рыбий пузырь, вероятно, еще в древности навел на мысль об использовании бычьих пузырей, а затем бурдюков в качестве плавсредств (рис. 1.8), которые впоследствии превратились в надувные плоты, лодки и даже корабли.

От плавания по воде недалеко до воздухоплавания. Сохранилась запись: «1731 года в Резане при воеводе подъячий Крякутной фурвин зделал как мяч большой надул дымом поганым и вонючим, от него зделал печку сел в нее и нечистая сила подняла его выше березы...» И «мяч большой» Крякутного, и воздушные шары братьев Монгольфье, начавшие в 1783 г. эру практического воздухоплавания, были, по существу, пневматическими конструкциями и полностью подходят под их определение.

Дождевые пузыри на воде, мыльные пленки, очевидно, не раз ассоциировались с большими искусственными пузырями, под сводами которых можно было бы жить, работать. Удивительна аналогия между подводным жилищем паука-серебрянки (см. рис. 1.1, г) и подводными домиками акванавтов (см. рис. 1.1, б и в). Паук использует в качестве оболочки пленку поверхностного натяжения и наполняет ее пузырьками воздуха, которые заносит с поверхности воды в своих мохнатых лапках. Люди делают из прорезиненной материи мешки и накачивают в них воздух компрессорами.

История пневматических строительных конструкций еще очень коротка.

Все без исключения зарубежные и отечественные литературные источники единогласно считают изобретателем ПС английского инженера Фредерика У. Ланчестера [19], который запатентовал конструкцию воздухоопорного купола в 1917 г. (рис. 1.9, а). И только известный немецкий специалист в области легких конструкций проф. Фрей Отто, подтверждая приори-

тет Ланчестера в этой конструкции, отметил, однако: «... по всей вероятности ей предшествовали еще более ранние, но неизвестные проекты» [9]. Как мы увидим далее, он был прав.

Обычно вслед за Ф. Ланчестером упоминается американец Герберт Г. Стивенс, который в 1942 г. разработал проект перекрытия промышленного здания в виде воздухоопорной оболочки диаметром 365 м (рис. 1.9, б) из листовой (1,27 мм) стали.

Не случайно оба проекта совпадали по времени с годами первой и второй мировых войн. Первый предлагался как полевой госпиталь, второй — как авиационный завод.

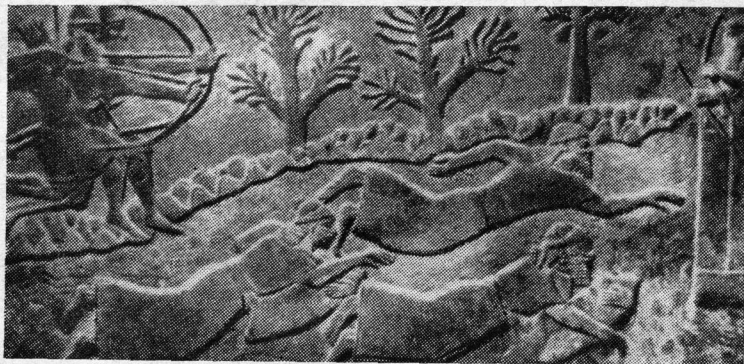
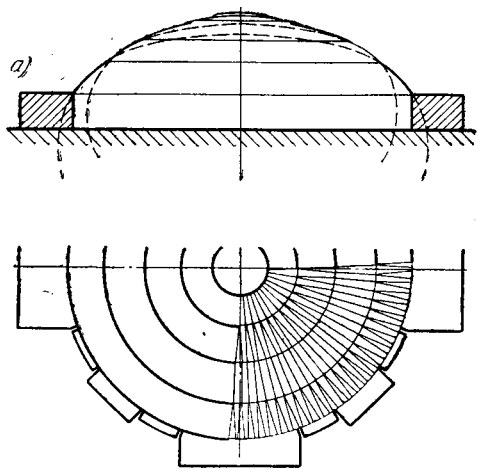


Рис. 1.8. Войны Ашшурнацирапала II (Ассирия, VIII в. до н. э.) переплывают реку на бурдюках, наполненных воздухом

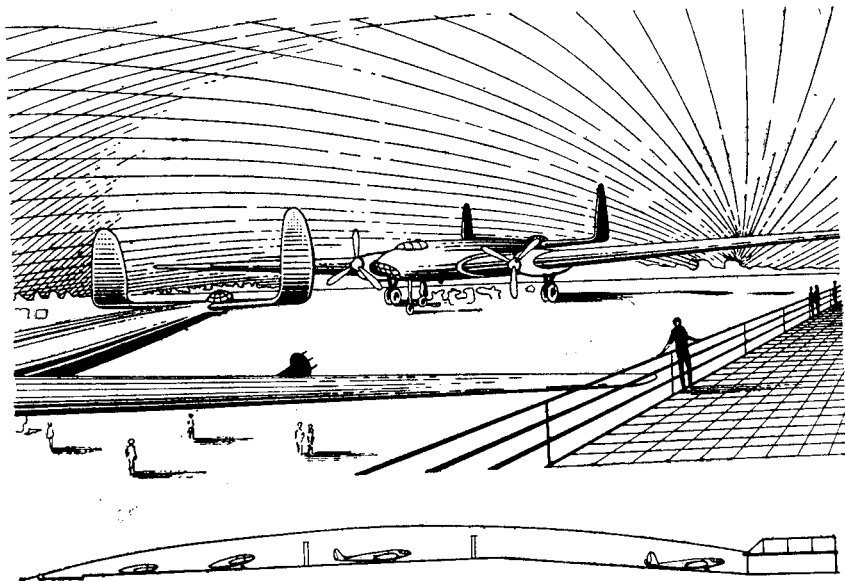
Между именами Ланчестера и Стивенса следует справедливо поставить имя проф. Г. И. Покровского, неоднократно выступавшего в печати с предложениями, относящимися к «аэростатической архитектуре» (рис. 1.9, в, г). Статьей Покровского, написанной в 1936 г. [11], открывается серия публикаций с оригинальными предложениями.

Однако ни Ланчестеру, ни Покровскому, ни Стивенсу не удалось воплотить свои идеи в натуре. Только в 1946 г. американскому авиационному инженеру Уолтеру У. Бэрд [12] посчастливилось наполнить воздухом первое в мире реальное пневматическое сооружение (купол укрытия радиолокационной антенны), взобраться на нее и сфотографироваться, как на покоренной вершине (рис. 1.10). Фотография эта считается исторической и обошла страницы многих книг и журналов. У. Бэрд организовал фирму «Бэрдэр» и уже через год изготовил около 100 пневмосооружений. В настоящее время ПС производят десятки предприятий во многих странах.

И все же не Ланчестеру принадлежит пальма первенства. Оказалось, что корни истории пневматических сооружений ухо-



b)



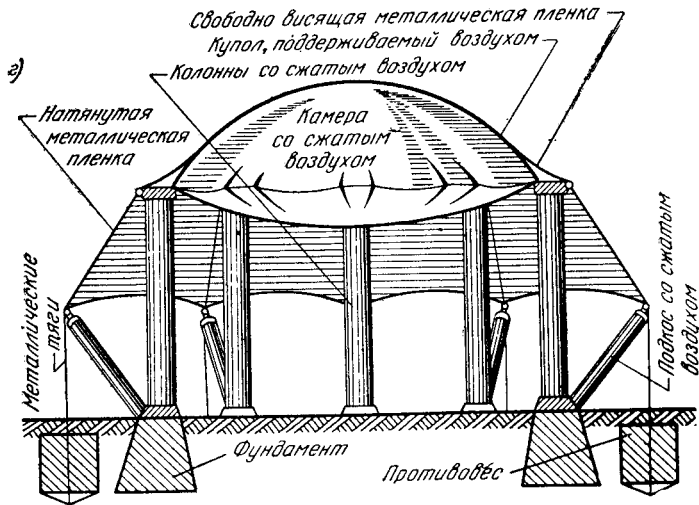
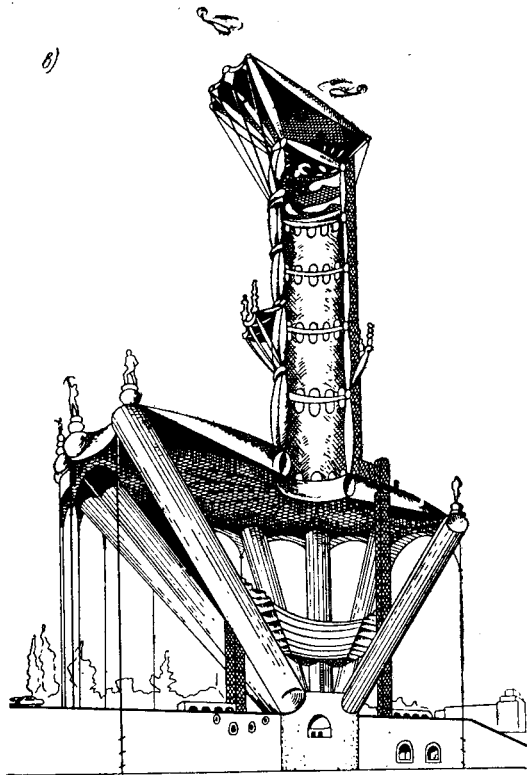


Рис. 1.9. Проекты пионеров пневматической архитектуры

а — госпиталь Ф. У. Ланчестера; б — цех авиационного завода Г. Г. Стивенса; в, г — Дворец спорта Г. И. Покровского

дят в прошлый век. В «Журнале новейших изобретений и открытий» за 1896 г. [4] говорится: «Выдающийся интерес представляют аэробалки, изобретенные г. Сумовским. Сущность нового изобретения сводится к следующему: непроницаемые мешки длиной до двух и более сажен различного диаметра наполняются при помощи воздушного насоса воздухом. Из

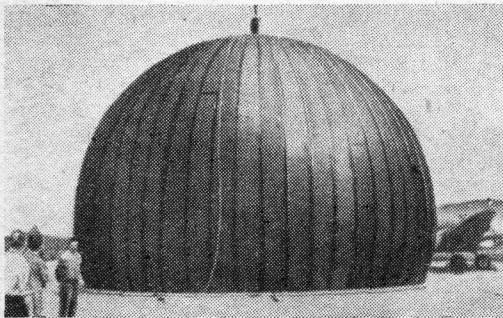


Рис. 1.10. У. У. Бэрд на вершине первого пневматического купола

этих мешков можно строить легко и быстро громадные постройки... Оригинальная идея г. Сумовского проверена практически, и Министерство путей сообщения уже ассигновало необходимую сумму для производства дальнейших опытов с его изобретением». Пока неизвестно, как использовал Сумовский эти ассигнования. Однако нам удалось обнаружить в патентных архивах сведения о том, что он получил на свое изобретение американский патент № 511472 еще в декабре 1893 г.

Несмотря на столь ранние проектные начинания, практическая реализация идеи пневматических сооружений в нашей стране началась с некоторым запозданием. Первое сооружение — сферический купол диаметром 36 м — было создано в 1959 г. сотрудниками НИИ резиновой промышленности (А. С. Миловидов, Л. М. Коганов) и других организаций (Е. А. Лукашев, О. Ф. Кондратьев, Ю. Н. Крепких). Второе — конический купол диаметром 22 и высотой 9 м — сотрудниками ЦНИИ строительных конструкций (А. Б. Губенко, Г. Н. Зубарев, М. И. Петровнин) и других организаций (К. Д. Годунов, В. Г. Ильинский, А. Б. Кулаковский). Третье — полуцилиндрический свод со сферическими торцами и автоматической системой регулирования поддува воздуха (авторы проекта и изготовители В. В. Ермолов, А. С. Воблый, Ю. И. Хрущев, В. Г. Кулешова, Е. И. Пивоваров) — было смонтировано в 1960 г., а в 1961 г. экспонировалось на ВДНХ, где этому сооружению была присуждена большая серебряная медаль. Оно стало первым в стране пневматическим сооружением, доступным для обозрения многим тысячам посетителей выставки (рис. 1.11, а). Этим же коллективом одновременно было изготовлено и испытано ПС на прямоугольном плане с мягким шлюзом (рис. 1.11, б).

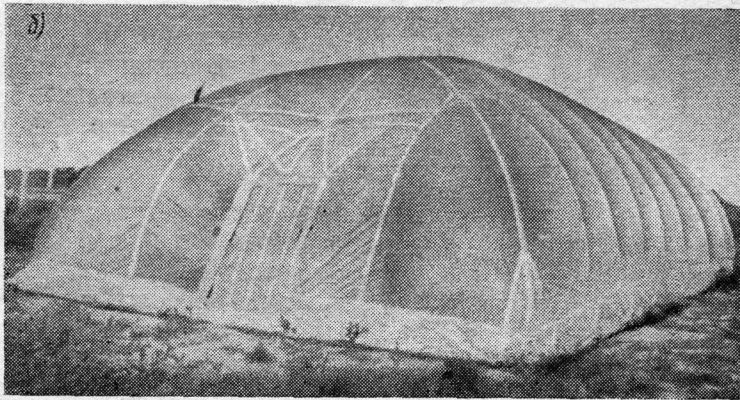
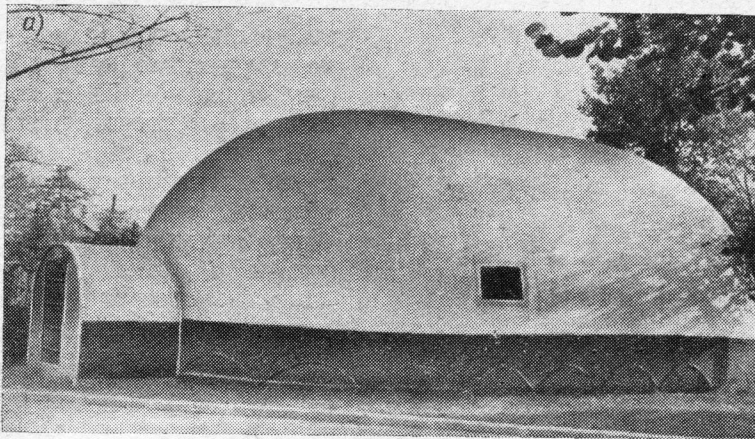


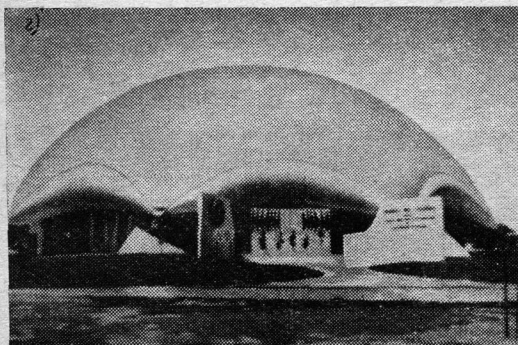
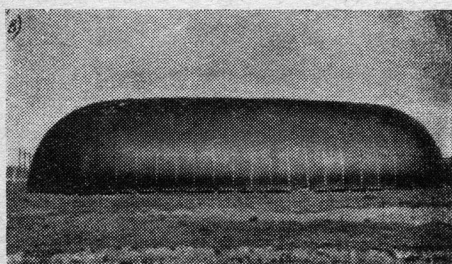
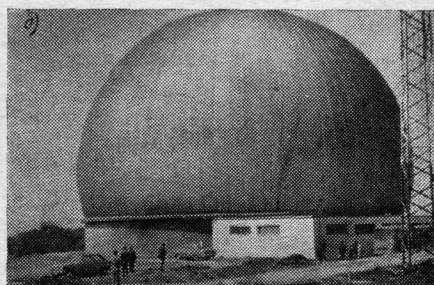
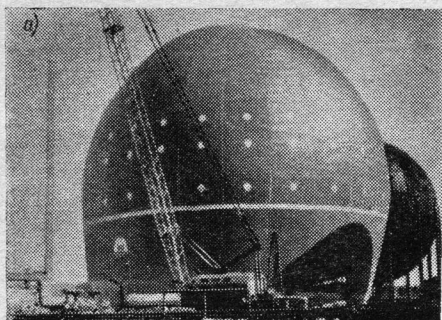
Рис. 1.11. Ранние отечественные ПС

а — из прорезиненной материи (экспонат ВДНХ-61); *б* — из полиэтиленовой пленки (экспериментальное)

После 1961—1962 гг. примеры применения ПС в отечественной строительной практике непрерывно множатся, чему в значительной мере способствует деятельность НИИ резиновой промышленности (В. М. Прокофьев, В. П. Шпаков), ЦНИИ строительных конструкций (С. Б. Вознесенский, А. С. Белозерова, В. А. Мешкуров) и ряд других организаций.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ

Различают два основных типа ПС — воздухоопорные и воздухоносимые (см. приложение I). К воздухоопорным относятся мягкие оболочки, выполняющие функции ограждающих конструкций, как бы опираясь на находящийся под ними воздух, сжа-



тый в очень небольшой степени, достаточной только для того, чтобы противостоять непосредственному действию распределенных внешних нагрузок без существенного изменения формы. Как правило, эксплуатируемый объем воздухоопорных сооружений находится под избыточным давлением, небольшая величина которого, измеряемая тысячными долями атмосферы, не препятствует нахождению в нем людей. Исключение — пневматические линзы, которые представляют собой не столько цельное сооружение, сколько часть его — перекрытие.

Воздухоопорные ПС (рис. 1.12 и 1.13) по конструкции оболочки могут быть подразделены на однослойные, двухслойные и оболочки, в состав которых входят элементы «мягкого каркаса» (канаты, оттяжки, диафрагмы). В двухслойных воздухоопорных ПС обе оболочки могут быть не связаны между собой. Их устойчивость обеспечивается благодаря разности давления воздуха для каждой оболочки. Эта

Рис. 1.12. Воздухоопорные оболочки в виде поверхностей вращения

a — сферическая диаметром 26 м (СССР); *б* — сферическая диаметром 39 м (ФРГ); *в* — цилиндрическая пролетом 12 м (Англия); *г* — линзовидная (США)

величина для внешней оболочки, испытывающей действие внешних нагру-

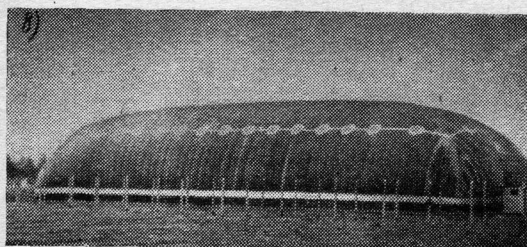
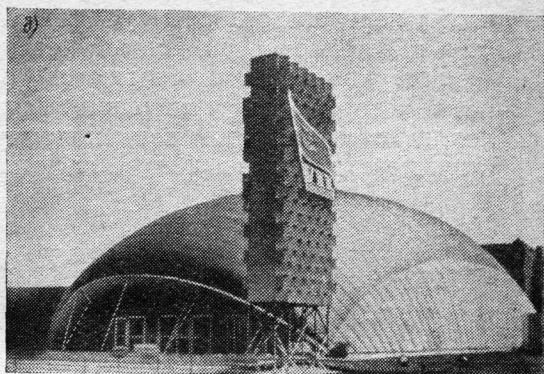
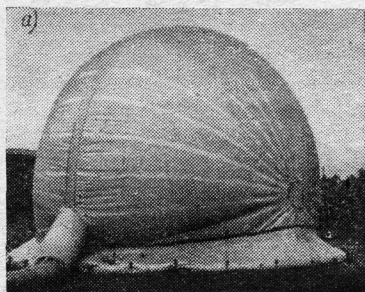
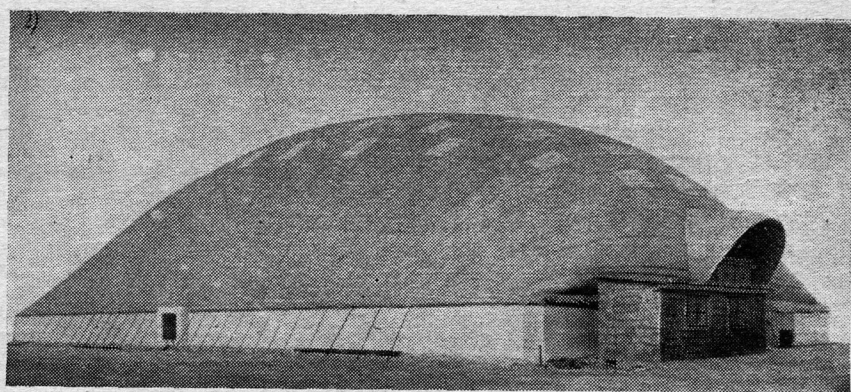


Рис. 1.13. Воздухоопорные оболочки более сложной формы

а — эллипсоидальная (СССР);
 б — торoidalная (ГДР); в — цилиндрическая с цилиндрическими торцами и срезанными углами (СССР); г — с поверхностью типа мыльной пленки (ГДР)



зок (ветер, снег), больше, чем для внутренней, несущей только свой собственный вес. Аналогично можно создать многослойные оболочки (рис. 1.14).

Мягкий каркас в виде облегающих канатов или сетей играет для многих оболочек ту же роль, что система подкреплений для жестких оболочек. Смысл «каркасирования» состоит в том,

чтобы передать основные усилия растяжения элементам каркаса и придать работе оболочки локальный характер.

Воздухонесомыми считаются оболочки, несущая способность которых (сопротивление сжатию, изгибу, кручению) обуславливается наличием в их полости сравнительно высокого избыточного давления. Они, в свою очередь, подразделяются на

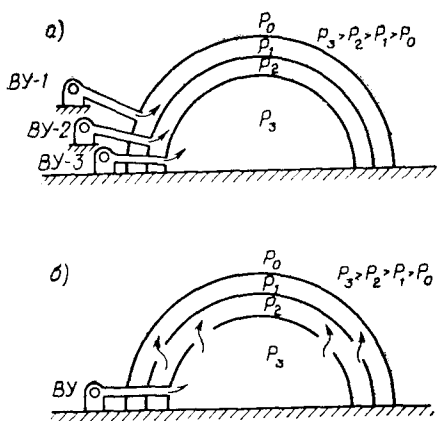


Рис. 1.14. Многослойные оболочки

а — с отдельным поддувом в межоболочечном пространстве; б — с общим поддувом

мах оси пневмостержень образует нии — пневмоарку или пневмотор.

Ряд соединенных пневмобалок образует конструктивно-ортотропные панели, из которых можно собирать складчатые покрытия. Пространственные воздухонесомые ПС (купола, своды, складки) можно формировать непосредственно сплошным соединением линейных элементов (стоек, арок, рам). Ряд пневмоторов образует цилиндрические сооружения башенного типа или купола — конические или шлемовидные.

Две оболочки, соединенные множеством точечных связей, образуют пневматы. Именно эта система, «эйрмат», применялась для изготовления надувных самолетов. Если панели, состоящие из ряда пневмостержней, мы назвали ортотропными, то панели последнего типа следует назвать изотропными (разумеется, в двухмерном пространстве). Пневматы свободны от ограничений контура. Поэтому из них возможно изготовление 3-, 5- и 6-угольных панелей для складок или геодезических куполов.

Комбинированные ПС наделены одновременно свойствами как воздухоопорных, так и воздухонесомых сооружений (рис. 1.17). Основным фактором, обеспечивающим функционирование сооружения комбинированного типа, остается избыточное давление воздуха в полезном пространстве. При прекращении подачи воздуха оболочка, хотя и изменяет свою форму,

но не теряет ее совсем, будучи поддерживаемая системой воздухоносных конструкций. Сооружения комбинированного типа

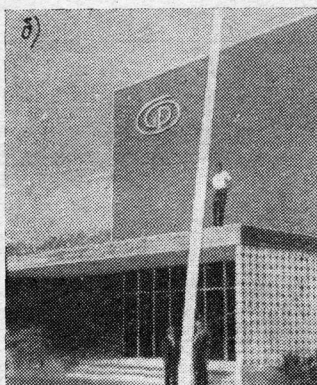
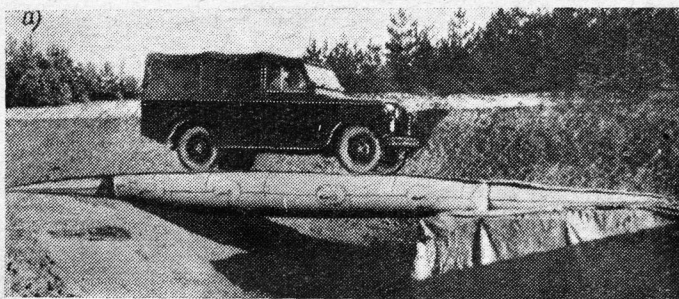
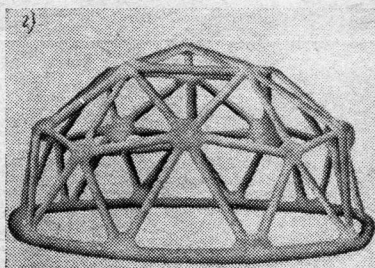
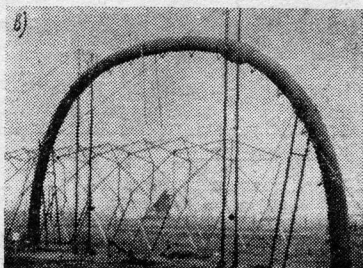


Рис. 1.15. Воздухонесомые конструкции (пневмоэтержные)

a — пневмобалка — мост для легковых автомобилей пролетом 5,5 м (Англия); *б* — пневмостойка — мачта антенны высотой 30 м (США); *в* — пневмоарка пролетом 16 м (СССР); *г* — пневмокаркас геодезического купола (США)



позволяют решить задачу ввода и вывода крупногабаритной техники для воздухоопорных сооружений, а также обеспечения временной жизнедеятельности их при выключении электроэнергии.

Более подробное рассмотрение воздухонесомых ПС не предусматривается планом настоящей книги. Поэтому все излагае-

мое ниже, в том числе и более детальная классификация — по виду поверхности, относится только к воздухоопорным оболочкам (см. приложение II).

Пневматические сооружения — строительные конструкции особого типа. В отличие от обычных конструкций, устойчивость которых обеспечи-

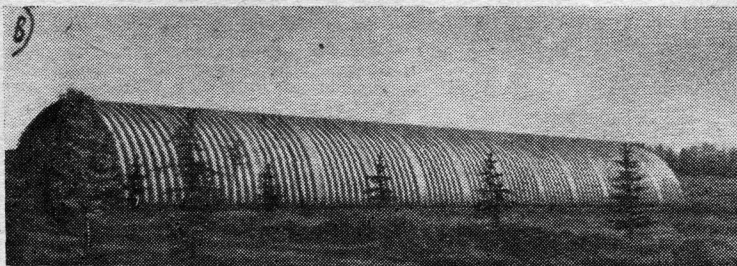
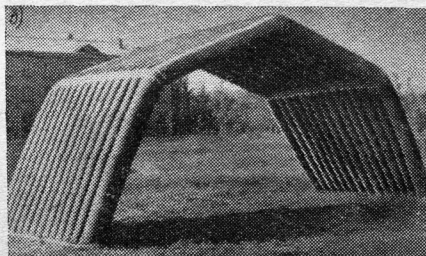
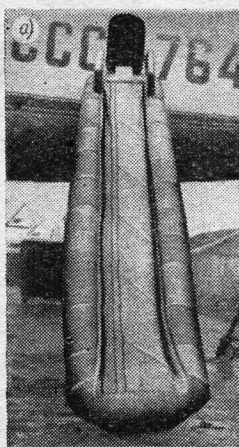


Рис. 1.16. Воздухонесомые (пневмопанельные) конструкции

a — плоская пневмопанель — спасательный трап для воздушных лайнеров (СССР); *б* — пневмоскладка — макет сооружения (СССР); *в* — пневмосвод — животноводческое помещение (СССР); *г* — пневмокупол с горизонтальным членением — укрытие антенны (США)

вается жесткостью применяемых материалов, в пневматических сооружениях помимо статических элементов требуются механизмы — воздухонагнетательные приборы. Пневматическое сооружение недостаточно только изготовить и смонтировать; оно

может существовать как строительная конструкция лишь тогда, когда работает система его жизнеобеспечения, постоянно или периодически подающая к несущим элементам воздух, сжатый до заданной степени.

Хотя в каждом современном здании имеются механизмы, без которых оно не может нормально функционировать (лифты, насосы центрального отопления, электроприборы и т. п.), ПС

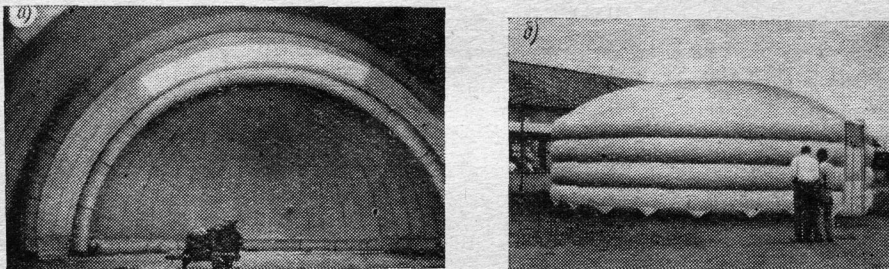


Рис. 1.17. Комбинированные пневматические конструкции

а — интерьер воздухоопорной оболочки пролетом 12 м с отдельной системой пневмоарок, в том числе «падающей» для открытия торцевой части сооружения (СССР); *б* — воздухоносимые стены из пневмоторов с воздухоопорным покрытием диаметром 8,6 м (Япония)

без воздухонагнетательной системы вообще не могут существовать. Таким образом, если в обычных зданиях механизмы являются хотя и необходимой, но все же принадлежностью, то основной механизм ПС — вентиляторная установка представляет собой элемент конструкции. В первом случае выход из строя механизмов приводит к неудобствам, к утрате комфорта, во втором — к прекращению функционирования сооружения. Поэтому ПС, сами по себе продукт высокой техники производства, требуют высокой технической культуры эксплуатации, показателями которой являются прежде всего надежность и устойчивость работы всех ее систем и, в первую очередь, воздухонагнетательных установок.

ПС не призваны заменить собой здания капитального типа из традиционных материалов (дерева, камня, бетона, металла), но могут успешно с ними конкурировать в условиях, когда время, отведенное на строительство, измеряется часами или когда заранее известно, что срок функционирования сооружения на данной площадке непродолжителен. Область применения ПС очерчивается возможностями наиболее полного использования всех их преимуществ перед сооружениями из традиционных материалов: полного заводского изготовления, высокой транспортабельности, быстроты монтажа и демонтажа, многооборотчивости. Сравнение с традиционными конструкциями по другим показателям (долговечности, независимости от источников

электроэнергии, комфорту обитаемости) обычно дает результаты не в пользу ПС.

Такие качества ПС, как возможность переброски на одном автомобиле или на одном самолете, возможность возведения за несколько часов, легкость, многооборачиваемость, определили на первых порах область их применения как сооружений полевого типа, быстро монтируемых на необжитых площадках удаленных районов страны. В настоящее время имеется много примеров ПС и постоянного назначения.

Существование ПС воздухоопорного типа возможно при наличии в их составе минимум трех основных частей: оболочки, вентиляторных установок и анкером. Для нормальной их эксплуатации требуются входные устройства, средства герметизации опорного контура и проемов. Все это составляет основной комплект ПС. К дополнительному оборудованию, отвечающему некоторым особым, не всегда выдвигаемым требованиям, могут быть причислены: автоматика регулирования работы вентиляторов; отопительные установки; резервный генератор тока; система полного открытия торцевой части ПС, поддерживающая оболочку на время открытия; монтажные швы, разделяющие оболочку на секции; дополнительные вставки, удлиняющие оболочку.

3. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОБОЛОЧЕК

Несмотря на многообразие форм оболочек ПС, они далеко не произвольны. Но если отклонение от рациональной в статическом понимании формы в угоду архитектурным или функциональным требованиям возможно в оболочках из жестких материалов и требуются лишь дополнительные расходы материала для компенсации местных перенапряжений, то мягкая оболочка сама реагирует на все отклонения от рациональной формы¹.

Под действием избыточного давления воздуха и внешних нагрузок мягкая оболочка стремится принять форму, соответствующую наибольшему объему. Те ее участки, которые препятствуют этому, испытывают дополнительные напряжения. Если они растягивающие, то оболочка может разорваться, если сжимающие, то на ее поверхности образуются морщины, складки,

¹ При изложении вопросов формообразования и расчета мягких оболочек приходится применять термин «устойчивость», в который вкладывается иной смысл, нежели тот, который имеет в виду классическая теория сооружений из жестких материалов. «Устойчивость» мягкой оболочки понимается как ее способность противостоять действию внешних нагрузок без существенных изменений своей формы. При этом существенными считаются такие, которые приводят к необходимости корректировки расчетной схемы оболочки, либо недопустимы по условиям эксплуатации ПС. Перемещения оболочки, связанные с изменением ее формы под действием нагрузок, названы «кинетическими», в отличие от перемещений, вызываемых удлинениями материала в результате его растяжения

что портит внешний вид сооружений. На рис. 1.18, *a* представлен фрагмент ПС с угловыми формами. При тенденции к приобретению вида поверхности, близкой к сферической, оболочка несколько изменила свою форму, в результате чего на ее ребрах образовались поперечные морщины, свидетельствующие об од-

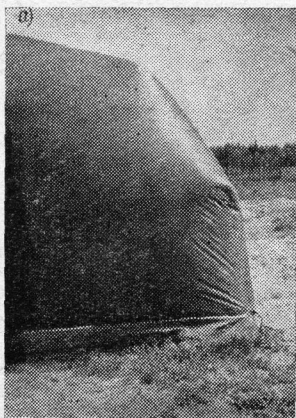


Рис. 1.18. Оболочки с участками одноосного напряжения, сопровождаемого образованием морщин по причинам

a — угловатости форм ребер (общий вид оболочки см. на рис. 3.10); *b* — возможности увеличения объема сооружения в результате уменьшения диаметра оболочки

ноосном напряжении материала. Вершины углов оказались ненапряженными. Естественно, что эти недонапряжения должны компенсироваться перенапряжениями оболочки в других местах.

Поверхность мягкой оболочки под действием избыточного давления и внешних сил принимает единственно возможную равновесную форму. Задача конструктора (архитектора) состоит в том, чтобы «угадать» эту форму. Трудность решения этой задачи в том, что временные нагрузки меняют свои величину и направление. Поэтому единой формы, удовлетворяющей всем комбинациям нагрузки, быть не может. Она будет варьировать в некоторых пределах. Искусство конструктора заключается в том, чтобы, предусмотрев влияние различных комбинаций нагрузок, найти такие очертания ПС, при которых все нежелательные явления (складки, морщины, перекосы) проявились в возможно меньшей степени.

Обычно стараются формировать поверхность ПС с учетом только постоянных нагрузок (собственный вес и избыточное давление воздуха), мирясь с тем, что при действии временных нагрузок (ветра, снега, дождя) возможны некоторые искажения формы. Однако последствия этого искажения не должны приводить оболочку к предельному состоянию как по прочности, так и по деформациям.

Сферические оболочки — естественная и наиболее совершенная форма ПС. Относительная высота H/R сферического купола определяется функциональными требованиями. При этом учитывают, что купола высотой более $3/4$ своего диаметра становятся неустойчивыми под действием ветра, а очень пологие оболочки испытывают повышенное напряжение от избыточного давления воздуха. Оптимальная высота H сферического купола составляет $1/3-1/2$ диаметра его основания. Сферический купол

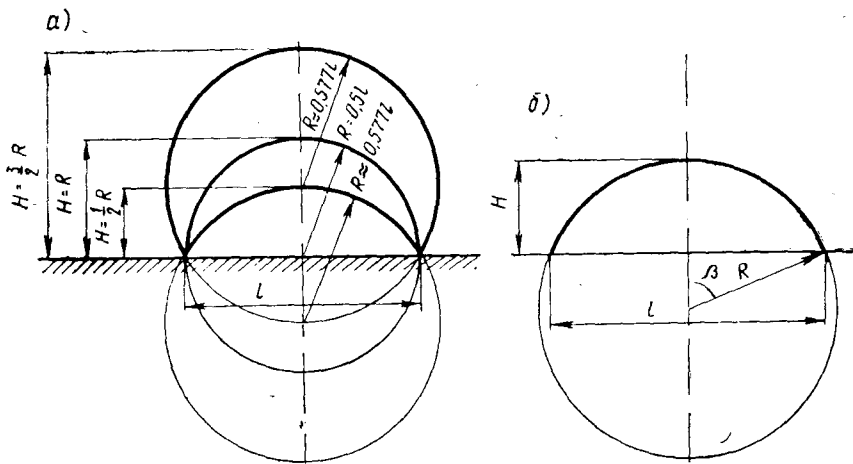


Рис. 1.19. Сечения сферических и цилиндрических оболочек с различной относительной высотой

высотой, равной своему радиусу, является оболочкой с наименьшими усилиями от избыточного давления. Имея в виду, что растягивающие усилия в сферической оболочке пропорциональны ее радиусу, из рис. 1.19, а можно усмотреть, что при высоте купола $H=R$ радиус сферы, а следовательно, и усилия будут минимальными.

Купол высотой $H \approx 1/3 l$ является куполом наименьшего веса. Если обозначить: γ — объемный вес материала оболочки; σ — расчетное сопротивление его растяжению; 2β — центральный угол (рис. 1.19, б), то формула веса оболочки получит вид

$$G(\beta) = \frac{\gamma \pi R l^3}{8\sigma} \cdot \frac{1}{(1 + \cos \beta) \sin \beta}.$$

Из условия минимума тригонометрической функции следует:

$$\beta = \frac{\pi}{3}; \quad H = \frac{l}{2\sqrt{3}}.$$

Конические оболочки (рис. 1.20), как самостоятельная форма ПС, встречаются довольно редко. Чаще они входят в состав более сложных комбинированных форм.

Цилиндрические оболочки — одна из наиболее распространенных форм ПС. Оптимальная высота цилиндрических оболочек лежит в пределах $1/3—1/2$ пролета. Устойчивость цилиндрических оболочек при боковом ветре несколько ниже устойчивости сферических. Поэтому высота их более $2/3$ пролета не

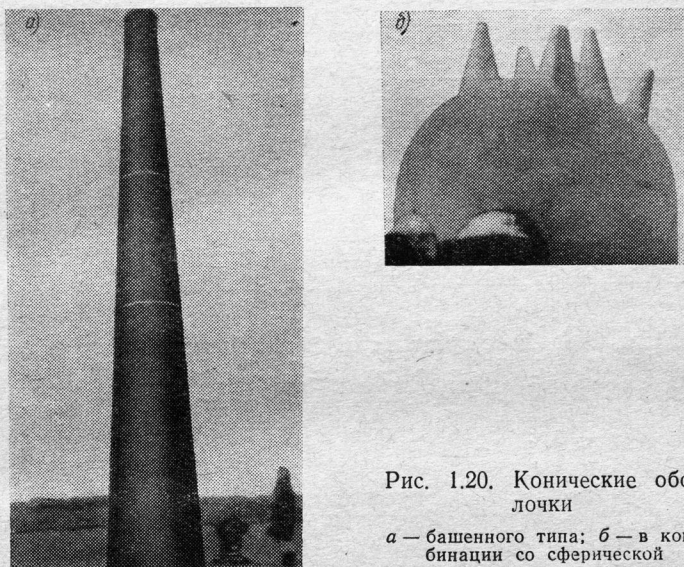


Рис. 1.20. Конические оболочки

a — башенного типа; *б* — в комбинации со сферической

рекомендуется. Минимальные усилия в оболочке от действия избыточного давления воздуха будут также при относительной высоте $\frac{H}{l} = 1/2$. Минимальный вес при $\frac{H}{l} \approx 1/3$, что следует из формулы веса оболочки

$$G(\beta) = \frac{\gamma p l^2}{2\sigma} \cdot \frac{\beta}{\sin^2 \beta},$$

откуда

$$\beta = 1,165 \approx 66^\circ 45'; \quad H = 0,329l.$$

Цилиндрические оболочки используются в комбинации с оболочками других форм, закрывающими их торец. При малых пролетах оболочек возможно устройство плоских торцов жесткой конструкции. Плоские торцы из мягких материалов применяются в исключительных случаях, так как вблизи шва сопряжения плоской и цилиндрической поверхности образуется зона одноосных напряжений с очень заметными складками.

Типичным торцовым окончанием цилиндрической оболочки является сферическая поверхность (рис. 1.21, *a*). Однако здесь усматриваются два недостатка: скачок кольцевых усилий на

границе сопряжения цилиндрической поверхности со сферической и некоторая потеря полезной площади в связи с округлостью плана.

В самом деле, в продольном разрезе такой оболочки радиус кривизны R сферического торца — величина конечная, тогда как в цилиндрической части $R = \infty$ (рис. 1.22, *a*). Между двумя образующими линиями — круговой и прямой — должна появиться-

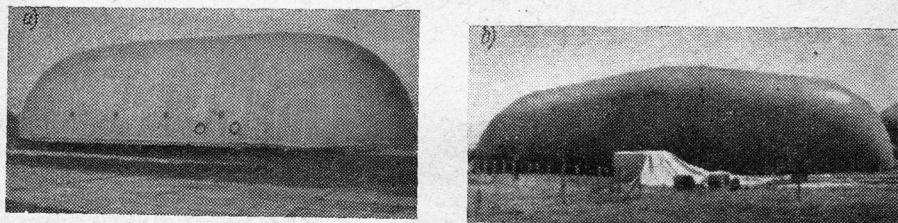


Рис. 1.21. Цилиндрические оболочки со сферическими торцами и образующей
a — прямой (СССР); *b* — выгнутой (Италия)

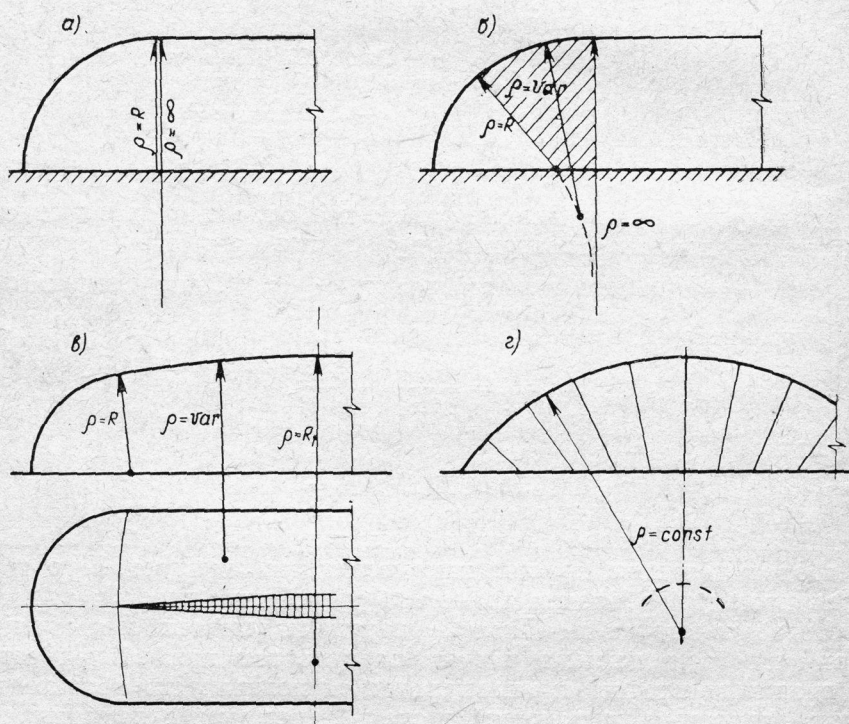


Рис. 1.22. Различные формы продольного профиля воздухоопорных оболочек
a — цилиндрическая со сферическим торцом; *б* — то же, с переходной вставкой; *в* — то же, с «рыбовидной» вставкой; *г* — тороидальная

ся переходная кривая с переменным радиусом ρ кривизны, растущим от $\rho=R$ до $\rho=\infty$.

В целях облегчения работы оболочки возможны следующие конструктивные мероприятия: устройство переходной вставки переменного радиуса (рис. 1.22, б) или «рыбовидной» вставки

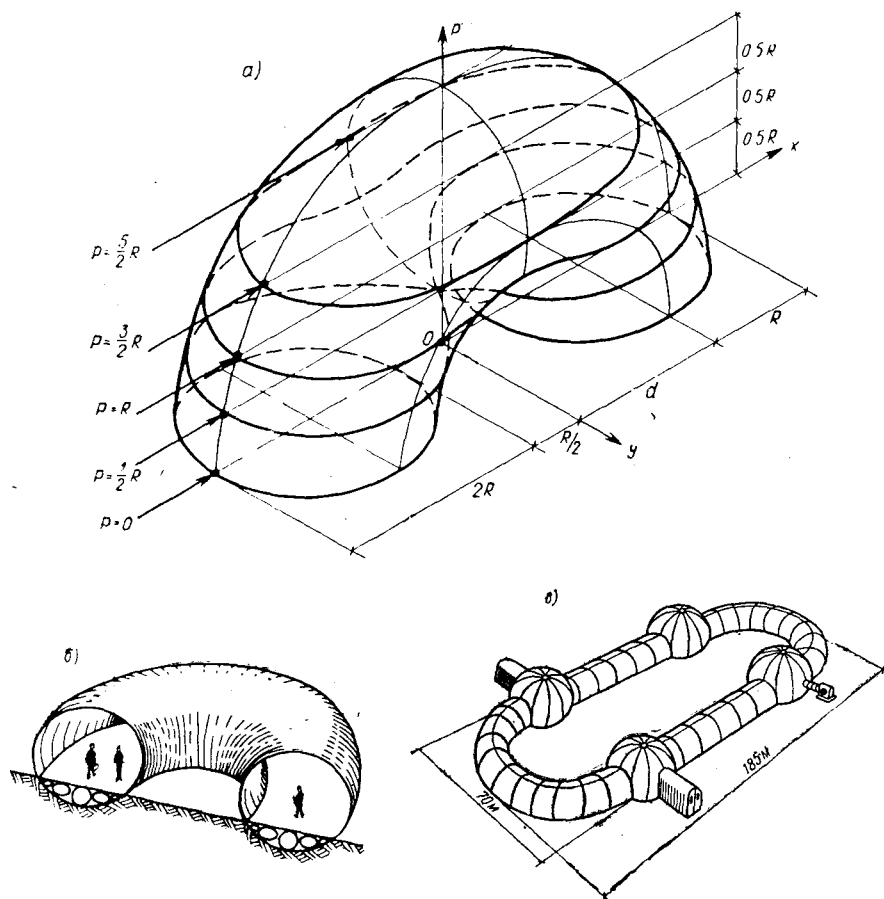


Рис. 1.23. Торондальные оболочки

a — с горизонтальной осью (сечения через $0,5R$); *б* — с вертикальной осью — лунный домик (по Р. Сцилларду); *в* — комбинация полуторов, полуцилиндров и полусфер (легкоатлетическая или конькобежная дорожка)

в цилиндрической части (рис. 1.22, в) с целью придания ее образующей некоторой кривизны (рис. 1.21, б). Однако эти вставки как правило, не делаются; оболочка, обладая сравнительно высокой деформативностью, создает необходимый переход за счет удлинений материала в кольцевых направлениях и деформаций сдвига в районе стыкования разнородных поверхностей.

При этом шов, соединяющий цилиндрическую и сферическую части оболочки, испытывает дополнительные напряжения.

Тороидальные оболочки в ряде случаев приводят к удачным во многих отношениях формам ПС. При горизонтальном расположении оси вращения тора (рис. 1.23, а) оболочка образуется тороидальным сегментом, который в зависимости от положения секущей плоскости образует ряд различных контурных линий, от овала до восьмерки с уравнениями (кривые Персея):

$$(x^2 + y^2 + p^2 + d^2 - R^2)^2 = 4d^2(x^2 + p^2),$$

где R — радиус образующей окружности; d — радиус направляющей окружности; p — координата секущей плоскости.

В отличие от цилиндрических, тороидальные оболочки по всей своей поверхности не имеют скачков напряжений (рис. 1.22, з).

При вертикальном положении оси вращения (рис. 1.23, б) тороидальная оболочка становится во многом похожей на цилиндрическую, отличаясь от нее искривленной по дуге окружности продольной осью. Она может быть замкнутой (полный тор) или змеевидной (рис. 1.24) или, наконец, входить в состав комбинированных оболочек (рис. 1.23, в).

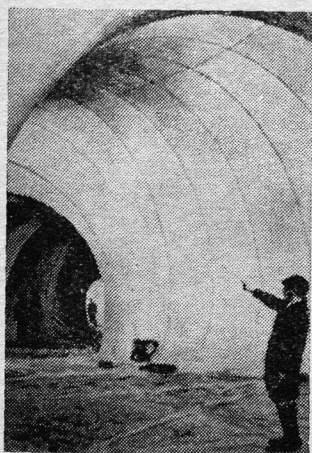


Рис. 1.24. Змеевидная оболочка

Оболочки вращения, как форма ПС, весьма разнообразны. Однако специфика их формообразования налагает на вид меридиональной линии по меньшей мере два ограничения. Во-первых, она должна быть плавной и не иметь угловых точек. При изломе меридиана наружу (рис. 1.25, а) на линии сопряжения возникают морщины,

так как равнодействующая сил T_1 и T_2 натяжения смежных участков оболочки не уравнивается внутренним давлением воздуха. При изломе внутрь (рис. 1.25, б) оболочка по линии сопряжения оказывается перенапряженной и требуется постановка разгружающего каната. Во-вторых, меридиональная линия должна удовлетворять условию, которое обосновывается в главе 4:

$$2R_1 > R_2, \quad (1.1)$$

где R_1 — радиус кривизны меридиана в рассматриваемой точке; R_2 — второй главный радиус кривизны в этой же точке.

На рис. 1.26, а нанесена произвольная меридиональная линия AB оболочки вращения и три характерные точки на ней (P ; P_1 и P_2). Радиусы кривизны R_1 в этих точках равны соот-

ветственно: CP ; C_1P_1 и C_2P_2 , а радиусы кривизны R_2 — OP ; O_1P_1 и O_2P_2 . В точке P условие (1.1) выполняется. В точке P_2 не выполняется. Точку P_1 (где $2R_1 = R_2$) следует считать границей между допустимой и недопустимой кривизнами меридиональной линии. Ниже точки P_1 должны появляться меридио-

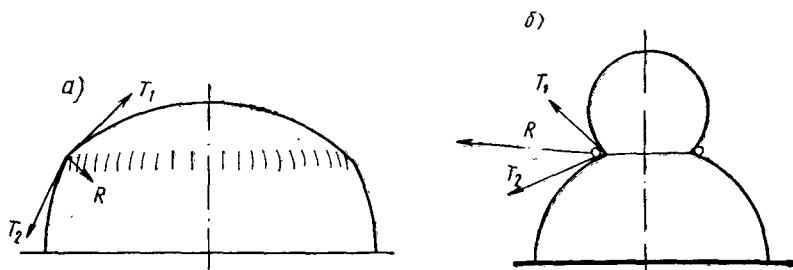


Рис. 1.25. Оболочки вращения с изломами образующей
а — положительным; б — отрицательным

нальные складки. Примером отклонения от этого условия может служить оболочка, изображенная на рис. 1.18, б [6], где видны складки, идущие от низа оболочки до того уровня, где условие (1.1) входит в силу. Интересно по схеме рис. 1.26, б [10], изображающей меридианы реально выполненного ПС, проследить как оболочка сама пытается исправить ошибку раскроя. Сравнение проектной и действительной форм оболочки показывает, что радиус кривизны меридиональной линии нижней части оболочки за счет образования складок увеличился до приемлемых по условию (1.1) соотношений. При этом высота купола возросла на 3 м. Диаметр оболочки уменьшился только на 8% (с 22,8 до 21 м), но объем заметно вырос.

Основным критерием правильности формы ПС является картина распределения напряжений в характерных точках

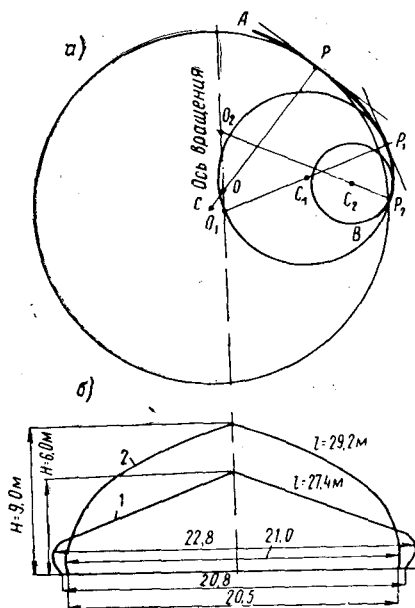


Рис. 1.26. Графический анализ правильности меридиональной линии вращения

а — построение; б — пример шлемовидного купола (см. рис. 1.18, б), раскроенного с нарушением условия (1.1); 1 — проектная форма; 2 — фактическая форма после наполнения воздухом

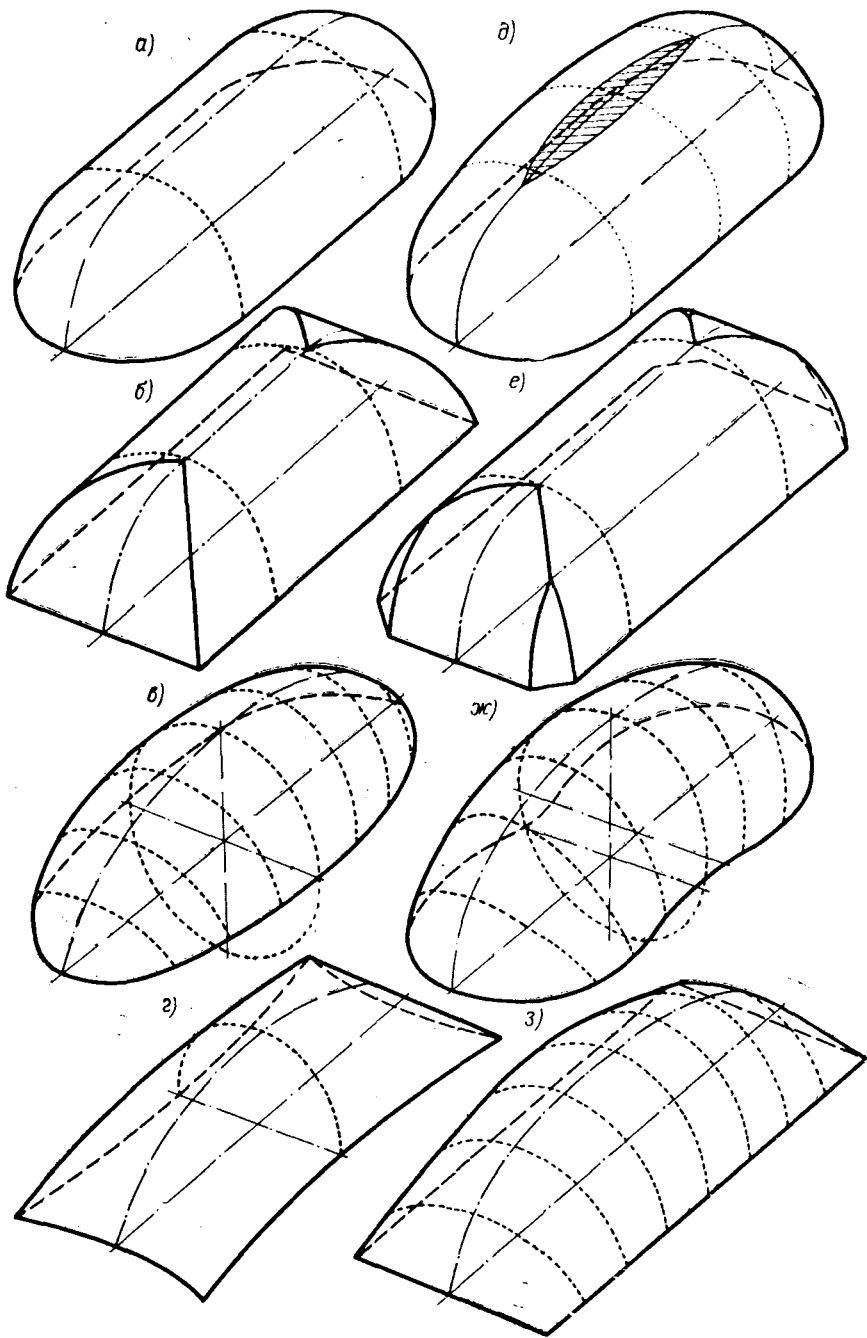


Рис. 1.27. Формы оболочек, перекрывающих прямоугольный или овальный план

оболочки в направлениях главных кривизн (будем считать, что они совпадают с главными напряжениями). Отличным можно считать такое положение, при котором оба главных напряжения положительны и равны между собой. Хорошо, если они оба положительны. Удовлетворительным (допустимым), если одно из главных напряжений положительно при нулевом другом (отрицательных напряжений в мягких оболочках физически быть не может). Нулевые напряжения одновременно в двух направлениях невозможны.

Второй критерий качества формы оболочки — технологический. Удобство и простота раскроя полотнищ, наименьшее количество отходов в виде обрезков и в конечном счете экономика — факторы немаловажные. Важнейшая задача проектирования пневматических оболочек — нахождение их формы, удовлетворяющей обоим критериям.

Рассмотрим перекрытие прямоугольного плана, который для большинства строительных конструкций наиболее характерен. Чаще всего эта задача решается с использованием цилиндрической оболочки со сферическими торцовыми окончаниями (см. рис. 1.12, *в* и рис. 1.27, *а*). Раскрой здесь очень прост: цилиндр образуется прямыми полотнищами, сфера — полотнищами, выкроенными в виде сферических треугольников. Однако это решение имеет два уже известных недостатка.

Другой распространенной формой является цилиндрическая оболочка с цилиндрическими торцами (рис. 1.27, *б*). Раскрой еще проще: все полотнища прямые, отходы минимальные. Недостаток этого решения в том, что ребра пересечения цилиндрических поверхностей в углах сооружения, особенно в нижней его части, слишком остры для того, чтобы сохранять свою теоретическую форму. Поперек ребер образуются складки и морщины, портящие вид сооружения и свидетельствующие о неблагоприятии в распределении напряжений. В целях борьбы с этим явлением прибегают к срезке граней в их нижней части (рис. 1.13, *в* и рис. 1.27, *е*). При этом, однако, усложняются раскрой и изготовление оболочки.

Третий вариант решения задачи — использование тороидальной поверхности (рис. 1.13, *б* и рис. 1.27, *в*, *ж*). Его достоинство — в единообразии выкройки полотнищ, которые отличаются друг от друга только расположением и формой среза коротких сторон. В статическом смысле тороидальная оболочка хорошо уравновешена и ее напряженное состояние ясно. Неплоха и архитектура. Недостатком является то, что план сооружения скван и может быть очерчен только одной из кривых Персея (т. е. овалом, выпуклым или приплюснутым).

Если обратиться за советом к природе, то придем к мыльным пленкам. Они легко перекрывают прямоугольный план, о чем красноречиво свидетельствуют эксперименты Ч. Бойса [13] и Ф. Отто [9]. Но здесь имеется ряд осложнений. Во-пер-

вых, координаты поверхности мыльной пленки трудно измерить и еще труднее вычислить. Во-вторых, эту поверхность трудно воспроизвести в натуре, имея дело с полотнищами, раскрой которых очень сложен (каждое должно иметь свой шаблон). В-третьих, пленка в углах сильно приплюснута и углы сооружения из-за пологости оболочки практически «необитаемы».

Приведенные примеры показывают, что вполне удовлетворительная поверхность оболочки для перекрытия прямоугольного плана еще не найдена, хотя изыскания в этой области ведутся. Подлежит исследованию, например, поверхность, образованная движением образующей в виде дуги окружности переменного радиуса по эллиптической направляющей. Другим примером может служить поверхность, прототипом которой является надувная подушка.

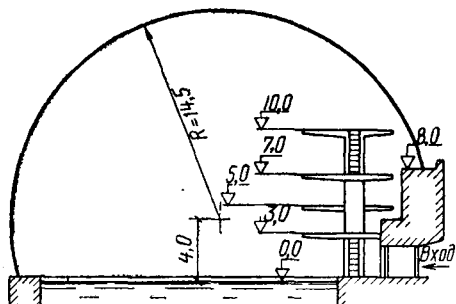


Рис. 1.28. Оболочка воздухоопорного типа с опорным контуром в разных уровнях — проектное предложение перекрытия плавательного бассейна «Чайка» в Москве

которой является надувная подушка. Выкройкой поверхности подушки служит прямоугольник, составленный из ряда прямых полотнищ. При наполнении воздухом подушка в плане приобретает вид четырехугольника с вогнутыми внутрь контура сторонами и острыми углами (рис. 1.27, в). Напряшивается следствие: если выкройке придать вид четырехугольника с выпуклыми сторонами и тупыми углами, то можно ожидать, что после наполнения воздухом оболочка примет в плане очертания прямоугольника (рис. 1.27, з).

Объемные формы воздухоопорных оболочек в значительной мере определяют их планом, тем более, что он может иметь вид любой замкнутой фигуры, в том числе звезды, креста и др. Этот план может лежать в разных уровнях (рис. 1.28). Найти рациональный вид поверхности и в этих случаях может помочь мыльная пленка.

Мыльные пленки — идеальные поверхности равных напряжений и минимальной площади, так называемые минимальные поверхности, дают единственное решение только для одной заданной совокупности нагрузок. Используя формы мыльной пленки, мы получаем поверхность мягкой оболочки, идеальную для восприятия усилий, вызываемых избыточным давлением воздуха и, в какой-то степени, собственным весом, но не совокупности всех нагрузок, для которой мыльная пленка, естественно, имела бы другой вид. Однако следует иметь в виду, что

Мыльные пленки — идеальные поверхности равных напряжений и минимальной площади, так называемые минимальные поверхности, дают единственное решение только для одной заданной совокупности нагрузок. Используя формы мыльной пленки, мы получаем поверхность мягкой оболочки, идеальную для восприятия усилий, вызываемых избыточным давлением воздуха и, в какой-то степени, собственным весом, но не совокупности всех нагрузок, для которой мыльная пленка, естественно, имела бы другой вид. Однако следует иметь в виду, что

избыточное давление воздуха, равно как и собственный вес, являются постоянными и органически присущими ПС нагрузками, в то время как многие другие (снеговая, ветровая) действуют периодически. Поэтому моделирование с помощью мыльной пленки, хотя и не может отразить влияния на форму оболочки

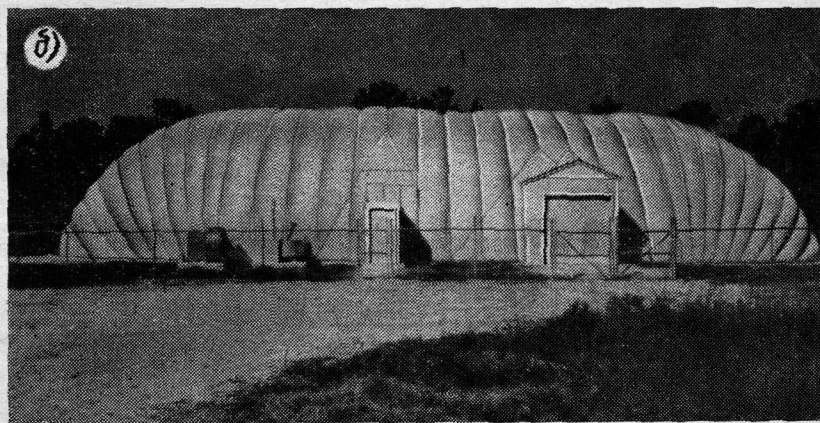
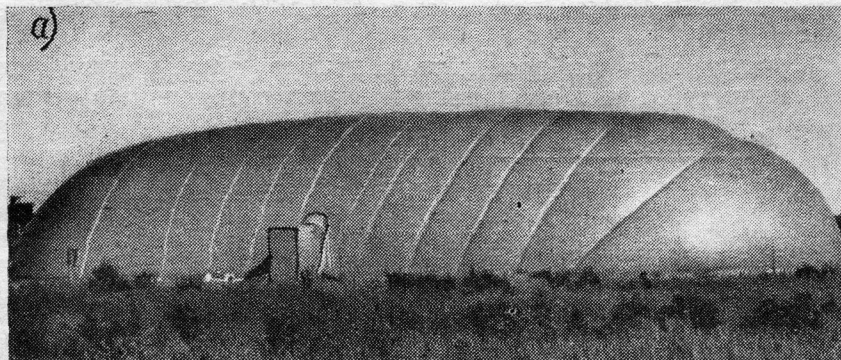


Рис. 1.29. Цилиндрические оболочки, усиленные поперечными канатами
а — экспериментальная (СССР); б — общего назначения (Канада)

каких-либо иных (кроме избыточного давления воздуха и собственного веса) силовых воздействий, все же приводит к правильным в принципе формам. Несоответствие формы мыльной пленки изменчивой совокупности нагрузок найдет отражение в виде наложения дополнительных усилий, а иногда и изменений формы, вплоть до возникновения зон одноосных напряжений с образованием морщин и складок на оболочке.

Размеры воздухоопорных конструкций ограничены проч.

ностью применяемых материалов, каждому из которых соответствуют свои пределы. При превышении их необходимо усиление оболочки системой разгружающих канатов или сеток. Для оболочек цилиндрической или близких к ней форм часто применяется система не связанных друг с другом канатов, перекинутых через тело сооружения в поперечном направлении (рис. 1.29). Возможно использование сетей с ромбической ячейкой (рис. 1.30).

Каркасы оболочек вращения, например сферических куполов, могут иметь вид системы пересекающихся только в верши-

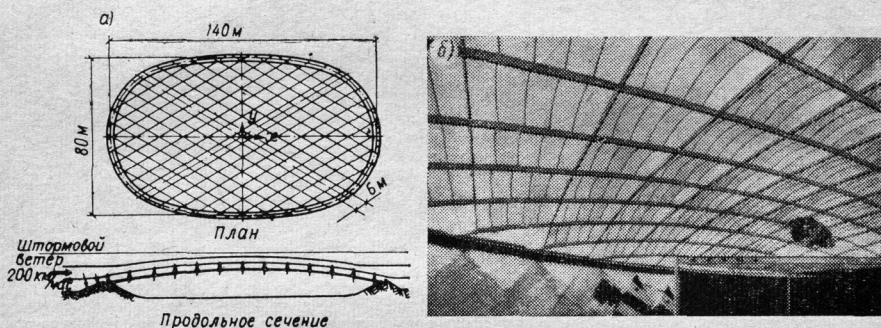


Рис. 1.30. Оболочка, усиленная сеткой с ромбической ячейкой (павильон США на ЭКСПО-70)

а — чертеж; б — интерьер

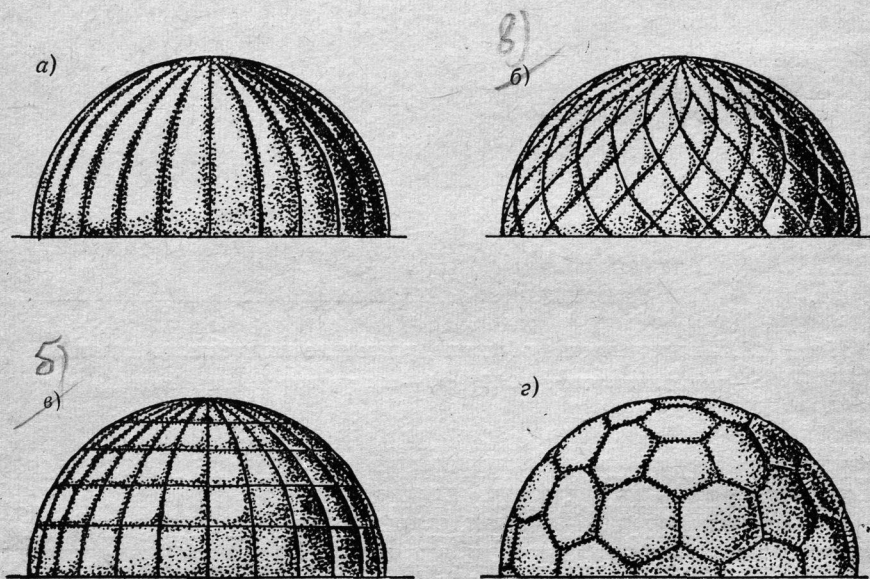


Рис. 1. 31. Оболочки вращения с мягкими каркасами в виде системы канатов
а — меридиональной; б — меридионально-широтной; в — ромбической; г — геодезической

не канатов, идущих в меридиональных направлениях. Канаты, скрепленные в местах пересечения, образуют сетки — меридионально-широтные, ромбические или геодезические (рис. 1.31).

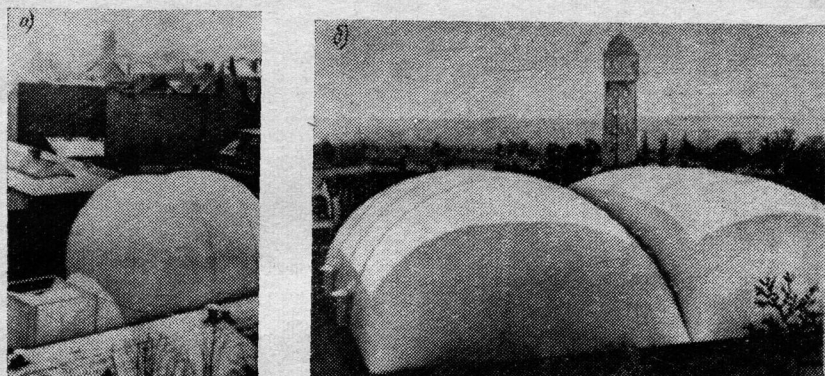


Рис. 1.32. Двухпролетные оболочки с диафрагмой

а — бисферическая оболочка; *б* — двойной теннисный корт (два по 19×38 м)

Мягкие диафрагмы с внутренними оттяжками в значительной мере повышают боковую устойчивость высоких и вытянутых в плане оболочек. На рис. 1.32, *а* изображена воздухоопорная оболочка в виде двух сопряженных сфер. Вдоль линии пересечения сфер располагаются внешний и внутренний канаты с диафрагмой между ними. В этом ПС выражена тенденция к образованию двухпролетной оболочки, получившая окончательное воплощение в конструкции, представленной на рис. 1.32, *б*. Таким путем можно формировать и многопролетные оболочки.

Применяя внутренние оттяжки, получают другую систему усиления, аналогичную стойкам грибовидного перекрытия, но не сжатым, а растянутым (рис. 1.33). Система оттяжек может развиваться

во внутреннюю стенку-диафрагму из того же материала, что и основная оболочка. Смысл усиления такого вида — передача зна-

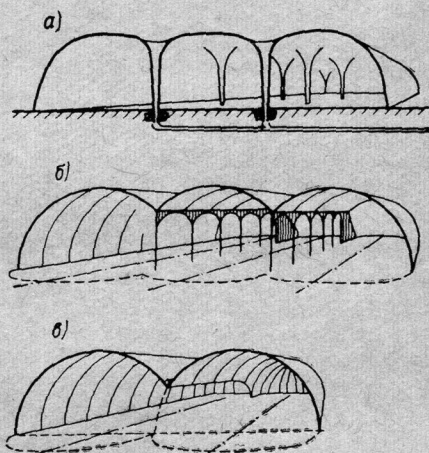


Рис. 1.33. Оболочки с внутренними оттяжками и диафрагмами

а — оттяжки, распределенные по площади;
б — оттяжки, расположенные линейно;
в — диафрагма, усиленная продольным элементом жесткости

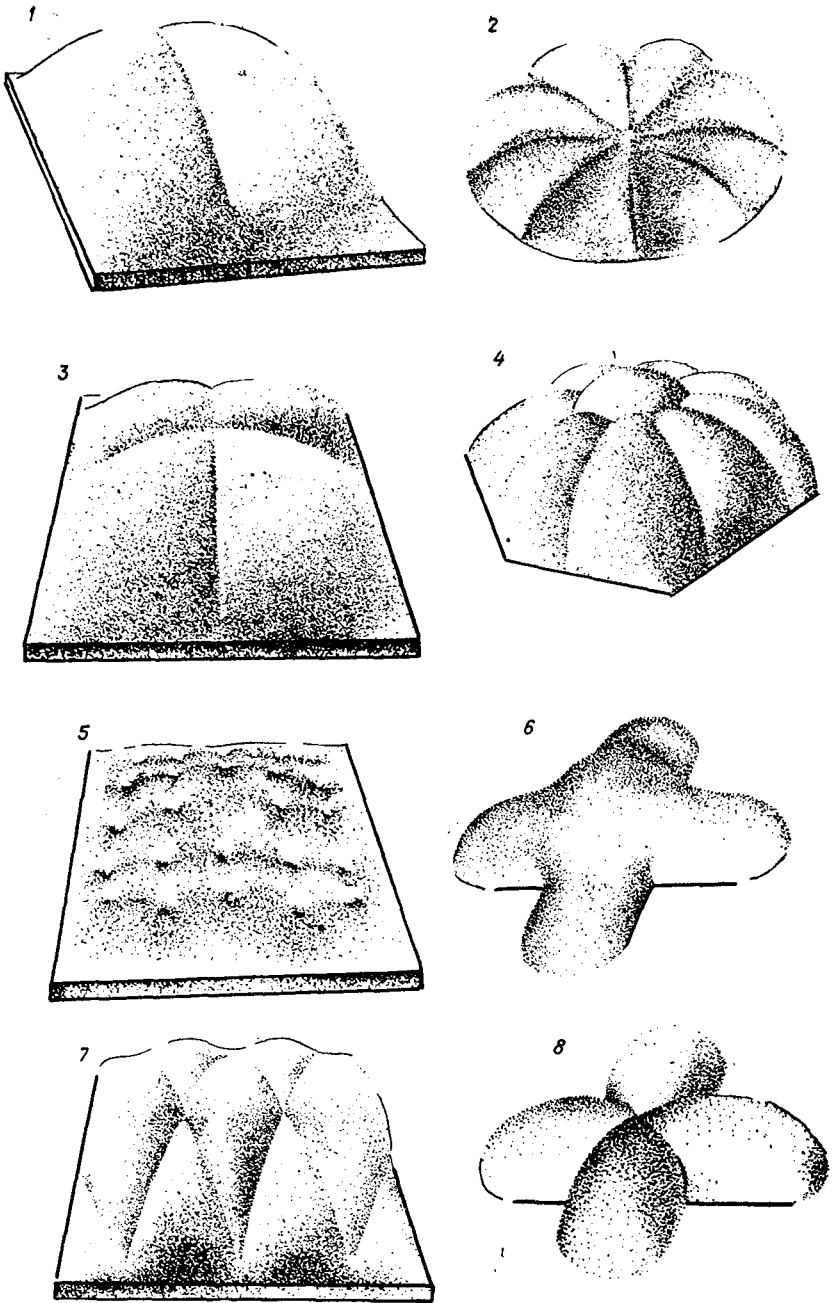


Рис. 1.34. Возможные формы оболочек, усиленных канатами (по Ф. Отто)

чительной части растягивающих усилий, порожденных избыточным давлением воздуха, оттяжкам-стойкам или диафрагмам-стенкам, и локализация работы оболочки — уменьшение радиусов ее кривизны (рис. 1.34).

К недостаткам многоопорных оболочек следует отнести затруднения отвода атмосферной воды и, особенно, образование снеговых мешков. Водоотвод довольно просто решается путем

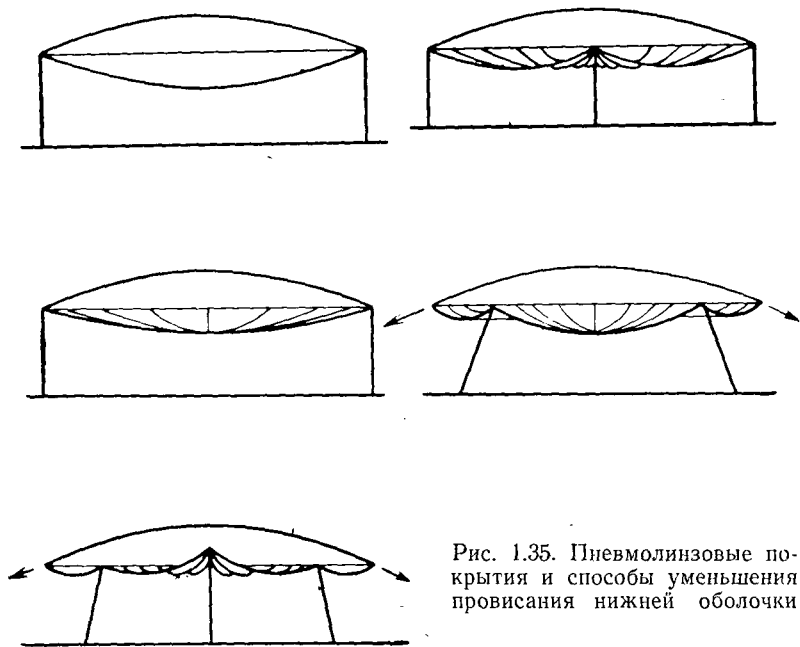


Рис. 1.35. Пневмолинзовые покрытия и способы уменьшения провисания нижней оболочки

превращения вертикальных оттяжек в водосточные трубы, однако снеговые мешки при этом остаются. Поэтому системы, изображенные на рис. 1.33, а, которыми можно перекрывать площади любых размеров, следует рекомендовать либо для бесснежных районов, либо для отапливаемых помещений, когда снег, падающий на оболочку, тает.

Распространенная разновидность воздухоопорных конструкций — пневмолинзы или пневмоподушки (рис. 1.35). Представляя собой две (обычно одинаковые) оболочки, соединенные одна с другой по контуру, линзы по характеру статической работы ничем не отличаются от обычных воздухоопорных оболочек. Линзу стараются сделать как можно тоньше. Это сокращает высоту здания, но, с другой стороны, с уменьшением кривизны, увеличиваются распор и напряжения в оболочке. Восприятие распора вырастает в серьезную конструктивную задачу, которая решается применением жесткого распорного

кольца или системы оттяжек. Помещение, перекрытое пневмолинзой, имеет провисающий потолок. Уменьшить провес можно, подкрепив нижнюю оболочку системой канатов или же, если это возможно, установив периметральные или центральные стойки. Известны удачные примеры использования пневмолинз из светопрозрачных материалов в качестве световых фонарей куполов из жестких материалов.

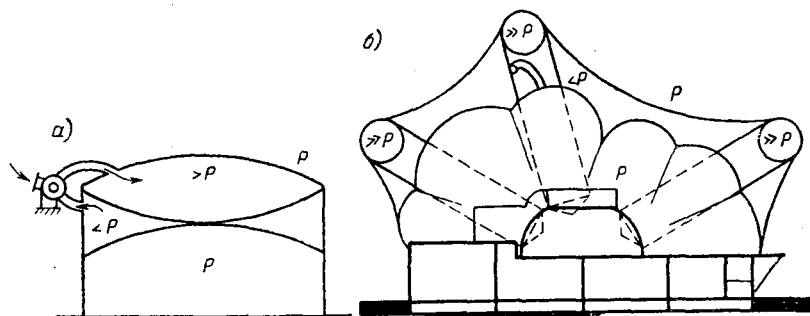


Рис. 1.36. Пневмооболочки, напряженные вакуумом (p — атмосферное давление)

a — подвесной потолок под линзовидным перекрытием; *б* — перекрытие над плавучим театром на ЭКСПО-70

Предварительное натяжение мягкой оболочки пневматическим способом может быть достигнуто не только созданием избыточного давления воздуха под оболочкой. Натяжение можно обеспечить совершенно противоположным путем — создав под оболочкой вакуум. Укажем на возможность использования вакуума для образования вспарушенного потолка в зданиях, перекрываемых пневмолинзами (рис. 1.36, *a*). Другим примером может служить пневматическая оболочка японского плавучего театра на ЭКСПО-70, где устойчивость мягкого двухслойного перекрытия зрительного зала обеспечивалась вакуумом в пространстве между оболочками (рис. 1.36, *б*).

4. ОСОБЕННОСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ВОЗДУХООПОРНОГО ТИПА

Основные достоинства ПС воздухоопорного типа сводятся к следующим: чрезвычайно малый расход материала, возможность перекрытия больших пролетов, полное заводское изготовление, быстрота монтажа и демонтажа, сравнительно низкая стоимость, транспортабельность, невозможность обрушения, светопрозрачность и радиопрозрачность ограждающих конструкций.

Естественно, всем этим немалым достоинствам сопутствует ряд недостатков. Поэтому область применения ПС может

быть только такая, где эти недостатки терпимы. В конечном счете они сводятся к двум: необходимость постоянного поддержания избыточного давления воздуха под оболочкой и некоторый дискомфорт, вызываемый малой толщиной материала оболочки.

Рассмотрим особенности ПС подробнее.

Малый расход материалов. Б. Фуллеру — известному конструктору геодезических куполов — принадлежит афоризм: «Если вы хотите установить степень совершенства конструкции здания — взвесьте его». В этом смысле ПС вне конкуренции — ни одно строительное покрытие даже не приближается к ним по весу. Ограждающая конструкция ПС — тончайшая (до 1/100 000 пролета) мягкая оболочка, а поддерживающей конструкции, как таковой, вовсе нет. Ею служит воздух.

Если ввести понятие «объемный вес сооружения», то получим следующие сравнительные данные ($кгс/м^3$);

Крупноблочный двухэтажный жилой дом	650
Промышленное здание из сборного железобетона	250
Деревометаллические сборные каркасные здания	150—200
Контейнеры и передвижные домики из традиционных материалов (дерево, сталь)	60—100
То же, из алюминия и пенопласта	30
Временные деревянные постройки (сарай)	20—50
Большепролетные купола и своды из легких сплавов и пластмасс	5—10
Брезентовые большепролетные палатки	3—5
ПС воздухоопорного типа	0,2—0,4

Возможности перевозки ПС, которые можно характеризовать коэффициентом транспортабельности

$$k_{тр} = \frac{\text{строительный объем}}{\text{транспортный объем}}$$

также исключительно высоки, что иллюстрируется следующими данными:

промышленные здания из сборного железобетона	3
сборные и передвижные дома	7
пространственные конструкции из легких материалов	15—30
ПС воздухоопорного типа	1500—2500

Следствием малого веса ПС является их безопасность в смысле последствий строительных аварий. При выходе из строя вентиляторных установок или внезапной разгерметизации оболочка медленно опускается без обрушения несущих или ограждающих конструкций, опасного для оборудования или жизни людей. ПС относятся к разряду сооружений сейсмостойких.

Возможность перекрытия больших пролетов. Если избыточное давление воздуха под оболочкой равно

по величине и направлению внешней нагрузке, то в результате равновесия этих воздействий оболочка не испытывает никаких напряжений, являясь лишь диафрагмой, разделяющей две среды — внутреннюю и внешнюю. Например, плоской пленкой с собственным весом g кгс/м² можно перекрыть ограниченное замкнутой стенкой пространство любых размеров, если под ним будет создано избыточное давление $p=g$ (рис. 1.37, а). Вероятно это соображение и дает основание некоторым специалистам считать пролет воздухоопорных сооружений беспредельным. А. Квормби [24] ссылается на Ф. Отто и Р. Тростеля, которые расчетом обосновали следующие предельные пролеты для сооружений из различных материалов:

сжатые арки и оболочки из бетона	500 м;
сжатые арки и оболочки из стали	1750 м;
растянутые тросы и мембраны	от 5 до 10 км,

но не смогли установить теоретический предел пролета для воздухоопорных конструкций.

В реальных условиях ни одна из внешних нагрузок не бывает равномерной и направленной нормально к поверхности оболочки. Если нормальные компоненты внешних нагрузок колеблются в пределах от $g_{\text{мин}}$ до $g_{\text{макс}}$, их не сможет уравновесить противодействие воздуха p , и поверхность оболочки за счет удлинений материала станет выпукло-вогнутой (рис. 1.37, б, в). В оболочке возникают растягивающие, так называемые мембранные усилия T , которые вызываются действием неуравновешенных нагрузок $|g-p|$. К ним присоединяются усилия от действия касательных составляющих внешней нагрузки.

Ни плоские, ни выпукло-вогнутые оболочки не удовлетворяют требованиям эксплуатации в связи с их склонностью к флаттеру («полосканию») под действием ветра и образованию водяных и снеговых мешков. Средством предотвращения этих опасных для оболочек явлений служит придание оболочке выпуклой формы (рис. 1.37, г) специальным раскроем полотнищ при изготовлении ПС. Выпуклая оболочка не нуждается в стенках. Нижний ее контур крепится непосредственно к основанию. Так возникают типичные очертания ПС воздухоопорного типа (рис. 1.37, д), в наиболее простых своих формах сводящихся к сферическим и цилиндрическим или к их комбинациям.

Пролет ПС отнюдь не беспределен и зависит от их формы (радиуса кривизны), нагрузки, неуравновешенной избыточным давлением, и прочности материала оболочки. При достаточно точном (возможно даже с помощью счетно-решающих устройств) регулировании избыточного давления воздуха в зависимости от изменения комбинаций внешних нагрузок, а также при применении сверхпрочных материалов оболочек он может быть доведен до нескольких сотен метров, а при использовании

тросового каркаса и нескольких километров. Однако в настоящее время рекордные пролеты оболочек без мягкого каркаса еще не достигли 75 м.

Полное заводское изготовление. ПС поступает на место установки полностью укомплектованным заводом-изготовителем и не требует производства никаких строительных работ, кроме планировки монтажной площадки (если это необходимо) и постановки анкеров.

Ряд зарубежных фирм (например, Бессоно во Франции, Крупп в ФРГ, Вако Коэки в Японии и др.) обладают набором ПС стандартных размеров, которые высылаются заказчику вместе с запрашиваемым комплекующим оборудованием.

Быстрота монтажа и демонтажа. Если не считать времени, необходимого для расчистки и планировки площадки, монтаж ПС воздухоопорного типа требует нескольких часов. За это время выполняются: разбивка контура сооружения, ввертывание или забивка анкеров, сборка каркасов шлюзов, раскладка оболочки, крепление ее к анкерам, подсоединение воздухопроводов, наполнение воздухом. Последняя операция длится 20—45 мин. Монтаж ПС на стационарном фундаменте, возводимом заранее, выполняется так же быстро. Какой бы большой ни была бы высота ПС, все монтажные работы производятся на уровне основания (пола) сооружения. Это в значительной мере способствует скорости монтажа и безопасности производства работ.

Трудозатраты на монтаж ПС колеблются в пределах 1,5—2,5 чел.-дня/100 м², тогда как эти же показатели для сборно-разборных зданий [3] при тех же

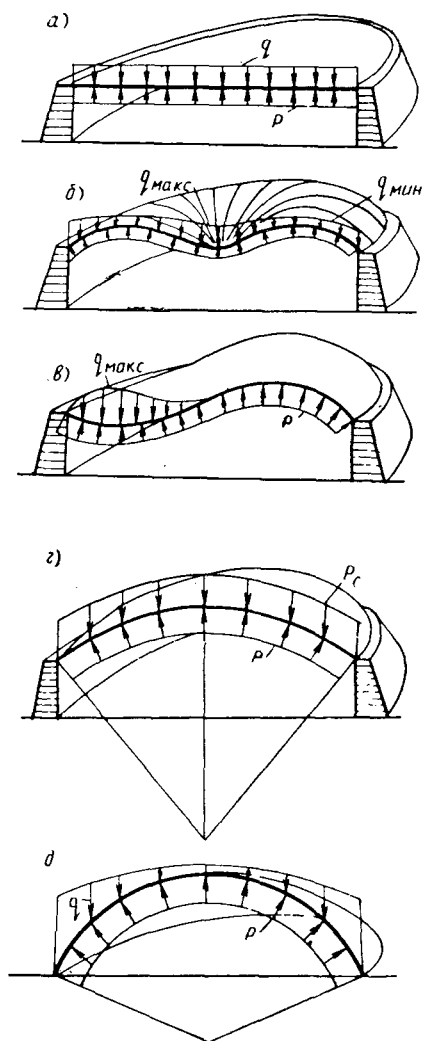


Рис. 1.37. Схемы взаимодействия внешней нагрузки и избыточного давления

примерно площадях (от 162 до 648 м²) составляют 35—65 чел.-дней/100 м², т. е. в 20 раз больше.

Многооборотчиваемость. Возможность многократного использования особенно важна в тех случаях, когда сооружения являются временными.

Воздухоопорные зернохранилища или склады для других видов сельскохозяйственной продукции можно сезонно использовать для хранения урожая на полях, железнодорожных станциях и в других необорудованных местах. Сооружения могут следовать с юга на север в страдную пору.

Как инвентарь строительных организаций пневматические тепляки можно последовательно применять на ряде объектов строительства.

Сезонное использование ПС на одном и том же месте также носит характер многократного оборота. Многочисленные спортивные и зрелищные сооружения летнего типа (плавательные бассейны, теннисные корты, театры, кино) могут быть на холодное время года перекрыты пневматическими оболочками, снимаемыми летом. Добавим, что сейчас села Украины обслуживает передвижной кинотеатр, зрительный зал которого площадью 156 м² перекрыт пневматическими конструкциями.

Светопроницаемость. Большинство современных материалов ПС можно изготавливать с различной степенью светопроницаемости. Оболочка может быть как совершенно светонепроницаемой, так и пропускающей свет в такой степени, что нужда в световых проемах отпадает.

Помещения, перекрытые оболочками с высокой светопроницаемостью можно освещать ночью наружными светильниками, что представляет определенные удобства, так как исключает необходимость подвески проводов и осветительной арматуры к оболочке или постановку под ней фонарных стоек (последнее крайне нежелательно в связи с опасностью повреждения оболочки при непредвиденном прекращении работы ВУ). Оболочки из светопроницаемых материалов, особенно многоцветные, освещенные изнутри, выглядят очень эффектно. Искусственным освещением межоболочечного пространства в линзовидных покрытиях, внутренняя оболочка которых обладает высокой светопроницаемостью, можно создать эффект ее отсутствия, что в ряде случаев выгодно для интерьерера.

Радиопрозрачность. Возможно, что именно проницаемость оболочек ПС воздухоопорного типа для ультракоротких радиоволн послужила толчком для их массового производства в США. С изготовления укрытий для антенн и начала свою деятельность первая фирма по производству пневматических конструкций «Бэрдэр», и лишь впоследствии, набравшись сил и опыта, перешла к производству ПС другого назначения. В настоящее время крупнейшие купола — обтекатели радиолокационных антенн, в том числе антенн космической связи, сделаны пневма-

гическими. К ним относятся, например, купола в Бохуме и Райстинге (ФРГ), в Андовере (США), в Ланньоне (Франция), имеющие диаметры соответственно 39, 49, 64 и 64 м.

Необходимо добавить, что такие виды атмосферных осадков, как снег или гололед, снижающие радиопрозрачность укрытия, на пневматических куполах отлагаются менее интенсивно, чем на куполах жесткой конструкции, в чем усматривается еще один довод в пользу ПС.

Избыточное давление воздуха под оболочкой. Необходимость постоянного поддержания избыточного давления воздуха является основным недостатком воздухоопорных ПС. Требуется непрерывная или периодическая подкачка воздуха; затрудняются вход и выход, въезд и выезд, требующие шлюзования или других мер предотвращения утечки воздуха; в помещении возникают «сквозняки» — струи наружного воздуха, шум вентиляторов.

В какой-то мере все эти неприятные явления стараются смягчить: со сквозняками борются путем отклонения струй нагнетаемого воздуха вверх (см. рис. 6.6), применяют глушители шума для вентиляторов, устраивают вращающиеся двери, шлюзы и др. Но само избыточное давление, разумеется, всегда остается, и необходимость его постоянного поддержания создает ряд трудностей. Падение избыточного давления в результате прекращения подачи электроэнергии или порчи вентиляторных установок влечет за собой опускание оболочки. В тихую погоду это не опасно ни для нее самой, ни для находящихся под ней людей, имущества или техники. Положение значительно ухудшается при сильном ветре: если при этом в помещении находятся крупные жесткие предметы с острыми углами, то разрыв оболочки неизбежен. Таким образом опасность представляет не столько само избыточное давление, сколько, наоборот, возможность его потери. Что же касается избыточного давления, как физиологического фактора, то в главе 4 доказывается его безвредность в диапазоне применяемых величин давления.

При проектировании, изготовлении и эксплуатации воздухоопорных ПС нет смысла стремиться к абсолютной герметизации оболочек. Во-первых, в связи с очень малыми ($0,0005 \div 0,005$ атм) величинами избыточного давления воздуха чувствительность оболочки к небольшим утечкам воздуха невелика. Во-вторых, внутренний объем помещения нуждается в вентиляции, т. е. в нормированном обмене воздуха.

Пути утечки воздуха из-под оболочки могут быть: поры в материале оболочки; отверстия, оставляемые иглой после шивки полотнищ; процесс шлюзования; вентиляционные, предохранительные и обратные клапаны; неплотности примыкания оболочки к опорному контуру и к обрамлению входных проемов. На фоне последнего все предыдущие пути утечки воздуха представляются столь незначительными, что их следует считать (учиты-

вая требования воздухообмена) скорее полезными, нежели вредными. По этой же причине не стоит придавать особого значения мелким прорывам, проколам и пробоинам в оболочке, ни, тем более, отверстиям от иглы (которые зачастую тщательно заклеивают герметизирующими лентами — трудоемкий процесс, сказывающийся на стоимости сооружения).

Малая толщина материала оболочки. Чем тоньше стенка, ограждающая помещение от внешней среды, тем труднее создать за ней климат, отличный от наружного. Малая толщина оболочки ПС служит первопричиной трудности обогрева помещения в холодное время года или охлаждения воздуха, перегретого в результате инсоляции, появления конденсата и наледей на внутренней поверхности оболочки.

Термическое сопротивление пневмооболочки ничтожно в связи с ее малой толщиной. Оно составляет примерно $0,01 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град} / \text{ккал}$, что, например, меньше аналогичного показателя для стены толщиной 1,5 кирпича в 60 раз.

Теплоемкость оболочки, вследствие малости ее массы, также незначительна. Поэтому создание перепада температур около 40° требует больших расходов тепла и применения отопительных установок с высокой теплопроизводительностью. Эта особенность ПС заставляет решать задачу отопления особыми методами. Наибольшее распространение получил способ подогрева нагнетаемого воздуха с помощью огневых калориферов (см. гл. 7). Возможен также непосредственный обогрев рабочих мест газовыми инфракрасными излучателями.

Эффективным средством повышения теплотехнических показателей ПС является применение двухслойных оболочек или специальных теплоизоляционных слоев, подклеиваемых к оболочке изнутри.

Оболочка малой толщины не в состоянии препятствовать перегреву под ней воздуха в результате инсоляции. Несмотря на то, что перегрев считается злом меньшим, нежели переохлаждение, бороться с ним труднее. Применение материалов со светлой наружной поверхностью, усиленная вентиляция пространства под оболочкой, использование двухслойных оболочек — все эти мероприятия позволяют несколько снизить перепад температур, вызванный перегревом. В южных странах (например, в Японии) рекомендуют непрерывную поливку оболочки водой с помощью специальной системы пластмассовых дождевальных труб, укладываемых сверх оболочки. Такой же прием был использован шведской фирмой «Барракуда» для охлаждения перекрытого пневматической оболочкой помещения кегельбана на московской выставке «Аттракцион-71». В особых случаях, когда температура воздуха под оболочкой должна быть равна или ниже температуры наружного воздуха, единственным средством может быть кондиционирование воздуха.

Капели от конденсата в ПС обычно не бывает, если оболочка

не имеет участков с отрицательной кривизной. Обильный конденсат (например, в перекрытии плавательных бассейнов) стекает на внутренний фартук. Мерами борьбы с конденсатом являются укладка на полу пароизолирующей пленки, а также применение материалов для оболочки, не абсолютно воздухонепроницаемых. Последний путь несколько парадоксален — выше указывалось, что материал оболочек должен быть воздухонепроницаемым. Однако в свете требований вентиляции помещения, т. е. обеспечения определенной кратности обмена воздуха, осуществляемой обычно через специальные вентиляционные отверстия (клапаны), возможность удаления испорченного воздуха через всю поверхность оболочки выглядит рациональной, тем более, что при этом решается проблема конденсата. Не исключено, что материи с повышенной воздухопроницаемостью станут основным материалом для оболочек плавательных бассейнов, которые, кстати, нуждаются в усиленной вентиляции.

Сроки службы. Пневматические конструкции недолговечны. Вряд ли дожило до наших дней первое ПС, которому было бы сейчас около 25 лет. Срок службы ПС редко превышает 10 лет, чаще он равен 5 годам. Синтетическое волокно, составляющее силовую текстильную основу оболочки, разрушается под действием ультрафиолетовой зоны солнечного спектра. Поэтому особо важную роль играет наружный защитный слой, наносимый на армирующую основу. Чем ниже его светопропускание, тем выше сохранность основы. Это положение часто входит в противоречие с требованиями освещенности и рождает ряд компромиссов (см. гл. 2).

Огнестойкость. Большинство материй и пленок, из которых делают оболочки ПС, относятся к категории самозатухающих. Практически это означает, что горение материала происходит только при наличии внешнего открытого пламени.

Проведенные авторами опыты воспламенению оболочки из сгораемого материала (прорезиненная хлопчатобумажная ткань) привели к неожиданным результатам: струя воздуха, вырывающаяся из прогоревшего отверстия, сбивала пламя, охватывавшее его края. Таким образом, сгораемый сам по себе материал, становясь конструктивным элементом — оболочкой воздухоопорного сооружения, — переходил в новое качество, становился трудносгораемым.

Более полные огневые испытания были проведены впоследствии Институтом строительных материалов (ГДР) с полусферической оболочкой диаметром 25 м (текстильная основа из полиамидного волокна, покрытая с обеих сторон ПВХ). Имитация пожара в одном, а затем в пяти очагах приводила к прогоранию и опусканию оболочки в первом случае на 19-й, во втором — на 8-й минуте [16, 26].

Эти испытания полностью подтвердили возможность отнесения ПС воздухоопорного типа к трудносгораемым конструкциям.

в соответствии с классификацией TGL 10685 (строительные нормы ГДР). Обязательным условием является непрерывная работа вентиляторов, устойчивость функционирования которых рассматривается как одна из мер противопожарной безопасности.

Ниже приводятся некоторые рекомендации, сделанные институтом в результате анализа выполненных огневых испытаний ПС.

Применение ПС допускается для покрытия производственных площадей и складов материалов определенных категорий пожарной опасности. Разрешается производство сварочных работ и пользование открытым пламенем при удалении от оболочки не менее 1 м, а также курение (если другие факторы этого не исключают). Заметим, что в СССР уже сделана первая попытка сварки стальных резервуаров под защитой сферической пневматической оболочки диаметром 26 м [1].

При использовании ПС в качестве помещений для временного пребывания больших масс людей (залы собраний, столовые, магазины, выставки) исходят из того, что при возникновении пожара имеется не менее 6 мин для эвакуации. Число посетителей, зависящее от размеров сооружения, рекомендуется ограничить 300. Норма общей ширины выходов устанавливается в 80 см на 100 чел. Отсутствие дверных порогов, применение безосколочного остекления дверей, прикрепление сидений к полу, устройство эстрады и декораций из трудногораемых материалов — таковы предложения для внесения в строительные нормы на проектирование общественных сооружений из воздухоопорных оболочек.

5. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, АРХИТЕКТУРА, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Рассмотренные особенности ПС воздухоопорного типа, подтвержденные отечественным и зарубежным опытом, позволяют указать примеры эффективного их применения в строительстве, опуская такие обширные области техники, как авиация и воздухоплавание, космонавтика и акванавтика, водный и автомобильный транспорт, радио и электроника. К ним относятся:

а) склады и хранилища: промышленной продукции и сырья, сельскохозяйственных продуктов, кормов и удобрений, строительных материалов, воды и жидкого топлива;

б) временные сооружения: выставочные (рис. 138, а), культурно-просветительные — лекционные залы, клубы (рис. 1,38, б), торговые, зрелищные (театры, кино, цирки), питания (столовые, кафе, рестораны), производственные, медицинские, различного назначения при стихийных бедствиях, катастрофах, военных действиях и т. п.;

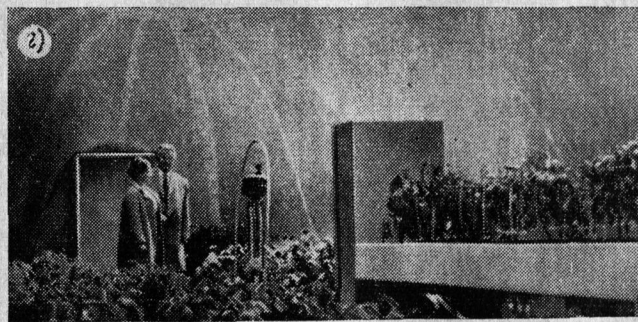
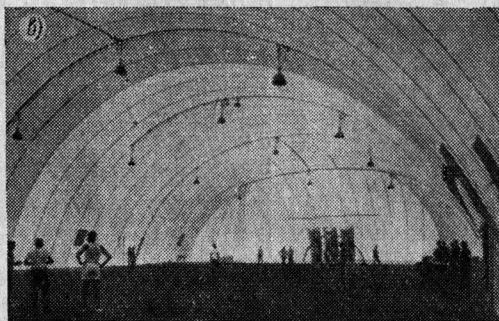
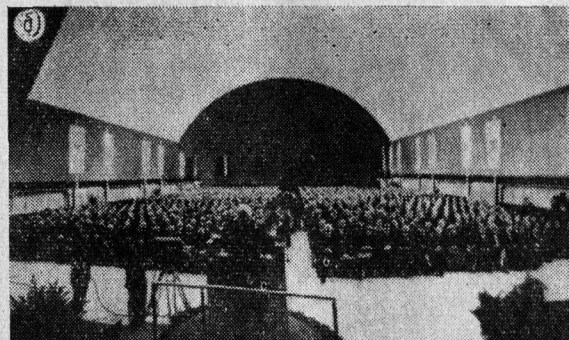
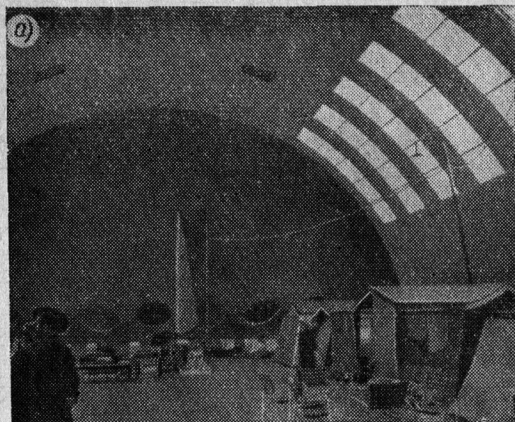


Рис. 1.38. Примеры использования ПС воздухоопорного типа

а — выставка туристического и спортивного снаряжения (ГДР); *б* — зал собраний (ФРГ); *в* — спортзал (Швейцария); *г* — теплица (СССР)

в) мобильные здания: станции оперативного обслуживания техники, киностудии, госпитали и медпункты, выставки, кинотеатры и клубы;

г) покрытия спортивных сооружений: над теннисными кортами, рингами, помостами, игровыми площадками (рис. 1.38, в), плавательными бассейнами, беговыми и ледяными дорожками,

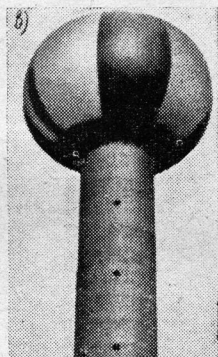


Рис. 1.39. Тепляки для зимних строительных работ

а—для кровельных работ на строящемся здании (Сыктывкар, Коми АССР); б—то же, интерьер; в—для ствола телебашни (Дрезден, ГДР)

легкоатлетическими секторами, хоккейными полями, конноспортивными манежами и даже над стадионами в целом;

д) стационарные производственные помещения: цехи, мастерские, гаражи, ангары, лаборатории и др.;

е) сооружения специального назначения: обтекатели антенн радиолокаторов, надувные антенны, теплицы (рис. 1.38, г), оранжереи;

ж) гидротехнические сооружения: надувные и наливные плотины;

з) производство строительных работ: подъемники для монтажа пространственных конструкций (куполов, сводов, складов), тепляки (рис. 1.39) для зимних строительного-монтажных работ (включая укрытие всего строящегося сооружения), опалубка для конструкций из бетона, железобетона, армоцемента и напыляемых пластмасс;

и) испытание строительных конструкций: нагружающие приспособления для элементов пространственных конструкций, датчики ветрового давления.

Пневматические сооружения у нас в стране еще не приобрели признания в сфере архитектуры. В какой-то мере их порочат такие свойства, как недолговечность, отсутствие капитальности и вообще некоторая, как говорят, «несерьезность». Тем не менее этот новый вид строительных конструкций довольно решительно проникает в область архитектуры.

Наиболее интересные композиции с использованием пневматических конструкций — это выставочные павильоны. В последнее десятилетие редкая международная выставка обходится без того, чтобы внимание ее посетителей не было привлечено какими-нибудь эффектными пневмосооружениями.

Впервые в Европе пневматический павильон появился на Всемирной выставке 1958 г. в Брюсселе. Это был сферический купол, на внешней поверхности которого, как на гигантском глобусе, были нанесены трассы самолетов авиационной компании. Идея глобуса была использована и в «Пентадоме» — выставочном комплексе из пяти пневматических куполов — большого диаметром 50 м, окруженного четырьмя малыми диаметром 33 м.

Вскоре творческая фантазия архитекторов, обратившихся к пневматическим конструкциям, нашла новые формы, отличающиеся от элементарных сферических. В 1960 г. ряд столиц южноамериканских государств посетила передвижная выставка, размещенная в пневматической оболочке (рис. 1.40, а). Затем она пересекла океан, появилась в Азии, Африке и Европе. Ее спроектировал Виктор Ланди, которого, пожалуй, следует считать пионером архитектуры пневматических сооружений, поскольку он уже не следовал, подобно своим предшественникам, естествену мыльного пузыря, а постарался привести форму в соответствие не только функциональным нуждам, но и некоторому архитектурному замыслу.

Тем же Ланди спроектировано несколько пневматических куполов над закусочными на территории Нью-Йоркской выставки 1964 г. Они были скомпонованы из нескольких сфер в виде ягоды малины или ежевики (рис. 1.40, б). Оболочки образовывали навес, под которым размещались прилавки и столики.

Всемирная выставка ЭКСПО-70 в Осаке изобиловала пневматическими сооружениями (рис. 1.41). Арх. Ю. Мурата спроектировал грандиозный выставочный павильон «Фудзи» из 16 пневмоарок, которые, располагаясь вплотную друг к другу, об-

разовали круглое в плане помещение диаметром 50 м при седловидном боковом фасаде высотой 35 м в центре и 50 м в торцах. Павильон поражает размерами и формой, почему, очевидно, и именуется «Посланием в XXI век». Плавающий театр того же автора (см. рис. 1,36, б) — один из редких примеров натяжения

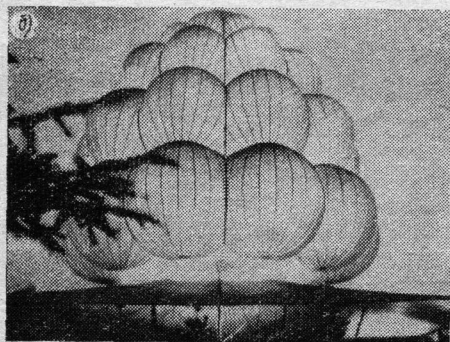
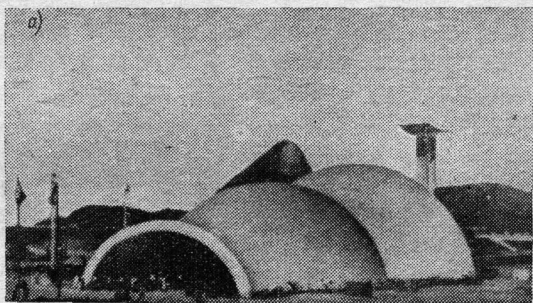


Рис. 1.40. Выставочные сооружения арх. В. Ланди

а — передвижной павильон двух-
слойной конструкции; *б* — пере-
крытие над закусочной

пневмооболочек с помощью вакуума в межоболочечном пространстве. Павильон США выполнен в виде громадной воздухоопорной оболочки, перекрывающей овальный план размером $142 \times 83,5$ м. Всего на ЭКСПО-70 насчитывалось более 20 пневматических конструкций.

Не менее интересна пневматическая архитектура спортивных сооружений, где мягкие оболочки используются особенно широко. Как никогда ранее близка к осуществлению давнишняя мечта строителей стадионов — полное перекрытие спортивной арены вместе с трибунами. Такие проекты, как, например, перекрытие известного лондонского стадиона Уэмбли или Атланта (США), делают серьезную заявку на реальное осуществление (рис. 1.42).

Воздухоопорные оболочки над плавательными бассейнами позволяют при условии подогрева воды превратить их из сезонных в действующие круглый год. У нас в стране имеется много

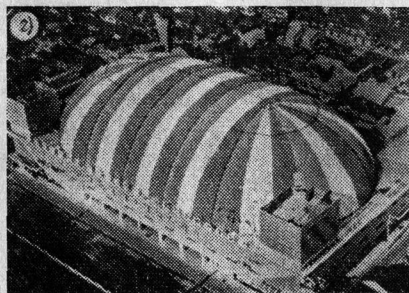
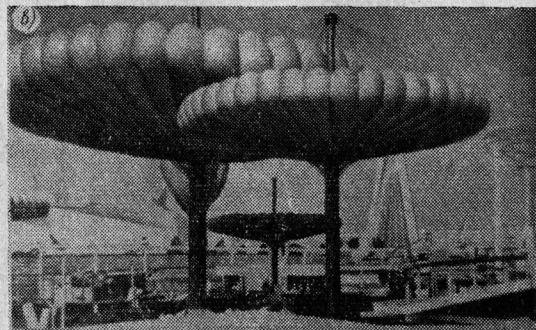
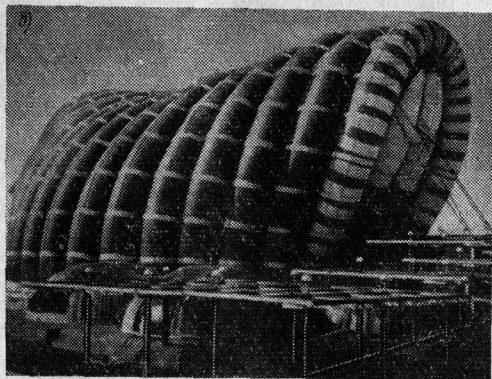
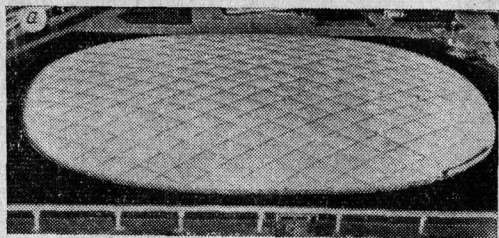


Рис. 1.41. Пневматические сооружения в Осаке

a — павильон США; *б* — павильон Фудзи; *в* — зонтичные навесы; *г* — оболочка размерами $100 \times 57 \times 21$ м над городским кегельбаном

открытых бассейнов, ждущих своей реконструкции с применением мягких оболочек. Первая попытка авторов применения их в условиях Подмосквья (см. гл. 7) при морозах до 20—25° дала превосходные результаты. Интерьер бассейна сильно выигрывает

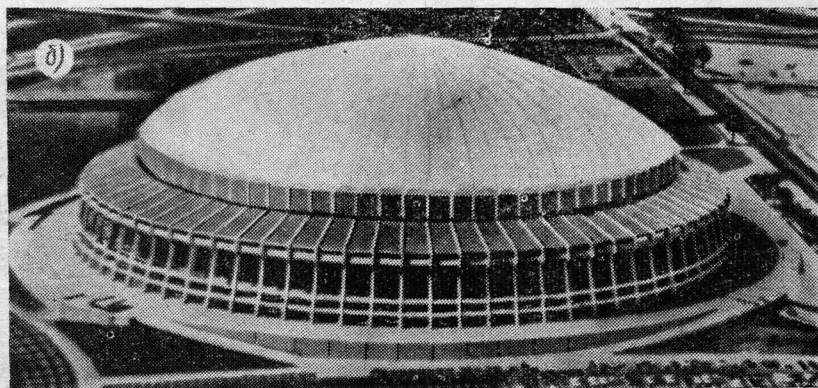


Рис. 1.42. Проекты пневматических оболочек, перекрывающих стадионы
а — Уэмбли (Англия); б — Атланта (США)

ет при устройстве верхних световых полос, комбинируя которые со светопроницаемыми участками можно создать интересные сочетания света и тени (рис. 1.43).

Пневматические сооружения сейчас смело проникают в область промышленной архитектуры. Известны примеры исполь-

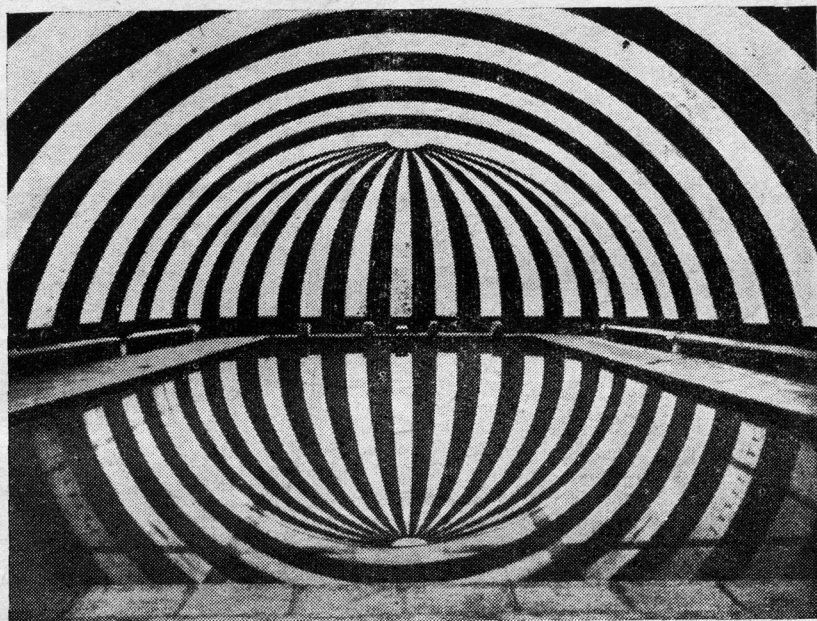


Рис. 1.43. Интерьер плавательного бассейна, перекрытого оболочкой со световыми полосами

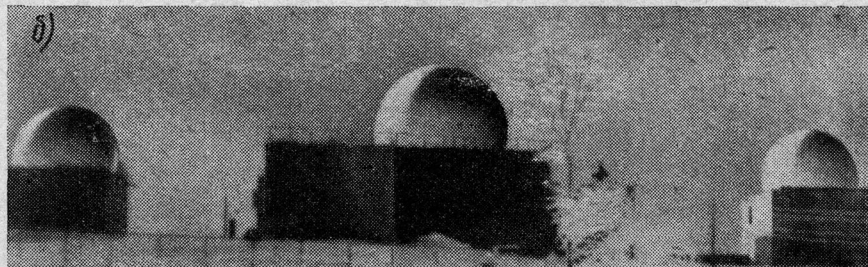
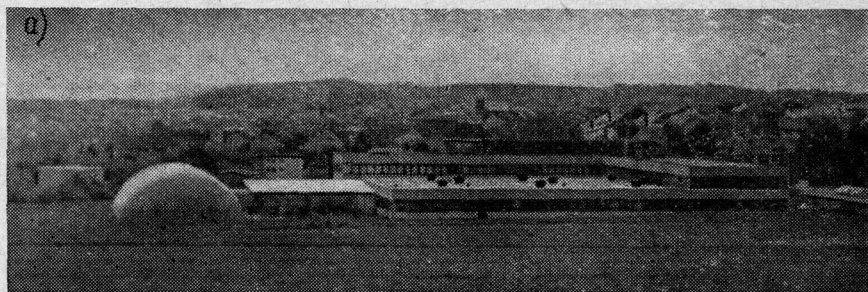
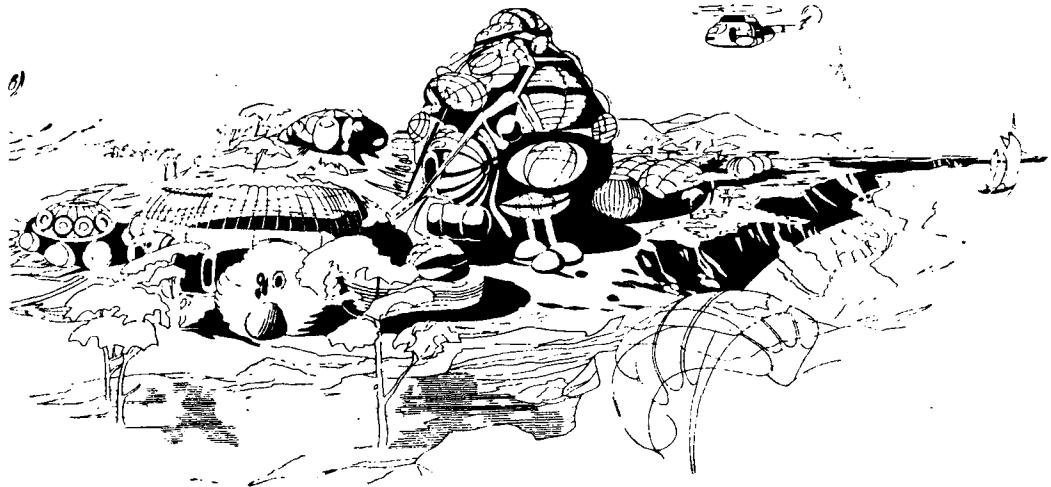
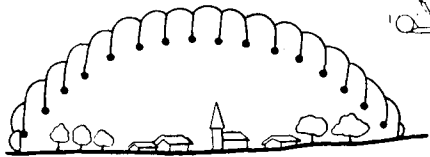
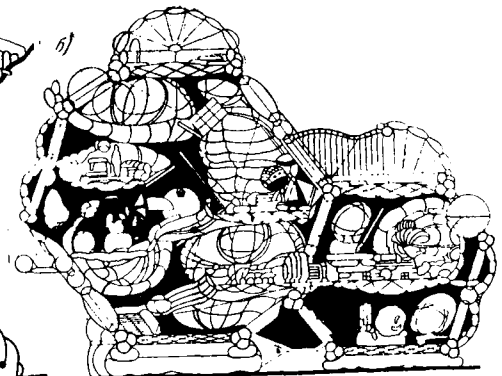
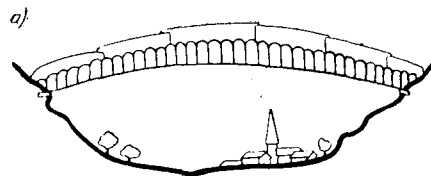


Рис. 1.44. Сочетание ПС с капитальными зданиями

а — склад изделий промышленного предприятия; *б* — укрытия радиолокационных антенн



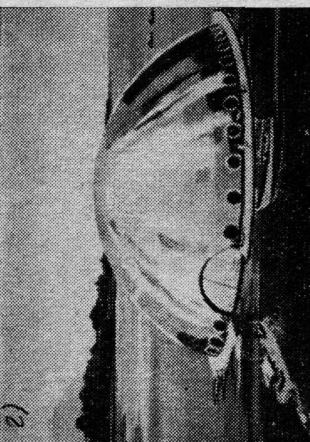
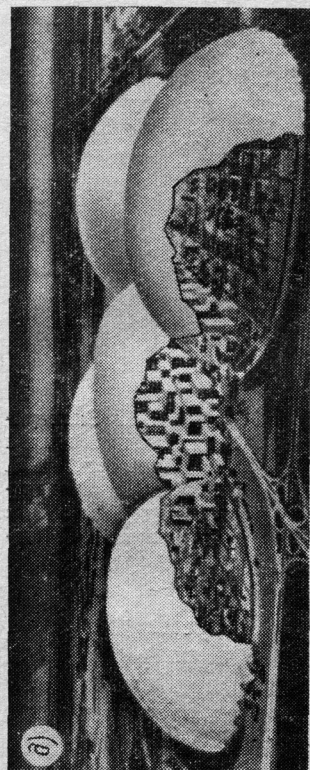


Рис. 1.45. Проекты пневматических сооружений будущего

а — пневматическое перекрытие над поселком в долине (У. Ньюмарк); б — жилой дом «Днодон» арх. Ж.-П. Юнгмана; в — поселок из «Днодон» на берегу; г — плавающее портовое сооружение; д — перекрытие над городом

зования пневмооболочек в качестве заводских лабораторий (см. рис. 1.32, а), складов готовой продукции крупных предприятий (рис. 1.44, а), цехов изготовления пневмооболочек и т. п. Очень распространены, даже традиционны, укрытия радиолокационных антенн в виде пневмоконструкций сферической формы (рис. 1.12, б; 1.44, б). Эти сооружения довольно хорошо вписываются в общезаводской архитектурный ансамбль, не диссонируют с ним и даже придают ему некоторую завершенность, выделяясь современными формами. В более удаленной перспективе рисуются пневматические покрытия над поселками и городами (рис. 1.45, а, б). В отличие от перекрытий стадионов — задачи, почти обеспеченной необходимыми материалами, покрытия над поселками или, тем более, городами требуют новых материалов и новых конструктивных решений. Например, осуществление опубликованного проекта пневматического покрытия над центральной частью Нью-Йорка — Манхаттаном диаметром 3,2 км и высотой около 500 м возможно только при создании такой «материи», где силовой основой будет металлическая сетка, а светопропускаемым наполнителем — небьющееся стекло [5].

Таким образом, одна из перспектив дальнейшего развития ПС связывается с возможностями перекрытия пролетов километрового диапазона и решения, в связи с этим, ряда градостроительных проблем.

Другая тенденция, заметно

проявившаяся в последние годы, — проникновение ПС в область капитального строительства. Если на первых порах ПС рассматривались, прежде всего, как «пневматические палатки», то сейчас имеется много примеров (некоторые из них уже упоминались) использования их для целей, которые раньше достигались строительством капитальных зданий. Не приходится сомневаться в том, что в ближайшие годы под пневматическими оболочками будут помещаться цеха некоторых заводов.



Рис. 1.46. Экспериментальный жилой особняк арх. Ф.-Л. Райта на Международной выставке жилища в Нью-Йорке

Некоторые перспективы использования ПС усматриваются в жилищном строительстве. Пока что бесспорна роль ПС, как помещений для временного пребывания людей при особых обстоятельствах. Однако сейчас уже ищутся пути решения проблемы жилища за счет применения ПС.

Интересно, что пионером в этом новаторстве выступил 90-летний патриарх западной архитектуры Фрэнк-Ллойд Райт. Его проект — квартира в виде двух сообщающихся полусферических куполов (рис. 1.46) — был осуществлен в 1959 г. [21]. Вряд ли это здание следует расценивать выше, чем просто эксперимент. В предложенном виде оно как жилище перспективы не имеет. Сейчас вообще нет ни одного жилого дома пневматической конструкции, однако экспериментальное проектирование непрерывно ведется. Следует упомянуть очень смелый экспериментальный проект французского архитектора Ж.-П. Юнгманна «Диодон» — проект жилого дома, где все надувное — несущие конструкции, ограждения, перекрытия, перегородки и даже мебель [22] (рис. 1.45, б, в).

Совсем по-другому решает эту задачу австралийский архитектор И. Г. Поль [23]. Его проект — воздухоопорный десятиэтажный дом с наружными стенами из мягкого светопропускаемого материала. Он предлагает поддерживать междуэтажные перекрытия давлением воздуха, нарастающим от верхнего этажа к нижним. При весе каждого перекрытия с полезной нагрузкой, принимаемом автором в 700 кгс/м^2 , давление воздуха в пер-

вом этаже составит 7000 кгс/м^2 , т. е. $0,7 \text{ ати}$. В этом — слабое место проекта, так как при выходе людей из нижнего этажа такого дома потребуются не только шлюзование, но и, в соответствии с водолазными таблицами, двухминутная декомпрессия.

Воздухоопорные оболочки стоят одинаково хорошо на земле и на воде. Это их свойство порождает ряд проектов плавучих ПС, предназначенных как для нужд судоходства, судоре-

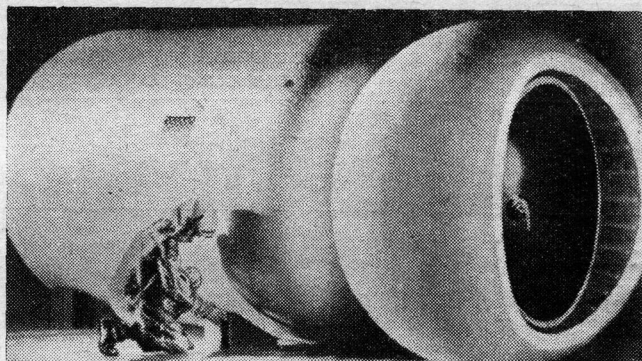


Рис. 1.47. Пневматический домик для двух космонавтов на Луне

монта и портового хозяйства, так и для водных спортивно-туристических целей. Вода, накачиваемая в мешки, расположенные по периметру оболочки, обеспечивает и противовес подъемной силе воздуха, и герметизацию контура (рис. 1.45, з).

ПС воздухоопорного типа, будучи помещениями, атмосфера которых изолирована от внешней и отличается от последней величиной давления (а иногда и составом), представляют собой идеальное решение проблемы жизни человека во враждебной ему среде — в космосе, под водой, на иных планетах [20], в отравленной атмосфере и т. п. (рис. 1.47). Перспективы применения для этих целей ПС поистине безграничны.

6. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ

Специфика технико-экономических вопросов, возникающих при оценке выгодности применения ПС, не дает возможности прямого сопоставления их стоимости со стоимостью, например, капитальных или даже сборных и сборно-разборных сооружений. Наслоение таких частных, как долговечность, эксплуатационные расходы, оборачиваемость, транспортные расходы, комфорт и др., сильно осложняет экономический анализ.

Положение усугубляется еще и тем, что в стране в настоящее время еще не организовано широкое промышленное производство пневматических конструкций. Можно привести данные о стоимости лишь опытных образцов, которая, естественно,

завышена за счет неизбежных расходов на освоение нового вида продукции (табл. 1). Имеются также стоимостные показатели продукции некоторых зарубежных фирм, указанные в проспектах или контрактах, заключенных с различными организациями СССР (табл. 2). Ценность этих показателей не столько в их абсолютной величине, сколько в том, что они отражают экономику серийного изготовления, которое отличается от опытного значительно меньшим удельным весом трудозатрат в общей стоимости сооружения.

Таблица 1

Технико-экономические показатели оболочек опытных ПС отечественного производства

Марка ПС	Размеры в м (длина×ширина× ×высота)	Полезная площадь, в м ²	Кубату- ра в м ³	Общая стои- мость в руб.	Удельная стоимость	
					руб/м ²	руб/м ³
УПС-16-01	32×16×8	456	2680	15 677	34—43	5—85
УПС-16-02	32×16×8	456	2680	13 096	28—72	4—88
УПС-12	(24+12)× ×12×6	400	1810	12 651	31—64	7—00
УПС-8	16×8×4	114	335	3 714	32—58	11—10
Тепляк ЦНИИСК	56,7×11,5×4,4	650	1900	12 000	18—48	6—32

Если основным комплектом ПС, как предлагалось выше, считать «оболочка+металлоконструкции шлюзов и анкеров+ВУ», то относительная стоимость перечисленных компонентов составит, соответственно, 70—80; 15—20; 6—15%.

Стоимость дополнительного оборудования ПС составляет по отношению к стоимости основного комплекта, принимаемой за 100%: отопительных установок — от 70% для малых ПС (менее 100 м² площади пола) до 20% для средних и больших (более 1500 м²) [14]; каркасов, поддерживающих оболочку на время ввода и вывода крупногабаритной техники, — 100%; полотнище мягкого пола — 15—18%.

Вставки, удлиняющие оболочку, оцениваются по стоимости основной оболочки пропорционально увеличению ее поверхности.

Стоимость строительно-монтажных работ оценивается примерно в 10—15% стоимости основного комплекта.

Эксплуатационные расходы складываются из стоимости электроэнергии, затрачиваемой на круглосуточное поддержание избыточного давления воздуха под оболочкой, и расхода топлива для обогрева помещения в рабочие часы холодного времени года. В первом случае при устанавливаемой обычно мощности вентиляторной установки около 4 квт годовой расход составит несколько сотен рублей. Во втором случае подсчет производится в зависимо-

Технико-экономические показатели зарубежных ПС серийного производства

Страна	Фирма	Размеры в м (длина×ширина×высота)	Полезная площадь в м ²	Кубатура в м ³	Отпускная цена в руб.	Удельная цена	
						руб/м ²	руб/м ³
Франция	«Бессоно»	12×6×3	64	157	2 260	35—30	14—40
		24×12×6	257	1 260	7 820	30—40	6—20
		36×17×8,5	550	3 840	14 900	27—10	3—88
		40×20×9	714	5 820	16 900	23—70	2—94
		50×25×10	1116	11 350	20 300	18—20	1—79
Япония	«Вако Коёки»	19,2×9,6×4,8	164	643	2 580	15—70	4—02
		27,2×13,6×6,8	330	1 830	4 620	14—00	2—52
		40 ×11,6×5,8	435	2 120	4 900	11—30	2—31
	Другие фирмы	Средние данные				От 12—80 до 22—30	—
ФРГ	«Крупп Баубетрибе»	21,1×11,1×5,6	208	835	4 800	23—10	5—75
		26,5×12,7×6,4	302	1 310	5 700	18—90	4—35
		31,2×15 ×7,5	420	2 580	7 200	17—16	2—79
		35,9×15,9×8	517	3 380	8 900	17—20	2—64
		39,6×18,3×9,2	653	4 900	10 400	15—92	2—12
		44,9×19,9×10	809	6 620	12 800	15—84	1—93
Англия	RFD	30×12×6	330	1 640	5 000	15—20	3—05
	«Гурук»	45×18×9	780	5 500	10 080	13—60	1—83

Страна	Фирма	Размеры в м (длина×ширина×высота)	Полезная площадь в м ²	Кубатура в м ³	Отпускная цена в руб.	Удельная цена	
						руб/м ²	руб/м ³
Италия	«Тесситур Карло Майокки»	40×16×9	640	4 700	5 600	8—75	1—19
США	«Сидэйр»	—	1170	12 000	22 700	19—40	1—90
	Другие фирмы	Средние данные				От 9—70 до 14—50	—
Швеция	«Барракуда»	35×17,2×8	540	3 600	9 592	17—80	2—66
ГДР	Комбинат в Нойгерсдорфе	20×20×10	310	2 330	17 199	55—00	7—39
		32×20×10	550	4 430	21 632	39—10	4—89
		45×20×10	810	6 700	25 652	31—50	3—83
		57×20×10	1050	8 800	30 081	28—50	3—42
		70×20×10	1310	11 100	34 023	25—90	3—07

Примечание. Цены переведены в рубли по курсу: 90 коп. за 1 доллар США; 22,5 коп. за 1 марку ФРГ; 31,2 коп. за 1 марку ГДР; 18,3 коп. за 1 французский франк; 0,14 коп. за итальянскую лиру; 2 руб. 52 коп. за 1 английский фунт; 17,44 коп. за 1 шведскую крону.

Калькуляция стоимости оболочек опытных ПС

Статьи расхода	Марка пневмоооружения								
	УПС-16			УПС-12			УПС-8		
	руб.	руб/м ²	%	руб.	руб/м ²	%	руб.	руб/м ²	%
1. Материалы (А)	4 855	10—65	36	4 612	11—53	36	1407	12—34	38
2. Основная зарплата (Б)	2 843	6—22	21	2 646	6—62	21	753	6—61	20
3. Цеховые расходы	2 501	5—48	19	2 315	5—78	18	663	5—81	18
4. Общезаводские расходы	1 404	3—08	10	1 306	3—27	11	372	3—26	10
Заводская себестоимость	11 607	25—43	86	10 879	27—20	86	3195	28—02	86
5. Внепроизводственные расходы	218	0—48	2	206	0—52	2	59	0—52	2
Полная себестоимость	11 825	25—91	88	11 085	27—72	88	3254	28—54	88
6. Премии 1%	118	0—26	1	111	0—28	1	33	0—29	1
7. Накопления 13%	1 553	3—40	11	1 455	3—64	11	427	3—75	11
Отпускная цена	13 496	29—57	100	12 651	31—64	100	3714	32—58	100

сти от числа рабочих часов в году, часового расхода и стоимости применяемого топлива. Расходы на отопление составляют несколько тысяч рублей в год.

Из данных табл. 4 видно, что отпускная цена 1 м² полезной площади зарубежных ПС колеблется в пределах (округленно) от 15 до 25 руб. Низкая стоимость ПС итальянской фирмы «Тесситурра Карло Майокки» объясняется дешевизной материала оболочки — армированной пленки «вайвлок», которая, однако, как показал опыт эксплуатации, не обладает прочностью, достаточной для перекрытия пролетов более 12 м. Несколько завышенная стоимость ПС, изготавливаемых Текстильным и швейным комбинатом в Нойгерсдорфе (ГДР), вызвана, по всей вероятности, особенностями валютных пересчетов.

В рамках продукции одной и той же фирмы заметно снижение стоимости 1 м² полезной площади при увеличении размеров сооружения. Еще заметнее это снижение при рассмотрении стоимости 1 м³ помещения.

Ценообразование оболочки — наиболее дорогой части ПС — наглядно прослеживается по калькуляционным данным, приведенным в табл. 3. Данные таблицы позволяют сделать некоторый прогноз путей снижения стоимости оболочки. Если обозначить А — стоимость материалов, а Б — основную зарплату, то ценообразование будет иметь следующий характер:

1. Материалы	А
2. Основная зарплата	Б
3. Цеховые расходы	0,88 Б
4. Общезаводские расходы	0,49 Б
<hr/>	
Заводская себестоимость	А+2,37 Б
5. Внепроизводственные расходы	0,02(А+2,37 Б)
<hr/>	
Полная себестоимость	1,02 А+2,42 Б
6. Премии	0,01(1,02 А+2,42 Б)
7. Накопления	0,13(1,02 А+2,42 Б)
<hr/>	
Отпускная цена	1,16 А+2,75 Б

Средние по трем оболочкам единичные стоимости по данным табл. 5 составляют: А=11,20 руб/м²; Б=6,44 руб/м²; отпускная цена Ц=30,76 руб/м².

Резкого снижения стоимости материалов (А) в ближайшие годы не ожидается. Тем не менее можно полагать, что при цене материала оболочки около 2 р. 50 к. за 1 м² она дойдет до 7 р. 50 к. за 1 м² полезной площади ПС. Существенно могут быть снижены трудозатраты за счет освоения производства и рационализации конструкции. Из табл. 3 видно, например, что второй экземпляр оболочки УПС-16 (индекс 02) обошелся дешевле первого (индекс 01) на 2581 руб. Основная часть этой экономии (2300 руб.) пришлось на зарплату и накладные расходы. Таким

образом расходы по этим позициям на втором изделии сократились на 22%.

Следует также учесть, что швы оболочек сооружений серии УПС делались клеешовными вместо повсеместно применяемых в настоящее время прошивных. Замена весьма трудоемких клеешовных швов прошивными приведет к резкому снижению трудозатрат и к соответствующему падению начислений на зарплату. Стоимость расходуемых материалов при этом снизится примерно на 10%, что видно из следующих калькуляционных данных на 100 м² оболочки, составленных предприятием РТИ (в % от общей стоимости материалов):

прорезиненная материя (125 м ²)	80%
ленточная материя (20 м ²)	8%
клей 4508 (10 кгс)	1%
лейконат (1 кгс)	1%
прочие материалы	10%

Итого 100%

Можно ожидать, что при серийном производстве с применением только прошивных швов расходы на зарплату могут быть снижены вдвое, а коэффициент 2,75, отражающий различные начисления на зарплату, доведен по меньшей мере до 2,50. Тогда отпускная цена 1 м² полезной площади оболочки составит: $1,16 \times 7,50 + 2,50 \times 3,22 = 8,70 + 8,05 = 16,75$ руб.

Возвращаясь к приведенным выше данным об относительной стоимости оболочки в общей стоимости ПС, определим стоимость 1 м² полезной площади, перекрываемой воздухоопорным сооружением, суммой около 20 руб. Она приближается к ценам на ПС зарубежных фирм, приведенным в табл. 4.

Таблица 4

**Технико-экономические показатели брезентовых палаток
серийного производства**

№ палатки	Размеры в м (длина×ширина×высота)	Полезная площадь в м ²	Кубатура в м ³	Общая стоимость в руб.	Удельная стоимость		Общий вес в т
					руб/м ²	руб/м ³	
2	17×11,5×6	195	840	8 100	41—50	9—60	2,4
6	35×9,9×6	346	1770	34 900	101—00	19—70	—
15	9×8×3,5	72	198	6 600	92—00	33—30	2,4
11	20,4×5,1×4,5	104	390	4 800	46—10	12—10	1,4
12	30,6×5,1×4,5	156	585	6 800	43—50	11—60	2,75

Вряд ли есть смысл сравнивать экономические показатели ПС с аналогичными для сооружений из традиционных материалов, не обладающими рядом преимуществ ПС, которые могут не иметь

стоимостного выражения. Тем не менее приведем результаты подсчетов американских инженеров применительно к покрытию над гимнастическим залом площадью 1170 м². Стоимость пневматической конструкции равна 2 долл./кв.фут. Покрытие из обычных конструкций обходится в 16—17 долл./кв.фут. [15].

Наиболее близки к пневматическим оболочкам обычные брезентовые палатки, данные о которых приведены в табл. 4. Палатки дороже, чем ПС, нуждаются в наружных и внутренних стойках, менее устойчивы при действии ветра и требуют периодического удаления снега зимой. С пневматическими сооружениями они могут конкурировать лишь при очень малых пролетах (до 5—6 м) и в условиях полного отсутствия источников электроэнергии.

Для сравнения приводятся аналогичные показатели для передвижных и сборно-разборных зданий временного построечного назначения (табл. 5).

Таблица 5

Технико-экономические показатели передвижных и сборно-разборных унифицированных типовых секций (УТС) по [3]

Наименование, серия	Полезная площадь в м ²	Кубатура в м ³	Общая стоимость в руб.	Удельная стоимость		Общий вес в т
				руб/м ²	руб/м ³	
Автофургоны, 420-01	22	55	1 980	89	35,7	4,1
Контейнеры:						
420-02	22,8	57	1 880	82,6	33	3,6
420-03	22	70	2 310	105	32,8	6,3
420-04м	14,4	36	1 160	80,5	32,2	4,5
420-046	63,4	150	4 550	71,3	28,5	13,8
420-136	16,7	38	1 710	102	44,3	3,2
420-13м	7	16	900	128	58,2	1,5
Сборно-разборные здания:						
420-06	270	1135	6 570	25	6	8,4
420-08	267,3	1125	6 340	23,7	5,6	4,5
420-09	270	1135	11 900	44	10,5	3,4
420-12	270	1135	5 400	20	4,8	3,5

МАТЕРИАЛЫ ОБОЛОЧЕК ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Материалы, предназначенные для изготовления оболочек ПС, должны обладать достаточной прочностью, воздухопроницаемостью и мягкостью.

Прочность гарантирует восприятие возникающих в оболочке усилий растяжения. Воздухопроницаемость предотвращает фильтрацию воздуха через оболочку, давая возможность поддержания в ней требуемого избыточного давления. Мягкость обеспечивает условия эффективного использования физико-механических свойств материала оболочки, а также легкого свертывания, развертывания и упаковки без изломов и растрескивания материала.

Требованию мягкости отвечают два различных материала — полимерные пленки и текстильные ткани. Однако в своем первоначальном виде они для изготовления оболочек ПС мало пригодны: пленки недостаточно прочны, ткани пропускают воздух.

Материал прочный, и воздухопроницаемый можно получить, либо армируя пленки прочной сеткой или отдельными нитями, либо накладывая полимерную пленку (пасту) на ткань. Эти два различных пути иногда в конечном счете приводят к схожим результатам и дают два основных материала ПС — армированные пленки и воздухопроницаемые ткани.

Армированные пленки — материал, в котором функция восприятия усилий делится между самой пленкой и армирующим слоем в самых различных соотношениях. Они изготавливаются путем дублирования (склейка, сварка) одного или двух слоев пленки с армирующим слоем.

Воздухопроницаемые ткани — условное название материала, в котором роль силовой основы играет ткань, пропитанная или покрытая полимерным слоем, придающим ей свойства воздухопроницаемости, а также защищающим ее от разрушающего действия факторов светопогоды или механических повреждений. Прочность тканей может быть очень высокой, тем более, что такие материалы часто делают двух- и многослойными.

Материалами для оболочки ПС могут служить тонкие металлические листы, в том числе фольга.

Другие требования к материалам вытекают из назначения сооружения, особенностей его эксплуатации и могут быть чрезвычайно разнообразными. Например, в некоторых случаях предъявляются требования проницаемости для света и радиоволн, ограничения возгораемости и деформативности, определенных адгезионных свойств поверхностной пленки в связи с особенностями стыковки полотнищ; стойкости к химически активным веществам и средам и др.

Требования к долговечности материала определяются предполагаемыми сроками службы проектируемого ПС и экономическими соображениями с учетом существующей номенклатуры материалов. Многообразие условий использования и эксплуатации сооружений, естественно, не позволяет найти материал, отвечающий всем требованиям практики; поэтому имеются материалы как общего, так и целевого назначения, разрабатываемые по специальным требованиям.

7. ОДНОРОДНЫЕ ПЛЕНКИ

Отечественная химическая промышленность выпускает пленки различных видов и назначения. Наиболее дешевые из них полиэтиленовые (полиэтилен, полипропилен).

Общим характерным свойством пленок являются воздухопроницаемость, регулируемая в широких пределах светопроницаемость, высокие тепло- и морозостойкость, биологическая и химическая стойкость. Основным недостатком является низкая стойкость к факторам светопогоды, ограничивающая срок службы оболочек, и сравнительно малая прочность. Кроме того, пленки в большинстве своем высокодеформативны.

Ниже приводятся характеристики основных видов пленок, применяемых для изготовления оболочек ПС (табл. 6).

Полиэтиленовые пленки. Толщина пленок колеблется от 0,035 до 0,3 мм, ширина доходит до 1400 мм (в отдельных случаях до 3200 мм) при длине до 300 м. Пленки характеризуются высокой тепло- и морозостойкостью, позволяющей эксплуатировать изделия в температурном интервале от -60 до $+80^{\circ}\text{C}$, хорошей свариваемостью, а также стойкостью к большинству агрессивных веществ.

При проектировании оболочек из полиэтиленовой пленки приходится учитывать ее значительную деформативность и текучесть под нагрузкой, превышающей 55% предела текучести [9]. Под воздействием атмосферного кислорода, тепла, солнечной радиации многие эксплуатационные свойства пленки ухудшаются: прочность и прозрачность снижаются, жесткость повышается. Для длительного сохранения свойств в полиэтиленовые пленки вводят стабилизаторы, например газовую канальную сажу.

Полиэтиленовые пленки применяются для покрытия парников и теплиц, строительных тепляков, облицовки оросительных кана-

Физико-механические свойства полимерных пленок

Показатели	Поливинилхлоридная	Полиолефиновые			Полиэфирные			
		полиэтилен высокого давления	полиэтилен низкого давления	полипро- пилен	поликар- бонат	полиэтилентерефталат		
						лавсан (СССР)	майлар (США)	мелинекс (Англия)
Плотность в $г/см^3$. . .	1,4	0,92	0,94—0,95	0,91	1,2	1,38	1,36—1,38	1,38
Прочность на разрыв в $кгс/см^2$	280—300	120—160	200—300	350—500	600—700	1460—1700	1800—2000	1600—1800
Удлинение при разрыве в %	200—300	300—600	135—200	140—200	50—100	70—150	70—80	70—80
Модуль упругости в $кгс/см^2$	—	1500—2500	5000—7000	—	—	29 000— 31 000	35 000	35 000
Морозостойкость в °С . .	—25	—60	—60	—20	—135	—65	—65	—65
Теплостойкость в °С . .	65	80	—	—	125—140	—	125	125
Температура сварки в °С	150—160	110—160	140—220	170—220	—	220—250	230	230

лов, водоемов, силосных ям, изготовления метеозондов. Большая деформативность и сравнительно малый срок службы ограничивают возможность использования пленки в пневматических сооружениях значительного пролета. Полипропиленовые пленки по сравнению с полиэтиленовыми обладают повышенной прочностью, теплостойкостью, но значительно уступают им по морозо- и светостойкости, что значительно снижает возможность использования их в открытых конструкциях.

Полиамидные пленки характеризуются повышенной прочностью при разрыве, эластичностью, способностью пропускать ультрафиолетовые лучи, химической стойкостью к жирам, маслам и щелочам. Они свариваются термическим способом и токами высокой частоты. Последний способ считается наилучшим. Пленку можно и склеивать (клей ПК-5).

Как на недостаток, следует указать на гидрофильность полиамидных пленок и склонность к быстрому старению.

Отечественная промышленность выпускает полиамидные пленки марок ПК-4, 548 и ПКРТ-3. Пленка ПК-4 обладает заметной анизотропией, что следует учитывать при раскрое и изготовлении из нее пневматических конструкций.

Пленки 548 (ВТУ МХП № 1-545-54) и ПКРТ-3 (ВТУ МХП М-603-55) получают из совмещенных полиамидов. Пленка ПКРТ-3 отличается наличием стабилизатора и пластификатора, значительно повышающих стабильность ее прочностных свойств и морозостойкость. Она в 4—7 раз менее подвержена естественному старению, чем пленка 548, а морозостойкость ее на 15—20° С выше [11].

Полиэфирные пленки. Из большого числа полиэфиров для целей изготовления оболочек ПС наибольший интерес представляет полиэтилентерефталат.

Полиэтилентерефталатные пленки обладают рядом положительных свойств: высокими прочностью (в 10 раз выше прочности полиэтиленовой пленки) и модулем упругости, значительной сопротивляемостью удару и многократному изгибу, повышенной атмосферостойкостью и низкой газопроницаемостью. Свойства пленки мало изменяются в интервале температур от —20 до +80° С, хрупкость не проявляется даже при —50° С [7]. Высокая прозрачность пленки обеспечивает пропускание более чем 90% солнечного света. Однако стоимость полиэтилентерефталатных пленок выше полиэтиленовых в несколько раз. Кроме того, они плохо сопротивляются раздиру и в этом отношении уступают полиэтиленовым.

За рубежом полиэтилентерефталатные пленки выпускаются под различными торговыми марками. Наиболее известны из них мелинекс (Англия), майлар (США), терфан (Франция), монтивель (Италия). У нас такие пленки называют лавсановыми.

Полотнища пленки соединяют клеем, представляющим собой 4% -ный раствор смолы ТФ-60 (ВТУ № П-264-66) в метиленхло-

риде. Прочность клевого шва составляет не менее 85% прочности исходной пленки [11]. Сварка полиэтилентерефталатных пленок нежелательна, так как при температуре сварки 220—250°С изменяется структура полимера и сварной шов становится довольно хрупким и непрочным. Поэтому прибегают к дублированию этой пленки с другими, например, полиэтиленовой, температура сварки которой значительно ниже. Такие слоеные материалы известны за рубежом под названиями майлар РЕ (США), хостафан РЕ (ФРГ), виден (Англия).

Отечественная промышленность также приступила к дублированию лавсановой пленки с полиэтиленовой.

При толщине лавсановой пленки 20 мк и полиэтиленовой 50 мк прочность комбинированной пленки составляет 550 кгс/см², удлинение 120%, а общий вес 71,8 гс/м² [8].

8. АРМИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ

Однородные пленки часто совмещают с различными армирующими материалами — нитями или сетками из синтетических, стеклянных, металлических волокон. При сохранении оптических свойств пленок удается повысить их прочность на разрыв, улучшить сопротивляемость раздиру и существенно снизить деформативность. Практическое применение для ПС получил армированный материал под названием «вайвлок». Он состоит из двух слоев поливинилхлоридной пленки и заключенной между ними системы синусоидальных и прямых нитей. Фирма «Тесситур Карло Майокки» (Италия) использует вайвлок для изготовления оболочек пролетом до 20 м с расчетным избыточным давлением около 10 мм вод. ст. Эксплуатация подобных сооружений позволила авторам данной книги выявить ряд отрицательных сторон этого материала. Прежде всего — местные расслоения материала, вызванные стремлением растягиваемых синусоидальных нитей к выпрямлению, а также повышение со временем жесткости пленки. Несмотря на это, использование армопленки вайвлок для ПС небольших пролетов (до 12 м), предназначенных для эксплуатации в бесснежных маловетренных районах с умеренным климатом, вполне возможно.

У нас в стране выпускается ряд полиамидных пленок, армированных капроновыми сетками (табл. 7). Назначением их является изготовление емкостей, работающих в агрессивных средах. Однако они вполне пригодны и для оболочек небольших ПС. Пленочные материалы АР-27т и АР10Л-2к представляют собой непрозрачную армированную пленку ПК-4 с покрытием из полиамида П-548. Оболочки ПС сваривают из отдельных полотнищ пленки на специальном оборудовании.

Физико-механические свойства армированных пленок

Показатели	Марка армопленки		
	вайвлок	АР-27 т	АР10Л-2К
Вес в $гс/м^2$	550	160±20	160±20
Толщина в $мк$	530	190±20	210±20
Прочность на разрыв в $кгс/м$	780/450	1000/1400	1200/1400
Удлинение при разрыве в %	34/66	20/30	30/40
Ширина в $см$	130	80±10	80±10
Технические условия	—	ТУ НИИПМ П-36-63	ТУ НИИПМ П-486-66
Цвет	Любой	Белый	Желтоватый

9. ВОЗДУХОНЕПРОНИЦАЕМЫЕ ТКАНИ

Ткани, межнитевое пространство которых заполнено полимерами, а поверхность защищена от разрушающего действия света, озона и температуры наружными слоями этих же полимеров, оказались материалом, который наиболее полно отвечает основным и ряду дополнительных требований, предъявляемых к материалам для оболочек ПС.

Применение тканых материалов в инженерной деятельности имеет давнюю историю. Достаточно упомянуть парус, оболочки мягких дирижаблей и воздушных шаров, где ткани выполняют роль силового элемента. Для воздухопроницаемости ткани пропитывались латексами или покрывались лаками, позже обрешивались.

Особенно широко ткани использовались в воздухоплавании. Были разработаны специальные, так называемые баллонные однослойные и многослойные ткани с резиновыми покрытиями, обладающие высокой газонепроницаемостью. В 1912 г. появились в печати две крупные работы, в которых рассматривались проблемы прочности и деформированности тканых материалов. Одна из них была опубликована Гаасом и Дитциусом в Германии [2], другая Бусом и Хайдом в Англии [16]. Исследованию конструктивных свойств технических тканей посвящены многочисленные работы отечественных авторов, например [3].

Использование тканей из растительных волокон позволяло решать практические задачи того времени, но эти ткани были недолговечны и имели малую прочность (500—1000 $кгс/м$).

Качественно новый этап использования тканей в конструкциях переменного объема начался с получением высокопрочных синтетических волокон и новых эластомеров. Способность тканей выдерживать многократные перегибы, легко складываться, выдерживать значительные растягивающие усилия, пульсирующие нагрузки, поглощать энергию удара широко используется при разработке легких транспортельных конструкций.

В настоящее время промышленность имеет все возможности для разработки любого материала, способного удовлетворить запросы практики по созданию пневмооболочек.

Волокно. Различают натуральные, искусственные и синтетические волокна. К первым относятся волокна растительного происхождения (хлопок, лен); искусственные представляют в основном целлюлозные (вискоза, ацетатные), стеклянное волокно и шелк. Наибольшим разнообразием отличаются синтетические волокна. Широко известны полиамидные (найлон, капрон, перлон, дедерон, амилан), полиэфирные (лавсан, терилен, дакрон, тревира), полиакрилнитрильные (орлон, нитрон, куртель), поливинилспиртовые (винилон, куралон, винол), полиэтиленовые, полипропиленовые, полихлорвиниловые. Динамика развития мирового выпуска волокон явно склоняется в пользу искусственных и синтетических волокон. Их доля в мировом балансе текстильного сырья составила в 1967 г. 34%, в 1968 г. — 36% и неуклонно повышается.

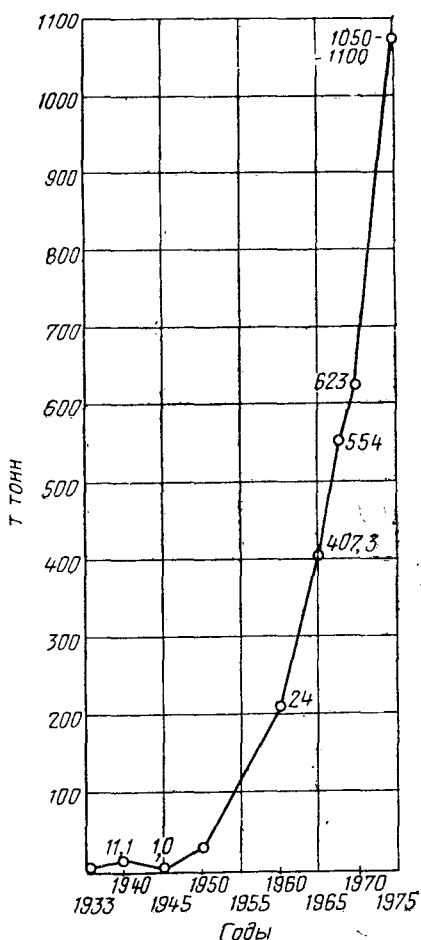


Рис. 2.1. Рост производства химических волокон в СССР

Ускоренными темпами развивается производство химических волокон и в нашей стране (рис. 2.1). В 1940 г. общий объем производства химических волокон составлял лишь 11 тыс. т. В текущей пятилетке Директивами XXIV съезда КПСС предусмотрен дальнейший рост производства волокон с доведением их выпуска в 1975 г. до 1050—1100 тыс. т.

Несмотря на разнообразие фирменных названий синтетических волокон, практически в мире выпускается три главных типа синтетических волокон: полиамидные, полиэфирные и полиакрилнитрильные.

Весьма перспективны стеклянные волокна. Существенный их недостаток — низкая сопротивляемость перегibu — преодолевает-

Структура типовых тканевых основ и их основные свойства

Тип волокна	Структура нити		Переплетение	Число нитей на 1 см	Толщина в мм	Вес в гс/м ²	Прочность на разрыв в кгс/5 см	Удлинение в %	Прочность на раздир в кгс
	№	денье							
Отечественные									
Капрон	34,5×1	—	Рогожка, 2×2	26/26	0,28	145	220/220	35/39	35/35
Капрон*	34,5×1	—	Рогожка, 3×3	27,6/25	0,61	334	540/480	36/39	59/57
»	10,7×1	—	Плотняное	8,8	0,48	186	250/275	29/37	47/49
Капрон**	10,7×1	—	»	9,6/11	0,52	230	250/300	23/25	—
»	10,7×2	—	»	7,4/8,6	0,65	335	400/450	25/28	—
Капрон*	10,7×1	—	Рогожка, 2×3	10/15	0,84	380	500/580	32/45	95/79
Лавсан*	36×1	—	Рогожка, 3×3	30/30	0,35	190	198/174	13/24	26/30
Лавсан**	10,7×3	—	Плотняное	7,8/8,2	1,2	560	450/490	24/20	—
Зарубежные									
Найлон	—	210	Плотняное	19/19	0,20	95	125/125	—	—
»	—	840	»	8/8	0,39	187	230/230	—	—
Тревира	—	1000	»	9/9,5	0,3	215	310/310	17/16	—
»	—	1000	»	8,5/9,5	0,3	210	300/310	16/16	—
»	—	1500	»	7/7	0,4	245	275/375	14/14	—

* Опытные тканевые основы, разработанные ВНИИ по переработке химволокна.

** Опытные тканевые основы, разработанные ВНИИ технических тканей.

ся, и они все шире используются в технических тканях. Практически решена также проблема связи стеклянного волокна с резинами [15].

Прочность волокна можно характеризовать разрывной длиной, т. е. длиной волокна в км, вызывающей его разрыв от собственной тяжести, а толщину — номером (количество метров волокна в 1 г). Разрывная длина L (ркм) находится из выражения: $L = PN$, где P — разрывное усилие при машинных испытаниях в кгс; N — номер волокна в м/г.

В ряде стран (США, Англия и др.) прочность волокон характеризуется гс/денье, где под «денье» подразумевается вес нити или пряжи длиной 9000 м в граммах.

Полиэфирные нити наименее растяжимы и зависимость «напряжения — деформация» для них близка к линейной.

Тканевая основа. Удачный выбор волокна во многом предопределяет, но еще не всегда обеспечивает требуемый комплекс свойств технической ткани. Сильно влияет на показатели ткани способ переплетения продольных (основных) и поперечных (уточных) нитей, плотность укладки и степень их крутки. Меняя эти параметры, можно изменять прочность и удлинение при разрыве, сопротивляемость раздиру, вес и толщину тканей, полимероёмкость и способность ткани к связи с полимерными защитными покрытиями.

Типичные структуры тканей, широко используемых в качестве тканевой основы для материалов оболочек, и их основные механические свойства даны в табл. 8.

Для изготовления тяжелых тканей повышенной прочности используются главным образом нити низких номеров, например в материале для оболочки купола системы «Тельстар» использована дакроновая нить 1100 денье. Часто практикуется получение толстой нити скруткой нескольких первичных нитей.

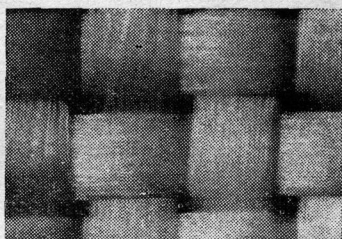


Рис. 2.2. Структура тканевой подложки полотняного переплетения из волокон низкой крутки

От структуры переплетения нитей зависит ряд свойств тканей — прочность, толщина, вес, связь текстильной основы с защитными покрытиями. В текстильном производстве известны три главных вида переплетения нитей: полотняное, саржевое и атласное.

Полотняное (миткалевое, тафтяное) — самое простое и чаще всего используемое для выработки технических тканей (рис. 2.2). Повышенная связанность нитей, возникшая благодаря максимально возможной частоте переплетения, препятствует раздвижке нитей и придает тканям повышенную прочность. Разновидностью полотняного является рогожковое переплетение, кото-

рое получается одновременным переплетением не одной, а двух или более расположенных рядом нитей. Структуру этого переплетения по основе и утку принято обозначать 2×2 , 2×3 , 3×3 (см. табл. 8, основа/уток). Ткани рогожкового переплетения имеют большую сопротивляемость раздиру.

Одной из главных предпосылок получения материала высокого качества, надежного в условиях эксплуатации, является прочность связи между тканевой основой и защитным покрытием, которая должна исключать отслоение покрытия при складывании и разворачивании оболочки, сдвигах в напряженном состоянии, усадочных явлениях под воздействием атмосферных факторов. Надежная связь покрытия с тканью нужна также для получения прочных швов при сварке и склейке соединяемых полотнищ. Прочность связи измеряется усилием, необходимым для расслаивания материала, и выражается в *кгс/см*. Для тканевых материалов с резиновым покрытием эта величина равна 1—2 *кгс/см*. По данным фирмы «Хёхст» [19], для полиэфирной ткани прочностью 300 *кгс/5 см* с поливинилхлоридным покрытием равнопрочность сварного шва достигается при прочности связи 1,4 *кгс/см* и нахлесте в 2 *см*.

Наиболее распространенный способ повышения адгезионной способности тканевой основы заключается в ее пропитке специальными составами или наложении грунтов, имеющих химическое родство с полимером волокна [4, 10]. Иногда механическую связь между тканевой основой и защитным покрытием повышают за счет более свободного проникновения пластичной резиновой или полимерной смеси в структуру тканей. Этого достигают разрежением нитей или же развитием поверхности нитей и тканей, для чего применяются нити низкой крутки, и переплетения, дающие рыхлую структуру тканей. Удачны в этом отношении результаты, полученные на материале, известном под названием «Малимо» (ГДР). Он состоит из двух систем нитей (основных и уточных), наложенных друг на друга без переплетения под прямым углом и связанных между собой в местах пересечения третьей системой нитей. Развитая структура «Малимо» позволила отказаться от обработки ее адгезионными составами, так как и без этого между компонентами материала достигается прочная связь. Тканую основу получают на специально разработанной швейно-трикотажной машине высокой производительности. Машина вырабатывает до 150 *м/ч*, вместо 5, которые дают современные высокопроизводительные ткацкие станки [10].

В СССР при обрешивании тканей из капрона и стекловолонна применяют пропитку эпоксиаминной смолой 89 [6]. При этом вес материала повышается. Например, вес широко применяемой капроновой ткани арт. 56026 после пропитки возрастает с 145 до 180 *г/м²*. Обеспечивая удовлетворительную адгезию к резиновым покрытиям (1,2—1,8 *кгс/см*), эта пропитка в то же время лишает материалы свойств светопрозрачности.

Защитные покрытия. Для нанесения защитных покрытий используются два способа — каландрование и шпредингование.

Каландрование обеспечивает высокую производительность (40—80 м/мин), но дает довольно толстый слой покрытия весом 200—250 гс/м². На современных высокоточных каландрах вес выкладки полимера может быть снижен до 120 гс/м² [1, 14]. Каландры позволяют получать материалы с плотным покрытием и ровной глянцевой поверхностью.

На шпрединг-машине, принцип работы которой сохранился со времен Макинтоша (1823 г.), удается наносить очень тонкие покрытия весом от 10 до 150 гс/м². Эта машина удобна и позволяет создавать комбинированное слоистое покрытие с наложением на наружную сторону специальных покрытий из особо погодостойких полимеров и резин. Однако процесс шпредингования трудоемок, так как смесь покрытия наносится на поверхность ткани последовательно несколькими отдельными штрихами (слоями). Производительность шпрединг-машины равна 1—3 м/мин готового материала. Качество покрытия очень высокое: полимер или резиновый клей равномерно обволакивает волокна ткани, возможные дефекты перекрываются нанесением последующего слоя. Шпрединг-машины менее сложны, чем каландры, проще и экономичнее в обслуживании. Последующая вулканизация каучуковых защитных покрытий осуществляется в камере под давлением.

Различают однослойные и многослойные ткани. Тканевые слои могут быть дублированы параллельно (нити основы и утка совпадают) или диагонально (под углом 45°). К параллельному дублированию прибегают, как правило, для увеличения сопротивления разрыву. Диагональное — имеет целью увеличение сопротивления материала раздиру. При изготовлении лодок и плотин часто применяют ткани трех и более слоев.

В табл. 9 представлены полученные авторами сравнительные данные испытания материалов, имеющих одинаковую капроновую тканую основу, но отличающихся конструкцией. Образцы приняты в виде полос шириной 5 см (по ГОСТ 3813—47).

Таблица 9

Прирост прочности ткани при дублировании (основа/уток)

Конструкция ткани	Прочность на разрыв в кгс/5 см	Прирост прочности в %
Однослойная	254/197	—
Диагонально дублированная	300/232	18/18
Параллельно »	441/279	73/42

Надо полагать, показатели для диагонально дублированной ткани при данном методе испытания несколько занижены. Более

уверенно можно судить в данном случае об эффекте параллельного дублирования слоев. Как правило, суммарная прочность исходных тканевых слоев при дублировании не достигается. Потеря прочности вызывается прежде всего, непараллельностью нитей в слоях и различием их деформативных свойств. Данные других исследователей можно найти в [6, 27].

Оболочки ПС изготавливают чаще всего из однослойных и реже двухслойных тканей. На рис. 2.3 показан микросрез ткани типичной конструкции, где видно, что основные нити более толстые, чем уточные. Эту особенность ткани приобретают в процессе наложения защитных покрытий, протекающем при натяжении ткани в продольном направлении. Неодинаковость структуры тканей усугубляет ее анизотропию. Однако, например, в материале «Малимо», где нити не переплетены, они прямолинейны в обоих направлениях.

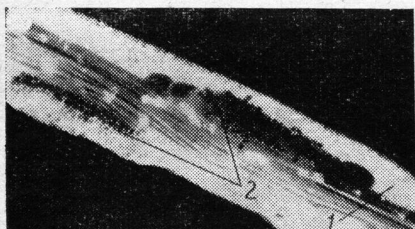


Рис. 2.3. Микросрез однослойной ткани с поливинилхлоридным покрытием
1 — основа; 2 — уточ

Основной защитный слой наносится на лицевую сторону ткани, с внутренней стороны он делается более тонким. Например, у однослойной ткани с поливинилхлоридным покрытием, общим весом 640 гс/м^2 наружный защитный слой весит 300, а внутренний — 160 гс/м^2 .

В качестве покрытий преимущественно используются каучуки и пластики, характеризующиеся повышенной термостойкостью и воздухонепроницаемостью, стойкостью к действию озона, кислорода, ультрафиолетовых лучей. Чаще всего используются хлорсульфированный полиэтилен (ХСПЭ, хайпалон), полихлоропреновые каучуки (наирит, неопрен), пластифицированный поливинилхлорид. Последний особенно широко применяется в зарубежной практике в связи с его доступностью и дешевизной. В опытном порядке в производстве отечественных тканей начинают использовать этилен-пропиленовый и полиуретановый каучуки.

10. ВИДЫ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ОБОЛОЧЕК

Для изготовления оболочек ПС пролетом до 25—30 м в большинстве стран используются, как правило, однослойные ткани с двусторонним защитным покрытием. Прочность тканей колеблется в пределах от 4000 до 10 000 кгс/м .

Основные физико-механические свойства зарубежных тканей, испытанных авторами, представлены в табл. 10. Текстильная основа из полиамидных или полиэфирных волокон низких номе-

ров имеет вес 170—200 гс/м², ширину 135—145 см. Для полиамидных тканей характерна повышенная растяжимость в сравнении с полиэфирами. Во Франции фирмами «Бессоно», «Тексер» широко используется нейлоновая ткань «феррамил» со светопроницаемым покрытием из ПВХ. Аналогичные материалы выпускаются и в других странах под различными торговыми названиями, например «фибертин» (фирма «US Rubber», США), «барралон» и «галонил» (Швеция). В Англии потребителями тканей с покрытием из ПВХ являются фирмы «Гурок Роупуорк» и «RFD», изготавливающие ПС. К достоинствам таких тканей следует отнести низкую стоимость в сравнении с прорезиненными тканями, способность покрытий легко окрашиваться в массу.

Таблица 10

Типичные механические свойства зарубежных тканей для пневмооболочек

Страна	Текстильная основа, денье	Вид покрытия	Показатели							
			толщина в мм	общий вес в гс/м ²	прочность на разрыв в кгс/5 см		удлинение в %		прочность на раздир в кгс	
					основ-ва	уток	основ-ва	уток	основ-ва	уток
Франция	Найлон, 840	ПВХ	0,64	670	248	200	17,9	29,4	24,5	29,4
Англия	То же	Хайпалон	0,43	400	258	231	18,6	23,3	30,5	28
ФРГ	Найлон, 840	Неопрен	0,49	730	274	245	19,4	23,1	15,2	15,8
	Тревира, 1000	ПВХ	0,65	760	320	270	11,4	16,9	26,2	28
ГДР	Дедерон	ПВХ	0,77	860	265	300	33,7	35,3	36,3	29,5
Япония	Найлон, 840	Хайпалон	0,44	420	269	228	19,9	19,5	34,3	37,8
	Куралон	»	0,92	980	700	715	28	27	46,1	72,2

Как недостаток тканей с покрытием из ПВХ, следует отметить малую морозостойкость (—25÷—30°С) и повышенную жесткость, увеличивающуюся во времени. Однако имеются высокоэффективные стабилизаторы и пластификаторы, обеспечивающие стабильность защитных свойств ПВХ на длительное время с сохранением эластичности и повышенной морозостойкости (до —50°С).

Покрытие из ПВХ используется и при тканевой основе из полиэфирных волокон. Основная трудность — крепление ткани к покрытию — в значительной мере преодолена, и эти материалы все чаще применяются для оболочек ПС. Известны «пластолен 950» (Англия), «галотрон» (Швеция). В ФРГ широко используются полиэфирные ткани из «тревиры» с поливинилхлоридным покрытием [21].

К наиболее известным конструкциям из этого материала следует отнести выставочный павильон в Ганновере (см. рис. 1.38, б) и тентовые конструкции на ЭКСПО-67.

Наряду с ПВХ для покрытий нейлоновых и полиэфирных тканей применяют неопрен, хайпалон. Используется сочетание хайпалона с неопреном (ткань «файпрен»), причем хайпалонное покрытие, как более атмосферостойкое, располагается с наружной, а неопреновое — с внутренней стороны ткани. Широко применяется комбинация дакрона с синтетическими каучуками. Фирма «Гаррет» [25] при разработке полевого госпиталя использовала дакронную ткань в сочетании с хайпалоном и неопреном.

При изготовлении оболочек повышенной надежности используются ткани, разработанные по специальным техническим требованиям. Особенно жесткие требования предъявляются к материалам для обтекателей радарных антенн, где применяются ткани повышенной прочности и долговечности. Обтекатель для радара в Бохуме (см. рис. 1.12, б) [19] диаметром 39 м изготовлен из однослойной полиэфирной ткани (волокно диолен) с покрытием из ПВХ прочностью 12 000 кгс/м и толщиной 1,2 мм. Однако чаще в этих целях используют двухслойные диагонально дублированные ткани. Для сферических диаметром 64 м оболочек обтекателей антенн систем «Тельстар» (США, Франция, Англия) использована ткань из термофиксированного горячетянутого дакрона с хайпалонным покрытием общей толщиной около 2 мм. Прочность этой двухслойной ткани составляет около 30 тс/м [18]. Принципиально возможна разработка и более прочных однослойных тканей. Например, для плавучих емкостей фирмой «Бритиш Найлон Спиннерс» (Англия) разработана однослойная ткань разрывной прочностью 70 тс/м. В надувных плотинах используются четырехслойные ткани прочностью около 50 тс/м и весом 6 кгс/м² [20]. Эти тяжелые ткани пригодны для стационарных большепролетных оболочек, проектируемых без системы разгружающих канатов или сеток.

Для защиты антенн корабельных радиолокационных установок используют двухслойные нейлоновые ткани, пропитанные неопреном с дополнительной обработкой наружной стороны хайпалоном. Обтекатель из ткани такого рода, защищающий радиолокатор на палубе французского авианосца «Жорж Клемансо», служит уже несколько лет [22]. Кроме нейлоновых и дакронных текстильных основ используются и стеклоткани. Купола для радаров в виде усеченного шара высотой 10,8 м при диаметре 16,2 м, разработанные Корнелльской лабораторией, выполнены из однослойной стеклянной ткани с двусторонним неопреновым покрытием [17].

Экспериментальное производство оболочек отечественных ПС, особенно в начале 60-х годов, базировалось на материалах, заимствованных из различных областей техники (баллонные, лодочные, чехольные и газгольдерные прорезиненные ткани). Сначала

применяли ткани № 500, 556, 533, 509 на хлопчатобумажной и льняной основе; позднее — капроновые ткани № 806, 19, 42-м, 860, конструктивно решенные подобно баллонным материалам — резиновое покрытие располагалось только с внешней стороны. Применение материалов, не предназначенных для оболочек ПС и имевших либо незначительную прочность, либо несовершенную конструкцию, все же позволило отработать конструктивные решения ПС, выявить их основные эксплуатационные особенности и подготовить условия для их серийного производства.

В последние годы была проведена модернизация капроновых тканей 51-019, 51-060 и разработана более широкая номенклатура материалов с покрытиями из каучуков и ПВХ с разнообразными физико-механическими свойствами (табл. 11). Материалы имеют капроновую основу из высокопрочных кордных нитей № 34,5. Защитные покрытия расположены с обеих сторон и выполнены в светопрозрачном и непрозрачном вариантах. Каучуковые покрытия наносятся по шпрединговой технологии, а ПВХ — на трехвалковых каландрах.

Материалы прошли комплексные кратковременные испытания. Изучены их механические и светотехнические характеристики, степень возгораемости; из них были изготовлены оболочки опытных ПС. В процессе разработки материалов оценивалось влияние различных защитных покрытий на исходные свойства тканевой основы.

Установлено, что вид и состав защитных покрытий оказывают заметное влияние на свойства рулонных материалов. Например, сопротивление раздиру при повышении жесткости защитного покрытия может снижаться в 2 и более раза. То же самое характерно и для двухслойных тканей. Так, прочность на раздир капроновой ткани 51-019 достигает 67/61 кгс (основа/утóк), а для ткани аналогичной конструкции, но с покрытием большей жесткости (47/31 гс), она снижается до 29/30 кгс, т. е. примерно в 2 раза. Особого внимания в этом отношении требуют материалы с покрытием из ПВХ, жесткость которого со временем повышается. При отрицательных температурах также можно ожидать снижения сопротивляемости раздиру.

Как известно, изменение температуры сказывается на прочности материалов. Поскольку защитные покрытия не оказывают существенного влияния на морозостойкость и теплостойкость тканевой основы, эти свойства целиком зависят от вида ее волокна. Особенно чувствительны к температурным изменениям капроновые ткани. При 90°С они теряют до 28% исходной прочности, при 40°С прочность капронового волокна снижается на 5—6%. Однако к отрицательным температурам они более стойки и практически сохраняют свои свойства до —30°С [13].

Полиэфирные ткани более теплостойки, чем полиамидные. Снижение прочности полиэфирной ткани при 60°С незначительно и составляет всего 3—4% прочности, полученной в нормальных

Основные физико-механические свойства тканей с защитными покрытиями отечественного производства

Показатели	Шифр тканей							
	556	806	23-м	51-019	У-92	У-93	30	«Волга»
Номер ТУ, ТР . . .	ТУ1205—54р	—	МРТУ 38-5-60-42-65	ТУ38-5-3-86-69	—	—	ТР ЯВ-681-65	—
Тканевая основа, арт.	Хлопок	Капрон, 56026	Капрон, 56026	Капрон, 56026	Капрон, 56026	Капрон, 56026	Капрон, 56026	Капрон, 56026
Вид покрытия . . .	СКБ+поли- изобутилен	Бутилкаучук	Найрит	СКБ+поли- изобутилен	СКЭПТ+по- лиизобутилен	СКЭПТ+по- лиизобутилен	СКБ+поли- изобутилен	ХСПЭ
Толщина в мм . . .	0,35	0,52	0,71	0,69	0,7	0,47	—	0,64
Вес в гс/м ² . . .	290—320	450—510	560—690	600—700	700	430	660	630
в том числе ткане- вой основы	—	156	360	360	360	180	360	180
Ширина рулона в см	130	90	90	90	90	90	90	93
Прочность:								
на разрыв								
в кгс/5 см**	54/42	180/140	—	460/310	440/310	235/214	300/230	250/210
на раздир в кгс**	42/4,8	11/13	—	61/67	64/68	34,31	—	—
Удлинение при раз- рыве в %**	12/16	24/35	—	23/26	23/26	28/31	—	29/32
Браковочный мини- мум по ТУ в								
кгс/5 см**	47/44	—	400/250	400/250	—	—	215/200	—
Морозостойкость в °С	—50	—	—30	—50	—50	—50	—50	—
Жесткость в гс	—	—	—	—	—	—	—	—
Число слоев тканевой основы	2д/д	—	2п/д	2п/д	2п/д	1сл	2д/д	1сл

Показатели	Шифр тканей							
	1023	1024	859-2	51-054	51-052	51-056*	51-057*	АПМ-ПС*
Номер ТУ, ТР	ТУ П-145-68	ТУ П-145-68	ВТУ П-84-65	ТР 30549	ТР 30549	ТР 30549	ТР 30549	—
Тканевая основа, арт.	Капрон, ТК-80р	Капрон, ТК-120р	Капрон, 56026	Капрон, 56026	Капрон, 56032	Капрон, 56032	Капрон, 56026	Капрон, 23604
Вид покрытия	Найрит	Найрит	—	ХСПЭ+ найрит	ХСПЭ+ найрит	СКЭПТ+ ХСПЭ	СКЭПТ+ ХСПЭ	ПВХ+СКН
Толщина в мм	1,2	1,5	0,43	0,5	0,8	0,8	0,5	0,6
Вес в гс/м ²	1500	1700	—	600	800	800	600	650
в том числе тканевой основы	335	470	315	180	330	330	180	—
Ширина рулона в см	—	—	—	—	—	—	—	95
Прочность:								
на разрыв в кгс/5 см**	—	—	262/224	257/230	400/570	475/550	257/248	300/260
на раздир в кгс**	35/30	70/60	36/37	25/23	34/58	107/89	52/51	31/31
Удлинение при раз- рыве в %**	35/55	40/55	22/27	23/27	32/38	29/32	28/30	31/47
Браковочный мини- мум по ТУ в кгс/5 см**	400/400	600/600	200/180	200/190	370/400	370/400	200/190	—
Морозостойкость в °С	—30	—30	—	—50	—50	—50	—50	—30
Жесткость в гс	—	—	—	9,7/6,2	32/23	—	3,7/3,9	12/10,5
Число слоев тканевой основы	1сл	1сл	2д/д	1сл	1сл	1сл	1сл	1сл

Условные обозначения: 1сл — однослойные, 2д/д — двухслойные диагонально-дублированные, 2пд — двухслойные, параллельно дублированные.

* Светопроницаемые материалы.

** Числитель — основа; знаменатель — уток.

условиях (рис. 2.4). При отрицательных температурах ее прочность повышается.

Оценка степени возгораемости материалов ПС проводится по методу огневой трубы в соответствии с Инструкцией МООП РСФСР № 16-15. Образцы материалов 46×155 мм, расположенные вертикально в специальной трубе, подвергаются воздействию газовой или спиртовой горелки до возгорания. По потере веса образца после затухания пламени судят о степени возгораемости материала. Результаты испытаний материалов (табл. 12), проведенных авторами, свидетельствуют, что в соответствии с классификацией СНиП II-A.5-70 все они относятся к группе сгораемых.

Добавка антипиренов в состав защитных покрытий тканей 51-054 и 51-052 вдвое повысила величину теплового импульса, необходимого для воспламенения материалов, и снизила потерю веса примерно на 10%. Соответствующим подбором негорючих волокон и покрытий специального состава можно снизить возгораемость материалов или исключить ее.

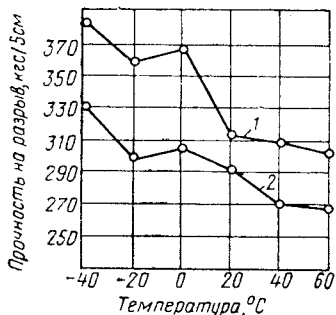


Рис. 2.4. Зависимость прочности полиэфирной ткани от температуры

1 — по основе; 2 — по утку

Таблица 12

Степень возгораемости некоторых материалов по методу огневой трубы

Индекс, шифр материала	Вид тканевой основы	Вид покрытия	Показатели огневых испытаний			
			время действия горелки в мин	величина теплового импульса в Ккал	продолжительность горения в мин	потеря веса в %
АПМ-ПС	Капрон, арт. 23604	ПВХ	0,25	0,3	1,52	75
51-051	Капрон, арт. 56026	ХСПЭ	0,25	0,3	0,6	66,5
51-054	Капрон, арт. 86026	ХСПЭ+Найрит	0,25	0,3	0,3	63,5
51-053	Капрон, арт. 56031	То же	0,25	0,3	1,11	63
51-057	Капрон, арт. 56026	СКЭПТ+ХСПЭ	0,25	0,3	1,08	71
Б-1*	Найлон	ПВХ	1	1,2	1,57	57
Н-1*	Перлон	Хлоропрен	0,5	0,6	0,88	50,8
Н-3*	»	ПВХ	0,7	0,8	1,45	81,5
А-1*	Найлон	Хайпалон	0,5	0,6	1,59	62,8
Малимо*	Дедерон	ПВХ	0,5	0,6	2,38	50,5
К-1*	Найлон	Хайпалон	0,25	0,3	1,53	58

* Материалы зарубежного производства.

К основным светотехническим характеристикам материалов оболочек ПС относятся светопроницаемость и светоотражение (табл. 13). Светонепроницаемые материалы имеют защитные покрытия на основе ПВХ или ХСПЭ. В отдельных случаях в качестве покрытия для получения светопроницаемых материалов используют полиуретаны. Интегральная и спектральная светопроницаемость может видоизменяться в зависимости от вида и количества введенных в состав смесей различных наполнителей и красителей. Однако с повышением светопроницаемости защитные свойства покрытий ухудшаются и долговечность материала снижается. Светопроницаемость материалов в сочетании с цветом позволяет придать оболочке красочность, архитектурную выразительность фасада и интерьера.

Таблица 13

Светотехнические характеристики материалов с защитными покрытиями

Индекс, шифр материала	Тип покрытия	Цвет наружного покрытия	Толщина материала в мм	Показатели в %			
				светопропускание при		светоотражение	
				естественном освещении	искусственном освещении	наружной стороны	внутренней стороны

Светопроницаемые материалы

АПМ-ПС	ПВХ	Темно-коричневый	0,51	15,2	15	29	—
51-051	ХСПЭ	Белый	0,53	18	19	53	—
51-051	ХСПЭ+ +СКЭПТ	Кремовый	0,44	16	17	42	—
51-056	То же	»	0,8	3,4	3,9	36	41
Б-1*	ПВХ	Светло-серый	0,72	2,6	—	56,5	—
К-12*	Хайпалон	Светло-голубой	0,3	10,2	—	57	—
А-1*	»	Белый	0,42	1,4	—	70,5	—
Н-12*	Полиуретан	Бесцветный	0,41	33,3	—	56,6	—

Светонепроницаемые материалы

АПМ-ПС	ПВХ	Защитный	—	2,25	2,42	9	20
51-054	ХСПЭ+ +Найрит	Светло-серый	0,43	—	—	30	55
51-053	То же	Белый	0,93	0,06	0,1	61	—
Малимо*	ПВХ	Светло-серый	—	1,3	1,5	60	—

* Материалы зарубежного производства.

Отражающая способность зависит от окраски и фактуры; она изменяется в широких пределах от 9 до 70%. Выбор окраски материала, а следовательно и светоотражающих свойств, во многом определяется назначением сооружения и районом предпола-

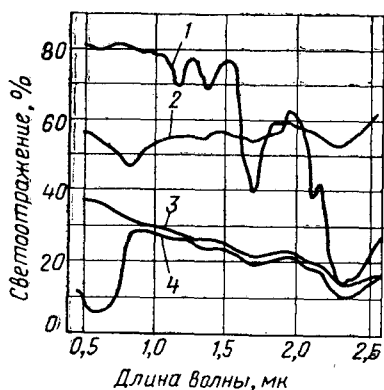


Рис. 2.5. Кривые светоотражения полиэфирной ткани в зависимости от цвета покрытия из ПВХ по [10]

1 — белый; 2 — серебристый; 3 — зеленый; 4 — голубой

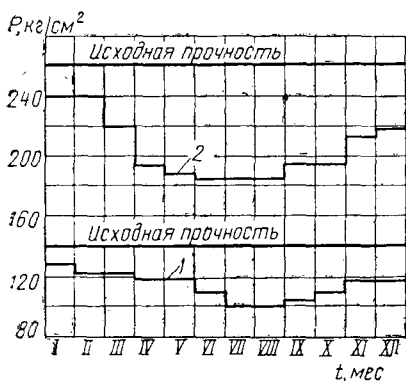


Рис. 2.7. Изменение прочности однослойной прорезиненной капроновой ткани при экспозиции в стендовых условиях

1 — по основе; 2 — по утку

В условиях атмосферной среды полимерные материалы меняют свойства — стареют. Это выражается, в частности, в потере прочности, снижении величины удлинения при разрыве, повышении жесткости, изменении цвета и светотехнических свойств.

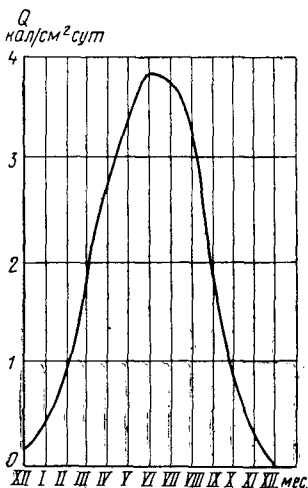


Рис. 2.6. Годовой ход суточных сумм рассеянной УФР при ясном небе Москвы ($\lambda < 340$), по данным метеостанции МГУ

гаемой его эксплуатации. Для снижения инсоляции в южных районах страны применяют материалы с высокими светоотражающими свойствами; для северных районов, наоборот, оказывается целесообразным использование материалов темного цвета, интенсивно поглощающих солнечное тепло.

Изменения светоотражающих свойств материалов в зависимости от цвета покрытия показаны на рис. 2.5.

Из внешних агентов, агрессивно воздействующих на материалы, наибольшую опасность представляют кислород, озон и ультрафиолетовое излучение. Влияние тепла и влаги не существенно. Например, после восьмидневного выдерживания капроновых волокон при температурах 80 и 100°С снижение прочности составило соответственно 0 и 14,5% [12]. В реальных же условиях эксплуатации ПС прогрев материалов в оболочке не превышает 60°С при продолжительности воздействия менее, чем светлое время суток. Влага не вызывает в синтетических волокнах химических изменений, тем более, что в тканях с защитными покрытиями они изолированы от непосредственного контакта с влагой.

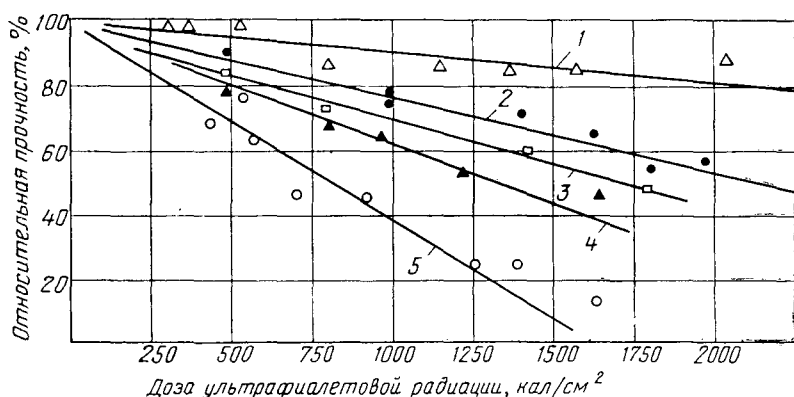


Рис. 2.8. Зависимость прочности материалов от полученной дозы УФР
 1 — нейлоновая ткань А-11; 2 — нейлоновая ткань Н-11; 3 — хлопчатобумажная ткань 500; 4 — капроновая ткань 19; 5 — нейлоновая ткань Я-12 (светопроницаемая)

Насыщенность атмосферы коротковолновой радиацией, опасной для волокнистых материалов, довольно велика и в течение года бывает неодинакова (рис. 2.6). Весной она в 2,5 раза выше, чем осенью, и примерно в 8 раз выше, чем зимой.

Исходя из доминирующей роли ультрафиолетовой радиации в процессе старения тканей можно объяснить некоторые закономерности изменения ими прочности в различные периоды года. На рис. 2.7 представлено типичное изменение прочности однослойной ткани в условиях стендовой экспозиции (по ГОСТ 10226—62). График имеет ступенчатый характер. Наиболее интенсивное изменение прочности приходится на весну и лето. Характер изменения прочности легко объясняется воздействием ультрафиолетовой радиации, интенсивность которой совпадает с наибольшей интенсивностью изменения материалом прочности.

Зависимость между прочностью и дозой радиации для некоторых материалов оболочек ПС приведена на рис. 2.8. В первом приближении можно считать, что их прочность линейно связана с полученной дозой коротковолновой радиации. Вид защит-

ного покрытия тканей определяет величину углового коэффициента семейства прямых.

Состав, толщина и окраска защитного покрытия имеют перво-степенное значение для сохранения первоначальных свойств ма-териала. Ткани без покрытий быстро разрушаются под откры-тым небом. В результате экспозиции на стендах под открытым небом с июля по октябрь (рис. 2.9) в условиях Подмоскovie, полипропиленовая ткань разрушилась полностью; прочность те-риленовой, лавсановой и капроновой тканей составила в сред-нем 58% исходной. Защитные покрытия резко повышают долго-

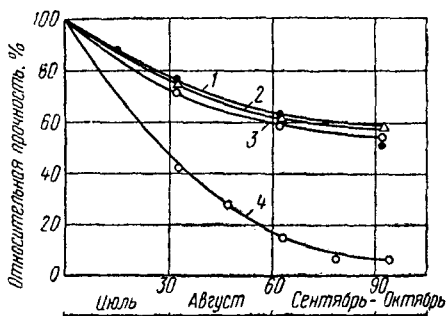


Рис. 2.9. Изменение прочности тканей без покрытий в стендовых условиях

1 — терилен; 2 — лавсан; 3 — капрон; 4 — полипропилен

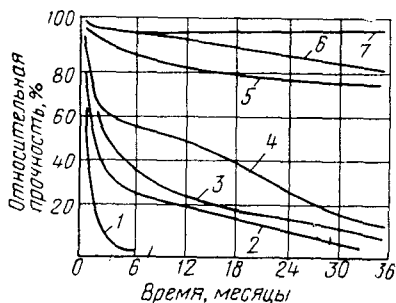


Рис. 2.10. Изменение прочности нейлоновой ткани в зависимости от толщины неопренового покрытия темного цвета по [23]

1 — без покрытия; 2 — $t=0,013$ мм; 3 — $t=0,025$ мм; 4 — $t=0,051$ мм; 5 — $t=0,083$ мм; 6 — $t=0,152$ мм; 7 — $t=0,203$ мм

вечность материалов, чувствительных к воздействию солнечного света (рис. 2.10). Как видно из графика, наилучшие результаты соответствуют наибольшей толщине покрытия. По данным фирмы «Дюпон», проводившей многолетние испытания материалов оболочек на старение, минимальная толщина неопренового покрытия для защиты нейлоновой ткани составляет 0,09—0,12 мм для неопрена, содержащего сажу, и 0,22 мм для бессажевого неопре-на [26].

Защитные свойства покрытий меняются также от вида и со-става полимерной или резиновой смеси, рецептурные составы ко-торых весьма разнообразны. Оправдали себя составы на основе ХСПЭ, ПВХ, неопрена.

Для повышения стойкости практикуют включение в состав покрытий специальных абсорберов ультрафиолетового излу-чения. Их действие основано на трансформировании поглощенной световой энергии в менее опасную, например тепловую. Широко известное светостабилизирующее действие тонко измельченной канальной сажи основано на этом же принципе. Положитель-ного эффекта добиваются также повышением светоотражающей

Изменение свойств материалов в оболочках пневматических сооружений в процессе эксплуатации (основа/уток)

Марка сооружения, месяц экспозиции	Шифр или индекс материала (характеристика)	Длительность эксплуатации в днях	Показатели				
			прочности на разрыв		удлинения %	прочности на раздир	
			кгс/5 см	%		кгс	%
ПС-1	№ 860 (капроновая двухслойная ткань)	0	234/220	100	20/28	15,6/14,9	100
		165	212/179	90,8/81,3	17/22,7	—	—
		510	146,2/162	62,4/73,6	16,7/24	5,9/7,7	37,9/51,8
		750	78,8/69,4	33,7/31,6	17/17,6	3,4/3,8	21,8/25,5
Экспериментальное, июнь	№ 500 (хлопчатобумажная ткань)	0	29,3/25,2	100	12/17	4,6/3,4	100
		1170	13,1/10,3	44,7/43,3	—/14,8	0	0
	№ 556 (хлопчатобумажная ткань)	0	54,5/42,5	100	9/16	4,2/4,8	100
		1170	31,3/—	57,4/—	11,6/—	1,9/3,4	45,2/70,8
КПС-12т, март	№ 82 (капроновая однослойная ткань типа 51-060)	0	235/214,2	100	21,0/31,3	33,8/31,4	100
		240	216/203	91,8/94	13,6/22,6	26,2/31,6	77,4/100
		540	216/205,3	91,8/95,6	13,3/19	21,9/28,2	65/90
УПС-16т, сентябрь	№ 80 (капроновая двухслойная ткань с алюминиевой окраской типа 51-019)	0	353/279,6	100	43/40	61/67	100
		390	343/302	97,3/114	33/40,6	32,5/39,3	53,3/58,7
Оболочка пневмокаркасного сооружения	А-1 нейлоновая светопроницаемая ткань	0 480	256/223 225/153	100 84,8/68,7	16/21,3 18/20	30,4/28,1 12,3/12,4	100 40,6/44,2

способности материала лакировкой, а также окраской ХСПЭ с алюминиевой пудрой.

Защитное действие алюминиевой окраски проявляется в ее высокой светоотражающей и светорассеивающей способности. Мелкие чешуйки алюминиевой пудры, введенной в окрасочный состав, обладают способностью всплывать из толщи окрасочного состава на поверхность, образуя своеобразный светозащитный панцирь. Наложение небольшого слоя покрытия на внутреннюю сторону ткани также способствует ее долговечности, защищая от механических воздействий и рассеянной ультрафиолетовой радиации.

Результаты испытаний некоторых материалов (по ГОСТ 3813—47), проведенных авторами на образцах, вырезанных из облобочек ПС, представлены в табл. 14.

Отмечается более интенсивное снижение прочностных свойств в поперечном направлении ткани, обусловленное ускоренным старением уточных нитей. Структура тканей такова, что уточные нити, расположенные более крутой волной, выходят на поверхность, и защитное покрытие над ними имеет наименьшую толщину. Характерно также то, что сопротивляемость всех тканей раздиру падает заметнее, чем прочность на разрыв. Это можно объяснить как следствие повышения со временем жесткости покрытия, которое в меньшей степени сказывается на прочности при растяжении.

Пониженную долговечность показали прорезиненные капроновые ткани с покрытием на основе бутилкаучука. Развитие процесса старения ткани 860 для них является типичным. Ткань 860 имеет двухслойную капроновую основу арт. 56023, обрешиненную только с наружной стороны. За период экспозиции, равный 750 дням, облобочка из этой ткани оказалась непригодной к дальнейшей эксплуатации.

Старение тканей сопровождается заметным изменением их внешнего вида. Например, при осмотре ткани № 860 можно было видеть, что покрытие сильно потемнело, стало липким и покрылось системой глубоких борозд (рис. 2.11, а), через которые просматривалась текстильная основа.

У капроновых тканей № 82 и 80 (аналоги тканей типа 51-060 и 51-019), имевших светлую окраску, прочность на разрыв почти не снизилась, однако сопротивление раздиру заметно упало. Наружное покрытие не претерпело заметных изменений. Сравнительно недолговечными оказались хлопчатобумажные балонные ткани типа 500 и 556, срок службы которых едва превысил три года. Пагубным для них оказалась незащищенность хлопчатобумажного текстиля с внутренней стороны, где наблюдались следы жизнедеятельности микроорганизмов. Можно предположить, что при наличии внутреннего защитного покрытия срок службы хлопчатобумажной ткани мог быть значительно выше.

На рис. 2.12 показана динамика изменения прочностных

свойств светопроницаемой нейлоновой ткани Б-1 с покрытием из ПВХ в условиях Подмосквья. После 46-месячной эксплуатации оболочки прочность материала несколько снизилась и составила 71,3/63,3% (основа/утёк) от исходной, но оставалась достаточно высокой по абсолютной величине (3840/2620 кгс/м). Это позволи-

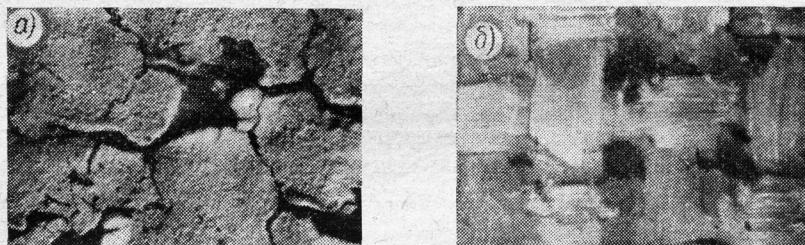


Рис. 2.11. Микрофотографии характера разрушения защитного покрытия в результате старения

а — бутилкаучук (ткань 860); б — полиуретан (светопроницаемая оболочка сооружения Н-12)

ло продолжить эксплуатацию сооружения. Видимых изменений при внешнем осмотре в материале не обнаружено. Данные испытания образцов ткани Б-1, вырезанных из эксплуатируемой оболочки, хорошо согласуются с результатами испытания образцов

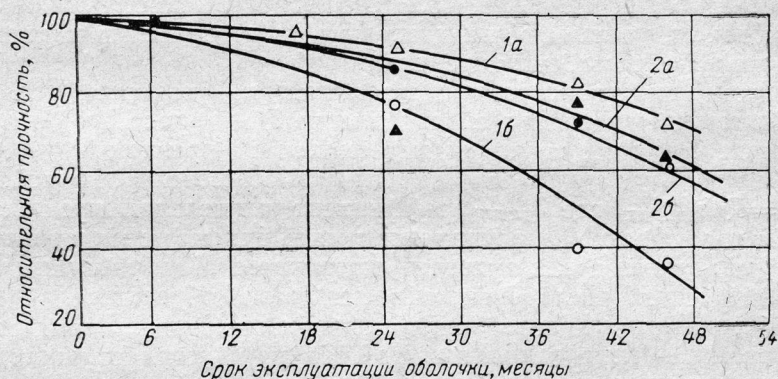


Рис. 2.12. Снижение прочности ткани Б-1 (образцы взяты из оболочки эксплуатируемого ПС)

1а, 1б — на разрыв и на раздир по основе; 2а; 2б — то же, по утёку

этой же ткани на стенде. Так, в результате 25-месячной экспозиции прочность на разрыв и раздир по основе ткани, взятой из оболочки, составила соответственно 100 и 57,6%, а со стенов — 97,5 и 58% номинала.

Помимо действия факторов светопогоды в процессе эксплуатации ПС, материал оболочек подвергается и чисто механиче-

ским воздействиям, прежде всего перегибам при раскладке и упаковке оболочек, трению о поверхность основания (грунт, бетон, асфальт и пр.) при монтаже и демонтаже (особенно в ветреную погоду), переменному натяжению от совместного действия избыточного давления и внешних нагрузок. Особенно нежелательны перегибы материала оболочек при сильном морозе, когда эластичность защитного покрытия падает и на нем могут появиться трещины. Трещинообразование, шелушение покрытия особенно резко выражены при слабой его связи с тканевой основой. Результатом многократного монтажа-демонтажа ПС явилось, например, снижение прочности светопрозрачной ткани Н-12. Испытания показали снижение прочности при растяжении на 53 и 84% (основа, уток), а при раздире соответственно на 87,5 и 73%. За то же время снижение прочности стеновых образцов составило в среднем 20,6%. Общий характер поверхностного разрушения ткани показан на рис. 2.14, б.

11. РАСЧЕТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТКАНЕЙ

Расчетное сопротивление, как наименьшее вероятное значение прочности материала, получают путем умножения величины нормативного сопротивления R^n на коэффициент однородности $k_{одн}$, являющийся одним из параметров в системе обеспечения надежности строительных конструкций, принятой в методе расчета по предельным состояниям. Кроме того, вводятся понижающие коэффициенты, учитывающие длительность воздействия нагрузок, а также условия работы материала.

С учетом сказанного представляется необходимым установить основное расчетное сопротивление $R^{осн}$ и расчетное сопротивление с учетом старения материалов во времени R .

Основное расчетное сопротивление выражается формулой:

$R^{осн} = R^n k_{одн} k_{дл}$, где $k_{дл}$ — коэффициент длительной прочности.

За нормативное сопротивление тканей принята средняя прочность, полученная в результате статистической обработки данных заводских или лабораторных испытаний образцов.

Для изучения однородности по прочности тканевых материалов авторами были использованы данные кратковременных испытаний, проведенных на различных заводах резинотехнических изделий. Результаты статистической обработки представлены в табл. 15. Ткани в уточном направлении менее однородны, чем по основе. Это можно объяснить особенностями технологии прорезинивания тканей, в процессе которого уточные нити могут деформироваться и искривляться.

Коэффициент однородности, определяемый по формуле $k_{одн} = 1 - 3v$ (где v — вариационный коэффициент), сопоставим с $k_{одн}$ для многих конструкционных полимерных материалов, для которых он находится в пределах 0,6—0,8. Математическая обработка результатов испытаний прочности образцов тканей по-

Данные статистической обработки результатов кратковременных испытаний прочности (основа/уток) некоторых материалов

Наименование материала, вид воздействия	Шифр	Количество образцов		Статистические характеристики			
		основа	уток	$M_{ср}$	σ	$v, \%$	$k_{одн}$
Капроновая однослойная ткань:	51-060	197	204	—	—	—	—
разрыв в кгс/5 см	—	—	—	254/196,8	23,6/36,5	9,28/18,56	0,722/0,443
раздир в кгс	—	—	—	34,3/34	2,51/3,51	7,32/10,3	0,781/0,691
Капроновая двухслойная ткань:	51-019	202	201	—	—	—	—
разрыв в кгс/5 см	—	—	—	490,5/237	56/44,15	11,45/18,7	0,656/0,440
раздир в кгс	—	—	—	88,6/79,4	7,13/6,9	8,06/8,7	0,758/0,739
Льняная однослойная ткань, разрыв в кгс/5 см	533	92	92	206/224	14,2/23,4	6,8/10,4	0,796/0,688
Хлопчатобумажная баллонная ткань, разрыв в кгс/5 см	500	450	450	32,5/31,36	3,28/3,11	10,3/10,1	0,691/0,67
Найлоновая однослойная ткань, разрыв в кгс/5 см	Я-1	41	—	265/218	9,93/—	7,46/—	0,776/—

Рекомендуемые расчетные сопротивления $P_{\text{осн}}$ прорезиненных тканей различной конструкции

Вид и конструкция ткани	Арт. тканевой основы	Шифр ткани	Средняя кратковременная прочность на разрыв в кгс/5 см	Коэффициент однородности, $k_{\text{одн}}$	Коэффициент длительной прочности $k_{\text{дл}}$	Основное расчетное сопротивление $P_{\text{осн}}$, кгс/м
Хлопчатобумажная, двухслойная диагонально-дублированная	—	500, 556	32,5/31,4, 54,5/42,5	0,7/0,65, 0,7/0,65	0,4/0,3, 0,4/0,3	180/120, 300/160
Капроновая, однослойная	56026	51-060, У-93, 51-054, 51-057,	254/197	0,7/0,45	0,5/0,45	1780/800
То же	56032	51-052, 51-056	430/490	0,7/0,5	0,5/0,45	3000/2200
Капроновая, двухслойная, параллельно дублированная	56026	51-019, 51-014, 23-М, У-92, 80 (типа 51-019)	490/237	0,65/0,45	0,45/0,4	2870/850

казывает, что они следуют закону нормального распределения.

Длительная прочность. Разрушение образцов материала при постоянной, длительно приложенной нагрузке происходит при напряжениях, значительно меньших, чем при кратковременных испытаниях. Следовательно, кратковременная прочность материалов не может служить окончательным критерием надежности и долговечности конструкций. Длительная прочность тканей, в первую очередь, зависит от вида волокна в тканевой основе и оценивается коэффициентом длительной прочности, определяемым опытным путем (рис. 2.13).

Величины основных расчетных сопротивлений приведены в табл. 16. Они

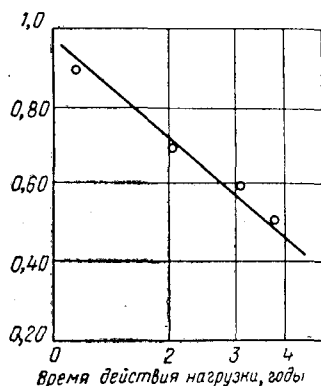


Рис. 2.13. Изменение предела прочности капроновой ткани под воздействием длительно приложенной нагрузки

Таблица 17

Ориентировочные значения коэффициентов старения $k_{ст}$ некоторых тканей для центральных районов страны

Шифр ткани	Вид покрытия	Текстильная основа, арт.	$k_{ст}$ при продолжительности эксплуатации оболочки, годы				
			1	2	3	4	5
500, 566	Полиизобутилен+СКБ с алюминированной окраской	Хлопок	0,8	0,6	0,4	—	—
860	Бутилкаучук защитного цвета	Капрон, 56023	0,8	0,5	0,3	—	—
82 (типа 51-060)	Полиизобутилен+СКБ с алюминированной окраской	Капрон, 56026	0,9	0,85	0,7	0,6	0,5
80 (типа 51-019)	То же	Капрон, 2 слоя, 56026	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6
47	Бутилкаучук защитного цвета	Капрон, 56026	0,8	0,5	0,3	—	—

зависят только от вида конструкции текстильной основы ткани. Это позволяет не производить перерасчет значений в случае изменений, касающихся вида защитного покрытия, цвета, оптических свойств, окраски и т. п.

Расчетное сопротивление с учетом старения материала устанавливается в зависимости от предполагаемого срока службы оболочки ПС и выражается формулой $R = R^{осн} k_{ст}$, где $k_{ст}$ — коэффициент старения, характеризующий долговечность ткани для данных климатических условий в зависимости от защитных свойств покрытий и некоторых мероприятий, проводимых в целях повышения атмосферостойкости тканей, например солнцезащитной окраски.

Значения $k_{ст}$ принимаются по данным результатов искусственного или естественного старения с учетом опыта эксплуатации оболочек сооружений. Величины $k_{ст}$ для некоторых тканей, опытная проверка которых на натуральных ПС в центральных районах страны выполнена авторами, сведены в табл. 17. Приведенные значения расчетных сопротивлений тканей носят ориентировочный характер и нуждаются в дальнейшем уточнении путем накопления и статистической обработки значительно большей совокупности показателей заводских испытаний, детального изучения длительной прочности и других факторов, влияющих на долговечность тканей.

12. КОНСТРУКЦИЯ ОБОЛОЧЕК

Проектирование оболочек воздухоопорных пневматических сооружений ведется с учетом ряда требований, которые можно подразделить на технологические (размеры и форма, обеспечение температурно-влажностного режима), эксплуатационные (сроки службы, трудоемкость монтажа, вес общий и отдельных элементов, потребный транспорт) и экономические (расход материала и стоимость изготовления).

Основные конструктивные элементы оболочки — собственно оболочка, силовой пояс, переходники и тенты шлюзов (рис. 3.1). К деталям относятся патрубки для присоединения вентиляторных и отопительных установок, обратные, вентиляционные и предохранительные клапаны, монтажные швы, воздухопроводы, узлы присоединения оттяжек и блоков и др.

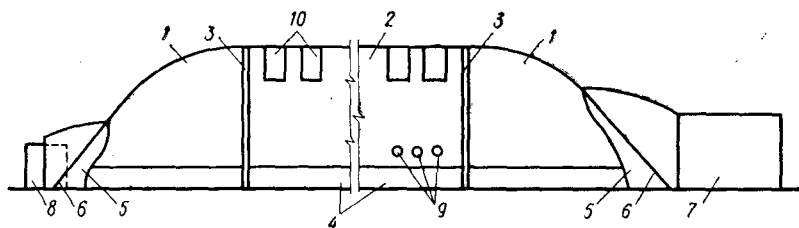


Рис. 3.1. Общий вид оболочки составной конструкции

1 — торцовые секции; 2 — центральная вставка; 3 — монтажные швы; 4 — силовой пояс; 5 — переходники; 6 — разгружающие тросы (канаты); 7 — технический (грузовой) шлюз; 8 — людской шлюз; 9 — патрубки для присоединения ВУ и ОУ; 10 — светопроницаемые участки оболочки

Расчленение оболочек на отдельные секции может оказаться целесообразным по ряду причин. Во-первых, ее длину можно увеличивать введением дополнительных средних секций. Во-вторых, для секций небольших размеров составной оболочки не требуется при ее изготовлении больших производственных площадей, а также специальных средств механизации. В-третьих, транспортирование и развертывание при монтаже оболочки существенно об-

легчается. Однако герметизация монтажных швов затруднена и поэтому составные оболочки по сравнению с цельными имеют повышенные утечки воздуха.

Размеры оболочки определяются в основном техническими требованиями и обеспечиваются раскроем их материала и заданными условиями на опорном контуре.

Наиболее распространенная форма оболочек ПС — цилиндрическая, со сферическими торцовыми окончаниями. Эта форма

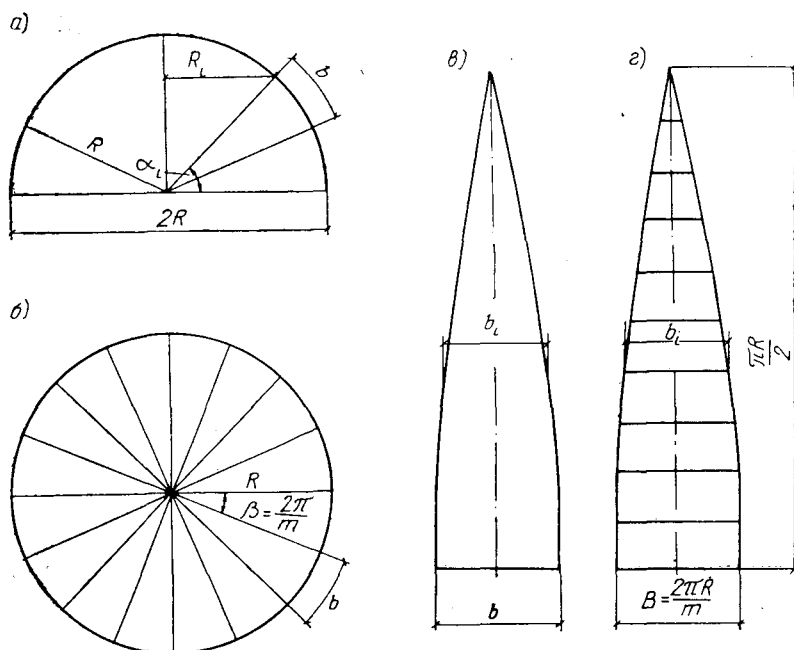


Рис. 3.2. Схема раскроя сферической оболочки

а — разрез; б — план; в — полотнище из целого куска; г — полотнище из трапеций

оболочки наилучшим образом отвечает природе пневматических конструкций.

Оболочка выкраивается из отдельных полотнищ, которые образуют цилиндрические, сферические и более сложные поверхности.

При раскрое сферической части оболочек используются в основном два метода — меридиональный и широтно-меридиональный. Меридиональный метод раскроя заключается в замене сферической поверхности рядом цилиндрических, ограниченных меридиональными дугами сферы, образующими некоторые плоские подобия сферических треугольников (рис. 3.2). Каждое полотнище выкраивается из целого отрезка материала основой в меридиональном направлении (рис. 3.2, в). При втором способе

треугольники с более широким основанием составляют из трапециевидальных отрезков (рис. 3.2, *г*) материи, основой в широтном направлении.

Выбор способа раскроя полотнищ оказывает большое влияние на расход материала и протяженность швов. На графиках (рис. 3.3 и 3.4) приведены данные о расходе материала с учетом нахлеста и протяженности швов при изготовлении сфери-

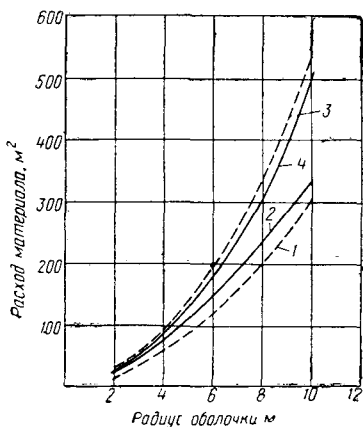


Рис. 3.3. График расхода материала на изготовление сферического торца цилиндрической оболочки в зависимости от способа раскроя полотнищ и величины радиуса оболочки

1 — теоретическая площадь поверхности торца; 2 — площадь меридиональных полотнищ из трапеций; 3 — площадь меридиональных полотнищ из целых кусков материала; 4 — площадь полотнища торца, образуемого пересечением двух цилиндрических поверхностей (см. рис. 3.5)

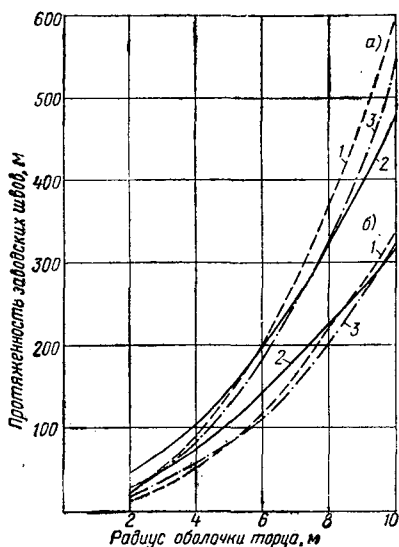


Рис. 3.4. График протяженности швов в сферическом торце цилиндрической оболочки в зависимости от способа раскроя полотнищ и радиуса оболочки

а — при ширине материала 0,9 м; б — при ширине материала 1,5 м; 1 — меридиональные полотнища из целого куска материала; 2 — меридиональные полотнища из трапеций; 3 — полотнища торца, образуемого пересечением двух цилиндрических поверхностей (см. рис. 3.5)

ческого торца цилиндрических оболочек с радиусами 2, 4, 6, 8 и 10 м из материала шириной 0,9 и 1,5 м. Из графиков видно, что оболочка получается наиболее экономичной по расходу материала и протяженности швов, если ее полотнища выкраиваются из трапециевидальных отрезков, причем расход материала мало зависит от его ширины. В то же время протяженность швов существенно зависит от нее.

При проектировании оболочек приходится рассматривать экономию по расходу материалов совместно с затратами на выполнение швов требуемой прочности и качества, что может оказать решающее влияние на способ раскроя.

При меридиональном раскрое число m полотнищ в полусферической оболочке (рис. 3.3) с радиусом R равно

$$m = \frac{2\pi R}{b}, \quad (3.1)$$

где b — ширина материи, уменьшенная на ширину шва.

Ширина полотнища, сужающаяся от основания к вершине, равна

$$b_i = R \frac{\pi}{m} \cos \frac{90^\circ}{n} i, \quad (3.2)$$

где n — число равных отрезков, на которые разделена длина полотнища; i — номер ординаты.

Для получения плавных очертаний полотнища число отрезков n достаточно принять равным 10.

При широтно-меридиональном раскрое (рис. 3.2, z) число полотнищ принимается от 10 до 30, а их ширина в основании определяется формулой

$$B = \frac{2\pi R}{m}. \quad (3.3)$$

Для нахождения ширины полотнища используется формула (3.2). Подробно метод широтно-меридионального раскроя рассматривается в работе [5]. В формулах (3.1) — (3.3) деформации материала не учитываются.

В ряде случаев возникает необходимость проектирования цилиндрических оболочек на прямоугольном плане. Для таких оболочек форма торцовых

окончаний часто решается в виде цилиндрических поверхностей. Раскрой полотнищ торца такой формы осуществляется по схеме развертки его поверхности, согласно рис. 3.5. Ширина полотнища принимается равной ширине материала, а текущие ординаты его длины вычисляются по формуле

$$y_i = \frac{90^\circ - \alpha_i}{90^\circ} \cdot \frac{\pi}{2} R, \quad (3.4)$$

$$\alpha_i = \arcsin \frac{x_i}{2};$$

x_i — ордината ширины полотнища.

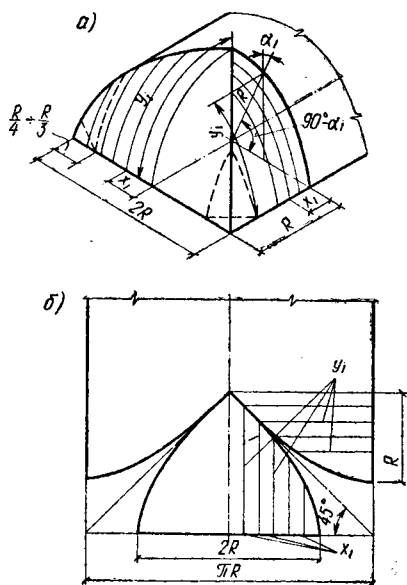


Рис. 3.5. Торце цилиндрической оболочки, образованный пересечением двух цилиндрических поверхностей

a — аксонометрия; b — раскрой

При таком раскрое торца достигаются некоторая экономия материала и сокращение протяженности швов в сравнении с меридиональным раскроем.

Эта форма оболочки не удовлетворяет условиям двухосного растяжения во всех ее точках поверхности. Однако опыты авторов (см. гл. 1, рис. 1.11,б) и ряда других специалистов [7, 8] подтверждают возможность применения оболочек с прямоугольным планом. При их испытании оказалось, что складки оболочки в местах сопряжения цилиндрических поверхностей при избыточном давлении воздуха 10—25 мм вод. ст были почти незаметны, что объясняется высокой деформативностью материалов оболочек.

При проектировании оболочек возможно применение и других методов раскроя. В частности, некоторые вопросы изготовления оболочек сложной криволинейной формы изложены в [6].

Проектирование и раскрой оболочек во всех случаях выполняются с учетом анизотропии материала: как правило, прочность по основе больше, чем по утку. Материал своей основой должен располагаться в направлении действия наибольших усилий, вызываемых суммарным воздействием внешних нагрузок и избыточного давления воздуха. Учет различий в деформативности материала по основе и утку необходим также для сохранения заданной геометрической формы оболочки.

Методы раскроя должны обеспечивать не только создание формы, удовлетворяющей особенностям формообразования мягких оболочек, но и экономии материалов, поскольку стоимость последних доходит до 75% общей стоимости комплекта сооружения.

Таблица 18

Показатели расхода материала на изготовление оболочек цилиндрической формы со сферическими торцами

Показатели	Единица измерения	Размеры оболочек (длина×ширина×высота) в м					
		43×8×6	47×12×7,5	40×11,6×5,8	34×16×8	36×16×8	42×20×9
Общий расход	м ²	1255	1570	819	1410	1240	1542
В том числе:							
оболочка	»	719	1084	732	793	1087	1264
балластные мешки для анкеровки	»	170	215	—	307	—	—
герметизирующие фартуки	»	366	271	87	310	153	278
Расход на 1 м ² полезной площади	»	3,7	3,1	2	2,4	2,4	2
Удельный расход на балластные мешки и фартуки	%	42,6	30,9	10,5	43,7	12	18

Некоторые данные о расходе материалов на изготовление цилиндрических оболочек со сферическими торцами приведены в табл. 18.

Большое влияние на стоимость оболочки оказывает не только форма, но и конструкции ее элементов и деталей. Например, применение балластных мешков для крепления оболочек требует значительного расхода материалов (до 40% общего), а следовательно, и повышения затрат на изготовление.

Необходимость изыскания рациональных форм и конструкций оболочек приводит к разработке единого нормального ряда габаритных схем ПС, благодаря чему можно было бы упорядочить проектирование, а также облегчить потребителю их выбор.

Исходя из опыта проектирования, изготовления и эксплуатации ПС авторы рекомендуют серию унифицированных пневматических сооружений (УПС) с учетом использования в них типовых монтажных секций, деталей и узлов, унифицированных по конструкции (табл. 19).

Таблица 19

Габариты элементов конструкций и показатели унифицированных пневматических сооружений

Марка сооружения	Минимальные габариты оболочек (ширина×длина×высота), в м	Габариты шлюзов (ширина×высота×длина) в м			Полезная площадь в м ²	Строительная кубатура в м ³
		служебный нормальный	служебный увеличенный	грузовой		
УПС-8	8×16×4	1,4×2,1×2,5	—	—	115	335
УПС-12	12×24×6	1,4×2,1×2,5	—	3,5×3,5×8,5	257	1316
УПС-16	16×32×8	—	2×2,1×2,5	3,5×3,5×8,5	460	2680
УПС-20	20×40×10	—	2×2,1×2,5	3,5×3,5×8,5	714	5240

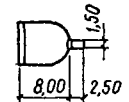



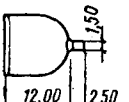




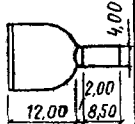

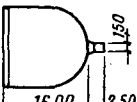

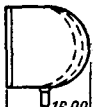


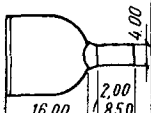
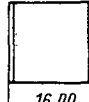
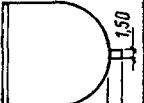
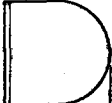

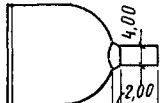

В предвидении необходимости увеличения длины ПС оболочки рекомендуется изготавливать составными, добавляя типовые секции (вставки), длина которых принимается равной пролету оболочки. Они присоединяются непосредственно на строительной площадке с помощью монтажных швов.

Размеры самой малой оболочки этой серии (УПС-8) соответствуют пределу экономической и эксплуатационной эффективности в сравнении с пневмокаркасными, каркасно-тканевыми и другими конструкциями.

Для оболочек пролетом 12 и 16 м предусмотрено шесть вариантов торцовых секций, два из которых рассчитаны на установку поддерживающих устройств (металлических или пневматических низкого давления), о которых говорится в главе 5.

Рекомендуемый набор типовых секций для каждого пролета оболочек приведен в табл. 20. Длина каждой секции равна про-

Типовые торцовые и удлинительные секции (вставки) оболочек УПС

Пролет, м	Типы секций						
	1	2	3	4	5	6	7
	С людским шлюзом	С людским шлюзом	Раскрываемый торец со служебн. шлюзом	Раскрываемый торец	Глухой торец	С грузовым шлюзом	Вставка
8			—	—		—	
12							
16							
20			—	—			

лету оболочки. Набор обеспечивает возможность компоновки, по усмотрению потребителя, цельных или составных воздухоопорных оболочек. Все секции снабжаются унифицированными силовыми поясами. На торцовых секциях предусматриваются переходники к шлюзам, карманы для разгружающих тросов и патрубки для присоединения воздухопроводов ВУ и ОУ.

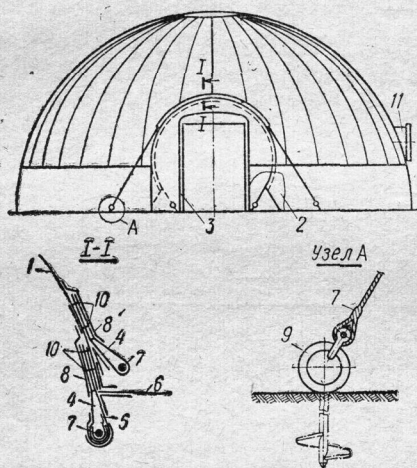


Рис. 3.6. Вид оболочки со стороны торцового шлюза и деталь заделки разгружающих тросов в месте при-
мыкания переходника

1 — оболочка; 2 — силовой пояс; 3 — каркас шлюза; 4 — наружный карман; 5 — внутренний карман; 6 — переходник; 7 — разгружающий трос; 8 — герметизирующая лента; 9 — анкер; 10 — строчки прошивки; 11 — тканевый патрубок оболочки

Внутренние и наружные карманы для тросов устраиваются по периметру врезки переходников в оболочку (рис. 3.6). Тросы, предварительно запасованные в резиновые шланги, укладываются в карманы, как правило, в заводских условиях. Концы их крепятся к анкерам, места установки которых определяются после пробной установки оболочки в проектное положение. У оболочек, устанавливаемых на капитальных фундаментах, внутренний разгружающий трос можно заменить вшитыми капроновыми лентами.

Патрубки для подсоединения съемных воздухопроводов ВУ и ОУ размещаются в цилиндрической части торцовых секций оболочки группами по три в каждой (рис. 3.1). При этом во избежание образования сквозняков патрубки не следует располагать против шлюзов. Рекомендуется размещение патрубков вдали от шлюзов, что обеспечивает более равномерное вентилирование в летнее время и распределение теплого воздуха в оболочке при отоплении ПС.

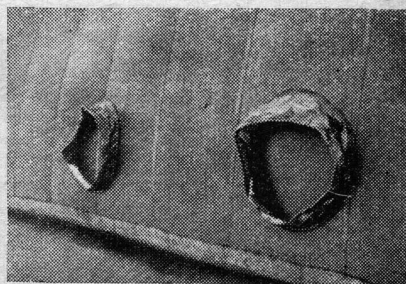


Рис. 3.7. Тканевые патрубки

Каждый патрубок представляет собой короткий отрезок (20—30 см) тканевого рукава цилиндрической формы, один конец которого присоединяется клеевым или клеепрошивным швом к оболочке (рис. 3.7). В свободную его кромку заделывается льняной канатик, с помощью которого обеспечивается стыкование патрубка с торцом съемного возду-

хода (см. гл. 6, рис. 6.8). Вырезка ткани оболочки внутри патрубков выполняется только перед присоединением ВУ или ОУ при монтаже сооружения.

В рекомендуемой серии УПС (см. табл. 24) устройство вентиляционных клапанов не предусматривается, поскольку приня-

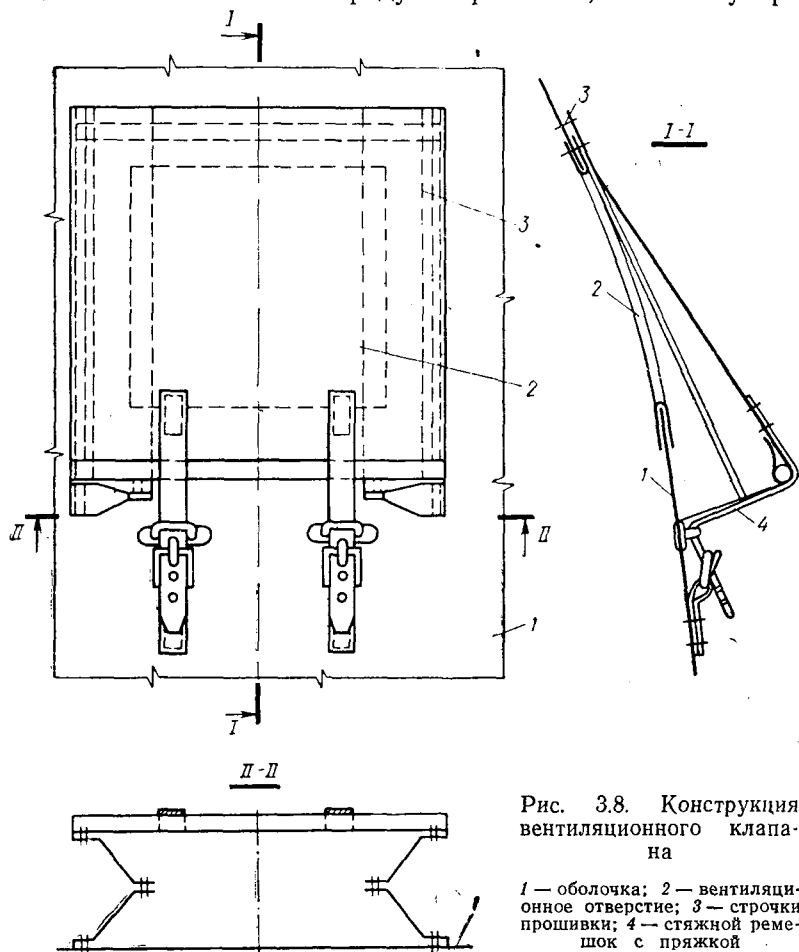


Рис. 3.8. Конструкция вентиляционного клапана

1 — оболочка; 2 — вентиляционное отверстие; 3 — строчки прошивки; 4 — стяжной ремешок с пряжкой

тые типы ВУ (см. табл. 40) обеспечивают дву-трехкратный обмен воздуха в 1 ч. Однако в ряде случаев такие клапаны могут быть полезны, особенно при эксплуатации сооружений в жарких районах страны. Вентиляционные клапаны довольно просты по конструкции. Это отверстия в оболочке, которые открываются или закрываются, как правило, вручную. Пример конструктивного решения вентиляционного клапана показан на рис. 3.8. Регулировка пропускной способности такого клапана производится при помощи ремешков и пряжек. Находят применение также вен-

тиляционные клапаны с автоматическим включением от избыточного давления воздуха в оболочке. В этом случае они выполняют функции предохранительного клапана.

Эффективность вентиляционных клапанов и вопросы выбора места их установки еще недостаточно изучены. Обычно их устанавливают в верхней части оболочки, где скапливается нагретый воздух. Иногда вентиляционные клапаны ставят по бокам оболочки на высоте 1,5—2 м от уровня пола в предположении создания условий усиленной вентиляции воздуха только в рабочей зоне помещения.

К оболочкам ПС могут крепиться также и другие детали: петли для подвески электроосвещения, «лапы» для оттяжек или блоков подъемных устройств и т. п. В двухслойных оболочках устанавливаются перепускные клапаны мягкого или жесткого типа или прорезаются калиброванные отверстия.

13. ЗАВОДСКИЕ И МОНТАЖНЫЕ ШВЫ

Полотнища, образующие поверхность пневматической оболочки, соединяются заводскими швами. Основные требования, которым они должны удовлетворять, следующие: прочность и деформативность, близкие к таковым для основного материала оболочки; воздухо- и водонепроницаемость, стойкость к действию факторов светопогоды и химической агрессии; экономические и технологические достоинства. Клеевые и сварные швы не должны выделять летучих токсичных компонентов.

Монтажные швы применяются для соединения секций составных оболочек и для присоединения переходников к тентам шлюзов при монтаже ПС непосредственно на строительной площадке. Кроме перечисленных выше качеств, монтажные швы должны обладать простотой конструкции и допускать быстрое соединение и разъединение секций усилиями 1—2 человек.

Монтажные швы применяются для соединения секций составных оболочек и для присоединения переходников к тентам шлюзов при монтаже ПС непосредственно на строительной площадке. Кроме перечисленных выше качеств, монтажные швы должны обладать простотой конструкции и допускать быстрое соединение и разъединение секций усилиями 1—2 человек.

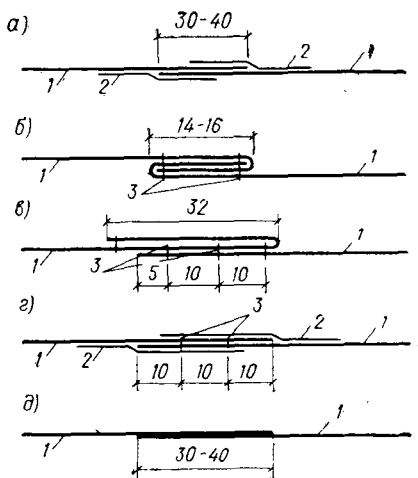


Рис. 3.9. Заводские швы оболочек

а — клеевой; *б* — прошивной замковый; *в* — прошивной накладной; *г* — клеепрошивной; *д* — сварной; *1* — материал оболочки; *2* — герметизирующая лента; *3* — нитка прошивки

Заводские швы делятся на клеевые, клеепрошивные, прошивные и сварные (рис. 3.9).

Клеевые и клеепрошивные швы получили широкое распространение в оболочках, изготавливаемых из прорезиненных мате-

рий. Их конструкция и технология изготовления унаследованы от таких пневматических конструкций, как аэростаты, газгольдеры, лодки и т. п.

Клеевые швы герметичны, но слабы и находят применение в малонапряженных конструкциях. Ширина переклейки в таких швах обычно принимается равной 30—40 мм. Как показывают испытания, дальнейшее увеличение этого размера нецелесообразно. Повышение прочности клеевого шва достигается за счет использования клеев, близких по составу к материалам покрытия текстиля. Наиболее часто применяемые самовулканизирующиеся клеи (холодного отверждения) дают менее прочные соединения в сравнении с клеями горячей вулканизации. Клеевые швы обладают сравнительно низкими атмосферостойкостью и теплостойкостью (не более 60—80°С). В конечном счете происходит расслоение швов и отрыв герметизирующих лент. Устранение таких дефектов в условиях эксплуатации оболочек ПС бывает весьма затруднительно.

При изготовлении оболочек из материалов высокой прочности применяются клеепрошивные швы. Соединяемые полотнища перед прошивкой склеиваются, что создает определенное удобство для их сшивания, а также повышает герметичность шва. Однако двойной процесс (сначала склеивание, затем прошивание) занимает много времени, требует удвоенных трудовых затрат и дополнительного расхода материалов. Поэтому клеепрошивные швы, несмотря на их популярность на резинотехнических предприятиях, для оболочек ПС нельзя считать рациональными.

Характеристика клеев, наиболее часто применяемых для изготовления клеевых и клеепрошивных швов оболочек, дана в табл. 21.

Из многих разновидностей прошивных швов [15] для оболочек ПС наиболее употребительны накладные (с открытыми или закрытыми срезами) и замковые (рис. 3.9, б, в). Их достоинство заключается в большой скорости прошивания, особенно при использовании многоигольных машин, и малой трудоемкости в сравнении, например с клеепрошивными. При выполнении прошивных швов имеются и трудности. В частности, бывает трудно совместить края полотнищ материала, особенно длинных; необходимо снижать нагрев иглы путем охлаждения игльной нити керосином, спиртом или силиконовой смазкой. При отсутствии специальных швейных машин прошивка выполняется на серийных — классов 23а, 36, 82, 83, 87, 216 и 236, применяемых в текстильной и обувной промышленности. Однако при такой замене процесс шитья становится многодельным и трудоемким.

Прошивные швы менее герметичны по сравнению с клеепрошивными и сварными и требуют применения атмосферостойких нитей. Применяемые в настоящее время капроновые нити 3к и 7к этим качеством не обладают, что приводит к необходимости изыскания путей их защиты от действия факторов светопогоды.

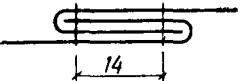

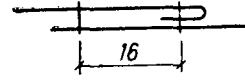
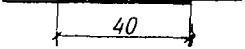
Характеристика клеев холодного отверждения, применяемых для изготовления клеевых и клеешовных швов оболочек

Шифр клея	ТУ, ГОСТ	Прочность склеивания в кгс/5 см	Температура стойкости в град	Срок хранения	Расход клея на один слой в кгс/м ²	Компоненты	Компоненты резинового покрытия материи	Специфические свойства
4508	ТУ 1105-50	3	-50 ÷ +40	2 года	0,08—0,1	Однокомпонентный	НК, СКБ, СКИ	Влагостойкий, нестойкий к маслам и топливу
СВ-1	МРТУ 38-5-6064-65	5	-50 ÷ +80	4—6 ч в смеси	0,1—0,15	Двухкомпонентный (4508+лейконат)	НК, СКБ, бутилкаучук	Влагостойкий
СВ-2а	ТУ 38-5-390-69	10	-35 ÷ +80	14—16 ч в смеси	0,1—0,15	Двухкомпонентный (компонент А-лейконат)	Найрит	Влагостойкий, ограниченно маслостойкий
СВ-3	ВТУ 38-9-110-65	3	+60	8 ч в смеси	0,1—0,15	Двухкомпонентный (компонент А-лейконат)	СКН-26,40	Маслостойкий
88-11	МРТУ 38-5-880-66	11	-50 ÷ +50	3 мес.	0,1—0,12	Однокомпонентный	Каучуки общего назначения	Влагостойкий, ограниченно маслостойкий

В этих целях прошивные швы смазывают специальными составами типа СПО-46, лака ХСПЭ, закрывают нить свободным краем сшиваемого полотна либо оклеивают герметизирующими лентами (рис. 3.9, в, г). Закрытый шов (рис. 3.9, в) прост в исполнении, но требует повышенного на 3—5% расхода материала в сравнении с накладным швом с открытыми срезами. Прошивные швы делаются преимущественно в две строчки. Их прочность составляет не более 30—40% прочности основного материала оболочки (табл. 22).

Таблица 22

Конструкция и показатели прочности швов оболочек зарубежного производства

Вид шва	Конструкция шва	Марка сооружения	Показатели		
			прочность материала по основе в кгс/5 см	прочность шва в кгс/5 см	относительная прочность шва в %
Замковый		Н-1	184	73	39,6
»		К-1	260	90	34,6
Настрочный		А-1	285	85	32
Сварной		Б-1,2	250	235	94

Сварные швы имеют наиболее высокие эксплуатационно-конструктивные качества. Однако они требуют специального технологического оборудования. Кроме того, не всякий материал можно сваривать. Как правило, свариваемостью обладают материалы с покрытиями из поливинилхлорида или других термопластов. Опыт изготовления оболочек из прорезиненных материй со сварными швами имеется в ЭКБ ВНИИСТ, где освоено соединение полотнищ на специальном прессе длиной 12 м методом горячей вулканизации (температура полза 156°) [8]. В качестве соединительной прослойки используется невулканизованная калиброванная резина такого же композиционного состава, как

и покрытие соединяемых полотнищ. Контактно-тепловая сварка на этом прессе была также использована при изготовлении экспериментального ПС из армированной пленки (рис. 3.10). Материал покрытия ткани имел двух- и трехкомпонентный состав:

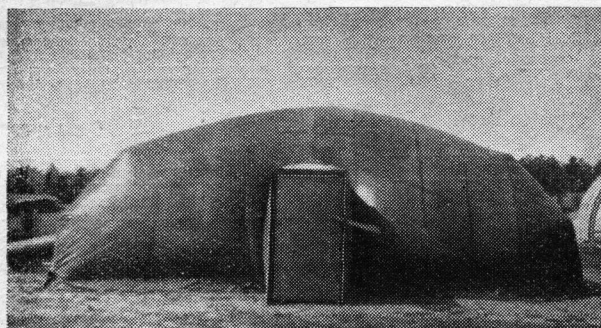


Рис. 3.10. Экспериментальная обочка с прямоугольным опорным контуром; размер $12 \times 8 \times 4$ м

ПВХ (поливинилхлоридная смола) + СКН-26 (синтетический каучук нитрильный) и ПВХ + СКН-26 + ПА (сополимер полиамида).

Сварные швы таких армированных пленок могут быть выполнены также на гидравлических прессах типа ПС-1. В частности, контактнo-тепловая сварка на таком прессе была применена ВНИИСТ для отработки конструкций и режимов изготовления сварных швов армопленок арт. 24192 и 24214 с покрытием из ПВХ. Качество сварки материалов на обоих прессах очень высокое. Прочность швов составляет 80—95% прочности соединяемых материалов.

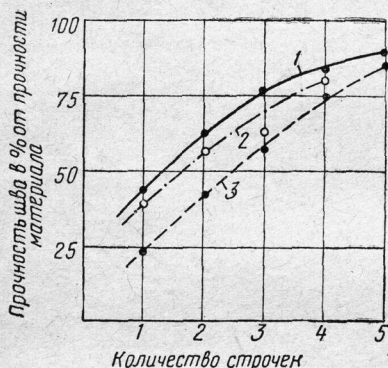


Рис. 3.11. График изменения прочности прошивных накладных швов в зависимости от количества строчек прошивки

1 — армопленка, арт. 24224/1 прочностью 490 кгс/5 см; 2 — армопленка, арт. 23025 прочностью 480 кгс/5 см; 3 — армопленка, арт. 23079 прочностью 890 кгс/5 см

Прочность прошивных швов зависит от прочности исходных материалов, числа строчек и расстояния между ними, размеров стежка и толщины иглы, наличия и ширины нахлеста, характера напряженного состояния обочки.

Как показывают исследования авторов (рис. 3.11) и других специалистов, для материалов прочностью более 8 тс/м влияние на прочность шва оказывают число строчек и прочность ниток. Испытаниями установлено, что с увеличением числа строчек характер разрушения шва меняется. Первоначально прочность шва

увеличивается почти пропорционально их количеству. При этом разрушение шва происходит из-за нарушения целостности строчек. С дальнейшим увеличением числа строчек, особенно при соединении материалов прочностью до 4—5 тс/м, прочность шва практически не повышается, так как в подавляющем большинстве случаев он разрушается вследствие подреза материала прошивкой. Таким образом, переход от одного вида разрушения к другому по существу определяет тот момент, когда дальнейшее увеличение числа строк в шве уже оказывается нецелесообразным.

В. П. Шпаков [14] рекомендует определять оптимальное число строк n_d в прошивном шве по эмпирической формуле

$$n_g = 1,2 \frac{T_{кр}}{p_n t}, \quad (3.5)$$

где $T_{кр}$ — предел прочности материала при одноосном кратковременном нагружении в кгс/см;

P_n — прочность швейной нитки на разрыв в кгс;

t — частота строчки (число стежков в 1 см).

Согласно [12], оптимальная длина стежка для соединения прорезиненных материй прочностью 5 тс/м составляет 5—6 мм, а расстояние между строчками рекомендуется принимать в пределах 10—15 мм. При этих условиях можно получить трехстрочечный накладной шов прочностью до 85—87% кратковременной прочности основного материала.

Однако по отчетным данным других исследователей, например [14], оптимальная длина стежка находится в пределах 2—3 мм. Для расчета прочности однострочечного шва Загорским филиалом НИИ резиновой промышленности [9] разработана методика [7], на основе которой можно написать следующую формулу:

$$T_{н2} = Ta \sqrt{1 + \frac{k_1^2}{2} - k_1 \left(\sin 2\delta + \frac{k_1}{2} \cos 2\delta \right)} \times \\ \times e^{-k_2(\beta - \gamma - \delta)} e^{k_1 \alpha} \leq [p_n], \quad (3.6)$$

где $T_{н2}$ — максимальное натяжение нити на протяжении одного стежка (в месте пересечения игольной и челночной нитей) в кгс;

$[p_n]$ — допускаемое натяжение нити в кгс;

T — натяжение ткани в кгс;

a — длина стежка швейной строчки в см;

k_1 — коэффициент трения между полотнищами ткани (капрон по капрону — 0,3; резина по капрону — 0,38; резина по резине — 0,5);

k_2 — коэффициент трения между нитью и поверхностью ткани в отверстиях, проделанном иглой (для капроновых ниток: 0,47—0,6 — при тканях с небольшим слоем обреза; 0,6—0,7 — при тяжелых каландро-

ванных тканях; для лавсановых ниток k_2 принимается на 10—20% выше);

k_4 — коэффициент трения «нить по нити» (для капрона — 0,25; для лавсана — 0,29);

α — угол обхвата нитей (считается $\alpha = 180^\circ$);

β — угол между нормалью к ткани и направлением действия натяжения:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2 - k_1 \sin 2\delta}{k_1 (1 - \cos 2\delta)};$$

γ — угол трения между нитью и поверхностью ткани (9—11° для необрезиненных; 19—22° для каландрованных; 22—31° для шпредиговых капроновых тканей).

Существующие предложения по расчету прошивных швов весьма приближенны и не всегда охватывают взаимосвязь всех факторов, оказывающих влияние на прочность. Поэтому в практике проектирования оболочек наряду с приближенными расчетами прочности заводских швов обязательно производится проверка их прочности опытным путем с учетом технологии производства и наличия оборудования для их изготовления.

Монтажные швы проектируют с учетом формы, размеров и конструктивных особенностей оболочки, а также назначения сооружения в целом. Прочность и герметичность монтажных швов определяется опытным путем. Для их размещения выбирают такие места оболочки, где усилия от действия избыточного давления воздуха равномерны по всей длине шва, а искажение формы оболочки, вызванное местным повышением жесткости, не имеет существенного значения. Например, в цилиндрической оболочке со сферическими торцами монтажные швы рекомендуется устраивать в цилиндрической части на удалении не менее 1,5—2 м от линии примыкания торца.

Используется несколько видов монтажных швов: петельно-тросовые, катенарные, петлевые, застежка «молния» и накладные. Все эти виды проверены авторами как при их заводском изготовлении, так и в условиях эксплуатации. В процессе испытаний их оценка производилась по следующим показателям: прочность, герметичность, трудоемкость в изготовлении и сборке. На рис. 3.12 показана конструкция петельно-тросового монтажного шва. Его замыкание осуществляется через петли с помощью двух тросов, один из которых закладывается в петли на заводе, другой — при монтаже. Петли клеиваются и вшиваются в края соединяемых секций оболочек. Герметизация шва обеспечивается внутренними фартуками. Шов обладает высокой прочностью, но трудоемок в изготовлении и монтаже. Вариант монтажного шва аналогичной конструкции, но с петлями больших размеров, был проверен также в ЦНИИСК [1].

Катенарный монтажный шов (рис. 3.13) соединяет секции оболочки следующим образом. Края секций, обрамленные рядом мелких катенарий с карманами, стыкуются между собой двумя фалами. Один фал закладывается заранее в карманы первой секции с выпуском петель на стыках катенарий еще на заводе, другой — свободный — пропускают сквозь петли при монтаже. В процессе эксплуатации ПС было установлено, что шов обеспечивает равномерное распределение усилий в оболочке и передаче

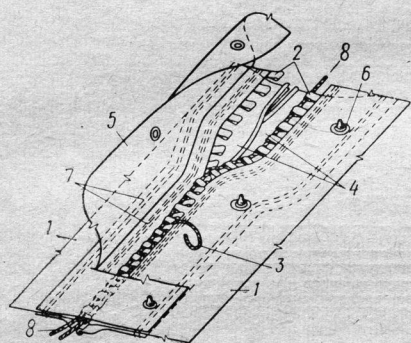


Рис. 3.12. Петельно-тросовый монтажный шов

1 — секция оболочки; 2 — тканевые петли; 3 — замыкающий трос; 4 — внутренние фартуки; 5 — наружный фартук; 6 — пукля; 7 — строчки прошивки; 8 — закладной трос

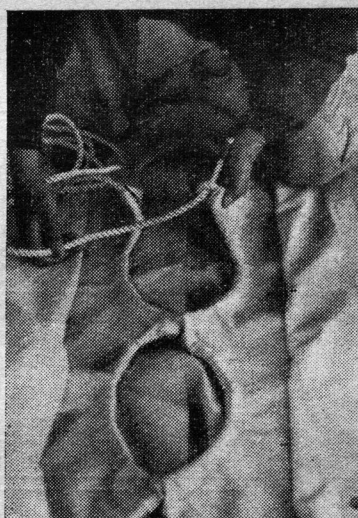


Рис. 3.13. Катенарный шов

их на петли. Однако его герметизация с помощью наружных и внутренних фартуков оказалась неудовлетворительной.

Петлевые двухрядные швы (рис. 3.14) разработаны одним из заводов резинотехнических изделий. Секции оболочки соединяются путем переплетения двух рядов петель из капронового шнура типа ШКК-450 или ШКК-700. В первом варианте (рис. 3.14, а) оба ряда петель имеют край только одной секции. На крае другой устанавливаются люверсы. Замыкание шва производится после предварительного пропуска петель через люверсы путем последовательного нанизывания одной петли на другую. Второй вариант (рис. 3.14, б) имеет более сложную конструкцию. Края обеих секций снабжены двумя рядами петель, которые при замыкании шва последовательно нанизываются друг на друга снаружи и изнутри.

Воздухонепроницаемость двухрядных петлевых швов обеспечивается герметизирующими лепестками, а водонепроницаемость — наружными фартуками. Замыкание фартуков осуществляется с помощью ремней и «пуклей» (резиновых шайб с головкой) или на кнопках.

Оба варианта петлевого шва проверены на ряде ПС как по трудоемкости их монтажа, так и по надежности в условиях эксплуатации. При этом установлено, что по трудоемкости они примерно одинаковы. Однако наличие металлических люверсов

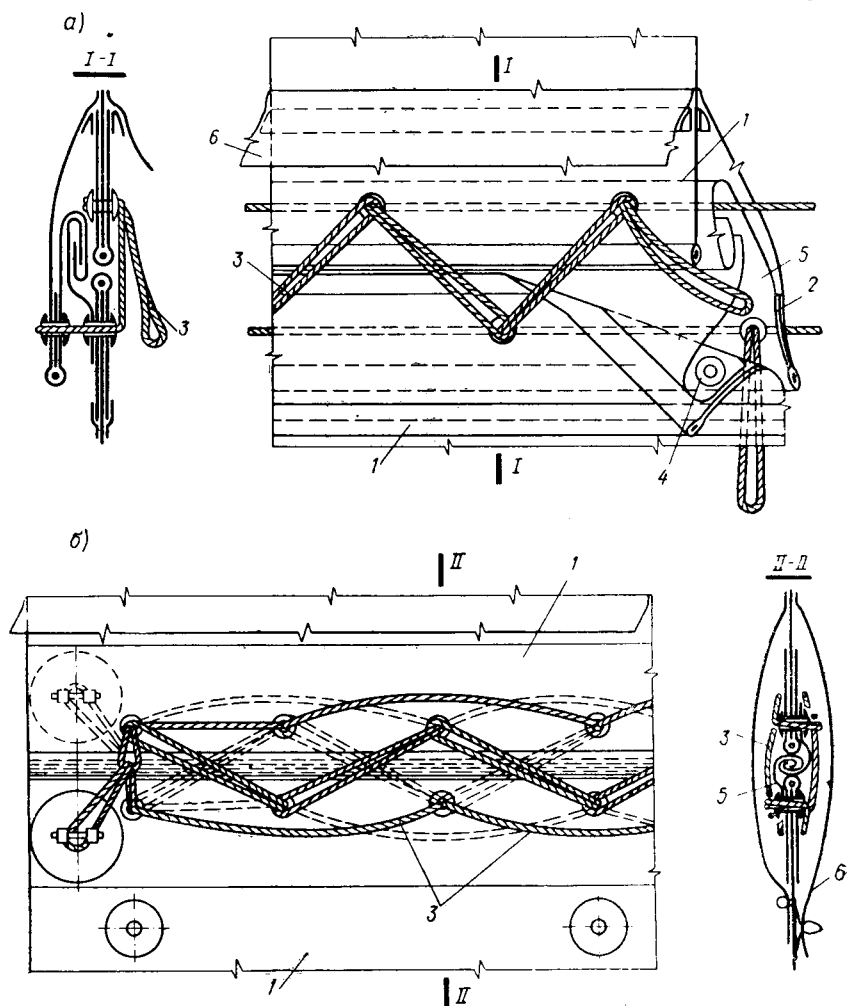


Рис. 3.14. Петлевые двухрядные швы

a — с односторонними петлями; *b* — с двусторонними петлями; 1 — кромки соединяемых секций; 2 — консольный фартучек; 3 — петли из капронового шнура; 4 — отверстия с люверсами; 5 — герметизирующие лепестки; 6 — фартук

в петлевом шве ведет к снижению его прочности и герметичности вследствие увеличения деформативности за счет образования сдвижек и срывов люверсов. Испытаниями петлевых швов на прочность установлено, что сдвижка и срыв люверсов наступают при нагрузке, соответственно, 400 и 500 кгс/м, а разрушение

швов — при 700 кгс/м. Более высокую прочность и герметичность имеет второй вариант петлевого шва (рис. 3.14, б), который и рекомендуется для применения.

Некоторые зарубежные фирмы в качестве монтажного шва применяют металлические и пластмассовые застежки «молния». Воздухо- и водонепроницаемость швов на застежках обеспечивается посредством специальных выпусков ткани, закладываемых в края соединяемых секций оболочки (снаружи и изнутри). Эксплуатация оболочек с такими швами показала нестойкость застежек «молния» к коррозии и механическим повреждениям.

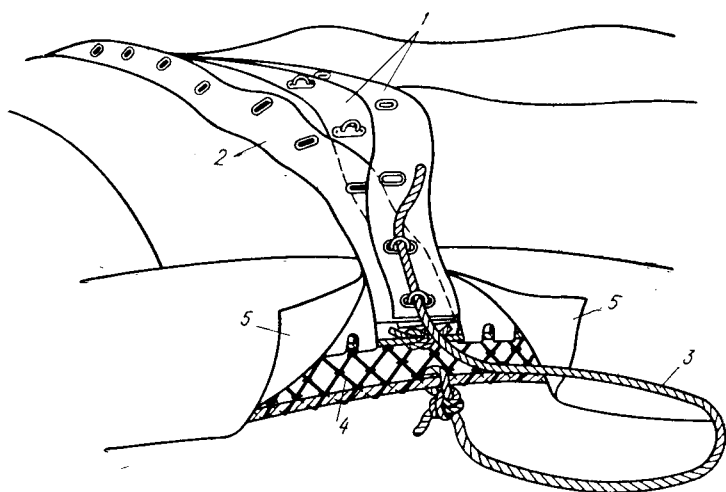


Рис. 3.15. Накладной монтажный шов

1 и 2 — кромки соединяемых секций; 3 — замыкающий шнур; 4 — силовой пояс с сеткой; 5 — наружный фартук

ПС иногда нуждаются и в таких монтажных швах, к которым требования герметичности не предъявляются, например для присоединения балластных мешков, наружных фартуков и переходников к тентам шлюзов. Ими могут служить однорядные петлевые и накладные швы (рис. 3.15).

Введение в конструкцию ПС монтажных швов в каждом конкретном случае должно вызываться обоснованной необходимостью, поскольку их наличие ведет к увеличению утечки воздуха, в силу чего приходится подбирать ВУ с более высокой производительностью, а следовательно, с большей мощностью на приводе в сравнении с ВУ для цельных оболочек.

14. СОПРЯЖЕНИЕ ОБОЛОЧКИ С АНКЕРНЫМ ОСНОВАНИЕМ

Сопряжение оболочки ПС с анкерным основанием обеспечивается с помощью силового пояса и анкеров, устанавливаемых

по опорному контуру. Сопряжение выполняет двоякую функцию: сопротивление подъемной силе, вызываемой избыточным давлением воздуха и действием ветра и герметизацию опорного контура.

Силовой пояс предназначается для сосредоточенной передачи анкерному основанию распределенных растягивающих усилий, возникающих в оболочке. Силовые пояса оболочек подразделяются на катенарные и кромочные прямолинейные.

Катенарные силовые пояса (рис. 3.16) отличаются простотой конструкции и надежностью крепления, но способствуют кон-

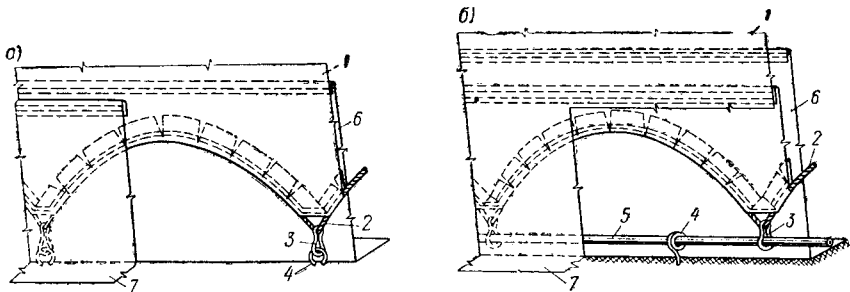


Рис. 3.16. Катенарный силовой пояс, соединяемый с анкерами

a — непосредственно; *б* — с помощью контурной трубы

1 — кромка оболочки; 2 — фала (трос); 3 — соединительная скоба (карабин); 4 — проушина анкера; 5 — контурная труба; 6 — внутренний фартук; 7 — наружный фартук

центрации напряжений в оболочках, возникающих при неточностях в разбивке и установке анкеров. Пролет и высота каждой волны катенарного пояса обычно принимаются равными соответственно 100—150 см и 20—30 см. С увеличением этих размеров возрастают усилия в тросах (фалах), возникает необходимость в постановке анкеров с большим сопротивлением выдергиванию, увеличивается расход материала на фартуки, ухудшается герметизация оболочки из-за выпирания внутренних фартуков под действием избыточного давления воздуха.

Катенарный пояс соединяется с проушинами анкеров, установленных по периметру опорного контура, либо непосредственно (рис. 3.16, *a*), либо при помощи металлической трубы диаметром 25—35 мм, пропускаемой через проушины анкеров (рис. 3.16, *б*).

В качестве силового элемента катенарного пояса используются тросы, капроновые или льняные фалы. Тросы более долговечны, но трудоемки в оплетке и заделке, неудобны при свертывании и транспортировке оболочки. Капроновые и льняные фалы сравнительно легко заделываются в материал пояса, но срок их службы невелик, особенно быстро перетираются петли. Для повышения износоустойчивости в них заделываются металлические коуши. Фалы рекомендуется пропитывать специальными соста-

вами, повышающими их стойкость к воздействию факторов светопогоды.

Результаты испытаний ряда образцов катенарных поясов, отличающихся между собой способами заделки капроновых фал и шагом петель, приведены в табл. 23.

Таблица 23

Результаты испытания катенарных поясов на разрыв

Размер волны пояса в м		Разрушающая нагрузка в тс/м	Характер разрушения
пролет	высота		
1,5	0,4	1150	Разрыв петли с коушем
1	0,2	3200	То же
1	0,2	3200	»
1	0,3	2800	Разрыв тканевого полотнища
1	0,3	2800	То же

Кромочные прямолинейные силовые пояса более равномерно передают натяжение оболочки анкерному основанию. Применяются два вида кромочных поясов: с карманами и сеткой (рис. 3.17).

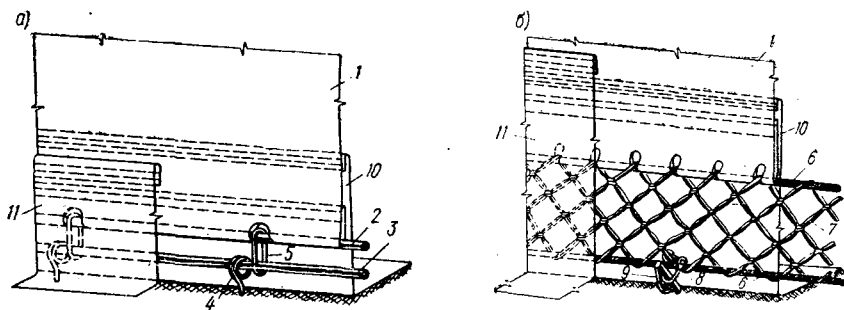


Рис. 3.17. Кромочный прямолинейный пояс

a — с карманами; *б* — с сеткой; 1 — кромка оболочки; 2 — верхняя контурная труба; 3 — нижняя контурная труба; 4 — проушина анкера; 5 — серьга; 6 — фала (трос); 7 — сетка; 8 — соединительная скоба; 9 — анкер; 10 — внутренний фартук; 11 — наружный фартук

Кромочный силовой пояс с карманами для закладки стальных труб или тросов (рис. 3.17, *a*) из одного или двух слоев материала, желательнее более прочного, чем основной, прикрепляется непосредственно к кромке оболочки. Сопряжение пояса оболочки с основанием достигается с помощью двух опорных контуров, собираемых из стальных труб диаметром 25—35 мм, соединенных муфтами. Верхняя и нижняя рамы соединяются серьгами, пропускаемыми через прорези в карманах пояса. Недостаток этого

сопряжения — наличие металлических деталей трубчатых рам в комплекте сооружения, что ведет к увеличению его веса и усложняет транспортировку.

Силовой пояс с сеткой (рис. 3.17, б) присоединяется своей верхней кромкой к тросу, пропущенному в карманы пояса, а другой с помощью такого же троса и скоб — к проушинам анкеров основания. Сетку защищает наружный фартук. Успешная эксплуатация оболочек с такой конструкцией сопряжения с основа-

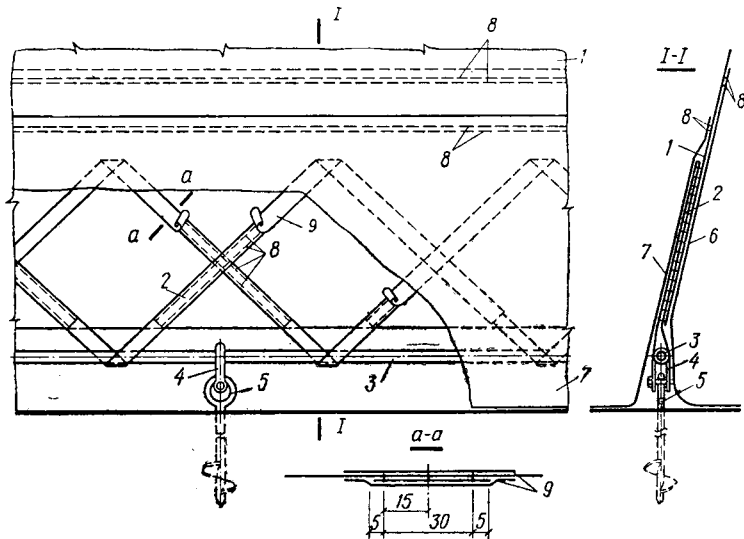


Рис. 3.18. Ленточный силовой пояс

1 — кромка оболочки; 2 — капроновая лента; 3 — стальная труба (трос); 4 — скоба; 5 — проушина анкера; 6 — внутренний фартук; 7 — наружный фартук; 8 — строчки прошивки; 9 — защитные ленты

нием в течение ряда лет подтвердила его работоспособность и надежность.

Возможны и другие конструктивные решения силовых поясов оболочек. Например, на оболочке УПС-8 был использован ленточный пояс (рис. 3.18). В качестве силового элемента применялась капроновая лента, пришиваемая к полотнищу пояса. Крепление пояса оболочки к анкерам осуществлялось с помощью контурной трубчатой рамы. Пояс надежно и равномерно передает усилия оболочки к анкерам. При малом шаге петель (0,4—0,5 м) возможна замена труб тросами с натяжными устройствами.

Герметизация контура оболочки обеспечивается внутренними фартуками, пришиваемыми к низу оболочки по всему периметру. Избыточное давление прижимает фартуки к основанию, и утечки воздуха сокращаются. Наименьшего расхода материала на

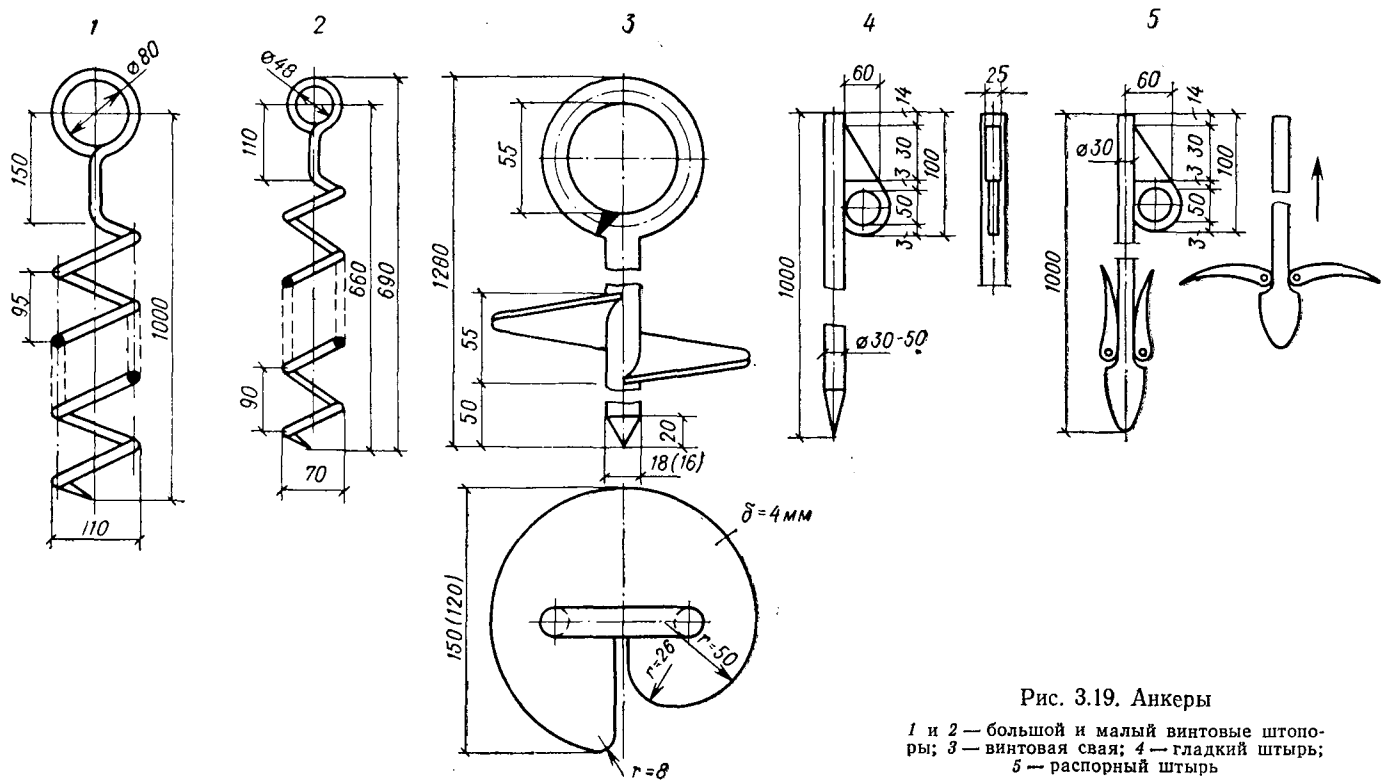


Рис. 3.19. Анкеры

1 и 2 — большой и малый винтовые штопоры;
 3 — винтовая свая; 4 — гладкий штогр;
 5 — распорный штогр

фартуки требуют оболочки с кромочными поясами, наибольшего — с балластными мешками.

Сооружения, рассчитанные на временную эксплуатацию, крепят, как правило, с помощью анкеров (рис. 3.19), которые должны удовлетворять следующим требованиям: обладать необходимой несущей способностью, иметь малые размеры и вес, допускать погружение в грунт вручными усилиями одного-двух человек.

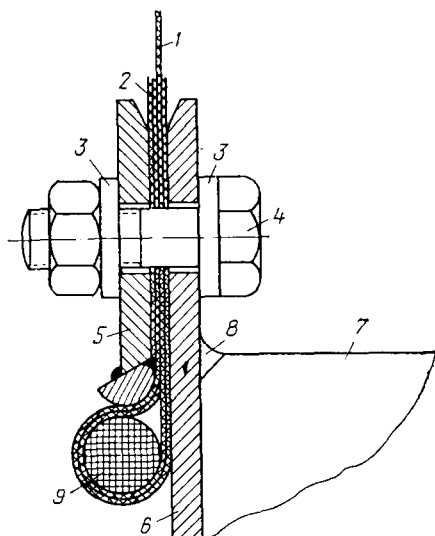


Рис. 3.20. Вариант крепления оболочки к ленточному бетонному фундаменту

1 — материал оболочки; 2 — усиление кромки оболочки; 3 — шайбы; 4 — болт; 5 — прижимная накладка; 6 — анкерная накладка; 7 — бетонный ленточный фундамент; 8 — уплотнение; 9 — капроновый шнур

Опыт эксплуатации ПС показывает, что наиболее эффективны анкеры — винтовые сваи с одной лопастью, которые погружаются в грунты 2 и 3 категории за 5—10 мин. Однако применение таких свай, равно как и винтовых штопоров, совершенно исключается на скальных и мерзлых грунтах и значительно затруднено при плотных глинистых грунтах.

Сопротивление винтовых штопоров выдергиванию заметно снижается при увлажнении грунтов основания.

Крепить оболочки ПС в зимнее время можно металлическими штырями, забиваемыми вручную или пневмомолотками в грунт обычно под углом 30—45° к вертикали. Мешки, заполняемые балластом (грунтом, камнем, водой), применяются только в особых случаях. Рекомендовать их нельзя из-за

больших расходов материала на изготовление и затруднений при монтаже и демонтаже в зимних условиях.

Пневматические сооружения, устанавливаемые стационарно и рассчитанные на длительную эксплуатацию, крепятся, как правило, на ленточных фундаментах, а также на бетонных или железобетонных блоках. Пример крепления оболочки к фундаменту приведен на рис. 3.20.

15. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ АНКЕРОВ

Прочность анкерного основания оболочки может быть гарантирована, если выдергивающее усилие N_a , передаваемое оболочкой анкеру, не будет превосходить его расчетной несущей способности (P_a).

Расчетная несущая способность винтовой сваи, согласно [11, 12], может быть определена по формуле

$$[P_a] = kmP_a, \quad (3.7)$$

где k — коэффициент однородности грунта, принимаемый равным 0,7;

m — коэффициент условий работы;

P_a — несущая способность винтовой сваи мелкого заложения.

Несущая способность P_a винтовой сваи мелкого заложения по [4] находится из условия образования над лопастью конуса выпирания грунта

$$P_a \leq Q + N \cos \psi + G, \quad (3.8)$$

где Q — вес грунта в объеме усеченного конуса в $тс$;

N — сила сопротивления грунта отрыву, действующая по боковой поверхности в $тс$;

G — собственный вес сваи в $тс$;

ψ — угол наклона образующей конуса выпирания к оси сваи.

Для определения сил Q и N служат формулы:

$$Q = \frac{\gamma H \pi D^2}{4} \left[1 + \frac{2H \operatorname{tg} \psi}{D} + \frac{4}{3} \left(\frac{H}{D} \operatorname{tg} \psi \right)^2 \right]; \quad (3.9)$$

$$N = \frac{\pi H c}{\cos \psi} (D + H \operatorname{tg} \psi), \quad (3.10)$$

где H — глубина погружения лопасти сваи в грунт в $м$;

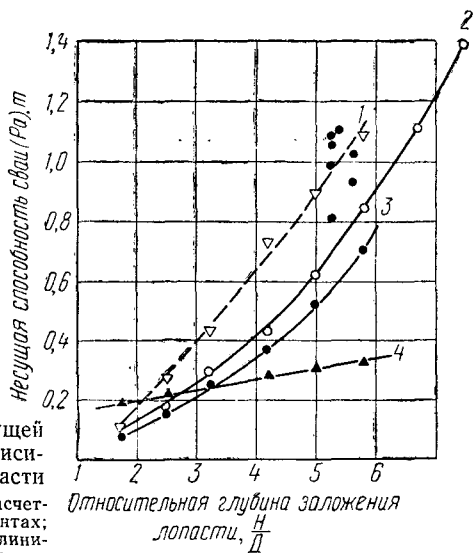
D — диаметр лопасти в $м$;

γ — объемный вес грунта в $тс/м^3$;

c — удельное сцепление грунта в $тс/м^2$, принимаемое по СН 200-62 (приложение 19).

Для практических расчетов угол ψ рекомендуется принимать: при связных твердых грунтах — равным углу внутреннего трения ϕ ; при тугопластичных — $0,66\phi$;

Рис. 3.21. График изменения несущей способности винтовых свай в зависимости от глубины заложения лопасти



1 — экспериментальные данные; 2 — расчетные — по формуле (3.8) в супесчаных грунтах; 3 — расчетные — по формуле (3.8) в суглинистых грунтах; 4 — расчетные данные по методике [15] в супесчаных грунтах

при насыпных со слабым уплотнением ($\gamma = 1,5-1,6 \text{ тс/м}^3$) — 0,3ф. Среднее значение угла ϕ можно принимать по СН 200-62 (приложение 19).

Возможность использования зависимости (3.8) для определения несущей способности винтовых свай с диаметром лопасти 120—150 мм была проверена экспериментально (рис. 3.21). Всего были испытаны на выдергивание в осенне-весенний период 144 винтовые сваи, погруженные в супесчаные и суглинистые грунты на глубину от 20 до 100 см.

Результаты расчета несущей способности винтовых свай мелко заложения по формуле (3.8) достаточно хорошо согласуются с экспериментом. Глубину погружения лопасти винтовой сваи рекомендуется принимать равной не менее $5 \div 6 D$.

Расчетное сопротивление анкеров типа винтовых штопоров, гладких или распорных металлических штырей устанавливается опытным путем. Для ориентировочных расчетов их несущая способность может быть оценена по данным табл. 24.

Таблица 24

Технические показатели анкеров

Тип анкера	Вес в кг	Глубина погружения в м	Сопротивление анкеров выдергиванию в грунтах 2 и 3 категории в кгс
Винтовой штопор:			
малый	2,8	0,5	400
большой	7,5	0,9	1000
Винтовая свая с лопастью:			
$D=120 \text{ мм}$	2	0,7	900
$D=150 \text{ мм}$	3	1	1600
Гладкий штырь, забиваемый в грунт под углом 30—45° к вертикали	7	1	1200

Расчетное сопротивление анкерного основания в виде бетонных и железобетонных якорей или свай рекомендуется определять по СНиП II-Б.5-62. Вес балластных мешков, заполняемых грунтом или водой для крепления оболочек, определяют исходя из условия уравнивания направленных вверх усилий с двукратным запасом.

РАСЧЕТ ОБОЛОЧЕК ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ВОЗДУХООПОРНОГО ТИПА

Цель расчета пневматических конструкций любого типа — определение напряженно-деформированного состояния мягкой оболочки, находящейся в равновесном состоянии под действием внутреннего избыточного давления воздуха и внешних нагрузок.

Несмотря на то, что по внешнему виду ПС мало отличаются от некоторых тонкостенных оболочек из обычных жестких материалов (железобетона, металла, пластмасс), они как объект статического расчета обладают рядом особенностей, существенно отличающих их от оболочек, жестких по природе материала.

Материалами пневматических конструкций служат мягкие, тонкие ткани и пленки, которые отличаются сравнительно высокой прочностью при растяжении и абсолютной неспособностью к восприятию сжимающих усилий, изгибающих моментов и поперечных сил.

Поэтому устойчивость¹ ПС при действии нагрузок, вызывающих в оболочках подобной формы из жестких материалов напряжения сжатия, может быть обеспечена лишь при условии их заблаговременного растяжения избыточным давлением воздуха, т. е. пневматическим способом. Отсюда и приведенное в главе 1 определение пневматических конструкций, как предварительно напряженных.

Степень предварительного напряжения сообразуется, с одной стороны, с необходимостью погашения сжимающих напряжений, вызываемых внешними нагрузками, а с другой стороны, — с прочностью материала оболочки. Из этих соображений и вытекает методика расчета ПС, основная задача которого сводится к подбору такой величины избыточного давления воздуха, которая была бы не только достаточно высокой, чтобы не допустить возникновения нулевых (и тем более сжимающих) напряжений в оболочке, но и достаточно низкой, чтобы, суммируясь с растягивающими напряжениями от внешних нагрузок, не вызвать перенапряжения материала оболочки.

Расчет оболочек ПС воздухоопорного типа состоит из двух основных этапов:

¹ См. сноску к стр. 26.

1) определение необходимого уровня избыточного давления воздуха;

2) проверка прочности оболочки.

Оболочки могут находиться как в двухосном, так и одноосном напряженном состоянии. Последнее в наиболее ярко выраженном виде характеризуется образованием складок вдоль линий, совпадающих с направлением траекторий одноосного напряжения.

Если материал оболочек сам по себе неспособен к восприятию моментов и поперечных сил, то это еще не значит, что мягкие оболочки, как конструкции, не могут воспринимать внешние нагрузки такого вида, которые в жестких оболочках вызывали бы напряжений изгиба или сдвига. В таких случаях мягкая оболочка изменяет свою геометрическую форму и, автоматически трансформируясь, принимает такие очертания, при которых изгибные и сдвигающие напряжения исчезают, вырождаясь в растягивающие, так называемые мембранные. Например, приложение к выпуклой жесткой оболочке внешней сосредоточенной силы вызывает в окрестностях точки приложения силы местные напряжения сжатия и изгиба. Мягкая же оболочка оседает под силой настолько, насколько это необходимо для возникновения нового равновесного состояния, при котором в оболочке возможны только растягивающие (или нулевые) напряжения.

В таких случаях проявляется третий этап расчета:

3) определение величины осадки оболочки под действием местных нагрузок.

Два первых этапа в соответствии с методикой расчета по предельным состояниям характеризуют первое предельное состояние:

условие прочности материала оболочки:

$$T_1^{\max} \leq R_1^p; \quad T_2^{\max} \leq R_2^p,$$

где R^p — расчетные сопротивления материала разрыву;

условие устойчивости оболочки:

$$T_1^{\min} > 0; \quad T_2^{\min} > 0^*.$$

Третий этап соответствует второму предельному состоянию — условию соблюдения нормированных перемещений

$$f \leq [f].$$

Расчет по первому предельному состоянию обязателен, по второму — производится при необходимости.

* Не исключается и одноосное напряженное состояние. Тогда имеется одно из двух следующих условий: $T_1^{\min} > 0$; $T_2^{\min} = 0$ или $T_1^{\min} = 0$; $T_2^{\min} > 0$.

16. РАСЧЕТНЫЕ НАГРУЗКИ

Расчетные нагрузки для ПС воздухопорного типа — избыточное давление воздуха; собственный вес оболочки; снег, гололед, дождь, ветер; технологические и специальные нагрузки.

1. Избыточное давление воздуха

Избыточное давление воздуха, создающее предварительное напряжение в оболочке, является наиболее характерной, постоянной и обязательной нагрузкой ПС. Поэтому оно считается основным и в некоторых случаях единственным (не считая собственного веса) видом силового воздействия на пневматическую оболочку. Степень избыточного давления определяется расчетом в зависимости от величины внешних нагрузок.

Имея в виду пневматические конструкции, воздух часто называют строительным материалом. Приведем некоторые сведения о нем, необходимые для более ясного понимания роли воздуха не только как строительного материала или нагрузки на сооружение, но и как фактора физиологического.

В отличие от несжимаемой воды, воздух, как и всякий газ, легко сжимается даже под действием собственного веса, достигая объемного веса $\gamma_0 = 1,293 \text{ кгс/м}^3$ на уровне моря, при температуре 0°C , на географической широте 45° . Нормальным атмосферным давлением считается 760 мм рт. ст. или $10\,333 \text{ мм вод. ст.}$ Это составляет $10\,333 \text{ кгс/м}^2$. В технике используется округленная величина давления — 1 атм. равная 1 кгс/см^2 , в метеорологии — 1 бар. равный 10^5 н/м^2 , или $750,06 \text{ мм рт. ст.}$

Входя в пневматическое сооружение или опускаясь на лифте высотного здания, человек ощущает повышение давления воздуха, которое можно сравнить с повышением атмосферного давления при перемещении в нижние слои атмосферы. Связь между перепадом высоты h (в м) и перепадом атмосферного давления p (в мм вод. ст.) может быть выражена формулой

$$h \approx 0,8p. \quad (4.1)$$

В воздухопорных сооружениях величина избыточного давления обычно не превышает 25 мм вод. ст. , достигая в редких случаях 100 мм вод. ст. Из формулы (4.1) следует, что перепаду давления, например 50 мм вод. ст. , соответствует изменение высоты 40 м . Это значит, что входя в ПС воздухопорного типа, человек подвергается такому же повышению давления воздуха, как при спуске на эскалаторе метро или на лифте примерно с двенадцатого этажа.

Пределом человеческой выносливости считается пребывание при исключительных обстоятельствах в течение длительного времени в атмосфере с давлением от $0,2$ (12 км над уровнем моря) до 7 ат (60-метровая глубина под водой) [57]. Разница давления в $0,1 \text{ ат}$ переносится легко даже без постепенного перехода, хотя она ощутима (соответствует разнице высот в 800 м). Меньшие

перепады, каким человек подвергается при входе в ПС (см. табл. 38), неощутимы. По данным врачей-гигиенистов, обычные суточные колебания атмосферного давления, составляющие 70—80 мм вод. ст., существенного влияния на организм человека не оказывают.

Расчет ПС требует применения некоторых законов идеальных газов. Из курса физики известно, что состояние газа определяется тремя параметрами: давлением p , температурой t и объемом V , которые взаимосвязаны.

При неизменной температуре (изотермический процесс) эта зависимость (закон Бойля—Мариотта) имеет вид

$$pV = \text{const}, \quad (4.2)$$

откуда следует, что

$$p_1 = p \frac{V}{V_1}. \quad (4.3)$$

При неизменном давлении (изобарический процесс) объем линейно связан с температурой (закон Гей-Люссака):

$$V = V_0(1 + \alpha t), \quad (4.4)$$

где t — температура по шкале Цельсия; V_0 — объем при 0°C .

При неизменном объеме (изохорический процесс)

$$p = p_0(1 + \alpha t), \quad (4.5)$$

где p_0 — давление при 0°C .

Давление воздуха p_1 при температуре t_1 равно

$$p_1 = p \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t}. \quad (4.6)$$

Динамическое давление потока воздуха, как одно из слагаемых уравнения Бернулли, равно

$$q = \frac{\gamma v^2}{2},$$

где v — скорость потока.

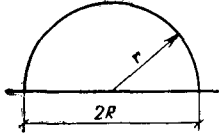
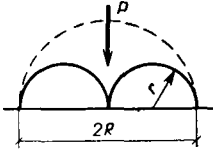
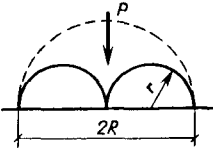
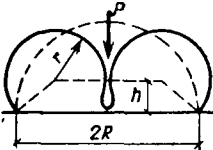
Формулу скоростного напора ветра получим, подставив численные величины $\gamma = 1,293 \text{ кг/м}^3$ и $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$:

$$q = \frac{1,293}{2 \cdot 9,81} v^2 \approx \frac{v^2}{16} \text{ кгс/м}^2, \quad (4.7)$$

где v — скорость ветра в м/сек.

Для расчета оболочек воздухоопорных ПС, объем которых нельзя считать замкнутым, допустимо предположение о постоянстве избыточного давления. Независимо от деформаций сооружения под действием нагрузок, уровень избыточного давления ограничивается регулируемым напором вентиляторов. При сравнительно медленном нарастании нагрузок такая предпосылка вполне приемлема. При быстро растущих нагрузках (например,

Напряжения полуцилиндрической оболочки в конечной стадии деформирования силой P при различных предположениях о природе избыточного давления воздуха под оболочкой

	Рассматриваемые формы оболочки	Радиус кривизны оболочки r	Избыточное давление p	Объем под оболочкой	Напряжения растяжения оболочки
Начальная форма (нагрузка отсутствует)		R	p_0	$\frac{\pi R^2}{2}$	$p_0 R$
Конечная форма (приложена сосредоточенная сила P)	<p>1) Давление воздуха постоянно</p> 	$\frac{R}{2}$	p_0	$\frac{\pi R^2}{4}$	$\frac{p_0 R}{2}$
	<p>2) Количество воздуха под оболочкой неизменно (оболочка нерастяжима)</p> 	$\frac{R}{2}$	$2p_0$	$\frac{\pi R^2}{4}$	$p_0 R$
	<p>3) Объем сооружения постоянен (оболочка растяжима)</p>  <p>Соотношение между h и R:</p> $2\pi - 3 \frac{h}{R} - \frac{h^3}{R^3} =$ $= \left(1 + \frac{h^2}{R^2}\right) \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{h}{R}\right)$	$\approx 0,7R$	p_0	$\frac{\pi R^2}{2}$	$\approx 0,7p_0 R$

порыве ветра или, наоборот, резком его падении) правильнее рассматривать ПС как замкнутый объем, так как воздух при резко меняющемся объеме сооружения не успевает выйти или войти: автоматика, стравливающие и обратные клапаны мгновенно не срабатывают. Таким образом, оба предположения о постоянстве как давления воздуха, так и о количестве его под оболочкой могут быть использованы в зависимости от характера решаемой задачи. Можно указать на возможность и третьей предпосылки — о постоянстве объема сооружения. Однако она следует из предположения о несжимаемости среды под оболочкой. Ею может быть только жидкость. Эта задача из смежной области — мягких емкостей и наливных плотин.

Наглядное сопоставление всех трех предположений на примере полуцилиндрической оболочки, деформируемой до предела нагрузкой P , можно сделать по данным табл. 25.

2. Собственный вес оболочки

Материалы оболочек воздухоопорных ПС имеют очень малый вес, который колеблется от 0,2 до 2 кгс/м² (обычно 0,6—0,8 кгс/м²). Собственный вес оболочки уравнивается избыточным давлением воздуха под оболочкой

$$p \geq \frac{A}{F} g,$$

где A — площадь поверхности оболочки;

F — площадь, ограниченная опорным контуром оболочки;

g — вес 1 м² материала оболочки.

Например, для полусферической оболочки — $p \geq 2g$, для полуцилиндрической — $p \geq \frac{\pi}{2}g$. Обычно это давление не превышает 1—2 мм вод. ст. Поэтому, за исключением особых случаев, специальный расчет оболочки на действие собственного веса не производится.

3. Нагрузки от атмосферных осадков

Снеговые нагрузки, нормируемые СНиП II-A.11-62, установлены на основании многолетних наблюдений за накоплением снега на поверхности жестких сооружений. Для цилиндрических сводов и сферических куполов с центральным углом $2\varphi_0$ расчетная снеговая нагрузка принимается равномерно распределенной по всей площади проекции этих покрытий на горизонтальную плоскость (рис. 4.1, а) и равной

$$p = 1,4 c p_0,$$

где

$$c = \frac{L}{8f} \quad [0,4 < c < 1];$$

L — пролет (при $2\varphi_0 > \pi$ — диаметр);
 f — стрела подъема (при $2\varphi_0 > \pi$ — радиус);
 ρ_0 — вес снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли, принимаемый в зависимости от района СССР равным от 50 до 250 кгс/м^2 .

Таким образом, интенсивность расчетной снеговой нагрузки на полуцилиндрический свод или полусферический купол, для которых $c=0,4$, составит от 28 до 140 кгс/м^2 . Имея в виду воздухоопорные сооружения, можно утверждать, что эти нормы не соответствуют действительности.

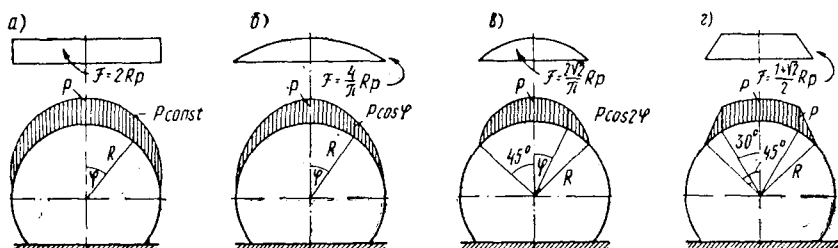


Рис. 4.1. Расчетные схемы снеговых нагрузок

$a - p(\varphi) = \text{const}$; $б - p(\varphi) = p \cos \varphi$; $в - p(\varphi) = p \cos 2\varphi$; $г -$ по А. Тарчевскому [59];
 F — площадь эпюры нагрузки

Наблюдения за поведением воздухоопорных ПС в процессе эксплуатации позволяют утверждать, что в силу подвижности под действием ветра и своеобразного «дыхания» оболочки при непрерывно меняющемся по ряду причин ее натяжении, многодневного накопления снега не бывает. Снег непрерывно сползает с «макушки» купола или свода (рис. 4.2). Однако это утверждение справедливо, если исключена возможность образования снеговых мешков по причине несовершенства форм ПС или из-за малости избыточного давления воздуха, величина которого, вообще говоря, должна превышать интенсивность снеговой нагрузки. При накоплении снега в связи с этими причинами натяжение оболочки у опор ослабляется и она может потерять устойчивость даже при незначительных ветровых нагрузках (рис. 4.3, а, б).

Нормы снеговых нагрузок для ПС должны быть установлены специально, с учетом перечисленных особенностей. До этого предлагается руководствоваться следующими указаниями:

- 1) расчетной снеговой нагрузкой считать максимальный вес ρ снега, накопившегося за один суточный снегопад (табл. 26);
- 2) распределение снеговой нагрузки по скату оболочки подчиняется закону

$$\rho(\varphi) = \rho \cos \varphi; \quad (4.8)$$

допускается принятие

$$\rho(\varphi) = \rho \cos 2\varphi \text{ при } 0 < \varphi < \frac{\pi}{4},$$

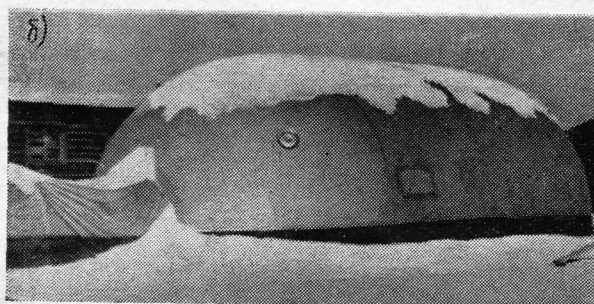


Рис. 4.2. Характер отложения снега на ПС

а — свежеснеживавший мокрый; *б* — то же, спустя немного времени; *в* — свежеснеживавший сухой; *г* — последствия снегопада при недостаточном давлении воздуха под оболочкой

Суточный максимум выпадения снега за 10 лет для различных районов СССР
в кгс/м² горизонтальной поверхности [18]

Географический район СССР	p	Район максимума
Побережье полярных морей (с островами)	11	—
Европейская территория СССР (зона умеренных широт)	22	Запад и предгорья Урала
Западная Сибирь	14	—
Хребты Юго-Западной Сибири (Алтай, Саяны, Тарбагатай)	11	—
Бассейн правых притоков р. Енисей и верховье р. Лены (Предбайкалье)	14	Севернее Ангары и в верховьях Танхой
Якутия и Забайкалье	7	Верховья р. Колымы
Муссонная зона Дальнего Востока	28	П-ов Камчатка

где φ — угол между вертикалью и нормалью к оболочке в рассматриваемой точке (рис. 4.1).

Приведем предложения зарубежных специалистов по нормам снеговых нагрузок на ПС.

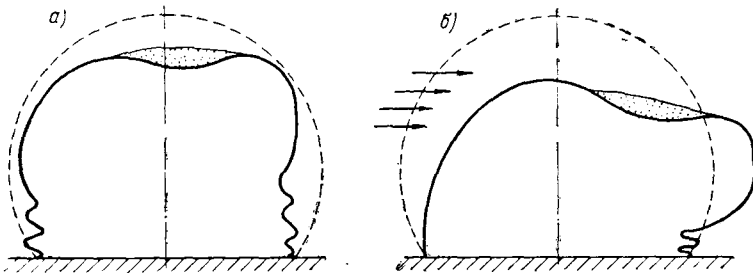


Рис. 4.3. Две формы потери устойчивости оболочки под действием снеговой нагрузки при малом избыточном давлении воздуха

Д-р инж. Г. Рюле (ГДР) предлагает [55, 56] для отопляемых ПС (гарантируемый минимум температуры $+15^\circ$) снеговую нагрузку считать отсутствующей¹. В остальных случаях — руководствоваться нормами для жестких сооружений, которые совпадают с упомянутыми рекомендациями СНиП, за исключением наименьшей величины S , принимаемой равной 0,2.

Магистр — инж. А. Тарчевски (ПНР) представляет [59] снеговую нагрузку трапецеидальной эпюрой (рис. 4.1, з).

Проф. Р. Тростель (ФРГ) при расчете ПС пользуется данными германских инженерных норм DIN 1055, В1. 5 для жестких со-

¹ Наблюдения авторов за отложением снега на оболочке отопляемого ПС (плавательный бассейн) подтверждают это соображение (см. рис. 7.7, а).

оружений [32], принимая синусоидальную закономерность распределения снеговой нагрузки вида (4.8).

Гололедные образования на поверхности воздухоопорных ПС обычно не накапливаются в такой мере, чтобы их вводить в расчет, как нагрузку на оболочку. Причиной тому является некоторая подвижность пневмооболочек и растяжимость их материала, способствующие разрушению и осыпанию ледяной пленки (рис. 4.4). Опыт эксплуатации ПС не содержит примеров аварийных ситуаций, вызванных гололедом.

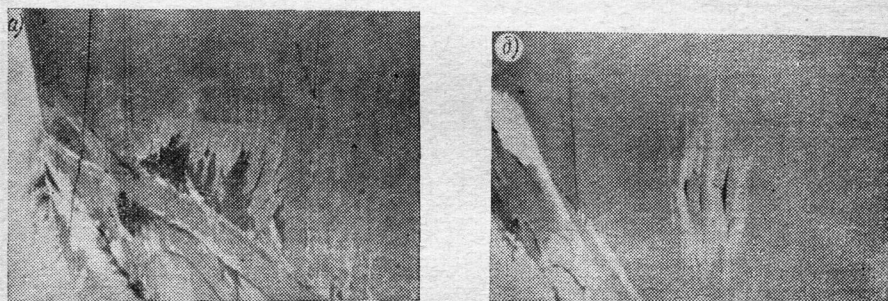


Рис. 4.4. Отслоение гололедной корки на оболочке ПС

Очень интенсивные дожди, особенно тропические ливни, должны учитываться как вертикальные или косые нагрузки, в зависимости от интенсивности ливня, аналогично скоростному напору ветра. Распределение дождевой нагрузки на поверхности оболочки должно следовать закону (4.8), где φ — угол между направлением дождевых струй и нормалью к оболочке.

4. Ветровая нагрузка

Специфика ветровых нагрузок на ПС изучена недостаточно. Поэтому сейчас, как правило, используются нормативы, рекомендуемые для жестких конструкций. Это не совсем правильно. ПС воздухоопорного типа податливы под действием ветра, заметно деформируются, подвержены «флаттеру», «бафтингу» и прочим явлениям аэродинамического характера, которые усугубляются при неблагоприятных соотношениях между внутренним давлением воздуха в оболочке и скоростным напором ветра.

Наибольшей опасности оболочка подвергается при избыточном давлении, существенно меньшем, чем скоростной напор ветра q . Практикой установлено, что при $p > q$ стабильность формы ПС обеспечивается. При $p = q$ возможно образование местных вмятин — «ложек» (рис. 4.5, а), временами пробегающих по поверхности оболочки, и заметное покачивание ПС. При $p < q$ и в особенности при $p \approx 0$ форма оболочки сильно меняется, она

начинает «полоскаться» и хлопать (рис. 4.5, б). Это — очень опасное состояние оболочки, чреватое ее разрывом или выдергиванием анкером. Такие положения возникают либо при отказе вентиляторных установок, либо в процессе подъема или опускания оболочки. Поэтому в районах, подверженных сильным ветрам, должно уделяться особое внимание дублированию вентиляторных установок и автономным источникам электроснабжения. Подъем и опускание оболочки производятся при ветрах со скоростью не более 5 м/сек. Как правило, на подъем оболочки тратится значительно меньше времени, чем на ее опускание, тем более, что подъем может быть ускорен включением резервного вентилятора. Опускание оболочки ускорить труднее. Если условия эксплуатации ПС предусматривают необходимость быстрого опускания оболочки, ее необходимо снабжать быстроразмыкаемым швом или реверсивным вентилятором.

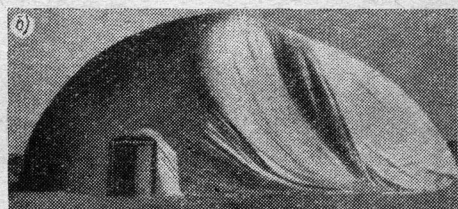


Рис. 4.5. Две фазы деформирования оболочки ПС под действием ветра

а — «ложки» при небольшом недостатке воздуха;
 б — «хлопание» оболочки при заметном недостатке воздуха

Для большинства ПС воздухоопорного типа ветровые нагрузки являются основными. Опыт эксплуатации свидетельствует о ряде случаев разрыва оболочек в результате порывов ветра. Однако следует заметить, что разрыву почти всегда предшествовало падение по той или иной причине избыточного давления воздуха под оболочкой до нуля, в результате чего она приобретала свободу перемещений и воздействие порывов ветра становилось ударным, динамическим.

Уточнение эпюры ветрового давления для ПС различной формы и при различных соотношениях величины внутреннего и наружного давлений было предметом ряда исследований.

На рис. 4.6, а представлены изолинии ветрового давления на поверхности жесткой модели сферического купола, полученные Корнеллской лабораторией аэронавтики в 1956 г. [46, 47]. Характерно заметное повышение интенсивности отсоса в зоне диаметральной плоскости, перпендикулярной направлению воздуш-

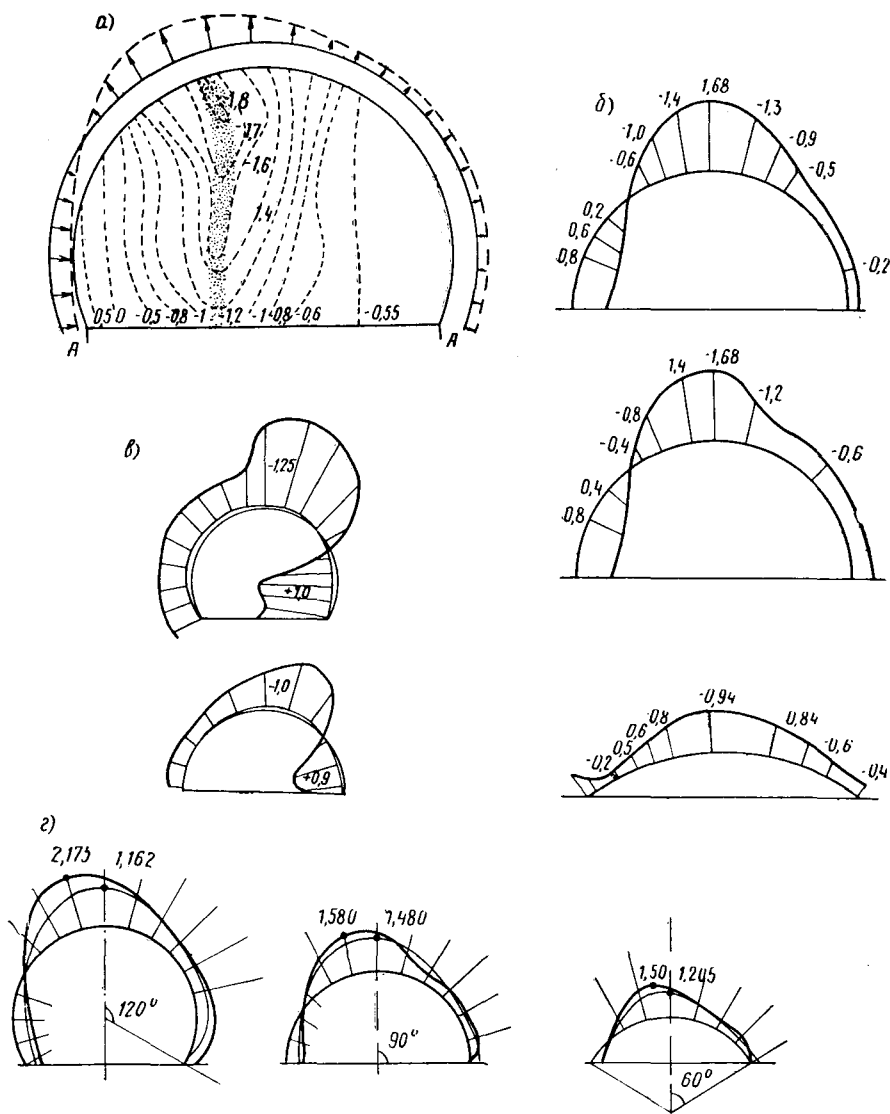


Рис. 4.6. Эпюры распределения ветрового давления по поверхности оболочки, полученные при продувках в аэродинамической трубе

а — жесткой сферической модели [47]; б — жестких сферических моделей [51]; в — мягких сферических и цилиндрических моделей [44]; г — жестких и мягких сферических моделей [9]

ного потока. Такая концентрация усилий послужила причиной разрыва не одной сферической оболочки.

Первые продувки мягких моделей сферических куполов показали, что при $\varphi_0 > \frac{3}{4}\pi$ наблюдается динамическая неустойчивость купола («бафтинг»). У. Бэрд [44] отмечает, что чем меньше базовый угол купола $2(\pi - \varphi_0)$, тем ниже частота собственных колебаний оболочки, и тем вероятнее возникновение подобных явлений. В наихудших условиях находится сферический купол, устанавливаемый на башне, диаметр которой слишком мал (см. рис. 1.39, в).

На моделях из полиамидной ткани проводили опыты Г. Бегер и Э. Махер (Дрезден, ГДР). Модели [44] имели форму $\frac{3}{4}$ сферы и полуцилиндра со сферическими окончаниями.

Давление воздуха в оболочках p и скоростной напор ветра q варьировались в достаточно широких пределах. В этих опытах было выявлено не только влияние отношения p/q на характер эпюры ветрового давления, но и найдены критические величины этого отношения, при которых на поверхности оболочек начинали образовываться ветровые вмятины. Оказалось, что для каждой формы оболочки имеется своя критическая величина p/q . Так для $\frac{3}{4}$ сферы $p/q \approx 1$; для полусферы $p/q \approx 0,7$; для полуцилиндра $p/q \approx 0,6$. Характерные эпюры ветрового давления показаны на рис. 4.6, в.

В СССР продувки моделей пневматических сооружений были проведены В. И. Никулиным [29] и А. М. Смирновым [38]. Их работы существенно пополнил перечень возможных комбинаций размеров нежестких моделей и соотношений p/q . А. М. Смирновым установлено, что отсос для мягких оболочек больше, чем для жестких на 10—15% для $\frac{1}{4}$ сферы и на 25% для $\frac{3}{4}$ сферы; максимальная ордината отсоса у мягких оболочек более сдвинута навстречу потоку (рис. 4.6, з).

Теория оболочек нуждается в аналитическом выражении закона распределения ветрового давления по их поверхности

$$q(\theta, \varphi) = qc(\theta, \varphi),$$

где $q(\theta, \varphi)$ — ветровая нагрузка, принимаемая нормальной к поверхности сооружения или его части, в $кгс/м^2$;

$c(\theta, \varphi)$ — аэродинамический коэффициент;

q — скоростной напор ветра в $кгс/м^2$ [формула (4.7)].

Коэффициенту c обычно придают вид тригонометрической функции координат φ , θ рассматриваемой точки (рис. 4.7, а). Наибольшее распространение получило довольно далекое от истины выражение [40, 59]:

$$c = \sin \theta \cos \varphi, \quad (4.9)$$

изображающее ветровую нагрузку антисимметричной в плоскости yz и симметричной в плоскости xz . Нагрузка в вершине обо-

лочки ($\theta=0$) оказывается равной нулю, что противоречит экспериментальным данным, которые свидетельствуют о том, что она здесь, наоборот, близка по абсолютной величине максимуму.

Более совершенна двучленная формула [32, 55]

$$c = A + B \sin \theta \cos \varphi, \quad (4.10)$$

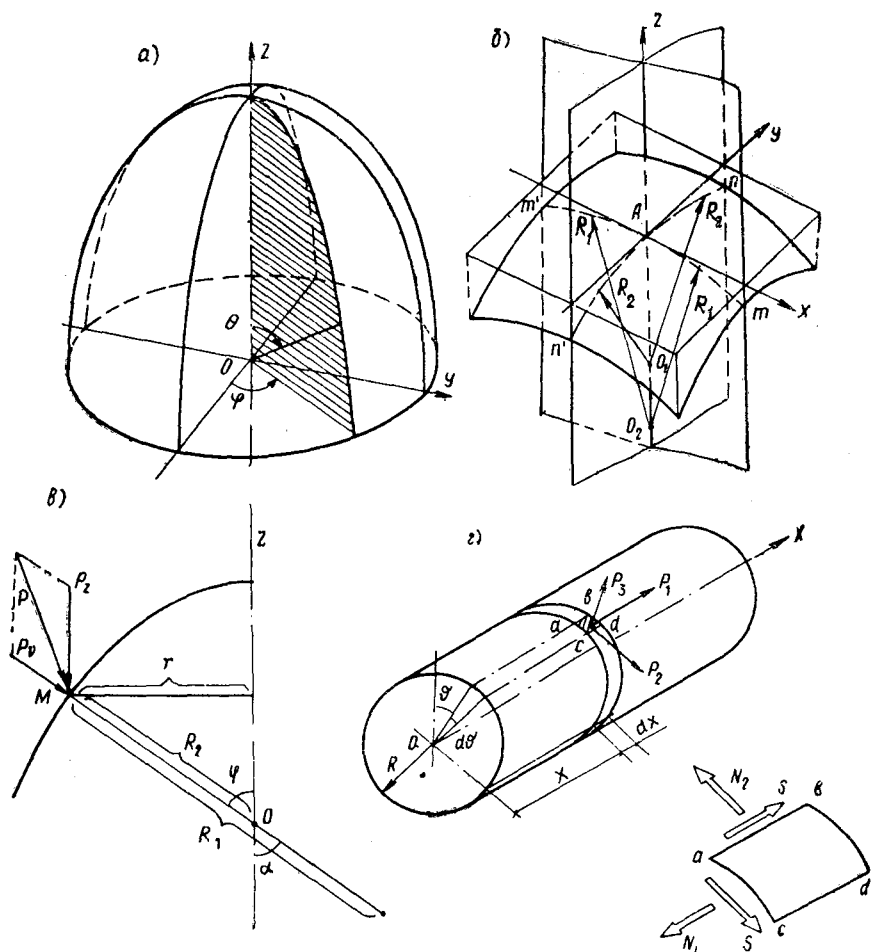


Рис. 4.7. Системы координат и обозначений теории оболочек

a — сферическая система координат; *б* — линии главных кривизн на поверхности; θ — внешние силы; *в* — цилиндрическая система координат

которой учитывается не только разница в абсолютных величинах активного и пассивного давления, но и нагрузка в вершине оболочки. Еще большее приближение к результатам продувок в аэродинамических трубах дают трехчленные формулы, которые

считаются пригодными для оболочек вращения с любыми меридиональными обводами [23]:

$$c = 0,5 \sin^2 \theta (0,85 \sin \varphi - 0,15 \sin 3\varphi) - \cos^2 \theta \quad (4.11)$$

или

$$c = \sin^2 \theta (A + B \cos \varphi + C \cos 2\varphi), \quad (4.12)$$

где параметры A , B и C , зависящие от отношения высоты оболочки к ее диаметру, высоты и формы поддерживающего цоколя, равны [45]:

	A	B	C
Для полной сферы . . .	-0,25	0,30	0,95
Для $7/8$ сферы	-0,65457	0,43228	1,22229

Некоторые исследователи [54] приходят к выводу, что «нельзя ожидать, чтобы закон распределения ветровой нагрузки мог следовать какой-либо простой математической функции». Действительно, более углубленные исследования даже наиболее простых форм ПС-сферических приводят к дальнейшему удлинению тригонометрического ряда [29]

$$c = a_0 + a_1 \cos \varphi + a_2 \cos 2\varphi + a_4 \cos 4\varphi + a_6 \cos 6\varphi \quad (4.13)$$

или к еще более сложным тригонометрическим полиномам с множеством (до 16) эмпирических коэффициентов [9].

Материалы исследований ветрового давления на ПС различной формы, при различных соотношениях избыточного давления в оболочке и скорости ветра продолжают накапливаться, однако их еще недостаточно для того, чтобы сформулировать закон распределения в общем виде и, тем более, ввести его в СНиП.

Для уникальных и ответственных конструкций следует настоятельно рекомендовать проведение специальных аэродинамических продувок, как это, например, было сделано при проектировании передвижного сферического воздухоопорного тепляка для бетонирования телебашни в Дрездене (см. рис. 1.39, в).

Вывод, к которому приходят все исследователи, состоит в том, что эффект воздействия ветра на ПС носит ярко выраженный характер отсоса. Участки с положительным давлением невелики по своей площади, а в сооружениях с малой относительной высотой совсем отсутствуют. Поэтому ветровая нагрузка вызывает в оболочке только растягивающие напряжения, которые суммируются с напряжениями того же знака от других нагрузок.

Несмотря на то, что «пики отсоса» характеризуются аэродинамическим коэффициентом, близким к $c = -2$, суммирование максимальной интенсивности ветрового давления на оболочку с избыточным давлением воздуха под оболочкой привело бы к завышению расчетных напряжений над фактическими. Поэтому

в ориентировочных расчетах допустимо полагать, что ветровое давление равномерно по всей поверхности оболочки и характеризуется аэродинамическим коэффициентом $c = -1$, т. е. рассчитывать оболочку на суммарное воздействие избыточного давления и скоростного напора ветра при заданной его скорости. Численные расчеты цилиндрических оболочек на ветровую нагрузку показали, что такое допущение идет в запас прочности.

Порывистый ветер превращает задачу расчета оболочки в динамическую, с учетом инерционных сил. Они проявляются особенно ярко тогда, когда оболочка получает возможность некоторого перемещения в потоке воздуха. Если ветровая нагрузка носит импульсивный характер, то и методика расчета должна соответствовать этому положению. Замечено, что большинство случаев разрыва оболочек приходится на те моменты, когда избыточное давление под оболочкой существенно ниже интенсивности ветрового напора, чему соответствует появление ветровых «ложек» на поверхности сооружения. В слабо надутой оболочке воздух обретает свободу перемещения и, будучи увлекаем воздушным потоком вместе с оболочкой, приобретает некоторую скорость v_0 , постепенно нарастающую и стремящуюся в пределе к скорости ветра v . Масса m_v воздуха, заключенного в оболочке с массой m_0 , движется в потоке воздуха со скоростью v_0 . Ее кинетическая энергия, равная

$$E = 0,5 (m_v + m_0) v_0^2, \quad (4.14)$$

гасится в тот момент, когда оболочка становится препятствием для дальнейшего перемещения системы «оболочка—воздух». На оболочку действуют инерционные силы, вызывающие ее натяжение. Если она выдерживает этот аэродинамический удар, упруго отбрасывая воздух назад, навстречу ветру, последний опять подхватывает слабо поддутую оболочку и удары повторяются, что может кончиться ее разрывом.

5. Технологические нагрузки

В ряде случаев эксплуатация ПС связана с необходимостью подвески легкого оборудования, являющегося для оболочки сосредоточенной нагрузкой. Вообще говоря, она нежелательна, однако порой неизбежна. Это, главным образом, электропроводка, арматура, светильники и т. п.

6. Специальные нагрузки

Воздухоопорные ПС, как указывалось в главе 1, нередко используются в качестве подъемников, опалубки, плотин и т. д.

В каждом особом случае нагрузки исчисляются в соответствии со спецификой работы, выполняемой пневматической конструкцией (рис. 4.8).

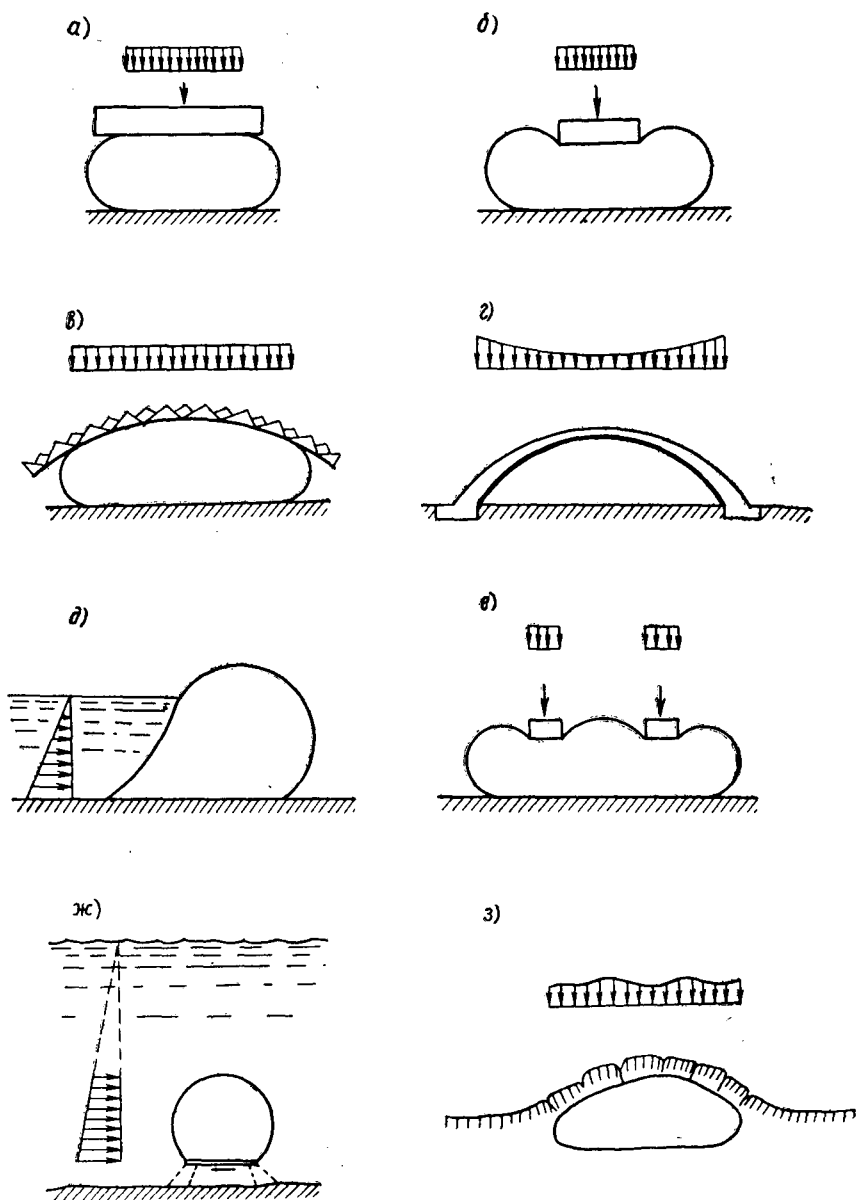


Рис. 4.8. Примеры специальных нагрузок на пневматические оболочки

а, б — пневмоподъемники; *в* — подмости для монтажа пространственных конструкций; *г* — опалубка; *д* — плотины; *е* — средство форсирования рвов; *ж* — подводные дома; *з* — вскрытие грунтов

17. СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Положение рассматриваемой точки на поверхности оболочки определяется пересечением двух линий — ее криволинейных координат. Если через точку A (рис. 4.7, б) провести нормаль к поверхности и принять ее за ось z , а оси x и y (на касательной b к точке A плоскости) вращать относительно оси z , то можно найти такое положение, когда кривизны K_1 и K_2 линий tAm' и nAn' на поверхности оболочки, соответствующие осям x и y , примут экстремальные значения. В теории поверхностей доказывается, что когда одна из них, например K_1 , в направлении x будет наибольшей, то другая — K_2 в направлении y — наименьшей. Эти кривизны считаются главными, а соответствующие им радиусы

$$R_1 = \frac{1}{K_1} \text{ и } R_2 = \frac{1}{K_2}$$

называют главными радиусами кривизны.

Важной характеристикой поверхности является гауссова кривизна

$$\Gamma = K_1 K_2. \quad (4.15)$$

По этому признаку поверхности оболочки разделяются на три класса:

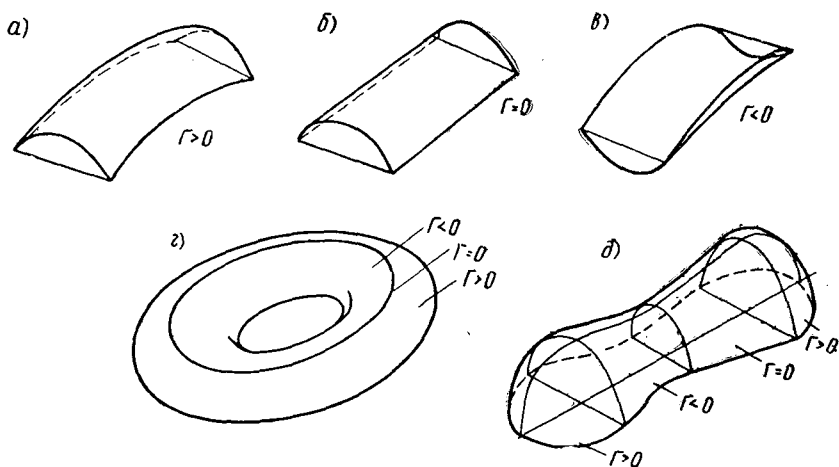


Рис. 4.9. Классификация видов поверхностей по знаку гауссовой кривизны
 а — положительная; б — нулевая; в — отрицательная; г, д — смешанные

I — положительной ($\Gamma > 0$) гауссовой кривизны (рис. 4.9, а), т. е. двояковыпуклые, синкластические (сфера, эллипсоид, двухполостный гиперboloид);

II — нулевой ($\Gamma = 0$) гауссовой кривизны (рис. 4.9, б) — цилиндрические и конические поверхности;

III — отрицательной ($\Gamma < 0$) гауссовой кривизны (рис. 4.9, в), т. е. выпукло-вогнутые, антикластические (однополостные гиперболоиды, гиперболические параболоиды).

Существуют оболочки смешанной кривизны (рис. 4.9, г, д), у которых она на различных участках имеет различные знаки (тороидальные и некоторые другие поверхности).

В оболочках вращения одно направление главной кривизны K_1 определяется сечением поверхности оболочки плоскостью, проходящей через ось вращения. Другое направление K_2 определяется сечением оболочки плоскостью, перпендикулярной первой и совпадающей с нормалью в рассматриваемой точке. Это сечение составляет угол φ с осью вращения.

На рис. 4.10 изображена оболочка, образованная вращением кривой GND вокруг оси AD . Линии пересечения поверхности вращения плоскостями, проходящими через ось вращения, называются *меридианами*. Линии пересечения ее плоскостями, перпендикулярными этой оси, — *параллелями*. Все меридианы — одинаковы; все параллели — дуги окружностей.

Рассматривая на оболочке точку N , линию GND считают ее меридианом; окружность, проходящую через N , — ее параллелью. Радиус кривизны NH меридиана в точке N называют первым главным радиусом кривизны R_1 . Радиус кривизны следа пересечения оболочки плоскостью M , перпендикулярной в точке N к меридиану, считается вторым главным радиусом NB кривизны R_2 . Оба радиуса лежат на нормали KN .

Если $r = r(z)$ — уравнение образующей оболочки (меридиана), то для точки N (рис. 4.10, б) дифференциальная геометрия дает следующие соотношения:

$$\operatorname{tg} \delta = r'; \quad \sin \delta = \frac{r'}{(1 + r'^2)^{1/2}}; \quad \cos \delta = \frac{1}{(1 + r'^2)^{1/2}}; \quad (4.16)$$

$$R_1 = \frac{(1 + r'^2)^{3/2}}{r''}; \quad (4.17)$$

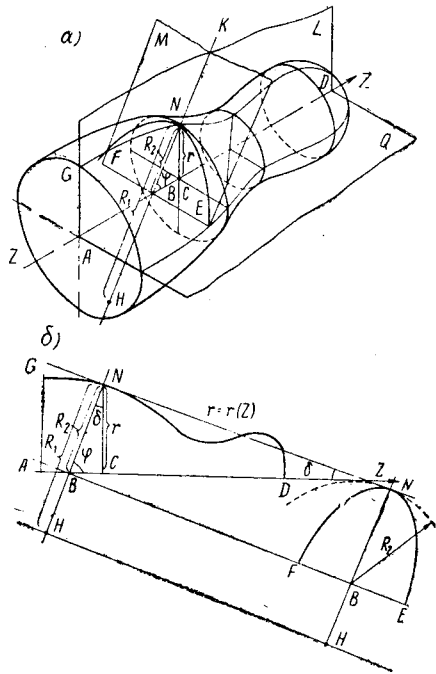


Рис. 4.10. Схема поверхности вращения с произвольной образующей

а — аксонометрия; б — ортогональные проекции на плоскостях L и M

$$R_2 = r (1 + r'^2)^{1/2}, \quad (4.18)$$

что следует из теоремы Менье:

$$R_2 = \frac{r}{\sin \varphi} = \frac{r}{\cos \delta}. \quad (4.19)$$

$$\Gamma = K_1 K_2 = \frac{1}{R_1 R_2} = \frac{r''}{r (1 + r'^2)^2}. \quad (4.20)$$

18. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Точный расчет оболочек ПС представляет собой сложную задачу строительной механики, для решения которой необходимо привлечение теории упругости, пластичности и ползучести. Особенности пневматических конструкций, осложняющие их расчет и приводящие к ряду нелинейных задач, вытекают как из общих свойств мягких оболочек, так и из частных свойств применяемых материалов.

При приложении нагрузки мягкая оболочка заметно изменяет свою форму, приходя к новому равновесному состоянию (рис. 4.11). Трансформирование оболочки происходит как в результате некоторой вытяжки материала, так и за счет образования «одноосных зон», т. е. ее сморщивания в направлении нулевых напряжений. Эта особенность вносит в расчет ряд усложнений, вызванных так называемой *геометрической нелинейностью*.

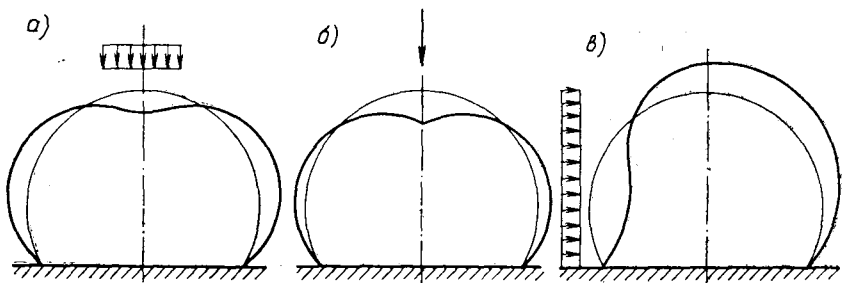


Рис. 4.11. Деформации пневматической оболочки под действием
а — снеговой нагрузки; б — сосредоточенной силы; в — ветрового давления

Материалы мягких оболочек анизотропны и отличаются нелинейной связью между деформациями и напряжениями. Пренебрегать этой особенностью так, как это часто делают при рассмотрении оболочек из жестких материалов, не всегда возможно. Таким образом приходится считаться и с *физической нелинейностью*.

Наконец, оболочки, основой которых служат полимерные материалы, обладают по своей природе сложными свойствами упруго-вязко-пластичного тела. Мало того, они заметно меняют

свои физико-механические показатели под действием факторов светопогоды, температуры и просто времени.

Вполне закономерно, что в развитии теории мягких оболочек наметились две тенденции:

преодоление математических трудностей, порождаемых полнотой учета всех особенностей конструкции и материалов;

упрощение расчетной процедуры путем введения ряда приближений с обоснованием их допустимости в определенных условиях и границах.

Правомерность первой тенденции бесспорна. Что же касается второй, то в ее защиту обычно приводят следующие аргументы:

общая и точная теория мягких оболочек еще не создана, и на пути ее разработки еще много трудностей;

нет смысла доводить математический аппарат расчета до точности, превышающей точность исходных данных (например, величин снеговых или ветровых нагрузок), которые для ПС весьма условны;

практика эксплуатации ПС сама по себе не стимулирует развития точных методов расчета, так как даже грубые ошибки в оценке напряженного состояния оболочки не влекут за собой катастрофических последствий; в большинстве случаев все аварии ПС вызывают лишь кратковременное прекращение их функционирования, быстро и полностью возобновляемого.

Очевидно, по мере успешного развития первой тенденции позиции второй будут постепенно ослабевать и приведенные аргументы потеряют свою силу.

Стоит упомянуть еще об одном способе решения задачи расчета ПС, которому часто следуют, когда теория становится бесильной или удручающе сложной, — моделировании. Оно прекрасно решает задачи нахождения деформированного вида оболочки при статических нагрузках. В аэродинамической трубе хорошо моделируются деформации оболочек, подверженных действию ветровых нагрузок. Однако тензометрические задачи моделированием решаются гораздо хуже.

Построение теории расчета ПС начинается с принятия модели материала оболочки. Одно из наиболее идеализированных представлений об оболочке ПС связано с наделением ее свойствами линейно-упругого тела. Вообще материал оболочки анизотропен, но, учитывая структуру армирующей системы (ткани или сетки), вполне допустимо считать его ортогонально-анизотропным (ортотропным) при малой жесткости G на сдвиг. Отсутствие сколько-нибудь существенных напряжений в направлении нормали к поверхности оболочки позволяет рассматривать только две ортогональные плоскости упругой симметрии.

Для этих условий уравнения обобщенного закона Гука для главных напряжений имеют следующий вид:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E_1} \sigma_x - \frac{\nu_{21}}{E_2} \sigma_y; \quad \epsilon_y = \frac{1}{E_2} \sigma_y - \frac{\nu_{12}}{E_1} \sigma_x, \quad (4.21)$$

где E_1 и E_2 — модули нормальной упругости вдоль главных направлений упругости x и y ;

ν_{12} — коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение в направлении y при растяжении в направлении x ;

ν_{21} — то же, в другом направлении.

Вводя обозначения

$$E = \sqrt{E_1 E_2} \text{ и } c = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}},$$

а также

$$\nu = \frac{\nu_{12}}{c} = \nu_{21} c,$$

следующее из

$$E_1 \nu_{21} = E_2 \nu_{12},$$

получим в записи, аналогичной [5]:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left(\frac{\sigma_x}{c} - \nu \sigma_y \right); \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} (c \sigma_y - \nu \sigma_x), \quad (4.22)$$

где c — показатель анизотропии;

E и ν — обобщенные модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона.

К изотропным материалам можно отнести однородные сплошные полимерные пленки и тонкие металлические листы (фольгу). В этом случае $c=1$ и формулы деформаций приобретают вид:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y); \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x). \quad (4.23)$$

Если материал считается нерастяжимым ($E = \infty$), то

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0. \quad (4.24)$$

На самом деле многие материалы оболочки даже в начальной упругой стадии своей работы не отличаются линейной связью между напряжениями и деформациями и линейно-упругое тело заменяется нелинейно-упругим

$$\varepsilon = f(\sigma) \sigma.$$

Расчетная процедура при этом существенно усложняется.

Однако материалы оболочек ПС обладают еще более сложными механическими свойствами. Их деформации, как правило, являются неравновесным процессом, развивающимся в функции времени по определенным законам. Для их понимания строят сложные реологические модели, наделенные одновременно свойствами упругости, пластичности и вязкости. Например, проф. Р. Сциллард [58] рекомендует при расчете пневматических конструкций использовать четырехэлементную модель Максвелла —

Кельвина (рис. 4.12, а), которая выражает зависимость между напряжением σ , удлинением ε и временем t следующей формулой:

$$\varepsilon(\sigma, t) = \frac{\sigma}{E_1} + \sum_n A_n \sigma^n + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \sum_m B_m \sigma^{C_m} t^m + S\sigma^r \left(1 - e^{-\frac{\eta_2}{E_2} t}\right), \quad (4.25)$$

где A_n, B_m, C, S, r — константы материала, получаемые из кривой ползучести (рис. 4.12, б) при неизменном напряжении, но при различных температурах;

E_1 — мгновенный модуль упругости (линейный или нелинейный);

E_2 — длительный модуль упругости;

η_1, η_2 — мгновенный и длительный коэффициенты вязкости.

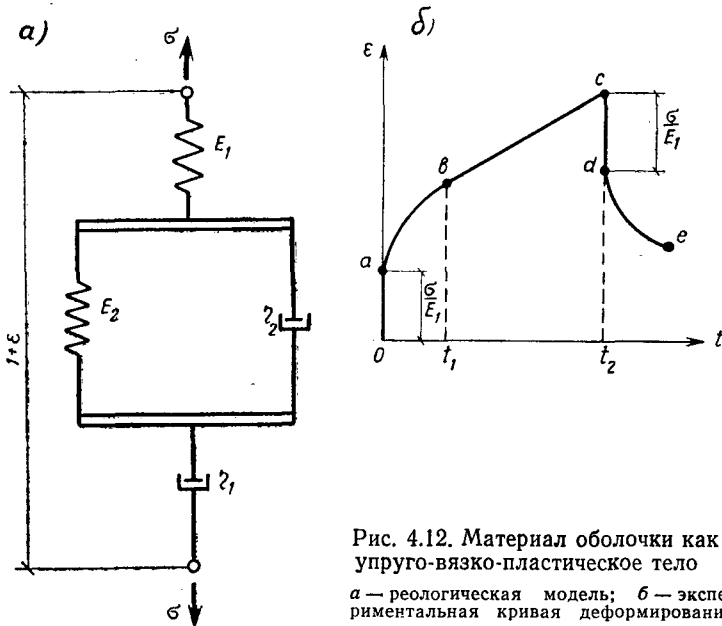


Рис. 4.12. Материал оболочки как упруго-вязко-пластическое тело
а — реологическая модель; б — экспериментальная кривая деформирования

Чем полнее учитываются физические свойства материалов оболочки, тем сложнее становится расчет и тем уже возможности его применения к пневматическим конструкциям сложной формы. Поэтому в настоящее время сложилось такое положение, когда методы, достаточно полно учитывающие физические особенности материала (например, метод конечных элементов [53]),

Современное состояние разработки задачи теории оболочек применительно к пневматическим сооружениям¹
(помеченные звездочкой области)

Нагрузка				Поверхности вращения									Сложные поверх-ности					
направление	область приложения	характер распределения	примеры	цилиндрические			сфери-ческие			с произ-вольной образующей			Сложные поверх-ности					
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
Нормальное	По всей поверх-ности	Равномерное	Избыточное дав-ление воздуха	*			*		*	*		*		*				
		По простому закону	Давление ветра, кососимметричное	*	*		*											
		По сложному зако-ну	Давление ветра, асимметричное	*	*				*									
	На части поверх-ности	Равномерное сим-метричное	Аналогия со сне-говой нагрузкой	*	*		*	*				*						
		Равномерное асим-метричное		*	*							*						

Нагрузка				Поверхности вращения									Сложные поверхности					
направление	область приложения	характер распределения	примеры	цилиндрические			сферические			с произвольной образующей								
				1	2	3	1	2	3	1	2	3						
Вертикальное	По всей поверхности	Равномерное	Собственный вес	*	*		*					*						
		По простому закону, симметричное		*	*		*						*					
	На части поверхности	То же, симметричное	Снег	*	*		*											*
		То же, асимметричное																
Вертикальное	На очень малой площади	Сосредоточенное симметричное	Оборудование, светильники, люди	*	*		*											
		Сосредоточенное асимметричное																

¹ Гипотезы о свойствах материала оболочек: 1 — недеформируем; 2 — нерастяжим; 3 — линейно-упруго-растяжим.

применимы лишь к расчету элементарных форм (мембраны, палящие или висящие оболочки вращения). Некоторое усложнение геометрических форм, нагрузок или условий опирания оболочек требует упрощения расчетной модели материала. Оболочки сложных форм со сложными нагрузками рассчитывают исходя из максимальной идеализации материалов [20].

В настоящее время до инженерных формул доведен весьма ограниченный круг задач, что иллюстрируется табл. 27. В ней показаны границы и глубина проработки задач определения напряженно-деформированного состояния пневматических оболочек, образованных поверхностями вращения и более сложными поверхностями, к которым отнесены все рациональные пространственные формы, доступные для воплощения в мягких материалах.

Как видно из табл. 32, основная масса найденных решений падает на первую строку (расчет на избыточное давление воздуха) и на колонку с пометкой 1, т. е. на случаи, когда мягкие оболочки рассчитываются как жесткие. Оболочки со сложными поверхностями и даже оболочки вращения с произвольным меридианом представляют собой незатронутые области исследований.

Построением теории мягких оболочек и, в частности, оболочек ПС воздухоопорного типа, заняты ученые нашей страны.

Проф. С. А. Алексеев известен трудами [2—8], посвященными расчету мягких оболочек. В его работах заложены основы общей теории мягких оболочек осесимметричных и более общего вида, которая рассматривает три основных типа задач:

1) задана конечная форма оболочки и нагрузки, найти напряжения и начальную форму;

2) задана начальная форма и нагрузки, найти напряжения и конечную форму;

3) задано конечное состояние оболочки (форма, нагрузки, напряжения), найти новое напряженное состояние и новую форму при приложении новой системы нагрузок. Материал считается линейно-упругим и ортотропным. Им же проведены исследования напряженно-деформированного состояния сферических оболочек в воздушном потоке [8—10].

Ряд практических задач расчета пневматических оболочек больших перемещений решен проф. Г. А. Гениевым [12—15]. Используя гипотезу о нерастяжимости материала, он довел решения для цилиндрических и сферических оболочек до инженерных формул. Успешные исследования в области теории мягких оболочек применительно в основном к практике использования их в качестве емкостей для жидкостей и сыпучих тел ведутся проф. В. Э. Магулой и руководимым им коллективом — Б. И. Друзь, А. И. Азовцев и др. [1; 25—27].

Из зарубежных исследователей в первую очередь следует назвать проф. Р. Тростеля (ФРГ), известного по его капитальной работе [32]. При определении напряженного состояния оболочек

Р. Тростель считает материал нерастяжимым; при нахождении деформаций — линейно-упругим и ортотропным.

Дж. У. Леонард (США) рассматривает напряженно-деформированное состояние пневматических оболочек, подверженных действию избыточного давления воздуха [48] и внешних нагрузок [49, 50]. Используется безмоментная нелинейная теория оболочек с некоторыми упрощениями. Материал оболочки считается изотропным и упругим. Для оболочек вращения с асимметричной нагрузкой получено решение в замкнутой форме. Перемещения даются в виде нелинейных дифференциальных уравнений, которые могут быть трансформированы в линейные особым приемом.

Представляет интерес работа проф. Дж. Одена и проф. У. Кубитцы [53], предпринявших попытку максимального уточнения расчета мягких оболочек с введением параметров упругости, пластичности и вязкости, для чего ими используется метод конечных элементов, приспособленный к использованию численных методов с применением ЭВМ.

На состоявшемся в 1967 г. в Штутгарте (ФРГ) I Международном коллоквиуме по пневматическим конструкциям был сделан ряд докладов, по которым можно судить о состоянии и тенденциях развития теории расчета ПС, освещенных в специальном обзоре [21].

Отсылая читателя, интересующегося теорией мягких оболочек в деталях, к первоисточникам (см. литературу к гл. 4), ограничимся изложением приближенных методов расчета, основанных на максимальном упрощении физических свойств материалов и использовании формул безмоментной теории оболочек.

19. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ОБОЛОЧЕК

1. Общие положения и допущения

Под действием внешних сил мягкая оболочка изменяет свой вид. Условимся различать три ее состояния: *начальное* (давление воздуха в оболочке едва превышет атмосферное, что необходимо для придания ей формы), *исходное* (давление воздуха достигает эксплуатационного уровня) и *конечное* (на оболочку помимо давления воздуха действуют расчетные нагрузки). Изменение формы оболочки — следствие двух причин: во-первых, удлинений материала, которые могут быть обратимыми или необратимыми и иметь линейную или нелинейную связь с напряжениями; во-вторых, перемещений кинетического характера (см. выше), свойственных и нерастяжимым материалам и вызываемых действием нагрузок, отличающихся от равномерно распределенных радиальных.

Инженерные методы расчета воздухоопорных оболочек основываются на гипотезе о нерастяжимости материалов. При этом понятия «начальное» и «исходное» состояния оболочки совпадают.

Прежде всего выясняется степень кинетических перемещений оболочки в зависимости от ее формы и характера нагрузки. Такие перемещения наблюдаются при боковой (ветровое давление) или местной (снеговые скопления) нагрузке или при сосредоточенных грузах (технологические и эксплуатационные). При этом учитывается новая форма оболочки, которая в значительной степени определяет ее устойчивость под действием нагрузок. Например, сферическая оболочка в таких случаях значительно жестче цилиндрической, устойчивость которой уменьшается с увеличением ее длины.

Если существенных перемещений оболочки не предвидится, она рассматривается как недеформируемая, т. е. предполагается, что ее формы после приложения нагрузок не изменяются. Если перемещения могут достигать существенных значений (более 10% поперечных размеров ПС), то сначала находят новое равновесное состояние загруженной оболочки, а затем определяют в ней напряжения, предполагая, что эту, новую форму она не изменяет. Считается, кроме того, что изменение формы оболочки под действием нагрузки не приводит к изменению величины последней.

Предположение о нерастяжимости таких растяжимых по своей природе материалов, как армированные пленки или воздухо-непроницаемые материи с высоким относительным удлинением при разрыве, принадлежит к категории грубых приближений и нуждается в количественной оценке.

Прирост напряжений от избыточного давления p воздуха в результате удлинений материала составляет для оболочек с начальным радиусом R_0 :
сферической

$$\Delta\sigma_c = \frac{pR_0(1-\nu)}{2E - pR_0(1-\nu)};$$

цилиндрической

$$\Delta\sigma_{ц} = \frac{pR_0(2-\nu)}{2E - pR_0(2-\nu)}.$$

Например, при $pR_0 = 1000$ кгс/м; $E = 10\,000$ кгс/м; $\nu = 0,25$ получим $\Delta\sigma_c = 0,0191 \approx 2\%$; $\Delta\sigma_{ц} = 0,0457 \approx 5\%$.

Таким образом, порядок величины погрешности, даже при очень сильном натяжении оболочки давлением воздуха, соответствует точности практических расчетов.

Прирост напряжений, вызванный утонением материала в результате увеличения площади оболочки, в данном случае не учитывается в связи с тем, что в воздухо-непроницаемых материях это явление связывается не столько с уменьшением сечения

нитяных прядей, сколько с их выпрямлением в структуре текстильного переплетения.

Для расчета ПС используются методы и формулы безмоментной теории оболочек. Теория расчета ПС и не может быть иной, поскольку условия существования безмоментного состояния мягких оболочек (плавно изменяющаяся непрерывная поверхность, плавная и непрерывная нагрузка, возможность свободного перемещения краев в направлении нормали к поверхности) обеспечены самой природой материалов.

В связи с постоянством и малостью толщины оболочек при расчете рассматривается только срединная поверхность. При этом роль напряжений играют погонные усилия, отнесенные к единице длины сечения оболочки, нормального к действующей силе. Их размерность *сила/длина* выражается обычно в *кгс/м*, хотя в справочных данных по материалам чаще можно встретить *кгс/5 см*. Такова же размерность модуля *E* нормальной упругости материалов.

Излагаемая ниже методика расчета ПС, как уже отмечалось, не отличается строгостью предпосылок и тонкостью математического аппарата. Однако точность статического расчета, как математического синтеза величин, характеризующих геометрию конструкции, физико-механические свойства материала, направление и величину нагрузки, определяется не только совершенством аппарата, но и степенью приближения к истине каждого из трех перечисленных компонентов задания. Известно, что эту точность нельзя повысить точностью вычислений. Специфика нагрузок, действующих на ПС, и физико-механические свойства материалов (особенно при длительном напряжении) изучены пока недостаточно. Нагрузки пока еще принимаются по нормам для жестких сооружений, материалы считаются наделенными неизменными во времени и, как правило, линейно-упругими свойствами. При таком (надо надеяться, временном) состоянии вопроса о корректности входящих в расчет величин гипотезы о нерастяжимости материала и о недеформируемости оболочки можно считать допустимыми.

2. Расчет оболочек без учета перемещений

Основные уравнения равновесия

Основные уравнения безмоментной теории оболочек, отнесенные к ортогональным координатам, отсчитываемым по линиям кривизн (рис. 4.13), следующие:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} (BT_1) - T_2 \frac{\partial B}{\partial \alpha} + \frac{\partial}{\partial \beta} (AS) + S \frac{\partial A}{\partial \beta} + AB\rho_1 &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial \beta} (AT_2) - T_1 \frac{\partial A}{\partial \beta} + \frac{\partial}{\partial \alpha} (BS) + S \frac{\partial B}{\partial \alpha} + AB\rho_2 &= 0; \\ K_1 T_1 + K_2 T_2 - \rho_3 &= 0, \end{aligned} \quad (4.26)$$

- где $\alpha; \beta$ — ортогональные координаты;
 $A; B$ — коэффициенты искажения, преобразующие приращение криволинейных координат в линейные отрезки (например, $dS_1 = A d\alpha$; $dS_2 = B d\beta$);
 $T_1; T_2$ — нормальные усилия на гранях, соответственно, $\alpha = \text{const}$ и $\beta = \text{const}$, отнесенные к единице длины сечения оболочки;
 S — касательные усилия;
 $K_1; K_2$ — кривизны координатных линий α и β ;
 $p_1; p_2; p_3$ — проекции интенсивности нагрузки на направления x, y, z , совпадающие с направлениями касательных к координатным линиям α, β, z в точке O .

Несмотря на то, что система (4.26) полностью определяет безмоментное состояние оболочки, которое в бесконечно малом является статически определимым (при известной нагрузке и реакциях опор), интегрирование ее сопряжено с определенными трудностями. Наиболее сложная задача — расчет оболочки произвольной формы на действие произвольной нагрузки. Расчет оболочек вращения, каковыми в большинстве своем бывают оболочки пневматических строительных конструкций, значительно проще.

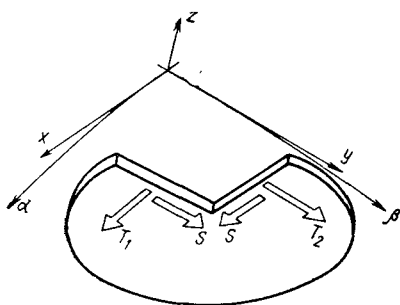


Рис. 4.13. Продольные и поперечные силы в безмоментной оболочке

Осесимметричная задача расчета оболочек вращения (к ней относятся расчет на избыточное давление воздуха, собственный вес и симметричная снеговая нагрузка) не только наиболее проста, но и наиболее типична для ПС. Здесь даются ее общее решение и ряд частных для наиболее распространенных форм. Задачи расчета оболочек вращения на нагрузки не осесимметричные

(ветровая, односторонний снег) более сложны. Однако, если характер нагрузки позволяет представить ее как сумму симметричных и антисимметричных компонентов, то решение особых трудностей не вызывает.

Для оболочек вращения система уравнений (4.26) видоизменяется. Наиболее удобными в данном случае оказываются сферические координаты θ и φ (рис. 4.7, а). В этой системе коэффициенты A и B функции лишь координаты φ и не зависят от θ ввиду симметрии формы оболочки.

Поэтому $A = R_1$; $B = r$; координаты α и β заменяются координатами φ, θ и уравнения равновесия приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \varphi} (rT_1) - T_2 R_1 \cos \varphi + R_1 \frac{\partial S}{\partial \theta} + R_1 r p_1 &= 0; \\ R_1 \frac{\partial T_2}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (rS) + S R_1 \cos \varphi + R_1 r p_2 &= 0, \\ K_1 T_1 + K_2 T_2 - p_3 &= 0. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Для нагрузок, симметричных относительно оси oz (осесимметричных), все производные по θ в системе уравнений (4.27) обращаются в нуль. Составляющая p_2 внешней нагрузки, вызывающая кручение, также приравнивается нулю, поэтому $S=0$.

При таких условиях система (4.27) превращается в более простую:

$$\frac{d}{d\varphi} (rT_1) - T_2 R_1 \cos \varphi + R_1 r p_1 = 0; \quad (4.28)$$

$$K_1 T_1 + K_2 T_2 - p_3 = 0. \quad (4.29)$$

Исключая T_2 , получаем после ряда преобразований

$$\frac{d}{d\varphi} (rT_1 \sin \varphi) + R_1 r (p_1 \sin \varphi - p_3 \cos \varphi) = 0.$$

В результате интегрирования в пределах от 0 до φ и некоторых упрощений получаем

$$T_1 \sin \varphi 2\pi r = - 2\pi \int_0^\varphi R_1 r (p_1 \sin \varphi - p_3 \cos \varphi) d\varphi + 2\pi C.$$

Правая часть уравнения представляет собой вертикальную равнодействующую внешней нагрузки на оболочку, расположенной выше линии φ , для которой определяется усилие T_1 . Обозначим ее Q_z .

Для оболочек с вертикальной осью вращения осесимметричными нагрузками будут собственный вес и снег. Напряжения в меридиональном направлении (на единицу кольцевого сечения) определяются по формуле

$$T_1 = \frac{Q_z}{2\pi r \sin \varphi}. \quad (4.30)$$

Учитывая (4.19), формуле (4.30) можно придать другой вид:

$$T_1 = \frac{Q_z}{2\pi R_2 \sin^2 \varphi}. \quad (4.31)$$

Кольцевое напряжение (на единицу длины меридиана) равно

$$T_2 = R_2 \left(p_v - \frac{T_1}{R_1} \right), \quad (4.32)$$

где p_v — нормальная составляющая внешней нагрузки (на единицу поверхности оболочки).

В общем случае

$$Q_z = 2\pi \int_0^z p_z r \left[1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 \right]^{1/2} dz, \quad (4.33)$$

где p_z — проекция на ось oz внешней нагрузки на единицу поверхности оболочки;
или, в соответствии с (4.18)

$$Q_z = 2\pi \int_0^z p_z R_2 dz. \quad (4.34)$$

Напряжения в оболочках от избыточного давления воздуха

В безмоментных оболочках, подверженных действию нормального давления p , связь между напряжениями в двух взаимно перпендикулярных направлениях и нагрузкой выражается уравнением Лапласа, вытекающего непосредственно из формулы (4.29)

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = p, \quad (4.35)$$

где σ_1 и σ_2 — напряжения в меридиональном и кольцевом направлениях;

R_1 и R_2 — соответствующие радиусы кривизны.

В формуле (4.35) содержатся две неизвестные величины — σ_1 и σ_2 . При расчете оболочек вращения одну из них можно определить исходя из условия равновесия части оболочки, отсеченной плоскостью, перпендикулярной оси вращения. Так, если r — радиус круга рассматриваемого сечения (см. рис. 4.7, ϑ); δ — угол наклона касательной к меридиану в этом сечении ($\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi$), то

$$\sigma_1 = \frac{pr}{2 \cos \delta}. \quad (4.36)$$

Обращаясь к (4.35), получим

$$\sigma_2 = R_2 \left(p - \frac{\sigma_1}{R_1} \right)$$

или, с учетом (4.36),

$$\sigma_2 = pR_2 \left(1 - \frac{r}{2R_1 \cos \delta} \right). \quad (4.37)$$

На основе общих формул (4.36) и (4.37) составлен ряд частных для наиболее распространенных видов оболочек, которые приведены в табл. 28 и 29.

Формула (4.37) с учетом (4.19) может быть записана

$$\sigma_2 = pR_2 \left(1 - \frac{R_2}{2R_1} \right). \quad (4.38)$$

Отсюда следует вывод, очень важный для решения задачи о форме пневматической оболочки. Отрицательная величина вы-

ражения в скобках свидетельствует о том, что кольцевые напряжения перестают быть растягивающими, и вдоль меридианов образуются складки материала. Во избежание этого меридиональная линия должна удовлетворять условию

$$2R_1 > R_2. \quad (4.39)$$

Аналитическое выражение меридиональной кривой оболочки вращения, испытывающей одноосное (меридиональное) напряжение растяжения (при кольцевом напряжении, равном нулю), можно получить, подставив в условие

$$2R_1 - R_2 = 0$$

выражение радиусов кривизны из (4.17) и (4.18)

$$2(1 + r'^2) - rr'' = 0, \quad (4.40)$$

где $r = r(z)$.

Решение этого дифференциального уравнения находится в эллиптических интегралах.

Разрабатывая основы теории мягких оболочек, С. А. Алексеев [5] показал, что такой оболочкой будет:

$$\frac{z}{b} = E\left(\varphi, \frac{\pi}{4}\right) - \frac{1}{2} F\left(\varphi, \frac{\pi}{4}\right); \quad \frac{r}{b} = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{2}}. \quad (4.41)$$

Меридиан оболочки имеет вид приплюснутого с полюсов овала с отношением полуосей, приблизительно равным 5 : 3. Одноосно напряженные оболочки такой формы могут быть использованы при применении материалов с ярко выраженной ортотропией в основных и уточном направлениях (имеются в виду конструкции, в которых избыточное давление является единственной нагрузкой).

Оболочка в виде эллипсоида вращения, как доказывает С. А. Алексеев, может быть сколь угодно вытянута вдоль оси вращения; сильно сплюснутые же оболочки быть не может.

Отношение полуосей $\frac{a}{r}$ должно превышать величину $\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,707$.

Напряжения в оболочках от внешних нагрузок

Рассмотрим несколько частных случаев загрузки сферических оболочек радиуса R .

В связи с тем, что $R_1 = R_2 = R$, формулы (4.34), (4.31) и (4.32) приобретают следующий вид:

$$Q_z = 2\pi R \int_0^z p_z dz;$$

$$\sigma_1 = \frac{Q_z}{2\pi R \sin^2 \varphi}; \quad \sigma_2 = p_v R - \sigma_1. \quad (4.42)$$

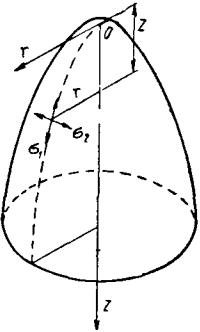
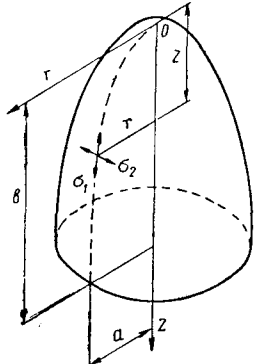
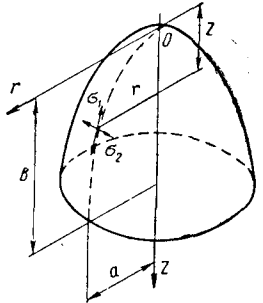
Формулы для расчета оболочек вращения

Геометрия и напряжения	Тело вращения с произвольной образующей	Сфера	Конус
Уравнение меридиональной линии	$r = r(z)$	$r = \sqrt{z(2R - z)}$	$r = z \frac{a}{b}$
Первый радиус кривизны, R_1	$\frac{[1 + (\frac{dr}{dz})^2]^{3/2}}{d^2r/dz^2}$	R	∞
Второй радиус кривизны, R_2	$r \frac{[1 + (\frac{dr}{dz})^2]^{1/2}}{\frac{dr}{dz}}$	R	$r = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{b}$
Меридиональное напряжение, σ_1	$\frac{pr}{2} \cdot \frac{[1 + (\frac{dr}{dz})^2]^{1/2}}{\frac{dr}{dz}}$	$\frac{pR}{2}$	$\frac{pz}{2} \cdot \frac{a\sqrt{a^2 + b^2}}{b}$
Кольцевое напряжение, σ_2	$pR_2 \left(1 - \frac{R_2}{2R_1}\right)$	$\frac{pR}{2}$	$pz \frac{a\sqrt{a^2 + b^2}}{b}$

на внутреннее избыточное давление p

Цилиндр с любыми торцовыми окончанием	Круговой тор	Эллиптический тор
$r = R$	$r = A + \sqrt{a^2 - z^2}$	$r = A + a \sqrt{1 - \frac{z^2}{b^2}}$
∞	a	$\frac{[(b^2 - a^2)(r - A)^2 + a^4]^{3/2}}{a^4 b}$
R	$\frac{r}{\sin \vartheta}$	$\frac{r [(b^2 - a^2)(r - A)^2 + a^4]^{1/2}}{b(r - A)}$
$\frac{pR}{2}$	$\frac{pa}{2} \cdot \frac{2 + \alpha \sin \vartheta}{1 + \alpha \sin \vartheta}$ при $\vartheta = 0$: pa ; при $\vartheta = \frac{\pi}{2}$: $\frac{pa}{2} \cdot \frac{2 + \alpha}{1 + \alpha}$; при $\vartheta = \frac{3}{2}\pi$: $\frac{pa}{2} \cdot \frac{2 - \alpha}{1 - \alpha}$ $\alpha = a/A$	$\frac{p}{2rb} \cdot \frac{r + A}{2} \times$ $\times \sqrt{(b^2 - a^2)(r - A)^2 + a^4}$
pR	$\frac{pa}{2}$	$\frac{p}{2b} \cdot \frac{2r(b^2 - a^2)(r - A) + a^4}{\sqrt{(b^2 - a^2)(r - A)^2 + a^4}}$

Формулы для расчета оболочек вращения на внутреннее избыточное давление p

Геометрия и напряжения	<p style="text-align: center;">Параболоид</p> 	<p style="text-align: center;">Эллипсоид</p> 	<p style="text-align: center;">Двухполостный гиперboloид</p> 
Уравнение меридиональной линии	$r = \sqrt{2\rho^*z}$	$r = a \sqrt{\frac{z}{b} \left(2 - \frac{z}{b}\right)}$	
Обозначения	$\rho = \frac{r\sqrt{2}}{2\rho^*}$	$\rho = \sqrt{\frac{z}{2b-z}};$ $\mu = \frac{\sqrt{4b^2\rho^2 + a^2(1-\rho^2)^2}}{1+\rho^2}$	$\rho = \sqrt{\frac{z}{2b+z}};$ $\lambda = \frac{\sqrt{4b^2\rho^2 + a^2(1+\rho^2)^2}}{1-\rho^2}$

Меридиональное на-
пряжение, σ_1

$$\frac{\rho\rho^*}{2} \sqrt{1+2\rho^2}$$

$$\text{при } z=0: \frac{\rho\rho^*}{2};$$

$$\text{при } z=p^*: \rho\rho^* \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\rho \frac{a}{2b} \mu$$

$$\text{при } z=0: \rho \frac{a^2}{2b};$$

$$\text{при } z=b: \rho \frac{a}{2}$$

$$\rho \frac{a}{2b} \lambda$$

$$\text{при } z=0: \rho \frac{a^2}{2b};$$

$$\text{при } z=b: \rho \frac{a}{2b} \sqrt{4a^2+3b^2}$$

Кольцевое напряжение,
 σ_2

$$\frac{\rho\rho^*}{2} \cdot \frac{1+4\rho^2}{\sqrt{1+2\rho^2}}$$

$$\text{при } z=0: \frac{\rho\rho^*}{2};$$

$$\text{при } z=p^*: \rho\rho^* \frac{5}{2\sqrt{3}}$$

$$\rho \frac{a}{2b} \left(2\mu - \frac{a^2}{\mu}\right)$$

$$\text{при } z=0: \rho \frac{a^2}{2b};$$

$$\text{при } z=b: \rho \frac{a}{2} \left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)$$

$$\rho \frac{a}{2b} \left(2\lambda - \frac{a^2}{\lambda}\right)$$

$$\text{при } z=0: \rho \frac{a^2}{2b};$$

$$\text{при } z=b: \rho \frac{a}{2b} \cdot \frac{7a^2+6b^2}{\sqrt{4a^2+3b^2}}$$

При расчете сферических оболочек удобно пользоваться угловой координатой φ , которая связана с координатой z следующей зависимостью (см. рис. 4.7, в):

$$\sin^2 \varphi = \frac{(2R - z)z}{R^2}.$$

При этом

$$Q_z = Q_\varphi = 2\pi R^2 \int_0^\varphi p_z \sin \varphi d\varphi.$$

а) Собственный вес g :

$$p_z = g; \quad p_v = g \cos \varphi;$$

$$Q_\varphi = 2\pi R^2 \int_0^\varphi g \sin \varphi d\varphi = 2\pi R^2 g (1 - \cos \varphi).$$

б) Равномерно распределенная снеговая нагрузка: на участке

$$0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$$

$$p_z = p_c \cos \varphi; \quad p_v = p_c \cos^2 \varphi;$$

$$Q_\varphi = 2\pi R^2 \int_0^\varphi p_c \cos \varphi \sin \varphi d\varphi = p_c \pi R^2 \sin^2 \varphi;$$

на участке

$$\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$$

$$p_v = 0; \quad Q_\varphi = p_c \pi R^2 = \text{const.}$$

в) Снеговая нагрузка, распределенная по закону $p = p_c \cos \varphi$:

на участке

$$0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$$

$$p_z = p \cos^2 \varphi; \quad p_v = p \cos^3 \varphi;$$

$$Q_\varphi = 2\pi R^2 p \int_0^\varphi \sin \varphi \cos^2 \varphi d\varphi = \frac{2}{3} \pi R^2 p_c (1 - \cos^3 \varphi);$$

на участке

$$\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$$

$$p_v = 0; \quad Q_\varphi = \frac{2}{3} \pi R^2 p_c = \text{const.}$$

г) Снеговая нагрузка, распределенная по закону $p = p_c \cos 2\varphi$:

на участке $0 < \varphi < \varphi_0$ $\left[\varphi_0 = \frac{\pi}{4} \right]$

$$p_z = p_c \cos \varphi \cos 2\varphi; \quad p_v = p_c \cos^2 \varphi \cos 2\varphi;$$

$$Q_\varphi = 2\pi R^2 p_c \int_0^{\varphi} \sin \varphi \cos \varphi \cos 2\varphi d\varphi = \\ = \frac{1}{4} \pi R^2 p_c \sin^2 2\varphi;$$

на участке $\varphi_0 < \varphi < \pi$

$$p_v = 0; \quad Q_\varphi = \frac{1}{4} \pi R^2 p_c \sin^2 2\varphi_0 = \text{const.}$$

Формулы для расчета сферических оболочек сведены в табл. 30.

д) Напряжения в полусферической оболочке от ветровой нагрузки, распределенной по закону $q(\varphi, \theta) = q \sin \varphi \cos \theta$:

$$\sigma_\varphi = \frac{qR}{3} \cdot \frac{\cos \varphi}{\sin^3 \theta} (2 \cos \theta - 3 \sin^2 \theta - 2 \cos^4 \theta);$$

$$\sigma_\theta = -\frac{qR}{3} \cdot \frac{\cos \varphi \cos \theta}{\sin^2 \theta} (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta);$$

$$\sigma_{\varphi\theta} = -\frac{qR}{3} \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin^3 \theta} (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta).$$

Для цилиндрических оболочек более удобна цилиндрическая система координат x, θ (рис. 4.7, з). При этом $A=1$; $B=R = \text{const}$; $R_1 = \infty$; $R_2 = R$.

Уравнения (4.26) принимают следующий вид:

$$R \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial \theta} + p_1 R = 0;$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial \theta} + R \frac{\partial S}{\partial x} + p_2 R = 0;$$

$$N_2 = p_3 R,$$

откуда находим

$$S = - \int \left(p_2 + \frac{\partial p_3}{\partial \theta} \right) dx + C_1(\theta); \\ N_1 = - \int \left(p_1 + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial S}{\partial \theta} \right) dx + C_2(\theta) = - \frac{x d C_1}{R d \theta} + \\ + \int \left[- p_x + \frac{1}{R} \int \left(\frac{\partial p_2}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 p_3}{\partial \theta^2} \right) dx \right] dx + C_2(\theta).$$

Формулы для расчета сферических оболочек на вертикальные осесимметричные нагрузки

Схема загрузкиения	Напряжения оболочки	
	Меридиональные σ_1	Кольцевые σ_2
	$-\frac{qR}{1 + \cos\psi}$	$\frac{qR}{2}$ $-qR \left(\cos\psi - \frac{1}{1 + \cos\psi} \right)$
	<p>при $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$</p> $-\frac{pR}{2}$ <p>при $\frac{\pi}{2} < \psi < \psi_K$</p> $-\frac{pR}{2 \sin^2\psi}$	<p>при $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$</p> $-\frac{pR}{2} \cos 2\psi$ <p>при $\frac{\pi}{2} < \psi < \psi_K$</p> $\frac{pR}{2 \sin^2\psi}$
	<p>при $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$</p> $-\frac{pR}{3} \frac{1 + \cos^2\psi}{1 + \cos\psi}$ <p>при $\frac{\pi}{2} < \psi < \psi_K$</p> $-\frac{pR}{3 \sin^2\psi}$	<p>при $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$</p> $-\frac{pR}{3} \cos^2\psi \left(\cos\psi - \frac{1}{1 + \cos\psi} \right)$ <p>при $\frac{\pi}{2} < \psi < \psi_K$</p> $\frac{pR}{3 \sin^2\psi}$
	<p>при $0 < \psi < \psi_0$</p> $-\frac{pR}{2} \cos^2\psi$ <p>при $\psi_0 < \psi < \psi_K$</p> $-\frac{pR}{8} \left(\frac{\sin 2\psi_0}{\sin\psi} \right)^2$	<p>при $0 < \psi < \psi_0$</p> $-\frac{pR}{2} \cos\psi (2 \cos 2\psi - \cos\psi)$ <p>при $\psi_0 < \psi < \psi_K$</p> $\frac{pR}{8} \left(\frac{\sin 2\psi_0}{\sin\psi} \right)^2$

Если нагрузка зависит от x (т. е. $p_1=0$), то:

$$S = - \left(p_2 + \frac{dp_3}{d\theta} \right) x + C_1(\theta);$$

$$N_1 = - \frac{x}{R} \cdot \frac{dC_1}{d\theta} + \frac{x^2}{2R} \left(\frac{dp_2}{d\theta} + \frac{d^2p_3}{d\theta^2} \right) + C_2(\theta).$$

Если нагрузки (равно как и условия на опорах) симметричны, то при $x = \frac{l}{2}$ $S=0$. Отсюда находим

$$C_1(\theta) = \left(p_2 + \frac{dp_3}{d\theta} \right) \frac{l}{2}.$$

Итак, для нагрузки, симметричной и не зависящей от x , имеем:

$$S = \left(p_2 + \frac{dp_3}{d\theta} \right) \left(\frac{l}{2} - x \right);$$

$$N_1 = - \frac{x}{2R} (l - x) \left(\frac{dp_2}{d\theta} + \frac{d^2p_3}{d\theta^2} \right) + C_2(\theta);$$

$$N_2 = p_3 R.$$

Постоянные интегрирования $C_2(\theta)$ определяются для каждого расчетного случая в зависимости от геометрической формы окончания цилиндра и вида внешней нагрузки. Например, для полуцилиндрической оболочки с окончаниями в виде четвертой сферы (рис. 4.14) $C_2(\theta)$ имеет следующие выражения:

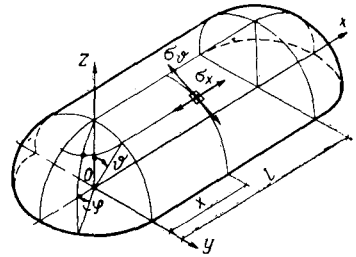


Рис. 4.14. Схема полуцилиндрической оболочки с торцами в виде четвертой сферы

нагрузка в виде внутреннего давления p

$$C_2(\theta) = \frac{pR}{2};$$

нагрузка от собственного веса g

$$C_2(\theta) = gR \left(\frac{1}{1 + \cos \theta} - \cos \theta \right);$$

симметричная снеговая нагрузка p_c

$$C_2(\theta) = \frac{p_c R}{3} \left(\frac{1 - \cos^3 \theta}{\sin^2 \theta} - 3 \cos^3 \theta \right).$$

Ниже приводятся формулы напряжений в такой полуцилиндрической оболочке, полученные Р. Тростелем [32] с учетом перераспределения касательных усилий в месте стыка цилиндрического участка оболочки со сферическим.

Нагрузка от собственного веса g :
для цилиндрической части оболочки:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= -gR \cos \theta; \\ \sigma_x &= gR \left[\frac{1}{1 + \cos \theta} - \cos \theta - \left(\frac{l}{R} \right)^2 \left(\frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right) \cos \theta \right]; \\ \sigma_{x\theta} &= gl \sin \theta \left(1 - 2 \frac{x}{l} \right); \end{aligned} \right\} (4.43)$$

для сферической части оболочки:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &\approx -gR \left[\frac{1}{1 + \cos \theta} - \frac{l}{R} \left(4,2 \frac{\operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2}}{\sin^2 \theta} \cos 3\varphi + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 3,4 \frac{\operatorname{tg}^5 \frac{\theta}{2}}{\sin^2 \theta} \cos 5\varphi \right) \right]; \\ \sigma_{\varphi} &\approx gR \left[\frac{1}{1 + \cos \theta} - \cos \theta - \frac{l}{R} \left(4,2 \frac{\operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2}}{\sin^2 \theta} \cos 3\varphi + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 3,4 \frac{\operatorname{tg}^5 \frac{\theta}{2}}{\sin^2 \theta} \cos 5\varphi \right) \right]; \\ \sigma_{\theta\varphi} &\approx -\frac{gl}{\sin^2 \theta} \left(4,2 \operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2} \sin 3\varphi + 3,4 \operatorname{tg}^5 \frac{\theta}{2} \sin 5\varphi \right). \\ G_{x\theta} &= 2pl \cos^2 \theta \sin \theta \left(1 - 2 \frac{x}{l} \right) \end{aligned} \right\} (4.44)$$

Снеговая нагрузка p , распределенная по закону $p_c = p \cos \theta$:
для цилиндрической части оболочки:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= -pR \cos^3 \theta; \\ \sigma_x &= pR \left[\frac{1 - \cos^3 \theta}{3 \sin^2 \theta} - \cos^3 \theta - 2 \left(\frac{l}{R} \right)^2 \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos \theta (\cos^2 \theta - 2 \sin^2 \theta) \left(\frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right) \right]; \\ \sigma_{x\theta} &= 2pl \cos^2 \theta \sin \theta \left(1 - 2 \frac{x}{l} \right); \end{aligned} \right\} (4.45)$$

для сферической части оболочки:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= -\frac{pR}{3} \cdot \frac{1 - \cos^3 \theta}{\sin^2 \theta} + \frac{pl}{\sin^2 \theta} \left(2,1 \operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2} \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos 3\varphi + 2,4 \operatorname{tg}^5 \frac{\theta}{2} \cos 5\varphi \right); \\ \sigma_{\varphi} &= \frac{pR}{3} \left(\frac{1 - \cos^3 \theta}{\sin^2 \theta} - 3 \cos^3 \theta \right) - \\ &\quad - \frac{pl}{\sin^2 \theta} \left(2,1 \operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2} \cos 3\varphi + 2,4 \operatorname{tg}^5 \frac{\theta}{2} \cos 5\varphi \right); \end{aligned} \right\} (4.46)$$

Формулы для расчета полуцилиндрических оболочек на вертикальные симметричные нагрузки

		Угловая координата ϑ		
		ϑ	0	$\frac{\pi}{2}$
		Собственный вес, g		
Линейная координата x	x	$\sigma_{\vartheta} = -gR \cos \vartheta$ $\sigma_x = gR \left\{ \frac{1}{1 + \cos \vartheta} - \cos \vartheta \left[\frac{x}{R^2} (l-x) + 1 \right] \right\}$ $\sigma_{x\vartheta} = g \sin \vartheta (l-2x)$	$\sigma_{\vartheta} = -gR$ $\sigma_x = -gR \left[\frac{1}{2} + \frac{x}{R^2} (l-x) \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = 0$ $\sigma_x = gR$ $\sigma_{x\vartheta} = g(l-2x)$
	0	$\sigma_{\vartheta} = -gR \cos \vartheta$ $\sigma_x = gR \left(\frac{1}{1 + \cos \vartheta} - \cos \vartheta \right)$ $\sigma_{x\vartheta} = \pm gl \sin \vartheta^*$	$\sigma_{\vartheta} = -gR$ $\sigma_x = -\frac{gR}{2}$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = 0$ $\sigma_x = gR$ $\sigma_{x\vartheta} = \pm gl^*$
	$\frac{l}{2}$	$\sigma_{\vartheta} = -gR \cos \vartheta$ $\sigma_x = gR \left[\frac{1}{1 + \cos \vartheta} - \cos \vartheta - \frac{1}{4} \cos \vartheta \left(\frac{l}{R} \right)^2 \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = -gR$ $\sigma_x = -gR \times \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{l}{R} \right)^2 \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = 0$ $\sigma_x = gR$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$
	0	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R \cos^2 \vartheta$ $\sigma_x = -\frac{p_c}{2R} \cos 2\vartheta \times \left[R^2 + \frac{3}{2} x(l-x) \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = -\frac{3}{4} p_c \sin 2\vartheta (2x-l)$	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R$ $\sigma_x = -\frac{p_c}{2R} \times \left[R^2 + \frac{3}{2} x(l-x) \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = 0$ $\sigma_x = \frac{p_c}{2R} \left[R^2 + \frac{3}{2} x(l-x) \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$
		Снеговая нагрузка, p (ϑ) = p_c		
Линейная координата x	x	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R \cos^2 \vartheta$ $\sigma_x = -\frac{p_c}{2R} \cos 2\vartheta \times \left[R^2 + \frac{3}{2} x(l-x) \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = -\frac{3}{4} p_c \sin 2\vartheta (2x-l)$	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R$ $\sigma_x = -\frac{p_c}{2R} \times \left[R^2 + \frac{3}{2} x(l-x) \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = 0$ $\sigma_x = \frac{p_c}{2R} \left[R^2 + \frac{3}{2} x(l-x) \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$
	0	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R \cos^2 \vartheta$ $\sigma_x = -\frac{p_c R}{2} \cos 2\vartheta$ $\sigma_{x\vartheta} = \pm \frac{3}{4} p_c l \sin 2\vartheta^*$	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R$ $\sigma_x = -\frac{p_c R}{2}$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = 0$ $\sigma_x = \frac{p_c R}{2}$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$

		Угловая координата ϑ			
		ϑ	0	$\frac{\pi}{2}$	
		Собственный вес, g			
Линейная координата x	$\frac{l}{2}$	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R \cos^2 \vartheta$ $\sigma_x = -\frac{p_c}{2R} \cos 2\vartheta \times$ $\times \left(R^2 + \frac{3}{8} l^2 \right)$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R$ $\sigma_x = -\frac{p_c}{2R} \times$ $\times \left(R^2 + \frac{3}{8} l^2 \right)$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = 0$ $\sigma_x = \frac{p_c}{2R} \left(R^2 + \frac{3}{8} l^2 \right)$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	
	Снеговая нагрузка, $p(\vartheta) = p_c \cos \vartheta$				
	x	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R \cos^3 \vartheta$ $\sigma_x = p_c R \left[\frac{1 + \cos \vartheta + \cos^2 \vartheta}{3(1 + \cos \vartheta)} - \cos^3 \vartheta - \frac{2x}{R^2} (l - x) \times \right.$ $\left. \times (3 \cos^2 \vartheta - 2) \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = 2p_c \sin \vartheta \cos^2 \vartheta \times$ $\times (l - 2x)$	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R$ $\sigma_x = -p_c R \left[\frac{1}{2} + 2 \times \right.$ $\left. \times (l - x) \frac{x}{R^2} \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = 0$ $\sigma_x = \frac{p_c R}{3}$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	
0	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R \cos^3 \vartheta$ $\sigma_x = p_c R \left[\frac{1 + \cos \vartheta + \cos^2 \vartheta}{3(1 + \cos \vartheta)} - \cos^3 \vartheta \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = \pm 2p_c l \sin \vartheta \cos^2 \vartheta^*$	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R$ $\sigma_x = -\frac{p_c R}{3}$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = 0$ $\sigma_x = \frac{p_c R}{3}$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$		
$\frac{l}{2}$	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R \cos^3 \vartheta$ $\sigma_x = p_c R \left[\frac{1 + \cos \vartheta + \cos^2 \vartheta}{3(1 + \cos \vartheta)} - \cos^3 \vartheta - \cos \nu \times \right.$ $\left. \times (3 \cos^2 \vartheta - 2) \frac{l^2}{2R^2} \right]$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = -p_c R$ $\sigma_x = -\frac{p_c R}{2}$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$	$\sigma_{\vartheta} = 0$ $\sigma_x = \frac{p_c R}{3}$ $\sigma_{x\vartheta} = 0$		

* Верхний знак относится к $x=0$, нижний — к $x=l$.

$$\sigma_{\theta\varphi} \approx - \frac{pl}{\sin^2 \theta} \left(2,1 \operatorname{tg}^3 \frac{\theta}{2} \sin 3\varphi + \right. \\ \left. + 2,4 \operatorname{tg}^5 \frac{\theta}{2} \sin 5\varphi \right). \quad (4.46)$$

Формулы для расчета полуцилиндрических оболочек на некоторые виды вертикальных нагрузок приведены в табл. 31.

3. Расчет оболочек с учетом перемещений

Расчет оболочек с учетом изменения их геометрической формы под действием нагрузки — сложная задача. Поэтому ограничимся рассмотрением лишь некоторых случаев, которые при своей простоте типичны для практических расчетов ПС. Задача обычно решается в два этапа: сначала находят новую равновесную форму оболочки, вызванную действием нагрузки, а затем вычисляют напряжения.

Предполагается, что избыточное давление воздуха под оболочкой постоянно, несмотря на то, что объем помещения при осадке оболочки уменьшается. Эта предпосылка вполне правомерна, так как в непрерывно поддуваемых оболочках воздухоопорных ПС избыточное давление определяется только рабочим напором вентиляторных установок, который практически постоянен.

Цилиндрические оболочки

С целью упрощения расчета протяженность цилиндрических оболочек считается неограниченной, в связи с чем задача сводится к плоской. Рассматривается полоска шириной, равной единице длины, образованная двумя нормальными к продольной оси оболочки сечениями.

Расчет цилиндрической оболочки на действие нагрузки q , равномерно распределенной вдоль ее центральной образующей, соответствует случаям скопления снега на горизонтальных участках оболочки или технологической нагрузке, например электропроводка с осветительной арматурой.

Под действием нагрузки q оболочка с исходным радиусом R и центральным углом 2φ оседает на величину f (рис. 4.15). Поперечное сечение оболочки в виде дуги ADA' окружности превращается в две дуги — AB и BA' — радиуса ρ . Концы этих дуг

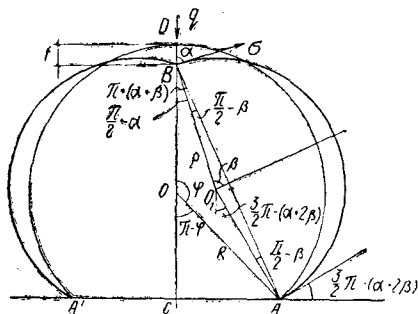


Рис. 4.15. Цилиндрическая оболочка с сосредоточенной нагрузкой

приближаются друг к другу и центральный угол растет, принимая значение 2β . Исходя из геометрических соотношений с учетом нерастяжимости оболочки ($\varphi R = 2\beta r$) находим:

$$\frac{\sin \beta}{\beta} = \frac{\sqrt{\left(\frac{f}{R}\right)^2 + 2\left(1 - \frac{f}{R}\right)(1 - \cos \varphi)}}{\varphi}; \quad (4.47)$$

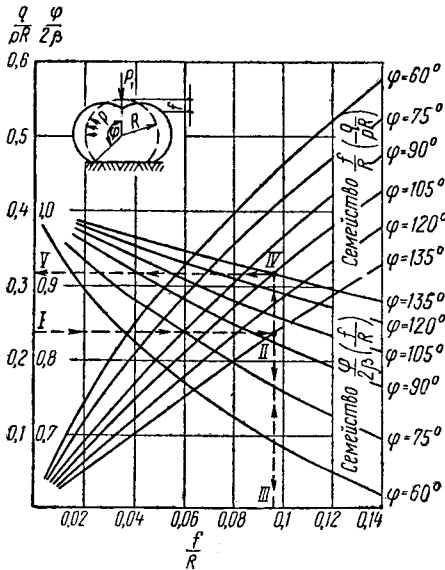


Рис. 4.16. График для расчета оболочек на действие сосредоточенной нагрузки

в зависимости от относительной нагрузки $\psi = \frac{r q}{p R}$ — построен график (рис. 4.16).

Пример 1. Дано: $p = 25 \text{ кгс/м}^2$; $R = 10 \text{ м}$; $\varphi = \frac{3}{4} \pi$; $q = 60 \text{ кгс}$.

Для $\psi = \frac{60}{25 \cdot 10} = 0,24$ находим по графику $\frac{f}{R} = 0,098$; $\frac{\varphi}{2\beta} = 0,912$ (ход решения показан пунктирной линией со стрелками). Затем вычисляем $f = 0,098 \cdot 10 \approx 1 \text{ м}$; $\sigma = 25 \cdot 10 \cdot 0,912 = 228 \text{ кгс/м}$.

Г. А. Гениевым [13] предложены приближенные формулы для расчета полуцилиндрических оболочек на действие местной радиальной равномерно распределенной нагрузки интенсивно-

$$\sin(\alpha + \beta) = \frac{\sin \varphi}{\varphi} \cdot \frac{\beta}{\sin \beta}. \quad (4.48)$$

Если задаться отношением $\frac{f}{R}$, то из (4.47) можно найти угол β^* , а затем из (4.48) — угол α .

Напряжение оболочки

$$\sigma = p r = p R \frac{\varphi}{2\beta}.$$

Нагрузка q , которая вызывает осадку f , может быть найдена из условия равновесия сил в точке B :

$$q = 2\sigma \cos \alpha = p R \frac{\varphi}{\beta} \cos \alpha.$$

Для решения прямой задачи — определения относительной осадки $\frac{f}{R}$ оболочки

* Угол β удобно находить, пользуясь таблицей функций $\frac{\sin x}{x}$ [31].

стью p (кгс/м). Если считать, что снеговая нагрузка располагается в пределах центрального угла $\alpha_0 \leq \frac{\pi}{2}$, то их можно рекомендовать для практических расчетов.

Случай симметричной нагрузки с центральным углом α_0 (рис. 4.17, а).

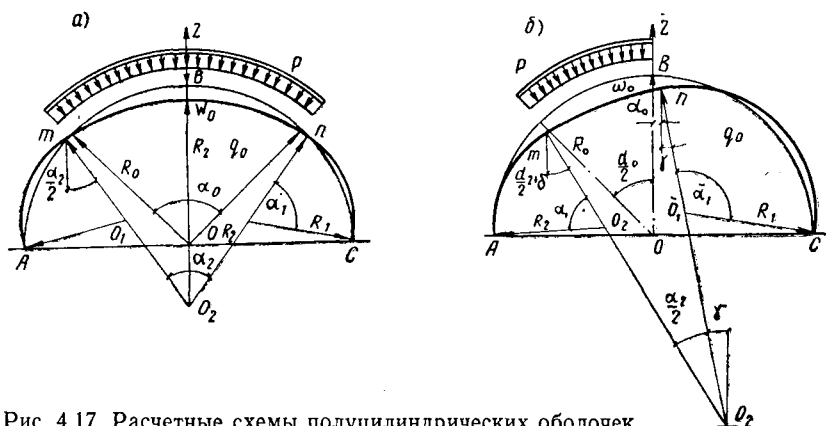


Рис. 4.17. Расчетные схемы полуцилиндрических оболочек

Радиальное перемещение ω_0 контура на оси симметрии

$$\frac{\omega_0}{R_0} = 1 - \frac{r \rho_1}{1 - \psi_0} \left[1 - \psi_0 \cos \frac{(1 - \psi_0) \alpha_0}{2 \rho_1} - (1 - \psi_0) \cos \frac{\pi - \psi_0 \alpha_0}{2 \rho_1} \right],$$

где R_0 — радиус недеформированного контура поперечного сечения оболочки;

$$\psi_0 = \frac{p}{q_0};$$

q_0 — избыточное давление воздуха;

ρ_1 — величина, определяемая из трансцендентного уравнения

$$\sin \frac{\pi - \psi_0 \alpha_0}{2 \rho_1} + \frac{\psi_0}{1 - \psi_0} \sin \frac{(1 - \psi_0) \alpha_0}{2 \rho_1} = \frac{1}{\rho_1}.$$

В качестве первого приближения рекомендуется следующая формула для ρ_1 :

$$\rho_1 \approx \frac{1}{1 + \frac{\psi_0}{1 - \psi_0} \sin \frac{\pi (1 - \psi_0) \alpha_0}{2 (\pi - \psi_0 \alpha_0)}}.$$

По значению ρ_1 находятся геометрические параметры деформированной оболочки

$$R_1 = \rho_1 R_0; \quad R_2 = \frac{\rho_1}{1 - \psi_0} R_0,$$

а также ее натяжение

$$S_1 = S_2 = q_0 \rho_1 R_0 < S_0 = q_0 R_0.$$

Случай односторонней нагрузки на дуге $\frac{\alpha_0}{2}$ (рис. 4.17, б).

По заданным значениям $\psi = \frac{p}{q_0}$ и $\frac{\alpha_0}{2}$ величины ρ_1 и γ определяются двумя трансцендентными уравнениями:

$$\begin{aligned} & \sin\left(\frac{\pi - \psi_0 \alpha_0}{2\rho_1} + \gamma\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2\rho_1} - \gamma\right) + \frac{\psi_0}{1 - \psi_0} \times \\ & \times \left[\sin\left(\frac{\alpha_0 - \psi_0 \alpha_0}{2\rho_1} + \gamma\right) - \sin \gamma \right] = \frac{2}{\rho_1}; \\ & \cos\left(\frac{\pi - \psi_0 \alpha_0}{2\rho_1} + \gamma\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2\rho_1} - \gamma\right) + \frac{\psi_0}{1 - \psi_0} \times \\ & \times \left[\cos\left(\frac{\alpha_0 - \psi_0 \alpha_0}{2\rho_1} + \gamma\right) - \cos \gamma \right] = 0. \end{aligned}$$

Вертикальное перемещение точки B

$$\frac{\omega_0}{R_0} = 1 - \rho_1 \left[\cos \gamma - \cos\left(\frac{\pi}{2\rho_1} - \gamma\right) \right].$$

Горизонтальное перемещение точки B

$$\frac{u_0}{R_0} = 1 - \rho_1 \left[\sin \gamma + \sin\left(\frac{\pi}{2\rho_1} - \gamma\right) \right].$$

Необходимые для построения деформированного контура оболочки параметры вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{\pi - \alpha_0}{2\rho_1}; \quad \alpha_2 = \frac{(1 - \psi_0) \alpha_0}{\rho_1}; \\ \bar{\alpha}_1 &= \frac{\pi}{2\rho_1}; \quad R_1 = \frac{R_0}{2} \cdot \frac{\pi - \alpha_0}{\alpha_1}; \\ R_2 &= R_0 \frac{\alpha_0}{\alpha_2}. \end{aligned}$$

Натяжение оболочки

$$S_1 = S_2 = \bar{S}_1 = q_0 R_1 < S_0 = q_0 R_0.$$

Разработанная нами методика расчета цилиндрических оболочек на давление ветра построена на предположении, что при перемещениях оболочки интенсивность давления в любой точке не изменяется; меняется лишь его направление, оставаясь, однако, всегда нормальным к ее поверхности. Это предположение мало противоречит экспериментальным данным, полученным в аэродинамической трубе [44]. Они свидетельствуют о том, что даже при заметных изменениях профиля цилиндрической оболочки величина аэродинамического коэффициента в зоне по-

ложительного давления, равно как и пик отсоса, растет незначительно.

Такое допущение позволяет использовать веревочный многоугольник. Оболочка представляется в виде полигона с K сторонами (рис. 4.18, а), а ветровая нагрузка, сложенная с избыточным давлением воздуха под оболочкой, сосредоточивается в $K-1$ узлах. Вследствие того, что нагрузка нормальна к поверхности

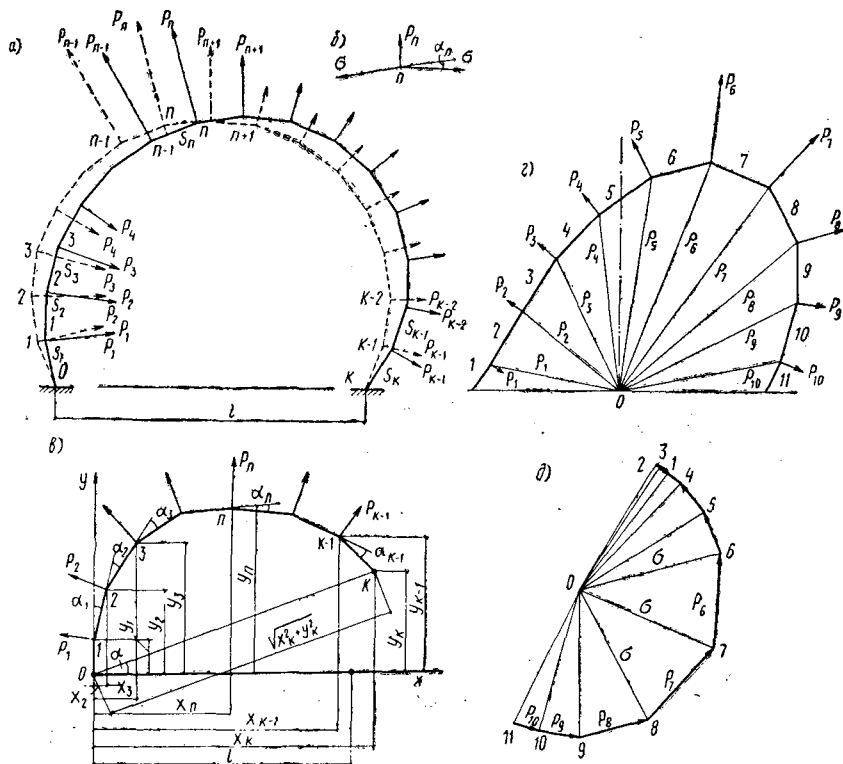


Рис. 4.18. К расчету цилиндрической оболочки на ветровую нагрузку

а — схема действия сил; б — силы в узле n ; в — ход решения прямой задачи; г — схема деформированной оболочки, снятая с натурального сооружения; д — ход решения обратной задачи

оболочки, тангенциальные составляющие отсутствуют, и поэтому напряжение σ оболочки постоянно по всему ее контуру.

Величины внешних углов α_n полигона определяются из условия равновесия каждого из узлов (рис. 4.18, б) по формуле

$$\alpha_n = \frac{P_n}{\sigma}, \quad (4.49)$$

где P_n — равнодействующая радиальных нагрузок в узле n .

Задавая произвольной величиной σ и полагая координаты левого конца оболочки равными $x_0 = y_0 = 0$, находят координаты правого конца оболочки (рис. 4.18, в) по формулам:

$$\left. \begin{aligned} x_k &= \sum_{n=1}^k S_n \sin \sum_{i=0}^{k-1} \frac{P_i}{\sigma}; \\ y_k &= \sum_{n=1}^k S_n \cos \sum_{i=0}^{k-1} \frac{P_i}{\sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (4.50)$$

где S_n — длина стороны полигона;
 $\alpha_0 = 0$.

При правильно назначенной величине σ соблюдается тождество

$$\sqrt{x_k^2 + y_k^2} = l, \quad (4.51)$$

где l — пролет оболочки.

Величину σ находят последовательными приближениями, обычно после трех-четырех попыток. Эта процедура довольно трудоемка, почему рекомендуется использование ЭВМ. Подробнее техника расчета изложена в [19].

Для определения σ предлагается эмпирическая формула

$$\sigma = \left[1,4 + \frac{q}{p} \left(1,2 + \frac{\cos \varphi + 15^\circ}{2} \right) \right] pR,$$

где q — скоростной напор в $кгс/м^2$;
 p — избыточное давление воздуха под оболочкой в $мм вод. ст.$;
 R — радиус оболочки в $м$;
 φ — центральный угол оболочки в $град.$

Формула справедлива в пределах $0,75 < \frac{q}{p} < 2$ и $90^\circ < \varphi < 270^\circ$. При этом погрешность не превышает $\pm 5\%$.

После того, как тождество (4.51) удовлетворено и, таким образом, напряжение σ найдено, нетрудно построить очертание деформированного контура оболочки. Координаты узлов вычисляют по формулам (4.50) после подстановки в них углов α_n , найденных по формуле (4.49).

Отметим, что отсюда вытекает методологическая основа для нахождения эпюры распределения ветрового давления по поверхности цилиндрической оболочки. Зафиксировав каким-либо образом (например, с помощью прогибомеров) удаления ρ определенных точек оболочки от ее первоначального центра и измерив ее натяжение σ (установив, например, динамометр в узле анкеровки), получают все необходимые данные для построения веревочного и силового многоугольников. Первым будет дефор-

мированный контур оболочки (рис. 4.18, *з*), вторым — многоугольник, вписанный в окружность радиуса, равного в масштабе сил σ (рис. 4.18, *д*). Стороны этого многоугольника суть равнодействующие давлений ветрового q и избыточного p . Вычитая последнее и приводя к распределенной нагрузке, можно построить эпюру фактического ветрового давления на оболочку.

Задача расчета цилиндрических оболочек надувных или наливных плотин весьма схожа с задачей расчета на ветровое давление. Поэтому для нахождения деформированного контура и натяжения оболочки пригоден изложенный выше метод расчета на ветровые нагрузки.

Имеются и специализированные методы. Большинство из них основано на рассмотрении контура цилиндрической оболочки плотины как гибкой полоски единичной ширины и заданной длины. Полоска лежит на неподатливом основании, к которому прикреплены оба ее конца в двух (реже одной) точках. Изнутри на полосу действует избыточное давление воздуха (если плотина надувная), или пьезометрический напор (если плотина наливная), или же и то и другое (если заполнение плотины водо-воздушное). Снаружи действует гидростатическое давление со стороны верхнего бьефа, уровень которого может достигать гребня и превышать его (тогда учитывают давление переливающегося потока), и со стороны нижнего бьефа, уровень которого может колебаться от гребня плотины до ее подошвы.

Отличие данной задачи от задачи о гибкой нити состоит в том, что и аэро- и гидростатическое давления нормальны к кривой $z(x)$, вид которой принимает полоска. Поэтому тангенциальная составляющая результирующей нагрузки $p(x)$ отсутствует, и напряжение σ полоски постоянно по всей ее длине:

$$\sigma = pR = \text{const},$$

где R — радиус кривизны полоски в рассматриваемой точке, определяемый из уравнения

$$R = \frac{(1+z'^2)^{3/2}}{z''}.$$

Дифференциальное уравнение

$$\sigma = p \frac{(1+z'^2)^{3/2}}{z''} \quad (4.52)$$

выражает зависимость профиля плотины от результирующей нагрузки.

Аналитическое решение уравнения (4.52) обычно находят с помощью эллиптических интегралов. Применяют также численные методы с использованием ЭВМ, графические и графоаналитические.

Б. И. Петраковым и П. П. Медведевым [34] разработана методика расчета надувной плотины без учета перелива воды через

гребень и подтопления в нижнем бьефе. Рассматриваются два участка профиля плотины (рис. 4.19, а): «сухой», очерчиваемый полукругом диаметра H (где H — высота напора), и напорный, дифференциальным уравнением контура которого является

$$p - \gamma x - \sigma \frac{d\varphi}{dS} = 0,$$

где p — избыточное давление воздуха;
 γ — удельный вес воды;
 dS и $d\varphi$ — длина элементарного участка оболочки и соответствующий ей центральный угол.

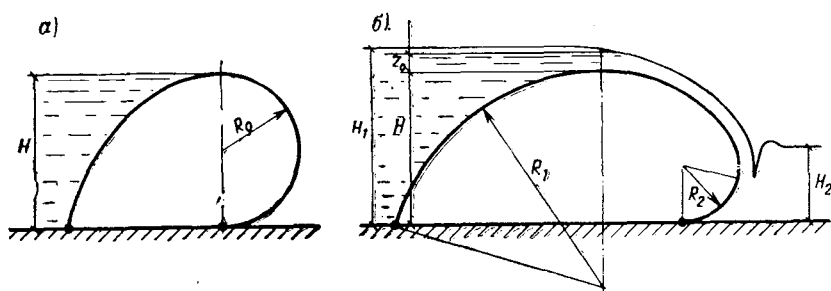


Рис. 4.19. Расчетные схемы пневматических плотин

а — надувной [34]; б — наливной [22]

Предлагаются два способа решения: графоаналитический и аналитический.

О. Г. Затворницкий [22] для расчета наливных плотин предлагает приближенный аналитический метод, учитывающий подтопление и перелив, причем давление переливающегося потока заменяется гидростатической эквивалентной нагрузкой.

Для принятой расчетной схемы (рис. 4.19, б) получены следующие зависимости:

$$\sigma = 0,25 \gamma [2H_0 H - H^2 - \bar{H}_2^2 - z_0 (H - \bar{H}_2)],$$

где H_0 — пьезометрический напор внутри оболочки;

$$\bar{H}_2 = \frac{H_2 - \theta H}{1 - \theta};$$

θ — эмпирическая величина, определяемая по графикам в зависимости от $\alpha = \frac{H_0}{H}$; $\beta = \frac{H_2}{H}$ и $\eta = \frac{z_0}{H}$,

$$R_1 = \frac{\sigma}{\gamma (H_0 - H - z_0)}; \quad R_2 = \frac{\sigma}{\gamma (H_0 - \bar{H}_2)}.$$

В отличие от надувной плотины, где отыскивается форма контура напорной части оболочки, тогда как «сухая» часть очерчивается дугой окружности, здесь, наоборот, напорная часть идет по дуге окружности, а нахождение очертания «сухого» контура составляет основную часть задачи. Для ее решения предлагается использовать графоаналитический способ.

Х. О. Энвер [42] решает задачу пневматических плотин в самой общей постановке с привлечением гидродинамики. Напрягающей средой в его решении может быть как воздух, так и вода. Методика расчета подтверждается экспериментальными данными, полученными в гидродинамическом лотке. Из последних отечественных работ следует назвать исследования Б. И. Сергеева и И. А. Петрова (Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт). В работе последнего даются аналитические выражения координат профиля воздухо- и водонаполняемых плотин, предложен графоаналитический метод решения задачи, составлены номограммы для практических расчетов.

Сферические оболочки

Задача об определении осадки под центрально приложенной нагрузкой для оболочек вращения и, в частности, сферических оболочек сложнее, чем для цилиндрических. Ее решению, предшествуют следующие рассуждения.

Под действием вертикальной нагрузки (рис. 4.20) перемещения оболочки могут быть направлены только внутрь (если материал нерастяжим). Осадка отмечается в пределах некоторой зоны CD , радиус которой тем больше, чем больше нагрузка Q и чем меньше избыточное давление p под оболочкой. Ниже границы этой зоны оболочка своей формы не меняет, не меняется и ее напряженное состояние.

Напряженное состояние верхней зоны оболочки характеризуется отсутствием кольцевых напряжений; физическая картина явления — наличием складок (морщин) вдоль меридиональных линий, вид которых, как доказал А. Р. Ржаницын [37], соответствует эластике Эйлера, обладающей свойством очерчивать меридиан поверхности вращения наибольшего объема при заданной длине меридиана.

Указанных условий достаточно для постановки задачи о напряженно-деформированном состоянии оболочки под действием центрально приложенной вертикальной нагрузки. С. А. Алексеевым [2] рассмотрен общий случай оболочки вращения с произвольной линией образующей и нагрузкой, передаваемой через

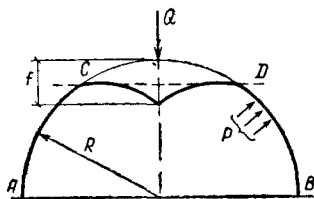


Рис. 4.20. Расчетная схема сферической оболочки при действии сосредоточенной нагрузки

круглый диск любого радиуса. Последовательными попытками отыскиваются корни трансцендентных уравнений, содержащих эллиптические интегралы 1-го рода, для построения характеристики системы (кривой зависимости силы Q от осадки f диска).

Г. А. Гениевым [12] предложены рабочие формулы для расчета полусферической оболочки радиуса R с центрально приложенным сосредоточенным грузом Q . После введения в решение ряда допущений получена приближенная формула осадки f :

$$\frac{f}{R} \approx 1,865 \frac{Q}{\pi p R^2}, \quad (4.53)$$

которой может быть придан более простой вид:

$$f \approx 0,6 \frac{Q}{pR}. \quad (4.54)$$

Им же предложена аналогичная формула для определения осадки полуцилиндрической оболочки под действием нагрузки q , распределенной вдоль центральной образующей. После некоторых упрощений формуле можно придать вид:

$$f \approx \frac{q}{2p}. \quad (4.55)$$

Формулы (4.53) и (4.55) рекомендуются их автором для тех случаев, когда величины отношений

$$\frac{Q}{p \pi R^2} \text{ и } \frac{q}{pR}$$

малы по сравнению с единицей.

Сообразуясь в каждом конкретном случае с результатами расчета по формулам (4.54) и (4.55), можно примерно оценить величину осадки ПС в виде полуцилиндра с торцовыми окончаниями сферической формы.

Попытки расчета сферических ПС на ветровое давление можно условно разбить на пять этапов последовательного приближения к точному решению, характеризующих различными допущениями в отношении формы оболочки и распределения ветрового давления.

1. Оболочка недеформируема; нагрузка представлена простыми тригонометрическими функциями вида (4.9) и (4.10), сильно идеализирующими действительность. Решение для первого вида нагрузки дано еще Дишингером [17], для второго можно найти в [32].

2. Оболочка недеформируема; нагрузка представлена более сложными функциями вида (4.11) и (4.12), полученными в результате продувок жестких моделей. Решение при нагрузке вида (4.11) принадлежит Г. И. Пшеничнову [35]. Готовые формулы напряжений в оболочке приведены в [23].

3. Оболочка недеформируема; нагрузка представлена еще более сложными функциями вида (4.13) и (4.14), найденными в результате продувок мягких моделей. Решение для нагрузки вида (4.13) найдено В. И. Никулиным [29]. Приближенное решение в виде формулы скорости ветра v , при которой оболочка радиуса R , изготовленная из мягкого материала с разрывной прочностью T_p , разрушается, дается С. А. Алексеевым [8]:

$$v = 4 \sqrt{\frac{T_p}{R} - \frac{p}{2}}.$$

4. Оболочка нерастяжима и под действием ветрового давления имеет кинетические перемещения; нагрузка задана в виде (4.9), отвечающем не столько действительности, сколько простоте математических выкладок. Решение, принадлежащее Дж. У. Леонарду, опубликовано в работе [50].

5. Оболочка нерастяжима и под действием ветрового давления имеет кинетические перемещения; нагрузка представлена функциями вида (4.13) и (4.14). Решением этой задачи занимались С. А. Алексеев и А. М. Смирнов. Материалы экспериментов и теоретических исследований, излагаемых ниже, легли в основу диссертации последнего [38, 39] и совместных публикаций [9, 10].

Методика расчета сферической оболочки на ветровые нагрузки с учетом перемещений, разработанная А. М. Смирновым [38], позволяет определить все элементы конечного равновесного состояния оболочки (в том числе и перемещения) и рассчитана на использование ЭВМ. В конечном виде дополнительное натяжение оболочки от ветрового давления, например для направления $\alpha\alpha$, представлено уравнением

$$T_{\alpha\alpha} = qRt_{\alpha\alpha} \cos n\beta, \quad (4.56)$$

где $t_{\alpha\alpha}$ — функция угла долготы, относительной высоты оболочки, упругих констант материала и избыточного давления под оболочкой, определяемая путем продувки моделей.

К выражению вида (4.56) приводятся и другие элементы напряженно-деформированного состояния оболочки.

Подводя итог результатам экспериментальных и теоретических изысканий в области взаимодействия мягких оболочек и ветрового потока, отметим, что представляется практически полезной систематизация величин коэффициентов k_φ и k_θ в следующих формулах максимальных меридиональных и кольцевых натяжений оболочек:

$$\sigma_\varphi^{\max} = k_\varphi qR; \quad \sigma_\theta^{\max} = k_\theta qR.$$

По всей вероятности эти коэффициенты будут определяться только двумя параметрами оболочки и нагрузки — базовым углом $\pi - \varphi_0$ и отношением p/q ; их можно свести в таблицу следующего вида:

Базовый угол $\alpha - \varphi_0$	p/q									
	0,6		0,8		1		1,2		1,67	
	k_φ	k_θ	k_φ	k_θ	k_φ	k_θ	k_φ	k_θ	k_φ	k_θ
$3/4\pi$										
$2/3\pi$									1,38	1,50
$1/2\pi$										
$1/3\pi$										

В настоящее время таблица пуста, если не считать одной клетки, заполненной на основе примера расчета из [38]. До заполнения таблицы исследователями ветрового воздействия на воздухоопорные оболочки при ориентировочных расчетах можно принимать

$$\sigma_\varphi^{\max} = \sigma_\theta^{\max} = (1,00 \div 1,50) qR.$$

4. Расчет оболочек, усиленных канатами

Мягкие оболочки, снабженные системой разгружающих канатов меридионального или кольцевого направления, отличаются тем, что их напряжение в направлении, совпадающем с направлением канатов, резко падает с увеличением стрелы выгиба оболочки между канатами.

Цилиндрические оболочки. При постановке канатов цилиндрическая поверхность оболочки приобретает кривизну и в меридиональном направлении (рис. 4.21). Гауссова кривизна оболочки из нулевой становится положительной.

Уравнение Лапласа (4.35) показывает, что с уменьшением радиуса R_1 меридиана напряжение σ_2 падает:

$$\sigma_2 = pR_2 - \sigma_1 \frac{R_2}{R_1},$$

что, собственно, и является эффектом применения разгрузочных канатов. При $R_1 = R_2 = R$, когда поверхность оболочки представляется состоящей из ряда сферических колец, напряжение σ_2 снижается вдвое. С дальнейшим уменьшением R_1 оно может быть доведено до нуля.

Теорией мягких оболочек разработаны решения [1, 30], имеющие отношение к поставленной задаче. Они отличаются главным образом гипотезами о физических свойствах материала оболочки, а также представлениями о начальной форме оболочки. В них рассматривается осесимметричная оболочка вращения, деформации которой вдоль оси развиваются свободно. Однако оболочка реального ПС рассечена опорной плоскостью, парал-

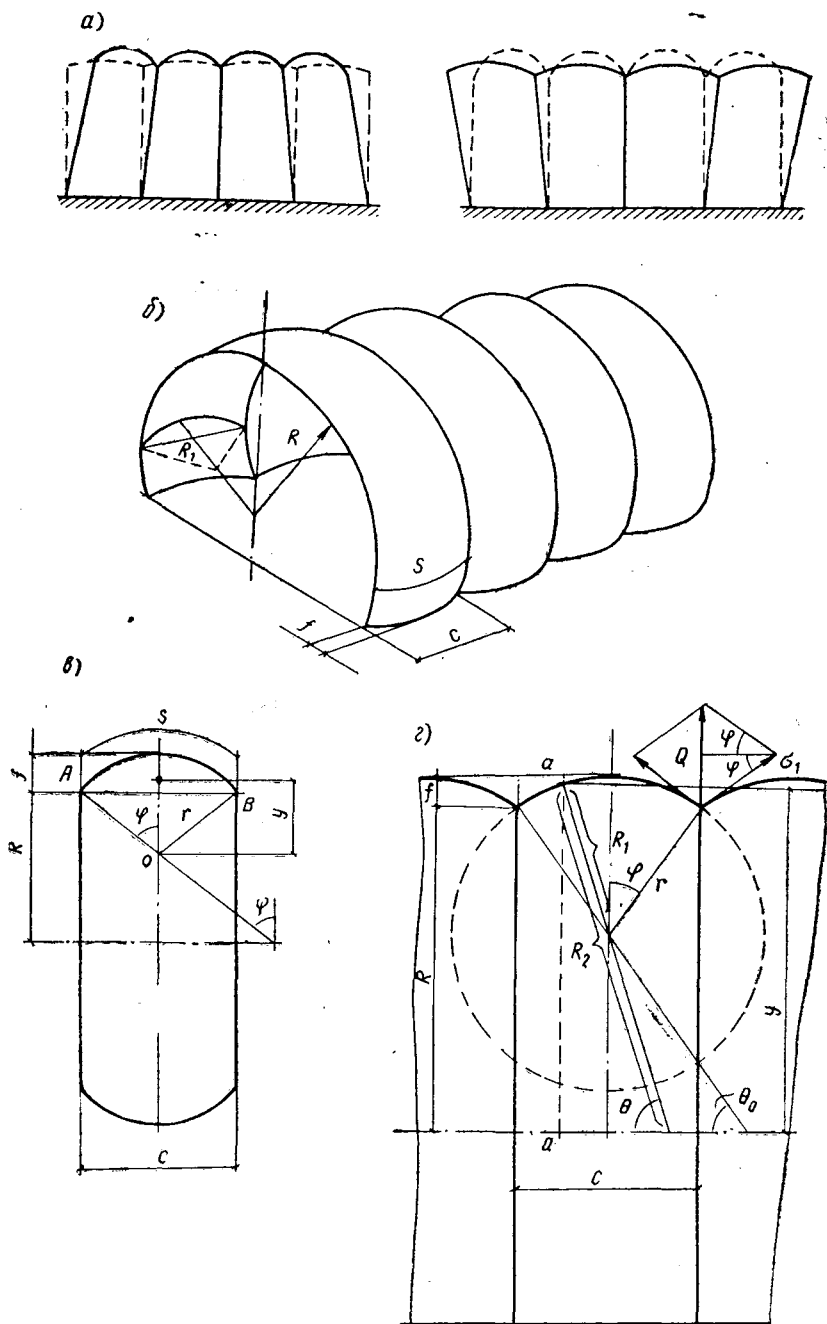


Рис. 4.21. Цилиндрические оболочки, усиленные канатами

a — сближение и расхождение канатов при недостаточной или избыточной величине стрелы выгиба гофра; *б* — образование гофров путем специального раскрая или путем стягивания канатов; *в*, *г* — геометрические соотношения

лельной оси, и деформация в этой плоскости невозможна. Поэтому точность, которую обеспечивают решения [1, 30], не соответствует тому грубому допущению, которое бы сделали, применяя методы, основанные на свободных деформациях оболочки, к условиям ее стесненных перемещений.

Для целей инженерных расчетов можно было бы пренебречь растяжимостью материалов, оставив, однако, условие, чтобы раскрой «гофрированной» оболочки был таким, при котором влияние растяжимости материала оказалось наименьшим.

При наполнении воздухом оболочки, выкроенной с выгибом f недостаточной величины, плоскости расположения разгружающих канатов будут наклоняться к центру сооружения (рис. 4.21, а). Излишний выгиб приведет к развалу этих плоскостей в стороны торцов. Только при определенном соотношении между размерами оболочки, которые должны учитываться как при раскрое оболочки, так и при разметке опорного контура, отклонения плоскостей расположения канатов от вертикали будут сведены к нулю. Это соотношение между радиусом R , длиной S и стрелой f выгиба оболочки между канатами найдем из условия максимума объема оболочки. Представим себе, что «гофрированная» поверхность оболочки каким-либо способом уже придана. Этим способом может быть как специальный раскрой, так и стягивание канатов при цилиндрически выкроенной оболочке, когда под канатами образуются складки — зоны избытка материала и одноосных напряжений.

Рассмотрим модель одного гофра оболочки в виде двух жестких дисков с радиусом R (рис. 4.21, в), соединенных мягкой оболочкой, которая в начальной стадии имеет вид цилиндра объемом

$$V_0 = \pi R^2 S.$$

При повышении давления воздуха оболочка между дисками выпучивается по некоторой кривой, которую будем считать дугой окружности радиуса r . Одновременно с этим торцовые диски стягиваются до расстояния между ними $C < S$. В результате наступает равновесное состояние, соответствующее наибольшему объему системы. Оно определяется уравнением

$$\left[4 \frac{R}{S} \varphi \left(\frac{R}{S} \varphi - \cos \varphi \right) + \cos^2 \varphi + 2 \right] \left(\frac{\varphi}{\operatorname{tg} \varphi} - 1 \right) + \varphi^2 = 0.$$

Определив с его помощью величину угла φ , стрелу выгиба оболочки находим по формуле

$$f = S \frac{1 - \cos \varphi}{2\varphi}.$$

Оболочка, характеризуемая найденными таким образом соотношениями параметров R , S , f , может рассматриваться как гео-

метрически неизменяемая, если материал считать нерастяжимым.

В меридиональном направлении первый главный радиус такой оболочки постоянен и равен $R_1 = r$ (рис. 4.21, в). Второй главный радиус кривизны R_2 определяется теоремой Менье

$$R_2 = \frac{R + f - R_1 (1 - \sin \theta)}{\sin \theta}.$$

Случай 1. Оболочка выкроена в виде поверхности типа тороидальной. Максимальные напряжения оболочки определяются по формулам

$$\sigma_1^{\max} = \frac{p}{2} \left(R_1 + \frac{R + f - R_1}{\cos \varphi} \right); \quad (4.57)$$

$$\sigma_2^{\max} = \frac{p}{2} \left[R_1 - \frac{(R + f - R_1)^2}{R_1} \right]. \quad (4.58)$$

Погонная радиальная нагрузка на канат

$$Q = 2\sigma_1 \sin \varphi.$$

Усилие в канате

$$T = QR = pR^2 \operatorname{tg} \varphi.$$

Из формулы (4.57) следует, что при

$$R_1 < \frac{(R + f - R_1)^2}{R_1}$$

максимальные кольцевые напряжения становятся нулевыми. Условием этого критического состояния будет

$$R_1^2 > (R + f - R_1)^2,$$

откуда находим условие одноосного напряженного состояния оболочки

$$f < \frac{C^2}{4R}.$$

Например, при пролете оболочки 16 м и расстоянии между канатами $C = 2$ м предельный выгиб оболочки равен 12,5 см. При превышении этого предела напряжения в оболочке развиваются только в одном направлении.

Случай 2. Оболочка выкроена в виде цилиндрической поверхности с избытком поперечного сечения. Оболочка стягивается разгружающими канатами до такого положения, что на ее поверхности образуются меридиональные складки и она возле каната начинает входить в состояние одноосного напряжения. Если R — радиус окружности, образуемой разгружающими канатами, $R_p = R + f$ — радиус цилиндрической выкройки оболочки, что меридиональное напряжение можно найти так:

из условия равновесия сил в сечении $a-a$

$$2\pi (R + f) \sigma_1 \sin \theta = \pi y^2 p,$$

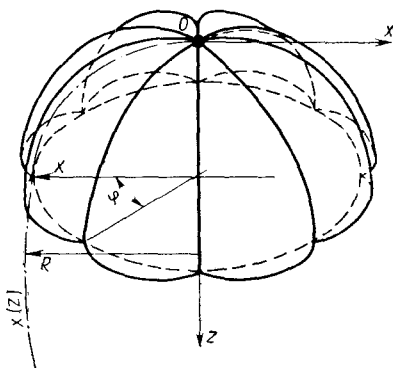


Рис. 4.22. Оболочка вращения, усиленная канатами

откуда

$$\sigma_1 = p \frac{[R + f - R_1(1 - \sin \theta)]^2}{2(R + f) \sin \theta}; \quad \sigma_2 = 0.$$

Максимальное напряжение будет при $\theta = \pi/2$

$$\sigma_1^{\max} = \frac{p}{2} (R + f).$$

Оболочки вращения. Оболочки вращения (рис. 4.22), усиленные меридиональными канатами, называют зонтичными. Под действием избыточного давления воздуха канаты следуют вполне определенной кривой. Ее уравнение дает Л. И. Ярин [41]:

$$z = \sqrt{2} E \left(\arcsin x_0 \sqrt{\frac{2}{1+x_0^2}}; \frac{1}{\sqrt{2}} \right) - x_0 \sqrt{\frac{1-x_0^2}{1+x_0^2}} + \\ + \frac{1}{\sqrt{2}} F \left(\arccos x_0; \frac{1}{\sqrt{2}} \right) - \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left\{ \Gamma \left(\frac{1}{4} \right) \right\}^2,$$

где $F(\gamma; k)$; $E(\delta; k)$ — эллиптические интегралы, соответственно, I и II рода;

$\Gamma(m)$ — гамма-функция;

$x_0 = \frac{X}{R}$; $z = \frac{Z}{R}$ — безразмерные координаты;

R — радиус экваториальной окружности, определяемый из таблиц, в зависимости от длины каната.

Длина каната (безразмерная)

$$l = \frac{L}{R} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left\{ \Gamma \left(\frac{1}{4} \right) \right\}^2 - \frac{1}{\sqrt{2}} F \left(\arccos x_0; \frac{1}{\sqrt{2}} \right).$$

Усилие в канате

$$T = \frac{\pi R^2}{n} p,$$

где n — число канатов;

R — радиус основания оболочки;

p — избыточное давление воздуха.

Напряжения оболочки в меридиональном направлении, как это было показано при рассмотрении цилиндрических оболочек, малы по сравнению с кольцевыми. Кольцевые напряжения, отнесенные к радиусу экватора R , определяются по формуле

$$T_k = pr \frac{\varphi}{2 \sin \frac{\varphi}{2}},$$

где r — радиус кривизны горизонтального сечения гофра оболочки;

$$\varphi = \frac{2\pi}{n}.$$

ЖЕСТКИЕ КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУХООПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Будучи в своей основе мягкими оболочками, ПС все же нуждаются в минимуме жестких конструкций, входящих в их комплект.

Жесткими как по конструкции, так и по применяемым материалам (сталь, алюминиевые сплавы, дерево, пластмассы), элементами ПС воздухоопорного типа являются шлюзы (каркасы, двери, ворота), устройства, поддерживающие оболочку на время открывания ее торцевой части для ввода или вывода крупногабаритной техники, и анкеры.

Существование воздухоопорных сооружений без жестких конструкций в принципе возможно: оболочка шлюза может быть подвешена к рабочей оболочке, дверные проемы могут быть завешены мягкими шторами; анкерным устройством может служить периметральная мягкая труба, заполненная водой, или же мешки с грунтом. Что же касается поддерживающего каркаса, то он нужен далеко не всегда, и большинство ПС им не снабжается; как будет видно из дальнейшего изложения, и поддерживающий каркас может быть пневматическим, т. е. мягким.

Тем не менее полная замена жестких конструкций ПС мягкими хотя и желательна, но далеко не всегда рациональна. Так, мягкий шлюз отнимает значительную часть полезной площади помещения; шторами можно закрыть лишь небольшие проемы; вода в периметральных трубах замерзает, а мешки с грунтом требуют дополнительного расхода материалов; пневматический поддерживающий каркас пригоден лишь для небольших пролетов и не свободен от других недостатков.

В связи с этим жесткие конструкции считаются обычной принадлежностью комплекта ПС. Не являясь основной частью сооружения, они составляют значительную долю его веса, транспортного объема и стоимости. Рациональным проектированием жестких конструкций можно добиться существенного улучшения упомянутых показателей, чем, собственно, и объясняется выделение этого вопроса в специальную главу.

20. ШЛЮЗЫ, КАРКАСЫ, ДВЕРИ, ВОРОТА

Для того чтобы воздухоопорное сооружение потеряло свою несущую способность, нужно чтобы из-под оболочки вышло не так уж много воздуха. Так, ПС средних размеров ($40 \times 16 \times 8$ м) требует для своего наполнения около 3500 м^3 воздуха. Но для «сскисания» оболочки достаточно утечки каких-нибудь десяти кубометров.

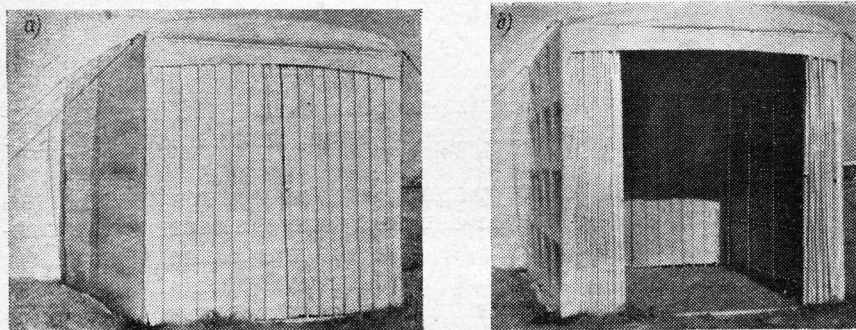


Рис. 5.1. Шлюз со шторными воротами

а — при закрытом наружном и открытом внутреннем проемах (тент шлюза находится под избыточным давлением); *б* — при открытом наружном и закрытом внутреннем проемах (тент шлюза свободно лежит на каркасе)

Открывание проемов в ПС неизбежно связано с потерей воздуха. При небольших размерах проемов, предназначенных для прохода человека, утечка довольно быстро компенсируется притоком воздуха от ВУ и принятие каких-либо особых мер не обязательно. Тем не менее, в целях удобства эксплуатации сооружения, практикуется устройство небольших шлюзов. В случае же проемов средних размеров (для проезда автотранспорта) шлюзование совершенно необходимо.

Шлюз представляет собой камеру, соединяющую внутренний объем сооружения с внешней средой закрывающимися проемами. При пропуске людей или техники одновременно открывается только один из проемов, поэтому давление воздуха в шлюзе периодически меняется от повышенного, равного давлению в сооружении, до атмосферного (рис. 5.1).

Шлюзы состоят из несущей системы (каркас) и ограждающей (тент). Материал тента шлюза принимается обычно тот же, что и для оболочки ПС. Как правило, каркас размещается внутри тента. Возможно устройство шлюза и с наружным каркасом (см. рис. 1.32, *а*). Шлюзы стационарных сооружений могут быть выполнены и из традиционных материалов — кирпича, бетона, сборного или монолитного железобетона (см. рис. 1.12, *б*).

В транспортабельных ПС к конструкции шлюзов предъявля-

ются требования простоты и удобства монтажа (демонтажа), а также предельно малого собственного веса и транспортного объема. Каркас шлюза выполняется обыкновенно из металла; для облегчения каркаса зачастую применяются алюминиевые сплавы.

По назначению шлюзы делятся на «людские», обеспечивающие вход (выход) из сооружения людей, и технические, предназначенные для ввода (вывода) техники.

Количество и расположение шлюзов определяются назначением ПС (рис. 5.2). Технические шлюзы размещаются обычно по торцам сооружения; шлюз для людей может быть предусмотрен в любом месте оболочки.

Обыкновенно шлюзы располагаются снаружи сооружения, но в некоторых случаях (при ограниченной площади подъездов) могут быть вдвинуты в сооружение. Этой трансформации способствует наличие так называемого переходника — мягкого «воротника», соединяющего оболочку ПС с тентом шлюза; удачная конструкция соединения переходника с рабочей оболочкой допускает свободное перемещение шлюза вдоль оси входа (рис. 5.2, б) и даже некоторый разворот. Габариты шлюзов определяются исходя из эксплуатационных требований, с учетом возможного прохода людей с ношей, носилками или с тачкой. Иногда в шлюзе предусматривается установка какого-либо оборудования, например ВУ. Длина этих шлюзов равна 1,5—3 м, ширина — 0,6—1,2 м, высота — до 2 м (рис. 5.3).

Когда пронос громоздких предметов через шлюз не предусматривается, возможно устройство шлюза в виде жесткого цилиндрического тамбура с вращающимися дверями. Ввиду незначительности утечки воздуха такое устройство рационально при непрерывном пропуске больших масс посетителей, например в выставочных павильонах. Однако в этом случае необходима строгая организация движения людей через тамбур, что создает некоторые осложнения в случае аварийной эвакуации людей из пневмосооружения. Шлюз для людей может быть выполнен

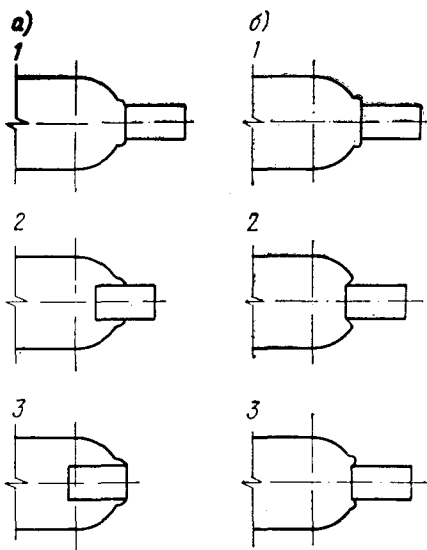


Рис. 5.2. Размещение шлюзов

а — возможное размещение технического шлюза: 1 — наружное; 2 — среднее; 3 — внутреннее; б — регулирование положения шлюза, допускаемое наличием переходника: 1 — выдвинут из сооружения; 2 — вдвинут в сооружение; 3 — промежуточное положение

в виде жесткой коробки листовой конструкции; в этом случае его целесообразно использовать как контейнер для перевозки всего комплекта транспортабельного ПС.

При низкой интенсивности движения людей возможна замена шлюза простым лазом щелевой или круглой формы (рис. 5.4); последний изнутри закрывается полотнищем, прижимаемым к отверстию давлением воздуха.

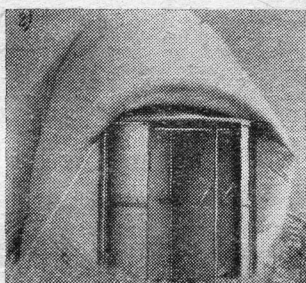
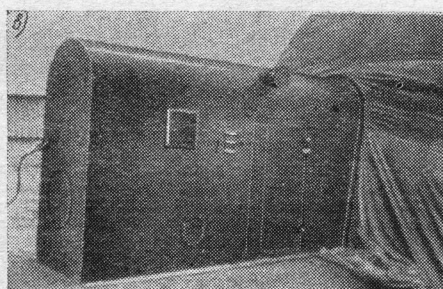
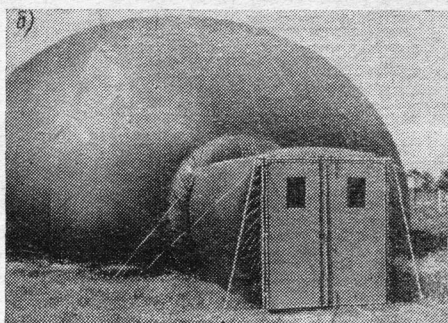
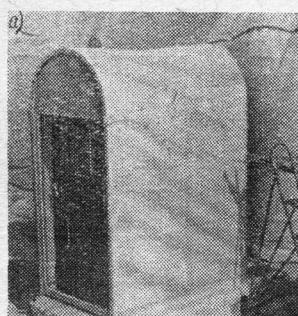


Рис. 5.3. Шлюзы для людей

а — малогабаритный с мягким тентом; *б* — крупногабаритный с мягким тентом; *в* — в виде жесткого металлического тамбура; *г* — в виде жесткой коробки с вращающимися дверями

Каркас шлюза для людей выполняется из трех-четырех П-образных рам или арок, соединенных продольными связями (рис. 5.5). Геометрическая неизменяемость каркаса обеспечивается жесткими узлами или диагональными подкосами.

Рациональна конструкция каркаса в виде укрупненных плоских монтажных элементов, состоящих из трех-четырех линейных элементов каждый: это ускоряет монтаж (демонтаж) шлюза (рис. 5.6).

Размеры технических шлюзов определяются габаритами техники, вводимой в сооружение (рис. 5.7). Обычно они равны: глубина 6—10 м, ширина 3—4 м и высота 3—4 м.

Стойки каркаса обычно выполняют прямолинейными. Однако под действием избыточного давления тент шлюза стремится приобрести цилиндрическую форму, в связи с чем стойкам придают

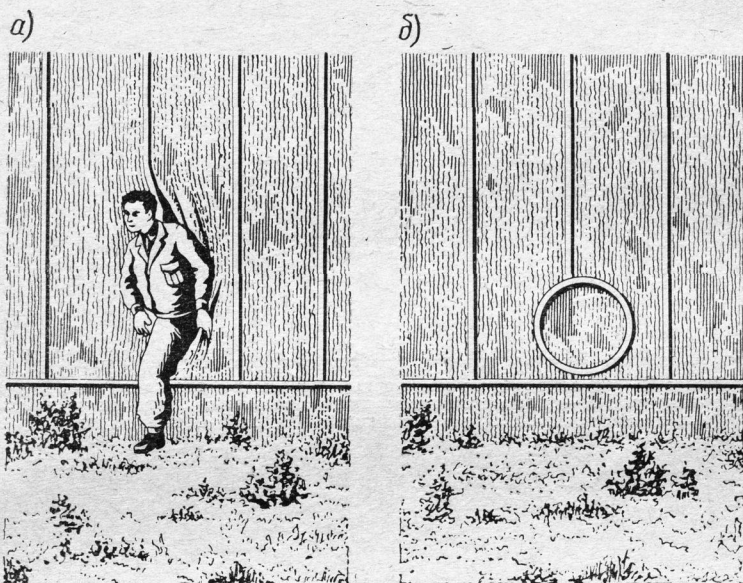


Рис. 5.4. Лазы
а — щелевой; *б* — круглый

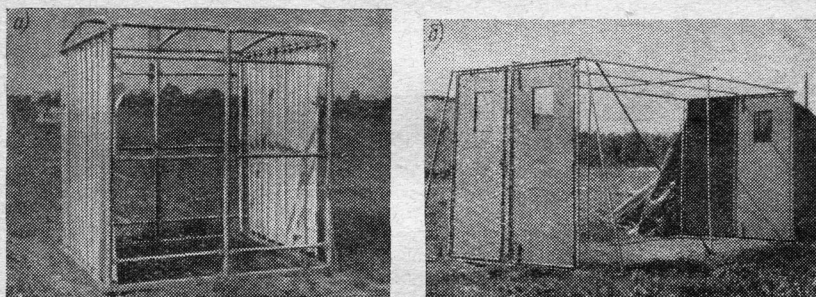


Рис. 5.5. Каркасы шлюзов с дверями
а — шторными; *б* — жесткими распашными

иногда кривизну и соответственно раскраивают тент (рис. 5.7, *з*). В этом случае наблюдается более благоприятное распределение напряжений в месте его соединения с оболочкой ПС.

Каркасы шлюзов рассчитывают на прочность и устойчивость под воздействием двух комбинаций нагрузок:

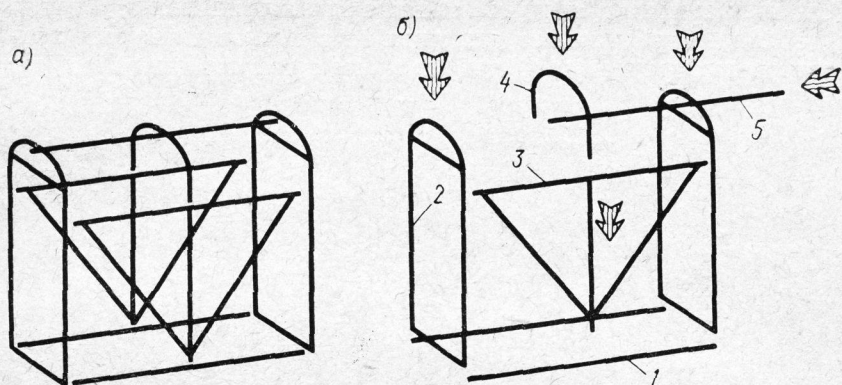


Рис. 5.6. Каркас шлюза для людей из линейных, изогнутых и плоских элементов
a — общий вид; *б* — порядок сборки; 1 — опорный лежень; 2 — торцовая рама; 3 — боковина; 4 — верхняя дуга; 5 — прогон (элементы пронумерованы в соответствии с последовательностью монтажа, стрелками показано направление их установки)

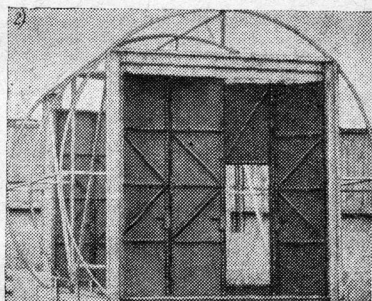
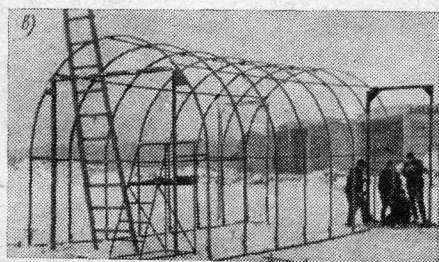
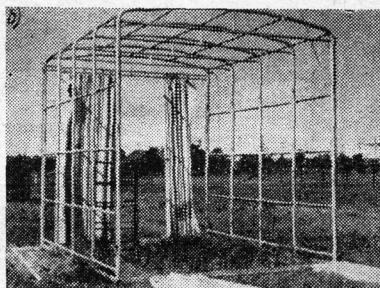


Рис. 5.7. Каркасы технических шлюзов

a — с жестким порталом; *б* — со сварными трубчатыми ригелями; *в* — с цилиндрическим верхом; *г* — кругового очертания

полная снеговая и ветровая нагрузка при условии отсутствия под тентом избыточного давления;

ветровая нагрузка при условии наличия под тентом избыточного давления и отсутствия снега.

Каркасы шлюзов крепят к грунту анкерами, устойчивость каркасов увеличивают применением тросовых оттяжек (рис. 5.1).

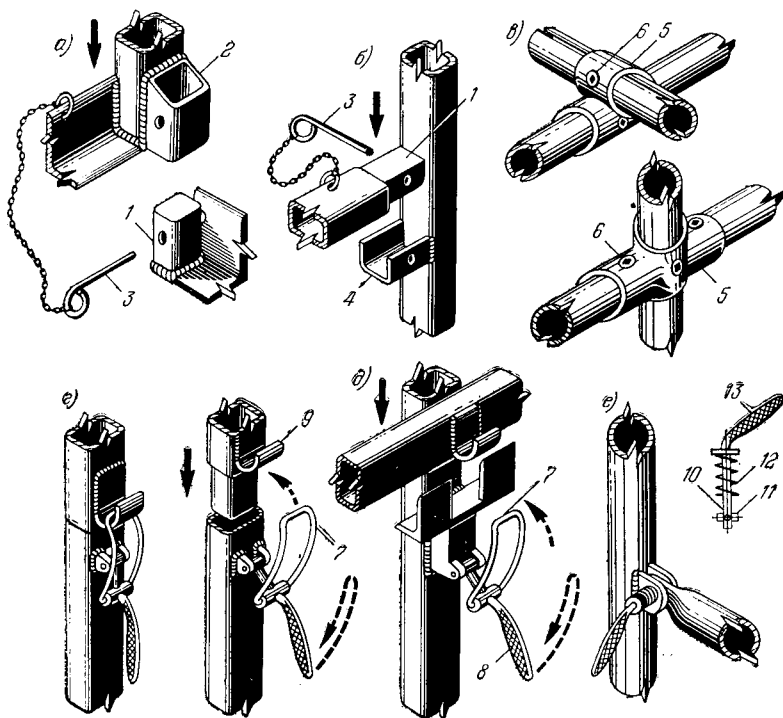


Рис. 5.8. Монтажные стыки элементов каркаса

а — соединение типа «шип-стакан» с фиксирующей шпилькой; *б* — соединение типа «шип-гнездо» с фиксирующей шпилькой; *в* — соединение на муфтах с фиксирующими винтами; *г*, *д* — соединения при помощи стяжного замка; *е* — шарнирное соединение морским болтом; 1 — шип; 2 — стакан; 3 — шпилька; 4 — гнездо; 5 — муфта; 6 — фиксирующий винт; 7 — петля стяжного замка; 8 — рукоять замка; 9 — крюк; 10 — стержень морского болта; 11 — вертушка; 12 — пружина; 13 — рукоять

Установка и снятие воздухоопорного сооружения занимает мало времени. Однако оно может быть непроизводительно потеряно при нерациональной конструкции монтажных стыков. Поэтому желательно, чтобы соединения элементов каркасов отличались простотой и надежностью и замыкались в результате одного-двух движений руки монтажника.

Наиболее просты шарнирные стыки в виде шипа и стакана, шипа и гнезда с фиксирующей чекой (рис. 5.8, *а*, *б*). Более сложные стыки с монтажными муфтами (рис. 5.8, *в*), снабженными за-

ранее ввинченными в них нержавеющей стали винтами. Кольцевая кромка концов винтов закалена, при затягивании их ключом кромки врезаются в поверхность соединяемых элементов. Такая конструкция стыка удобна в монтаже, но под воздействием вибрационных нагрузок она постепенно ослабляется, что требует периодического затягивания винтов.

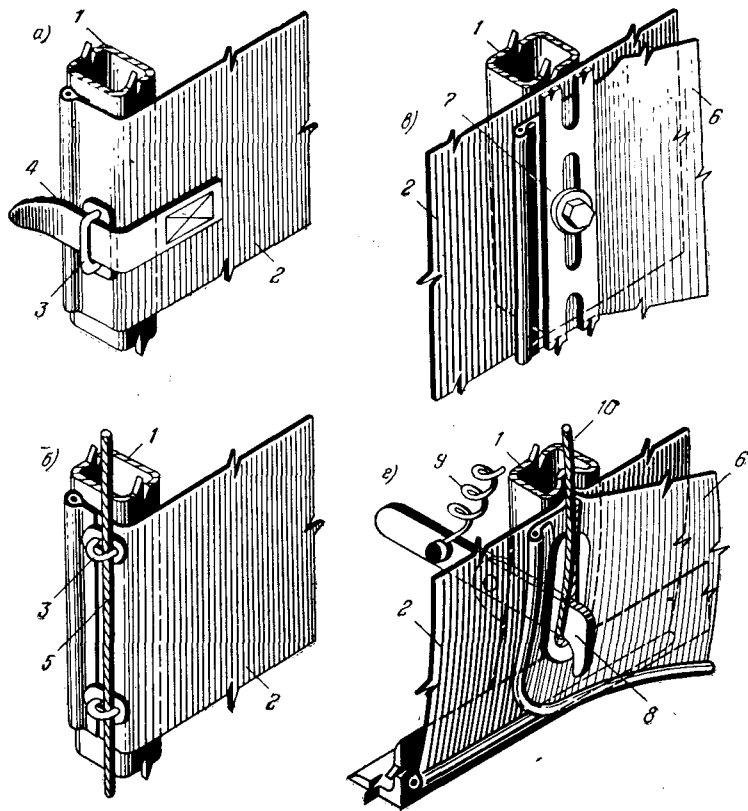


Рис. 5.9. Крепление оболочки к каркасу шлюза при помощи

a — петля и ремешков; *б* — петля и монтажного троса; *в* — перфорированных лент и болтов; *г* — обжимного монтажного троса; *1* — стойка каркаса; *2* — ткань оболочки; *3* — петля; *4* — ремешок; *5* — монтажный трос; *6* — ткань переходника; *7* — перфорированная лента; *8* — крюк; *9* — пружина натяжения обжимного троса; *10* — обжимной трос

Быстрое соединение элементов каркасов достигается при помощи стяжных замков, состоящих из рычага с петлей на одном элементе и крюка на другом (рис. 5.8, *г, д*). Плотный жесткий стык образуется в результате одного поворота рычага.

Шарнирные стыки элементов каркаса могут быть осуществлены путем применения морского болта.

Монтажные стыки с применением болтов нельзя считать удачными: они чувствительны к коррозии; требуют много времени на совмещение отверстий соединяемых элементов, на накидывание шайб и гаек, на их затягивание; элементы болтового соединения легко теряются.

Большое влияние на затраты времени при монтаже ПС оказывает способ соединения мягкой оболочки с каркасом. Проще

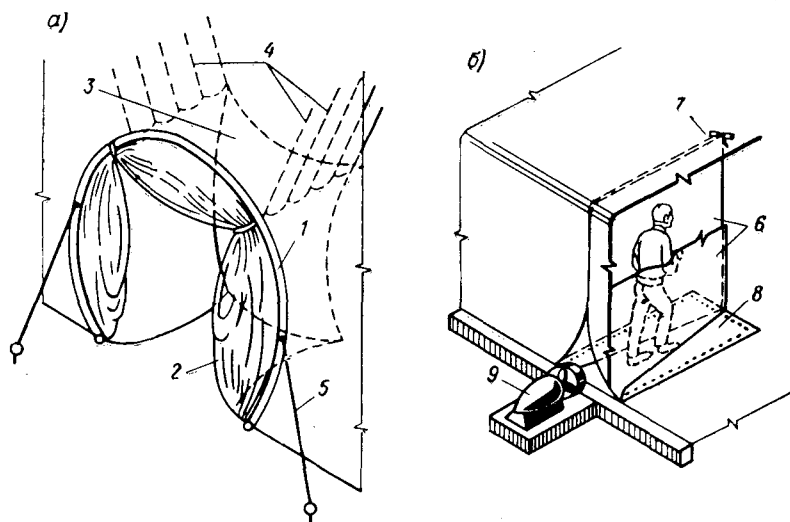


Рис. 5.10. Мягкие шлюзы в виде

а — камеры, подвешенной к оболочке ПС; *б* — двух полотнищ, смыкающихся под воздействием избыточного давления; 1 — силовой трос; 2 — мягкая штора; 3 — шлюз; 4 — подвеска шлюза; 5 — оттяжки; 6 — мягкие полотнища; 7 — крепление полотнищ сверху; 8 — крепление полотнищ внизу; 9 — вентилятор

всего крепление оболочки при помощи пришитых к оболочке ремешков, продеваемых в приваренные к элементам каркаса петли (рис. 5.9, *а*), сквозного монтажного троса (капронового шнура), продеваемого в аналогичные петли (рис. 5.9, *б*). В том и в другом случаях край оболочки снабжается овальными люверсами, надеваемыми на петли каркаса. Недостаток таких креплений — неплотное соединение оболочки с каркасом. Более плотным, но и более трудоемким является крепление оболочки при помощи перфорированных металлических лент, прижимаемых к элементам каркаса болтами (рис. 5.9, *в*). Наилучшим можно считать крепление монтажным тросом, вжимающим край оболочки в поперечную раму шлюза по всему контуру, сечение которой делается желобчатым, а стойкам придается кривизна. Монтажный трос имеет по концам петли, заводимые в снабженные пружиной крюки, поддерживающие натяжение троса (рис. 5.9, *г*).

Элементы каркасов чаще всего выполняют трубчатыми без острых углов, о которые может порваться оболочка. Желательно,

чтобы элементы каркаса не имели выступающих деталей: это облегчает их компактное пакетирование при перевозке.

Представляют интерес мягкие шлюзы — конструкции, наиболее полно отвечающие идее мягких оболочек. Тент шлюза вводится внутрь ПС (см. рис. 1.11, б) и подвешивается к оболочке. Проем завешивается шторами (рис. 5.10, а) или уменьшается до полного соприкосновения полотнищ, облегающих тело человека

при его проходе через шлюз, не допуская заметной утечки воздуха (рис. 5.10, б — патент США).

Заполнение проемов шлюзов делается герметичным не только само по себе, но и по контуру проема. От избыточного давления воздуха заполнение испытывает значительную нагрузку; она может достигать нескольких сот килограммов на полотнище ворот. Заполнение может быть жестким, полужестким и мягким.

Жесткое заполнение в виде рам, обшитых листовым металлом, фанерой, пластиком или

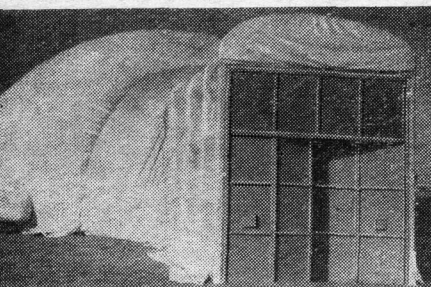


Рис. 5.11. Технический шлюз с распашными воротами, фрамугой и клапанами для выравнивания давления воздуха в шлюзе

же обтянутых пленкой или тканью, характерно для распашных или откатных дверей (ворот). Учитывая воздействие избыточного давления воздуха в ПС, двери размещают таким образом, чтобы это давление плотно прижимало их к притворам. В технических шлюзах при большой ширине проема полотна распашных ворот расчлняются на створки, соединенные между собой петлевыми шарнирами. Если в сооружение время от времени требуется пропускать технику большой высоты (краны, погрузчики, комбайны), то возможно устройство фрамуг в верхней части проема (рис. 5.11).

Недостатком ворот распашного типа является необходимость удлинения шлюза на ширину полотен заполнения. Кроме того, в технических шлюзах открывание распашных ворот затруднено нагрузкой от избыточного давления на открываемую створку, в то время как закрывание происходит с сильным толчком, почти ударом. Для выравнивания давления по обе стороны створок иногда устраивают специальные клапаны, открывание которых предшествует открыванию ворот.

Удлинения шлюза можно избежать, применяя раздвижные двери или откатные ворота. Однако по сравнению с распашными они отличаются конструктивной сложностью.

Откатные ворота могут быть решены в двух вариантах — с опиранием на гребень порога или с подвеской к ригелю ворот

(рис. 5.12). Второй вариант предпочтительнее, так как не требует особой точности установки рамы ворот и тщательного выравнивания основания для укладки порога; кроме того, образование на пороге наледи в зимнее время не затрудняет эксплуатацию ворот. Плотность притвора откатных ворот обеспечивается фартуками, прикрепленными к полотнам по их контуру.

Для технического шлюза наиболее рациональным решением считается применение распашных ворот внутри сооружения и откатных — с наружной стороны шлюза (рис. 5.13). В шлюзах для людей раздвижные двери, как правило, не устраиваются — их конструкция неоправданно сложна по сравнению с распашными дверями.

Полужесткое заполнение проемов шлюза выполняется в виде тканевых или пленочных штор, армированных трубами, которые закладываются в специально предусмотренные карманы (рис. 5.14). Такие шторы могут быть устроены как в людском, так и в техническом шлюзах. Горизон-

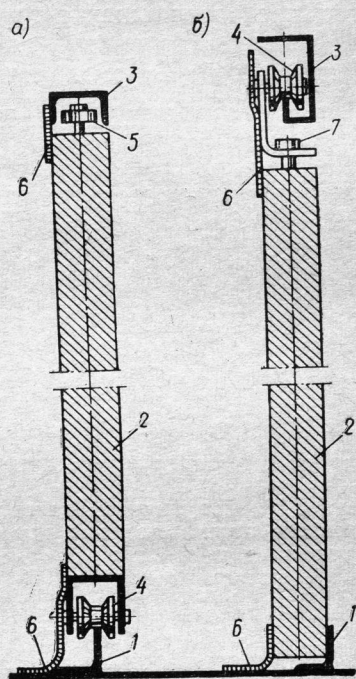


Рис. 5.12. Конструкции откатных ворот

a — с опиранием полотен на гребень порога; *b* — с подвеской полотен к ригелю ворот; 1 — порог; 2 — полотно ворот; 3 — ригель; 4 — опорный ролик; 5 — упорный ролик; 6 — герметизирующее уплотнение; 7 — регулировочный винт

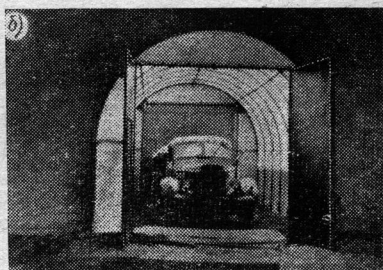
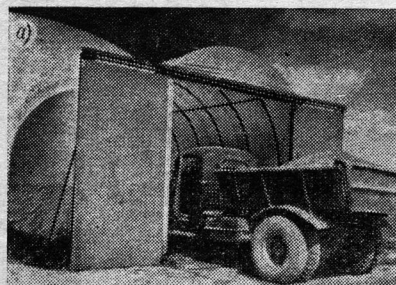


Рис. 5.13. Технический шлюз с наружными откатными и внутренними распашными воротами

a — вид снаружи; *b* — вид изнутри помещения

гальное расположение труб создает неудобства в эксплуатации штор, так как для открывания проемов штору необходимо поднимать на требуемую высоту и удерживать в этом положении в течение всего времени открытия проема. При подъеме или опускании шторы возможен перекося и даже их заклинивание в проеме.

Более удобны шторы с вертикальным армированием. Верхние концы труб снабжаются роликами, катящимися по направляющей, нижние упираются в порог из металлического профиля.

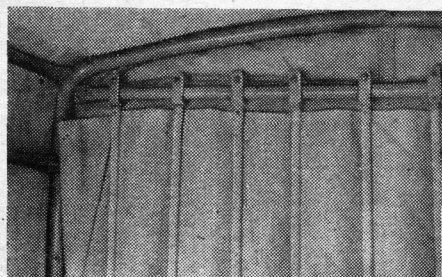


Рис. 5.14. Полу жесткое заполнение входного проема людского шлюза с армированием в виде вертикально расположенных труб

Шторные устройства отвечают принципу исключения жестких элементов из комплекта ПС, что следует считать их достоинством.

Мягкое заполнение возможно только при малых размерах проема. Для людского шлюза оно выполняется в виде шторы без какого бы то ни было арми-

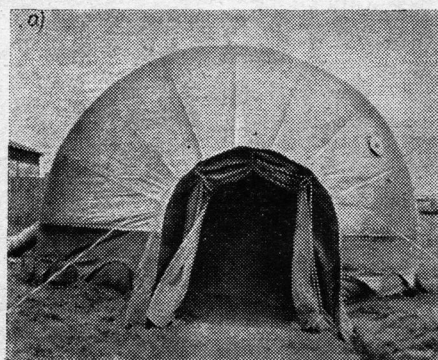


Рис. 5.15. Мягкое заполнение проема людского шлюза
а — в открытом виде; б — в закрытом виде

рования (рис. 5.15). Положение шторы при открытом или закрытом проеме фиксируется специальными канатами, которые или подвязываются сверху, или же нижним концом крепятся к анкерам, забитым в грунт. Такие устройства неудобны в эксплуатации.

Возможно решение шлюзов и без заполнения проемов. Предложен ряд конструкций, где утечке воздуха из ПС при открытом проеме препятствуют струи воздуха, направленного внутрь помещения (рис. 5.16).

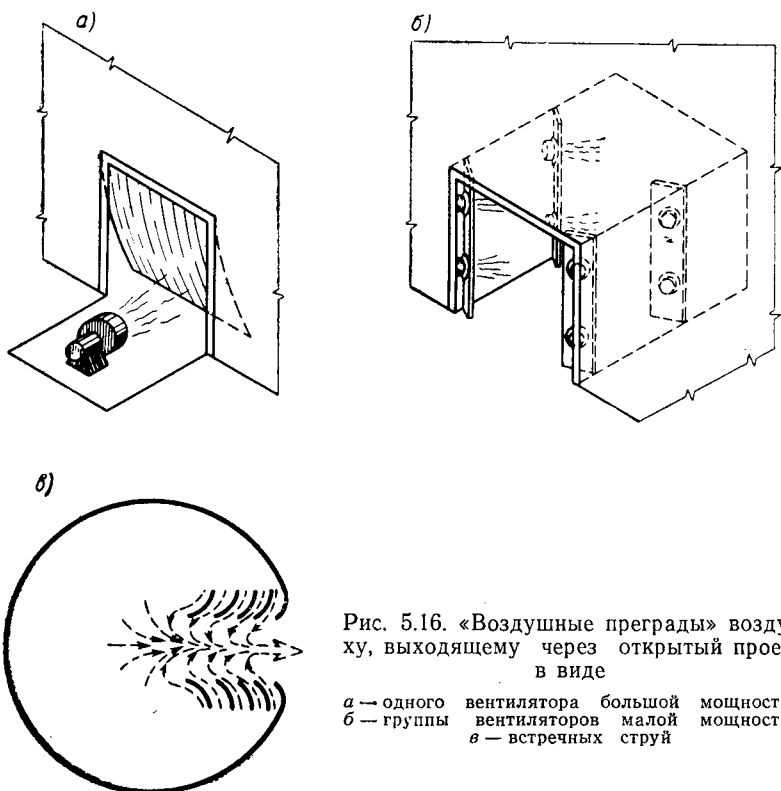


Рис. 5.16. «Воздушные преграды» воздуха, выходящему через открытый проем в виде

a — одного вентилятора большой мощности;
б — группы вентиляторов малой мощности;
в — встречных струй

21. КОНСТРУКЦИИ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ОБОЛОЧКУ ВО ВРЕМЯ ОТКРЫВАНИЯ ЕЕ ТОРЦА

Необходимость размещения в ПС крупногабаритной техники (сельскохозяйственных машин, самолетов, автокранов и т. п.), проходные габариты которой соизмеримы с сечением самого сооружения, порождает сложную задачу обеспечения ввода и вывода этой техники. Устройство шлюзов громадных размеров (рис. 5.17, *a*) нерационально: резко возрастает расход материала, увеличиваются размеры самого сооружения, возникает необходимость в устройстве большепролетных каркасов с тяжелыми воротами. Кроме того, перепуск больших масс воздуха из рабочего объема сооружения в шлюз связан со «скисанием» оболочки ПС на сравнительно продолжительное время. Предпочитают решать эту задачу путем полного открывания торца сооружения (рис. 5.17, *б*), которое на время перестает быть пневматическим, и поддерживать оболочку, потерявшую опору в виде сжатого воздуха, специальными, кратковременно действующими устройствами.

Возможны два принципиально различных способа поддержания воздухоопорной оболочки на время полного открывания ее торца. Первый — это применение поддерживающих конструкций (жесткий каркас или вантовая система) при бездействующей ВУ; второй — сохранение аэродинамическими способами избыточного давления под оболочкой при открытом торце.

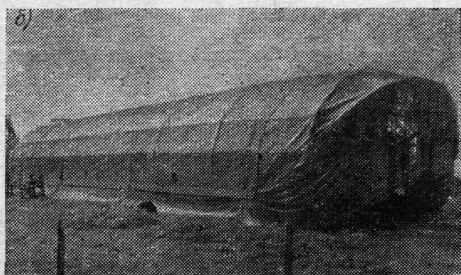
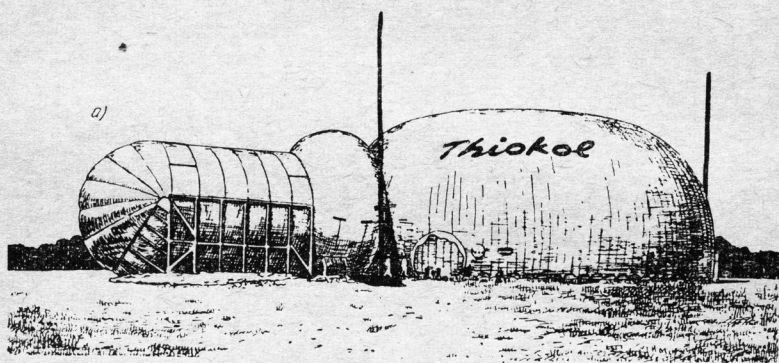


Рис. 5.17. Два пути решения проблемы ввода (вывода) крупногабаритной техники

a — большеразмерный шлюз; *б* — открывающийся торец с поддерживающим каркасом

Жесткие поддерживающие каркасы (рис. 5.18, *a*) устанавливаются внутри ПС, но не связываются с оболочкой и зачастую даже отстоят от нее на некотором расстоянии (20—40 см), исключая контакты, которые могут привести к истиранию защитного слоя ткани. Вантовые системы устанавливаются снаружи ПС (рис. 5.18, *б*).

Поддерживающие конструкции обыкновенно воспринимают незначительные кратковременные нагрузки — собственный вес, вес оболочки и ветровая нагрузка при скорости ветра, допускающей открывание торца. Снеговая нагрузка не учитывается, так как в момент опускания оболочки на каркас снег осыпается почти полностью.

Каркас состоит из ряда арок или полигональных рам, соединенных продольными связями (рис. 5.19). Целесообразно применение трубчатых сечений, так как округлая поверхность труб плавно огибается материалом оболочки, в результате чего снижается опасность его протирания и разрыва.

В зависимости от величины пролета арки собираются из двух — пяти секций. Рекомендуются проверенные на практике конструкции монтажных стыков одно-, двух- и трехветвевых секций (рис. 5.20).

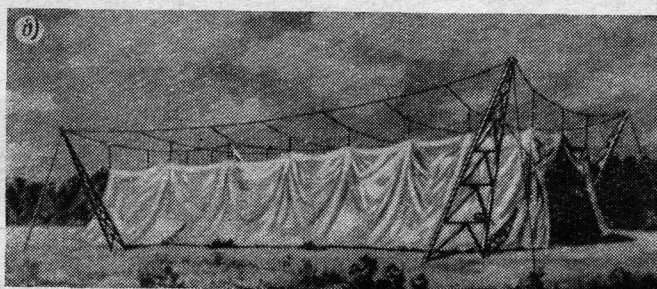
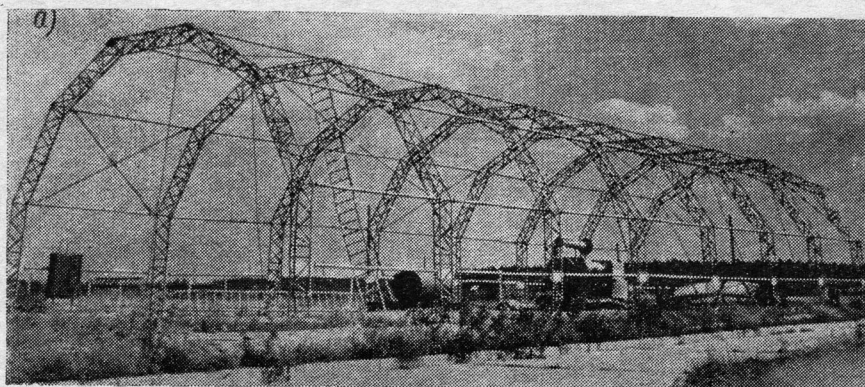


Рис. 5.18. Поддерживающие конструкции ПС

а — жесткий алюминиевый трубчатый каркас размером $40 \times 11 \times 7$ м;
б — вантовая система

Арки (рамы) опираются на грунт башмаками, положение которых фиксируется анкерами, забиваемыми или завинчиваемыми в грунт. Арки (рамы) поддерживающих каркасов соединены системой прогонов (рис. 5.21, *а*), системой раскосов (рис. 5.21, *б*) или же их сочетанием. Система прогонов требует либо устройства жестких узлов, либо диагональных связей. Система раскосов позволяет значительно повысить продольную устойчивость каркаса независимо от характера узлов, которые могут быть выполнены шарнирными.

Для ввода (вывода) крупногабаритной техники один из торцов ПС приходится делать подъемным. Для этой цели поддерживающий каркас снабжается двумя арками — опускной и про-

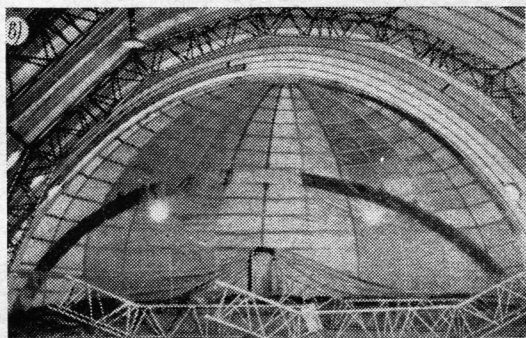
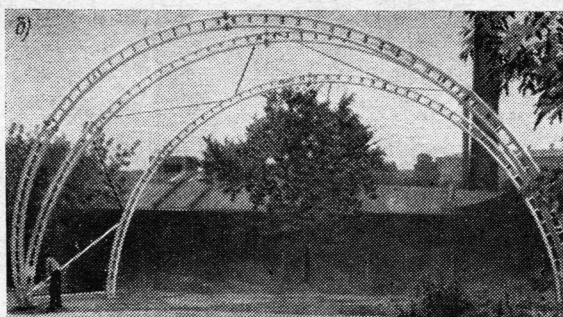
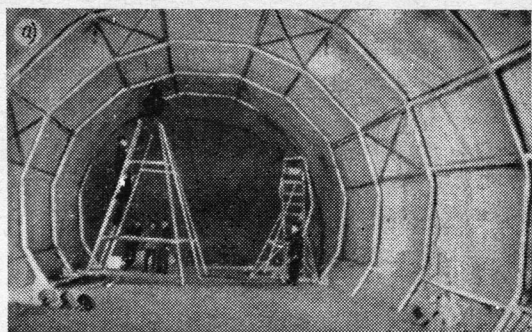


Рис. 5.19. Трубчатые поддерживающие каркасы
a — полигональные одноветвевые; *b* — круговые двухветвевые; *в* — полигональные трехветвевые (внизу видны несмонтированные секции)

межуточной, системой блоков, тросов и лебедкой. При закрытом торце опускная арка свободно лежит в плоскости грунта, в то время как промежуточная удерживается вспомогательной подвеской под углом $\sim 45^\circ$.

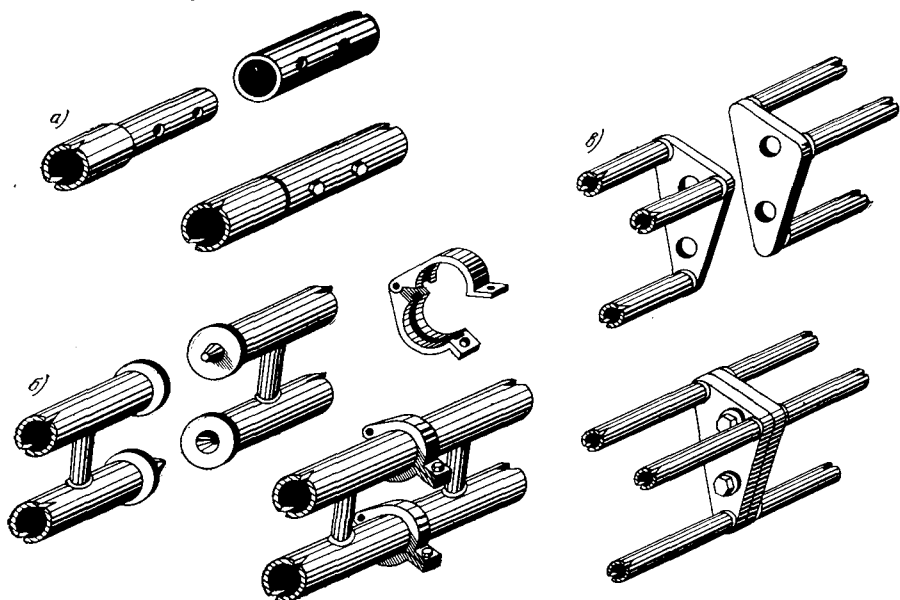


Рис. 5.20. Соединения секций арок (рам)

а — способом «шип-муфта»; *б* — фланцевым и стяжными хомутами; *в* — диафрагмами на болтах

Вантовая система поддержания оболочки при открытом торце может оказаться более выгодной по металлоемкости, однако она требует мощных анкеров, что не всегда возможно. Кроме того, при открытом торце внутренние габариты помещения значительно сокращаются за счет провисания оболочки.

Очевидный недостаток всяких поддерживающих конструкций — ухудшение технико-экономических показателей сооружения в целом. Так, при включении в сооружение алюминиево-

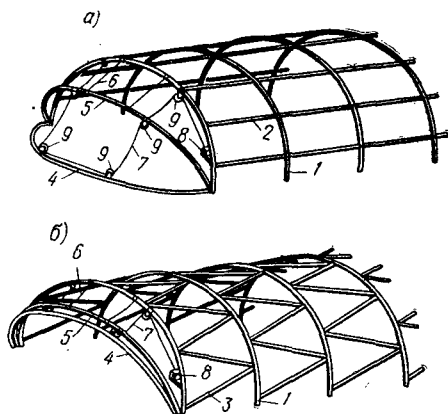


Рис. 5.21. Конструктивные схемы открывающегося торца и продольных связей
а — система прогонов (торец закрыт); *б* — система раскосов (торец открыт); 1 — арка; 2 — прогон; 3 — раскос; 4 — подъемная арка; 5 — вспомогательная арка; 6 — подвеска вспомогательной арки; 7 — тяговый трос; 8 — лебедка; 9 — блоки

го каркаса возрастают: стоимость в 2 раза, вес в 1,6 раза, трудоемкость монтажных работ в 2,5 раза, потребный транспорт в 3 раза.

Есть еще один, менее очевидный недостаток особого свойства, который неожиданно выявился лишь в процессе эксплуатации ПС с поддерживающими каркасами в реальных условиях. Непрерывно действующие ВУ, особенно в нерабочее время, представляют для несведущих хозяйственников источник дополнительных

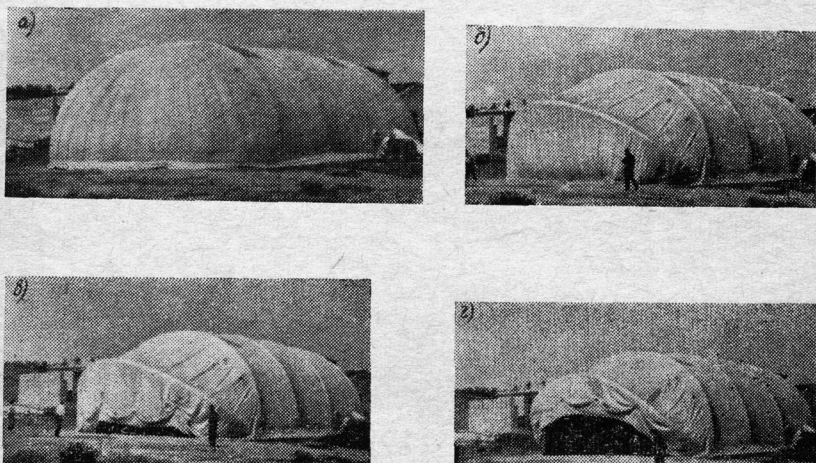


Рис. 5.22. Воздухоопорное сооружение размером $24 \times 12 \times 6$ м с пневматическим поддерживающим каркасом

a — общий вид (в режиме воздухоопорного ПС); *б, в, г* — фазы открывания торца (в режиме пневмокаркасного ПС)

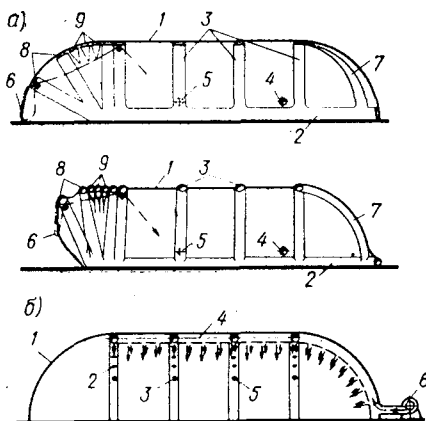
(с их точки зрения) затрат на электроэнергию и забот по техническому надзору. Наличие поддерживающих конструкций порождает у них уверенность в ненужности поддува сооружения. Первоначальные попытки выключения ВУ в нерабочие часы обычно проходят успешно, и «рациональная схема» действует до первого ветра или дождя (см. рис. 6.17, *a*), после чего, в результате образования «водяных мешков», либо разрушаются поддерживающие конструкции, либо прорывается оболочка, или происходит и то и другое одновременно.

Жесткий металлический каркас может быть заменен пневматическим. В эксплуатационном режиме такое комбинированное сооружение (см. гл. 1, рис. 1.17, *a*) работает как воздухоопорное с избыточным давлением внутри; в режиме ввода и вывода техники — как пневмокаркасное (рис. 5.22). Пневматический каркас по сравнению с металлическим легче, требуется меньше трудозатрат при монтаже и меньше транспортных средств. Однако

общая стоимость сооружения практически остается прежней; кроме того, добавляется ряд недостатков, свойственных пневмокаркасным конструкциям вообще (необходимость включения в комплект сооружения компрессоров, чувствительность пневмоарок к проколам, потенциальные неприятности, связанные с высоким давлением воздуха, и др.). Остается и психологический фактор (если оболочка держится на арках, зачем ее поддувать?).

Рис. 5.23. Временно действующие пневматические каркасы

а — надуваемый во время открывания торца при оболочке в нормальном эксплуатационном режиме воздухоопорного сооружения и в режиме открывания торца; 1 — одинарная оболочка; 2, 3, 8, 9 — двойные полосы материала; 4 — воздухопровод ВУ низкого давления, подающий воздух в сооружение; 5 — воздухопровод ВУ высокого давления, подающий воздух в двойные полосы; 6 — отстегающиеся от анкеров карабины; 7 — полуарка; 8 — пневмореактивный поддерживающий каркас; 9 — оболочка; 2 — порталная арка; 3 — рядовая арка; 4 — коньковый прогон; 5 — отверстия; 6 — ВУ



Таким образом, существующая до настоящего времени концепция «и каркас, и поддув» к удовлетворительному решению проблемы не приводит. Возможно, что более плодотворной может оказаться другая — «или каркас, или поддув». Она может иметь, например, следующее конструктивное воплощение (рис. 5.23, а). На оболочку нашивается ряд полос из того же материала, что и оболочка (возможно получение таких «полос» перехлестом полотнищ при ее шитье). Полосы сообщаются одна с другой, так что при подаче воздуха образуется каркасная система в виде нескольких арок, хребтового прогона и периметральной трубы.

Воздухонагнетательная установка состоит из двух агрегатов, подсоединенных к сети по принципу «или — или». Первый — обычный вентилятор низкого давления; он подает воздух под оболочку с избыточным давлением 10—30 мм вод. ст. Другой, автоматически включаемый после выключения первого, — воздуходувка, непрерывно подающая воздух в каркасную систему при давлении около 1000 мм вод. ст.

Слабо (по сравнению с пневмокаркасными конструкциями) надутые арки дают возможность ввести или вывести технику, однако их ограниченная устойчивость при действии иных, кроме собственного веса, нагрузок, заставляет по миновании надобности в открытом торце сразу же переходить на обычный режим эксплуатации, т. е. закрыть торец и дать воздух под оболочку,

выключив его подачу в каркас. Таким образом, электромотор работает всегда — и в эксплуатационном режиме и в режиме ввода — вывода. Другой путь решения этой проблемы — аэродинамические способы поддержания оболочки или же (что по конечному эффекту одно и то же) предотвращения утечки из-под нее воздуха при открытом проеме. Поддержание оболочки при открытом торце возможно также путем установки внутри ПС ряда арок и продольного хребтового прогона, снабженных по внутреннему обводу системой комбинированных отверстий, из которых с большой скоростью выходит воздух, подаваемый в систему арок воздуходувкой с высоким расходом (рис. 5.23, б). Возникающая при этом реактивная подъемная сила используется для временного поддержания оболочки.

Успешное решение задачи сохранения устойчивости ПС при открытом торце может дать существенный экономический эффект в результате расширения сферы применения воздухоопорных сооружений, которые в несколько раз дешевле, чем воздушно-несомые, обладают возможностью перекрытия в несколько раз больших пролетов, но от которых приходится отказываться при необходимости ввода (вывода) крупногабаритной техники.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУХООПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

22. ЭКСПЛУАТАЦИЯ СООРУЖЕНИЙ И РЕЖИМ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК¹

Особенность эксплуатации воздухоопорных сооружений в основном заключается в непрерывном поддержании в них с помощью вентиляторных установок (ВУ) избыточного давления воздуха на определенном уровне, при котором обеспечивается их устойчивость. Для сооружений этого типа характерна значительная утечка воздуха через опорные контуры оболочек, монтажные швы и места соединения оболочки с входными устройствами, которая ведет к снижению давления в сооружении и существенно влияет на режим работы ВУ.

В процессе эксплуатации сооружений ВУ работают в трех характерных режимах, которые являются определяющими при выборе их основных аэродинамических характеристик: производительности Q и напора H (рис. 6.1 и 6.2, $a—г$).

Режим *I* соответствует процессу наполнения оболочки воздухом до придания ей проектной формы. ВУ работает при максимальной производительности и нулевом напоре, а также наибольшем расходе мощности на приводе. В режиме *II* (повышение давления) на производительность ВУ уже оказывает влияние создаваемое избыточное давление воздуха под оболочкой. После достижения установившегося (заданного) значения избыточного давления в оболочке наступает третий «установившийся режим» работы ВУ.

В режиме *III*, эксплуатационном, ВУ работают с относительно стабильными аэродинамическими характеристиками, хотя они также могут изменяться в результате интенсивного использования входных устройств. В таких случаях возникает необходимость во включении (автоматическом или ручном) резервных ВУ. При этом возможны следующие варианты режима агрегата из двух ВУ:

непрерывная работа одной или одновременно обеих;

непрерывная работа одной и периодическое подключение второй;

периодическая работа одной или обеих.

¹ В исследованиях режимов работы ВУ кроме авторов принимал участие инженер А. В. Маралов.

Расчетные аэродинамические характеристики ВУ определяются с учетом предполагаемой утечки воздуха при заданном избыточном давлении. Зависимость производительности ВУ от из-

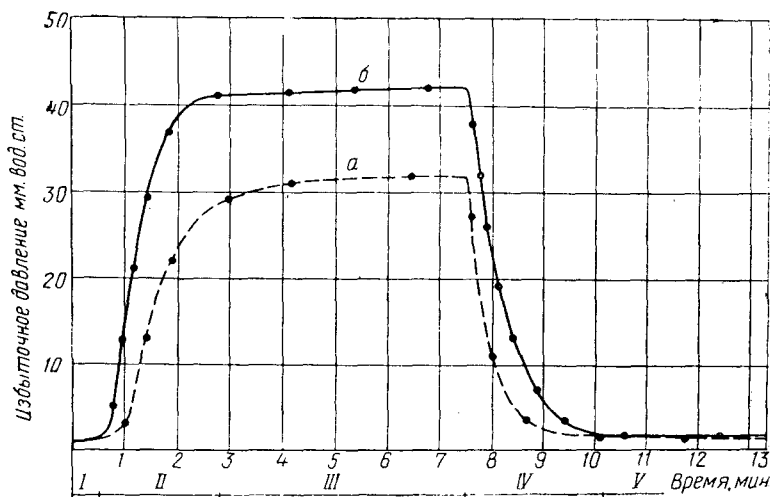


Рис. 6.1. График основных режимов эксплуатационного содержания оболочки со свободноележащим (а) и пригруженным грунтом (б) герметизирующим фартуком:

I — наполнение; II — повышение давления; III — установившийся режим; IV — снижение давления при выключении ВУ; V — опускание оболочки

быточного давления под оболочкой является нелинейной (рис. 6.3) и может быть выражена следующим уравнением:

$$\frac{Q^2}{Q_0^2} + \frac{p^2}{H^2} = 1, \quad (6.1)$$

где Q_0 — производительность вентилятора при нулевом напоре в $\text{м}^3/\text{ч}$;

H — напор вентилятора при нулевой производительности в $\text{кгс}/\text{м}^2$;

Q и p — текущие значения производительности вентилятора и избыточного давления под оболочкой.

Величину постоянной утечки воздуха из сооружения можно определить по известной зависимости [1]:

$$Q_y = 3600 \mu F \sqrt{\frac{2g}{\gamma} p}, \quad (6.2)$$

где μ — коэффициент, зависящий от формы отверстий;

F — общая площадь отверстий в сооружении в м^2 ;

g — ускорение силы тяжести в $\text{м}/\text{сек}^2$;

γ — объемный вес воздуха в $\text{кгс}/\text{м}^3$.

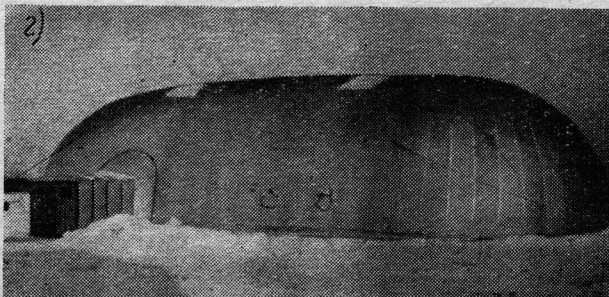
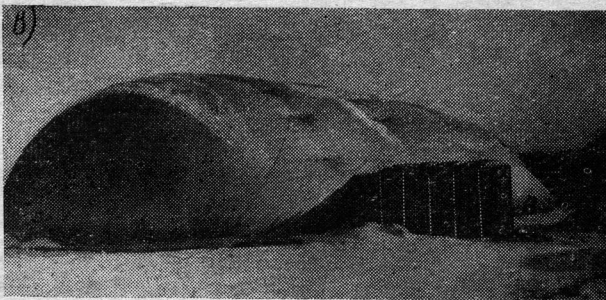
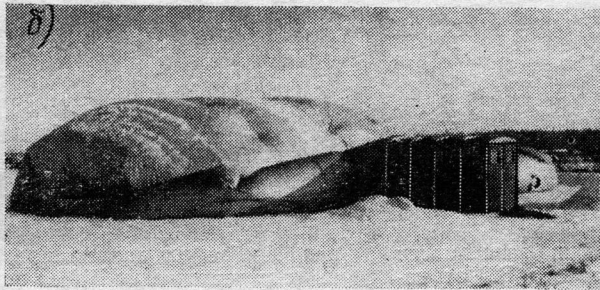
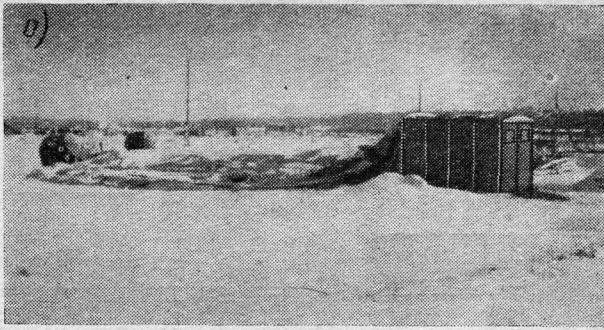


Рис. 6.2. Оболочка ПС в процессе наполнения воздухом

Очевидно, что при установившемся режиме достигается количественное равенство между подачей воздуха в оболочку и утечкой его из-под нее:

$$Q = Q_y. \quad (6.3)$$

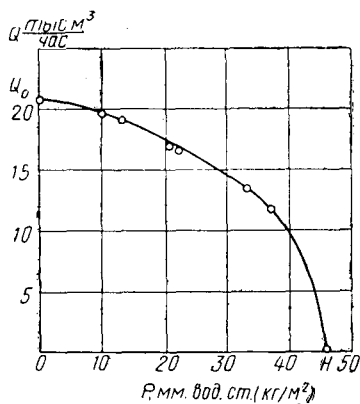


Рис. 6.3. График зависимости производительности ВУ от избыточного давления в оболочке

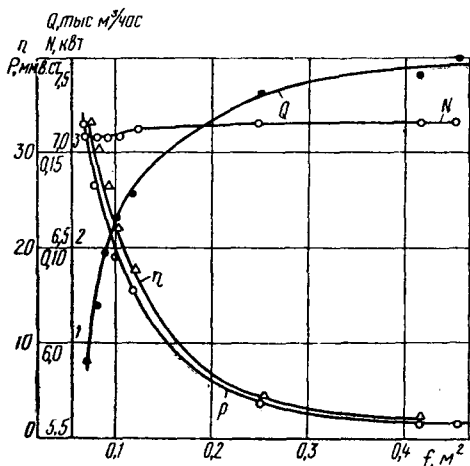


Рис. 6.4. График зависимости аэродинамических характеристик ВУ от показателя негерметичности f сооружения

p — избыточное давление, равное статическому давлению ВУ; Q — производительность; N — потребляемая мощность; η — статический к. п. д.

Подставив в (6.3) выражения Q и Q_y из формул (6.1) и (6.2), определим производительность и напор вентиляторов, необходимых для содержания сооружений в этом режиме:

$$Q_0 = \frac{3600 f}{\gamma} \sqrt{\frac{2g\rho\gamma}{1 - \left(\frac{p}{H}\right)^2}}; \quad (6.4)$$

$$H = \frac{p}{\sqrt{1 - \frac{2g\rho}{\gamma} \left(\frac{3600 f}{Q_0}\right)^2}}. \quad (6.5)$$

Зависимости (6.4) и (6.5) показывают, что производительность и напор ВУ при установившемся режиме зависят не только от величины избыточного давления воздуха, но и от степени герметизации оболочки, которая характеризуется величиной $f = \mu F$ — показателем негерметичности сооружения. Полученная авторами экспериментальная зависимость аэродинамических характеристик ВУ от показателя негерметичности, изменяемого путем регулирования площади входного проема ПС сферической формы, представлена на рис. 6.4.

Преобразуя формулу (6.5), находим выражение показателя негерметичности

$$f = \frac{Q_0 \gamma}{3600} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{p}{H}\right)^2}{2g\gamma}}. \quad (6.6)$$

Согласно требованиям ГОСТ 5976—55, вентиляторы должны работать в зоне аэродинамических характеристик с к. п. д. η не ниже $0,9\eta_{\text{макс}}$. В этой зоне их статический напор изменяется в пределах $(0,5 \div 0,8) H$. Если учесть, что максимальный напор ВУ, применяемых для воздухоопорных сооружений, обычно не превышает $80\text{—}100$ мм вод. ст., а производительность при нулевом напоре — $4 \div 7$ м³/сек, то, согласно (6.6), пределами изменения величины f будут $0,1$ и $0,2$ м². Только при таких значениях коэффициента негерметичности оболочек сооружений может быть обеспечена работа ВУ с $\eta = 0,9\eta_{\text{макс}}$.

Величины показателей негерметичности были получены авторами в процессе натурных испытаний нескольких ПС (табл. 32).

Данные таблицы показывают, что при неизменных аэродинамических характеристиках ВУ повышение избыточного давления может быть достигнуто лишь при надлежащей герметизации ПС, прежде всего, опорного контура оболочки и сокращения потерь воздуха через входные устройства. Повышение герметизации опорных контуров транспортабельных ПС обычно достигается путем пригрузки внутренних фартуков слоем грунта толщиной $3\text{—}5$ см. Как показывают данные эксперимента (табл. 32), это обеспечивает понижение показателя негерметичности в $1,5\text{—}2$ раза и повышение избыточного давления воздуха под оболочкой в 2 раза. Величина показателя негерметичности транспортабельных сооружений, опорный контур которых герметизируется, как правило, только с помощью внутренних фартуков, находится в пределах $0,3 \div 0,4$ м². Положение, когда $f > 0,3$ м² должно считаться временным (по технологическим требованиям) или аварийным.

При подборе ВУ рекомендуется принимать $f = 0,002 l$, где l — периметр опорного контура и мест стыкования шлюзов в м.

Расчетная величина напора H принимается равной:

$$H \geq p + H_{\text{д}} + \Sigma H_{\text{м}}, \quad (6.7)$$

где p — расчетное избыточное давление (в кгс/м²), назначаемое согласно указаниям главы 4;

$H_{\text{д}}$ — динамический напор, теряемый при входе, в кгс/м²;

$H_{\text{м}}$ — местные потери напора, согласно данным табл. 33, в кгс/м².

Опыт эксплуатации сооружений показывает, что их устойчивость обеспечивается при избыточном давлении воздуха, примерно равном величине скоростного напора ветра. Поэтому подбор

Режим работы ВУ в сооружениях с разными показателями негерметичности

Форма и размеры оболочки (длина×ширина×высота) в м	Конструкция уплотнения опорного контура	Периметр в м			Установленная мощность элек- тродвигателей ВУ в кВт	Экспериментальные данные					
		опорного контура	мест стыко- вания шлюзов			производи- тельность ВУ в тыс. м ³ /ч	потребляемая мощность в кВт	кзбыточное давление под оболочкой в мм вод. ст.	статический к.п.д. ВУ	средний по- казатель не- герметично- сти в м ³	
			грузо- вого	слу- жеб- ного							
Сферическая диамет- ром 26 м и высотой 15 м	На бетонном фундаменте с помощью стальных пластин и болтов	81	27	0	7,5	8	—	50	—	0,078	
		81	27	0	7,5	10,5	3,81	63,9	0,48	0,09	
Цилиндрическая 40× ×20×10 м	Свободно лежащий фактур	107	27	8	4,5	19,6	2,4	14,5	0,33	0,35	
	То же, при значительных по- рывах в оболочке	107	27	8	4,5	21	2,2	4	0,12	0,56	
	То же, при пригрузке фарту- ка песком после ремонта обо- лочки	107	27	8	4,5	15,2	2	24,5	0,50	0,21	
Цилиндрическая 24× ×12×6 м	Свободно лежащий фактур	74	0	6	2,8	19	2,3	12,4	0,24	0,34	

**Ориентировочные значения местных потерь напора в элементах ВУ
и оболочек ПС**

Элементы ВУ и оболочек ПС	Потеря напора при скорости выхода потока в оболочку в кг/м ²	
	8 м/сек	15 м/сек
Диффузор конический с углом расширения 20° и отношением площадей, равным 3:		
одинарный	1	3
двоенный, U-образный	2	6
Обратный клапан типа жалюзи со свободно подвешенными створками:		
многостворчатый	3	3
одностворчатый	5	4
Отражатель на выходе потока в оболочку, расположенный под углом 60° к оси потока	2,5	8
Сетка на выходе потока в оболочку живым сечением 80%	1,5	5
Воздуховод из прорезиненной материи диаметром 700 мм и длиной 3,5 м	2	6

ВУ и режима их работы следует производить с учетом климатических условий района. Среднегодовой скоростной напор ветра на территории СССР не превышает 4—5 кгс/м², а длительность ветров со скоростью более 18 м/сек (напор более 20 кгс/м²) составляет менее 2% в году [2]. Вследствие этого появляется возможность длительной эксплуатации ВУ на режимах с пониженными производительностью и напором по сравнению с расчетными. Это подтверждается практикой пятилетней эксплуатации многих ПС в Московской области, когда оболочки были устойчивыми при избыточном давлении 5—7 мм вод. ст. Необходимость повышения давления более 15 мм вод. ст. возникала лишь кратковременно, при ветрах со скоростью более 20 м/сек. Как правило, устойчивость оболочек обеспечивается при избыточном давлении 10—20 мм вод. ст. В связи с этим возникает задача регулирования аэродинамических характеристик ВУ с целью уменьшения расхода энергии.

Исходя из опыта проектирования, эксплуатации и анализа режимов работы ВУ в пневматических сооружениях можно рекомендовать:

стремиться к повышению герметичности, ибо это приводит к увеличению избыточного давления под оболочкой, а значит не только к повышению ее устойчивости, но и к экономии электроэнергии;

герметизация оболочки, как средство, приводящее к сокращению воздухообмена в помещении, не должна снижать кратности, нормированной санитарными или технологическими требованиями;

величину избыточного давления воздуха под оболочкой необходимо постоянно контролировать и регулировать;

сооружения, устанавливаемые стационарно и имеющие показатель негерметичности менее $0,15 \text{ м}^2$, целесообразно комплектовать ВУ, разными по производительности и напору. ВУ с низкими аэродинамическими характеристиками использовать для компенсации потерь воздуха при установившемся режиме. ВУ с высокой производительностью включать периодически: для наполнения оболочки, усиленной вентиляции в помещении, компенсации утечек воздуха, возникающих по технологическим причинам, при аварийном состоянии оболочки, при превышении внешних нагрузок над расчетными;

сооружения, транспортные и эксплуатируемые временно, герметизированные только внутренними, свободно лежащими фартуками, следует комплектовать ВУ, одинаковыми по производительности и напору;

для сохранения формы сооружений, у которых по технологическим условиям должны открываться или один из торцов, или одновременно внутренние и наружные ворота шлюзов, следует применять специальные устройства для временного поддержания оболочки: каркасы или воздушные завесы (см. табл. 5);

ВУ должны иметь устройства, позволяющие изменять их аэродинамические характеристики от максимальных расчетных до минимальных (в 2—3 раза меньше расчетных) в целях экономии электроэнергии и обеспечивающие управление их работой в зависимости от задаваемых уровней избыточных давлений воздуха в сооружении.

23. ВЕНТИЛЯТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

Каждое воздухоопорное сооружение комплектуется не менее чем двумя ВУ (одна из которых считается резервной) и шкафом управления. Они должны обеспечивать быстрое наполнение оболочки воздухом, поддержание необходимого избыточного давления, заданную кратность обмена воздуха в помещении и длительную бесперебойную работу в различных климатических условиях. Последнее определяется степенью защиты ВУ от влияния внешних факторов.

ВУ должны иметь расчетные аэродинамические характеристики, устанавливаемые согласно указаниям § 22, и отвечать таким требованиям, как компактность, малый вес, бесшумность, простота обслуживания. Большинство их удовлетворяется при правильном выборе вентиляторов. Бесшумность работы достигается применением клиноременной передачи, ограничением окружной скорости вращения, а также установкой специальных глушителей.

Для ВУ, как правило, используются центробежные вентиляторы низкого давления с лопатками, загнутыми назад, серийно выпускаемые промышленностью в различных конструктивных ис-

полнениях, согласно ГОСТ 5976—55. Возможно также применение и осевых вентиляторов. Наиболее пригодны центробежные вентиляторы I и VII исполнения типа Ц4-94/2 двустороннего всасывания и Ц4-70, Ц9-57, Ц4-76, Ц13-50 одностороннего всасывания.

Вентиляторы исполнения I (рис. 6.5, а) компактны и весят меньше, чем вентиляторы других исполнений. Однако насадка

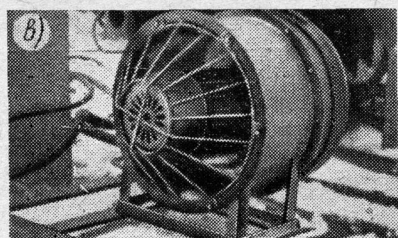
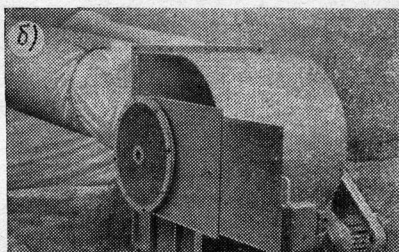
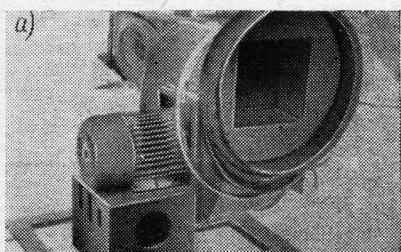


Рис. 6.5. Типы вентиляторов, применяемых в ПС

а — центробежный одностороннего всасывания; б — центробежный двустороннего всасывания; в — осевой

колеса непосредственно на вал электродвигателя создает большие трудности при техническом обслуживании в процессе эксплуатации: при замене электродвигателя возникает необходимость в демонтаже вентилятора; промывка и смазка подшипников электродвигателя невозможны без снятия колеса с помощью специального съемника и т. п.

Вентиляторы двустороннего всасывания (исполнение VII) с клиноременным приводом электродвигателя, как показывает опыт их эксплуатации, более удобны в обслуживании (рис. 6.5, б). Их производительность больше, чем у вентиляторов одностороннего всасывания, а клиноременная передача обеспечивает возможность регулирования производительности и напора путем изменения диаметра шкива. К недостаткам вентиляторов исполнения VII относятся: большой вес и габариты, несколько пониженный к. п. д. из-за наличия клиноременной передачи. Вентиляторы двустороннего всасывания широко используются в зарубежных ПС.

Основные технические показатели некоторых типов серийных вентиляторов

Марка и номер вентилятора	Тип вентилятора	Показатели						Тип передачи
		число оборотов в мин	мощность в квт	производительность в тыс. м ³ /ч	напор в мм вод. ст.	габариты в м (длина×ширина×высота)	вес в кг	
		I. Серийные отечественного производства						
	Центробежный одностороннего всасывания с электродвигателем:							
Ц4-70, № 5	АО-2-31-4	1420	2,2	5,8	76	0,9×0,8×0,9	130	Прямая
Ц4-70, № 6	АО-2-42-4	1440	5,5	10	110	1,1×1×1,1	170	»
Ц9-57, № 6	КО-12-6	950	8,0	12	100	0,96×1,1×1	213	»
		II. Зарубежного производства						
«Нольтинг» (ФРГ)	Центробежный двустороннего всасывания низкого давления	1190	7,5	13	110	1,35×1,1×1,1	200	Клиноременная
«Лерой» (Франция)	То же, низкого давления	942	1,8	20	48	2×1,4×1,4	355	То же
«Нольтинг» (ФРГ)	То же	1190	3,5	10	60	1,7×0,8×0,9	150	»
Англия	Осевой среднего давления	2900	2,2	6,3	126	2×0,75×0,6	90	Прямая
«Морелли» (Италия)	Осевой низкого давления	1390	0,75	4	26	0,75×0,65×0,8	55	»

Технические показатели некоторых образцов ВУ отечественного и зарубежного производства, испытанные на ПС, приведены в табл. 34.

Важное значение для функционирования и рационального использования производительности и напора вентиляторов имеет правильный подбор дополнительных устройств: защитных сеток на входных патрубках, диффузоров на выходных патрубках, обратных клапанов, воздухопроводов (рис. 6.6). При конструировании

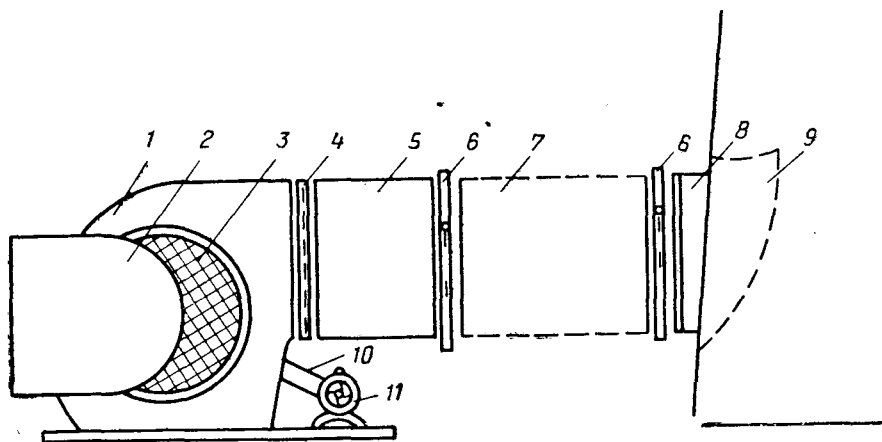


Рис. 6.6. Дополнительные устройства ВУ и схема подсоединения к оболочке

1 — вентилятор; 2 — дроссельная заслонка; 3 — защитная сетка; 4 — обратный клапан; 5 — диффузор; 6 — стяжной хомут; 7 — воздухопровод; 8 — патрубок оболочки; 9 — струеотключающий карман; 10 — клиноременная передача; 11 — электродвигатель

этих устройств стремятся свести к минимуму потери напора. Ориентировочные величины потерь, вычисленные авторами, даны в табл. 33.

Входные патрубки ВУ обычно устраиваются на высоте 0,5—1 м от уровня земли и снабжаются защитными решетками, благодаря которым уменьшается подсос мусора (а в зимнее время снега) и обеспечивается безопасность обслуживания.

Диффузоры, устанавливаемые на выходных патрубках ВУ, обеспечивают снижение скорости воздушного потока, а также возможность подсоединения к ним воздухопроводов. Распространены конические диффузоры с углами расширения не более 40° , диаметры которых определяются из уравнения расхода [1]:

$$d = 1,13 \sqrt{\frac{Q_p}{v_{cp}}}, \quad (6.8)$$

где Q_p — расчетный объем воздуха в $m^3/сек$;
 v_{cp} — средняя скорость воздушного потока в $m/сек$.

В ВУ с двусторонним всасыванием и производительностью бо-

более $15\,000\text{ м}^3/\text{ч}$ находят применение диффузоры тройникового типа с подачей воздуха в оболочку по двум воздуховодам.

Величина средней скорости воздушного потока на входе в оболочку устанавливается в зависимости от назначения сооружения и предъявляемых к нему требований по санитарным условиям. В сооружениях, используемых для размещения людей, она не должна превышать $8\text{ м}/\text{сек}$, а в сооружениях технического назначения — $15\text{ м}/\text{сек}$ [3]. Для отклонения воздушного потока

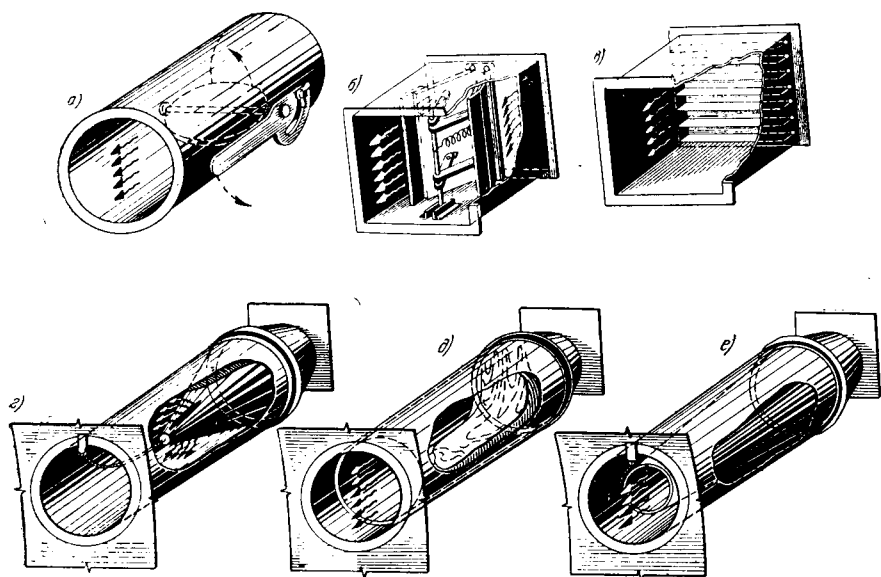


Рис. 6.7. Обратные клапаны

жёсткой конструкции: а — дроссельный; б — створчатый с рычажной системой; в — типа жалюзи; мягкой конструкции: г — лепестковый; д — цилиндрический рукав; е — конический рукав

вверх используются тканевые струеотклоняющие карманы, отводящие воздушный поток в верхнюю зону оболочки (см. рис. 6.6 и 6.15).

Обратные клапаны, предотвращающие утечку воздуха через воздуховоды при отключении ВУ, могут устанавливаться на диффузорах, в воздуховодах или непосредственно на входных отверстиях (рис. 6.7). Основные требования, предъявляемые к ним: максимальная герметичность и минимальные потери напора ВУ.

Наиболее часто применяются клапаны типа жалюзи, устанавливаемые в диффузорах (рис. 6.7, в); их лепестки открываются под действием воздушного потока. После отключения ВУ они под действием собственного веса опускаются и «запираются» избыточным давлением воздуха. Клапаны просты и надежны в эксплуатации.

ВУ транспортабельных сооружений, рассчитанных на временную эксплуатацию, в большинстве случаев оборудуются мягкими клапанами. Конусный тканевый клапан, использованный авторами в одном из первых экспериментальных сооружений, был изготовлен в виде конического рукава (рис. 6.7, з) со щелями на конце, которые под действием воздушного потока раскрываются, а под действием избыточного давления в оболочке — закрываются. Лепестковый клапан создает сравнительно большие потери напора и поэтому область его применения ограничивается.

Другим примером мягкого обратного клапана служит цилиндрический тканевый рукав, который вкладывается в воздуховод и вместе с ним присоединяется к диффузору и патрубку оболочки (рис. 6.7, д). При включении ВУ рукав расправляется и не препятствует свободному прохождению воздуха в оболочку, а при отключении он под воздействием обратного воздушного потока сминается и, опираясь на решетку, перекрывает выходное сечение диффузора. К недостаткам клапана этой конструкции следует отнести малый срок службы, поскольку ткань под действием воздушного потока быстро изнашивается. Кроме того, наличие решетки на диффузоре создает некоторую потерю напора ВУ.

Более рационален тканевый рукав с небольшой конусностью одного конца (рис. 6.7, е). Этот конец привязывается к оболочке и имеет обрамление из шнура, с помощью которого можно вручную полностью или частично перевязать рукав. В этой конструкции клапана устраняются недостатки, присущие вышеописанным двум тканевым клапанам. Его достоинством является также возможность уменьшения сечения. Благодаря этому достигается регулирование производительности и напора ВУ, которое бывает необходимо по условиям эксплуатации сооружения.

В практике проектирования и эксплуатации сооружений используются обратные клапаны в виде металлических или тканевых крышек, устанавливаемых на выходных отверстиях горизонтально, наклонно или вертикально расположенных жестких воздуховодов. Возможно в качестве обратных клапанов использовать особым образом выкроенные струеотклоняющие карманы (см. рис. 6.15) или же дроссельные заслонки, установленные на диффузорах ВУ или на входных патрубках (см. рис. 6.6).

При проектировании сооружений в каждом конкретном случае следует выбирать обратные клапаны в зависимости от принимаемых конструкций воздуховодов, схемы подачи воздуха в оболочку, а также от видов компоновки, места и способа установки ВУ.

Для присоединения ВУ к оболочке сооружения используются воздуховоды, которые в зависимости от их конструкции и материала, из которого они изготавливаются, делятся на мягкие (в том числе армированные) и жесткие. Мягкими, как правило, снабжаются транспортабельные ПС, а жесткими — стационарные.

Мягкие воздуховоды имеют вид цилиндрического рукава из материала основной оболочки. В некоторых случаях они одним концом присоединяются к оболочке заводским швом (см. рис. 1.13, *a*). Другой конец подсоединяется к диффузору при монтаже оболочки. Опыт эксплуатации подтверждает работоспособность таких воздуховодов. Однако при отключении ВУ они теря-

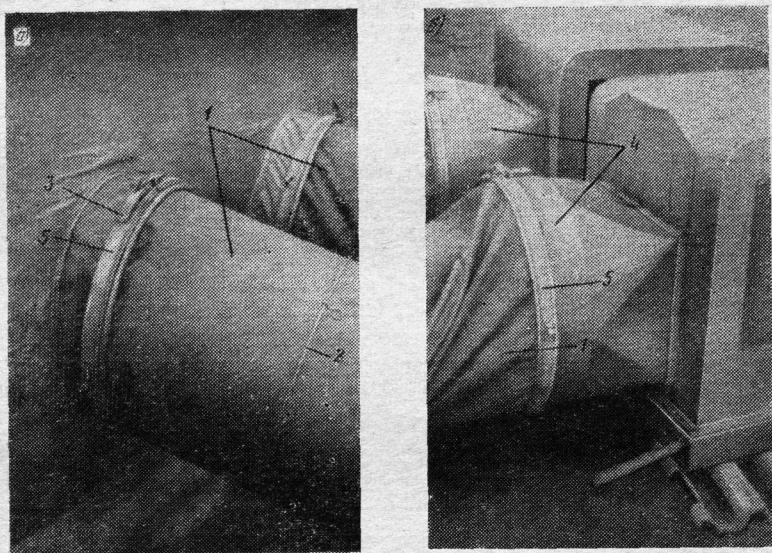


Рис. 6.8. Узлы соединения армированных тканевых воздуховодов

a — с оболочкой ПС; *b* — с ВУ

1 — воздуховод; 2 — кольцо жесткости; 3 — патрубок; 4 — диффузор; 5 — стяжной хомут

ют форму, что особенно нежелательно зимой, в условиях возможного смерзания и заноса снегом.

Более удобны съемные мягкие воздуховоды с арматурой из проволочных колец диаметром 3—4 мм (рис. 6.8). Благодаря наличию колец уменьшается «полоскание» воздуховода под действием воздушного потока и обеспечивается быстрая и компактная его укладка в транспортное положение. Торцы воздуховодов, обрамленные кольцом из стального стержня диаметром 10—12 мм, закрепляются на диффузорах ВУ и патрубках оболочки с помощью стяжных хомутов. Диаметр воздуховода определяется размерами диффузора и тканевого патрубка оболочки. Длина воздуховода назначается из условия обеспечения выравнивания воздушного потока, а также удобства обслуживания ВУ. Опытом эксплуатации ВУ установлены оптимальные размеры мягких воздуховодов: длина 2,5—3 м, диаметр 0,6—0,7 м.

Жесткие воздуховоды, изготавливаемые из тонкой листовой стали в виде цилиндрической трубы или короба прямоугольного сечения, применяются в основном для подземной прокладки. Если по каким-либо причинам возникает потребность присоединения их непосредственно к оболочке, то патрубок оболочки должен иметь длину не менее 1 м и служить как бы гасителем колебаний оболочки под действием ветра.

Подача воздуха под оболочки, устанавливаемые, стационарно (например, для перекрытия бассейнов, спортивных залов, укрытия антенн радиолокационных станций, в качестве выставочных залов и т. п.) может осуществляться через специальные каналы и отверстия, устраиваемые в стенах зданий или полах их подвалов.

Для крепления воздуховодов к диффузорам ВУ и патрубкам оболочек можно использовать, например шнуры резиновых амортизаторов, стяжные хомуты из полосового железа или троса, хомуты фасонного профиля (см. рис. 6. 8) и др. Слабое крепление и недостаточная герметичность в местах соединения воздуховодов могут явиться причиной резкого падения избыточного давления в оболочке.

Сущность всех способов регулирования аэродинамических характеристик ВУ заключается в обеспечении возможности снижения производительности и напора при уменьшении внешних нагрузок на сооружение и в конечном счете — в сокращении потребляемой энергии. Из многочисленных способов регулирования на практике находят применение лишь дросселирование (аэродинамический), установка двухскоростных двигателей (механический) и переключение соединения обмоток двигателя с треугольника на звезду (электрический).

Дросселирование с помощью заслонок устанавливаемых на входных или выходных патрубках вентиляторов, — самый простой способ регулирования их производительности. Эффективность дросселирования, как показали результаты наших исследований, подтвержденные данными других специалистов, невелика. При снижении производительности в два и в четыре раза путем дросселирования на нагнетании (выходном патрубке) потребление электроэнергии уменьшается соответственно на 18,8 и 32%. Дросселирование на всасывании (входной патрубок) более рационально, поскольку его эффективность примерно в 1,5 раза выше в сравнении с дросселированием на нагнетании.

Более заметное изменение аэродинамических характеристик ВУ достигается применением двухскоростных двигателей. Например, снижение скорости вращения вентилятора в 1,5 раза приводит к уменьшению его напора в 2,25 раза, а производительности в 1,5 раза. При этом может быть достигнута экономия электроэнергии на приводе до 20%, если ВУ будет использоваться 80% времени на меньшей скорости. Достоинство двухскоростных двигателей также и в простоте автоматизации переключе-

ния ВУ с одной скорости на другую с помощью специальных датчиков, подающих сигнал на их пусковую аппаратуру в зависимости от изменения нагрузки (например, ветровой) на сооружение. Как показывают расчеты, применение двухскоростных двигателей не ухудшает таких показателей ВУ, как габариты, вес, первоначальные затраты, пусковой момент двигателя и его коэффициент мощности. Однако их использование для ВУ воздухоопорных сооружений не дает заметной экономии электроэнергии вследствие низких к. п. д. двигателей.

Переключение соединения обмоток двигателей с треугольника на звезду наиболее рационально применять для ВУ, энергопитание которых осуществляется от автономных источников ограниченной мощности. При таком переключении достигается снижение пусковых токов двигателя в 3 раза.

Рассмотренные способы регулирования аэродинамических характеристик ВУ достаточно надежны и сравнительно легко осуществимы. Однако их применение может быть рациональным только для сооружений с показателем герметичности менее $0,1 \text{ м}^2$. В иных случаях устойчивость оболочки достигается непрерывной или периодической работой одной или обеих ВУ. Поэтому изменение аэродинамических характеристик ВУ, применяемых в настоящее время как в СССР, так и за рубежом, достигается в основном за счет дросселирования.

Экономия электроэнергии на приводе может быть достигнута благодаря сокращению времени работы ВУ путем периодического автоматического отключения с помощью двух датчиков, один из которых отрегулирован на верхний, а второй на нижний пределы давления, или одного датчика с двумя контактными реле, срабатывающими при верхнем и нижнем пределах давления. В качестве датчиков можно применять сигнализаторы падения давления типа СПДМ-100, кольцевые дифманометры типа ДК-ТСВ, прессостаты, гермоклапаны с электроприводом, датчики реле типа ДН и любые другие (на основе мембран, анероидных коробок или сильфонов), которые под действием определенного избыточного давления воздуха вызывают срабатывание контактного реле включения (выключения) ВУ. Выбирают датчики в зависимости от предполагаемого режима работы ВУ. Для оболочек, поддерживаемых непрерывно работающей одной ВУ и периодической подключаемой второй, могут быть использованы компактные автоматические приборы различных типов.

В автомате поддува (рис. 6.9) датчиком служит анероидная коробка, полость которой через резиновый шланг сообщается с внутренним объемом оболочки. При изменении избыточного давления переключающее устройство срабатывает и подает сигнал на магнитный пускатель для включения или отключения ВУ. Недостаток автомата поддува заключается в сложности его регулирования на задаваемый предел давления и необходимости частой зачистки контактов из-за их обгорания.

Прессостат (рис. 6.10) — мембранная манометрическая коробка, оснащенная ртутным реле. Контакт реле мощностью 35 вт при 220 в включен в цепь катушки контактора резервной ВУ и управляет ее работой, включая ее при снижении давления в оболочке ниже давления срабатывания ($P_{ср}$) прессостата и отключая ее при повышении избыточного давления до $P_{ср}+2$ мм вод. ст. Давление срабатывания регулируется в пределах от 5 до

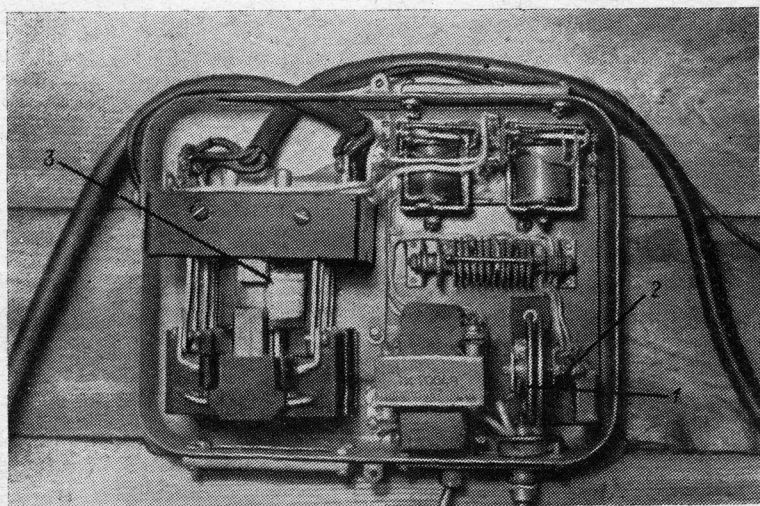


Рис. 6.9. Автомат поддува

1 — анероïдная коробка; 2 — переключающее устройство; 3 — магнитный пускатель

55 мм вод. ст. Для четкого и фиксированного переключения ртутного реле применяется постоянный магнит. Гашение дуги на контакте достигается с помощью конденсатора, установленного параллельно с ним.

Опыт применения автомата поддува и прессостата показал, что они осуществляют устойчивое автоматическое включение резервной ВУ. Однако при частых кратковременных утечках воздуха, вызываемых открыванием дверей и ворот шлюзов, избыточное давление постоянно меняется и резервная ВУ работает с большой частотой включения. Это приводит к преждевременному износу пусковой аппаратуры и неблагоприятно сказывается на работе электродвигателей.

В режимах периодического включения или непрерывного поддува в заданных пределах давления возможно применение двух датчиков — реле типа ДНТ и ДН. Схема одного из датчиков-реле напора ДН с пределами регулирования 10÷100 мм вод. ст. показана на рис. 6.11. Принцип действия датчика-реле основан

на уравнивании давления воздуха на диафрагму силами упругих деформаций винтовых пружин. Связанная с мембраной игла при нарушении равновесия действует на переключающее устройство реле. Реле снабжено микровыключателем, с помощью которого передается сигнал на включение (отключение) ВУ.

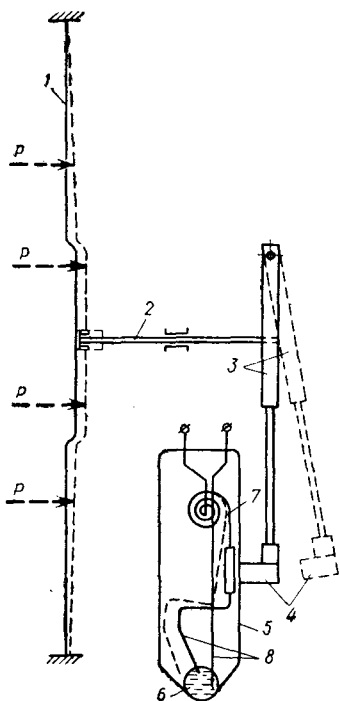


Рис. 6.10. Принципиальная схема прессостата

1 — мембрана; 2 — шток; 3 — рычаг; 4 — магнит; 5 — корпус ртутного переключателя; 6 — ртуть; 7 — пружина подвижного контакта; 8 — контакты

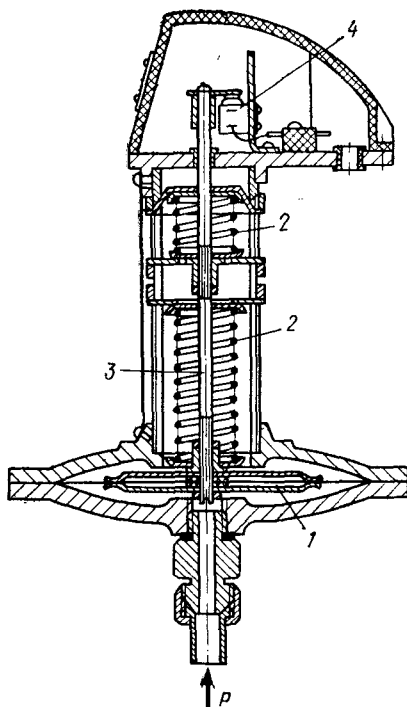


Рис. 6.11. Конструкция датчика-реле напора

1 — диафрагма; 2 — винтовая пружина; 3 — игла; 4 — переключающее устройство

Настройка пределов срабатывания прессостата как и датчика-реле напора ДН выполняется заранее вручную при визуальном контроле избыточного давления в оболочке с помощью микроманометра или стрелочного мембранного напоромера.

Если требуется гарантированная устойчивость сооружения без вмешательства обслуживающего персонала или если непрерывная подача воздуха нежелательна (например, зимой), ВУ укомплектовывают несколькими датчиками, срабатывающими не только от избыточного давления воздуха под оболочкой, но и от скорости ветра. Такое устройство предложено инж. А. В. Мараловым.

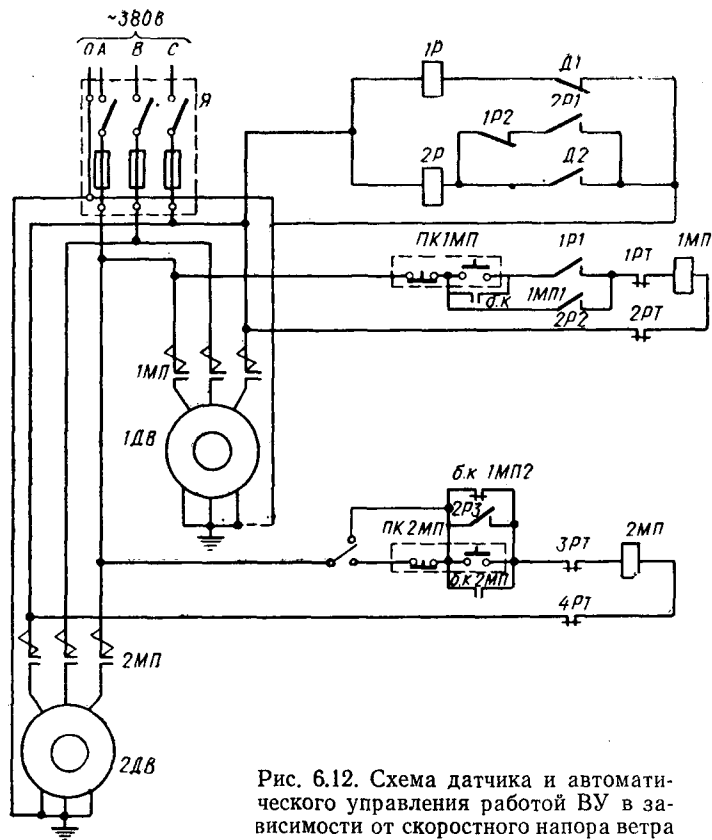
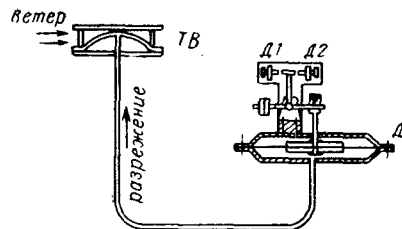


Рис. 6.12. Схема датчика и автоматического управления работой ВУ в зависимости от скоростного напора ветра



Обозначения	Наименования	Колич.	Примечания
Д	Сигнализатор разрежения разработки НИИСТ	1	Габариты 160×140
ТВ	Трубка Вентури	1	Устанавливается выше сооружения
1РТ÷4РТ	Контакты тепловых реле магнитных пускателей	1	
1Р, 2Р	Пром. реле типа ПЭ-6	2	$t_{\text{раб}} = \pm 40^\circ$
б.к 1МП, б.к 2МП	Блок-контакты магнитных пускателей	3	
ПК 1МП, ПК 2МП	Пусковые кнопки магнитных пускателей	2	
Д1, Д2	Контакты сигнализатора разрежения	2	Пределы регулирования $P_1 = 2 \div 20$; $P_2 = 5 \div 35$ мм вод. ст. $U_{\text{кат}} = 380$ в
1МП, 2МП	Магнитные пускатели типа ПМИ-222	2	
	Пусковой ящик типа ЯАП-3164	1	
1ДВ, 2ДВ	Электродвигатели ВУ типа АО-2	2	Мощность в соответствии с ВУ

Датчик скоростного напора (рис. 6.12) состоит из трубки Вентури и сигнализатора разрежения конструкции НИИ сантехники Министерства промышленности строительных материалов, рекомендуемого для топок. Принцип его работы заключается в следующем: при достижении величины скоростного напора ветра, равной уставке сигнализатора, последний производит переключение своих контактов, а те с помощью двух реле переключают ВУ.

Схема автоматического переключения ВУ с помощью этого устройства была проверена при эксплуатации сооружения с двумя ВУ с разными аэродинамическими характеристиками и мощностями электродвигателей. Поэтому схемой было предусмотрено три режима работы ВУ, при которых создавалось три различных уровня избыточного давления. В первом режиме одна ВУ работала непрерывно и создавала под оболочкой избыточное давление 15 мм вод. ст. При усилении ветра до 16 м/сек включалась резервная ВУ, поднимавшая избыточное давление до 20 мм вод. ст., а рабочая автоматически выключалась. При дальнейшем росте скоростного напора ветра включалась рабочая ВУ, и устойчивость сооружения обеспечивалась одновременной работой обеих ВУ. С уменьшением скоростного напора до 15 мм вод. ст. резервная ВУ автоматически отключалась. Недостатком этой схемы автоматического управления ВУ является необходимость ручного изменения уставок сигнализатора при значительном изменении показателя негерметичности сооружения.

Датчики регулирования избыточного давления в сооружении размещаются в шкафу управления. В нем же монтируются все электрические цепи и приборы автоматического управления ВУ, защиты от неполнофазного режима, коротких замыканий и перегрузок и т. п. Вся аппаратура должна безотказно работать при заданных диапазонах температуры наружного воздуха.

Изложенные соображения и выводы на основе экспериментов, проведенных авторами, положены в основу конструкций ВУ и схем автоматического управления, разработанных и испытанных в НИИ сантехники. Их основные технические показатели приведены в табл. 35, а общий вид — на рис. 6.13.

ВУ оборудованы вентиляторами двустороннего всасывания, их конструктивные и аэродинамические схемы даны в приложениях I—III. На всасывающих сторонах ВУ со стороны, противоположной приводу, установлены дроссельные заслонки, а на нагнетающих — обратные клапаны типа жалюзи. Входные отверстия ВУ закрыты сетками для предохранения от случайного попадания в рабочую полость посторонних предметов. Все ВУ на выходе снабжены диффузорами, к торцам которых стяжными хомутами крепятся тканевые воздуховоды.

Каждая пара ВУ укомплектовывается шкафом управления (рис. 6.14). Схема автоматики (приложение IV), смонтированная в шкафу, обеспечивает автоматическое поддержание избы-

Основные технические показатели ВУ, рекомендуемых для воздухоопорных сооружений

Марка и номер вентиляторов	Тип вентилятора	Показатели						Тип передачи
		число оборотов в мин	мощность в кВт	производительность в тыс. м ³ /ч	напор в мм вод. ст.	габариты в м (длина×ширина×высота)	вес в кг	
Ц4-94/2, № 4, 5 (ВУ-1)	АО2-2-31-4	1430	2,2	5—8	58—40	1,27×1,15×1,16	142	Прямая
Ц4-94/3, № 6, 3 (ВУ-2)	АО2-41-4	960	4	10—15	51—32	1,59×1,06×1,46	273	Клиноременная
Ц4-94/2, № 7 (ВУ-3)	АО2-42-4	970	5,5	15—25	61—22	1,75×1,13×1,59	320	То же

Примечание. В ВУ-2 и В-3 напор может быть повышен соответственно до 67—47 и 75—35 мм вод. ст. при тех же величинах производительности за счет уменьшения диаметра шкива на 10%.

точного давления в заданном диапазоне с помощью двух ВУ (рабочей и резервной). В шкафу установлены два датчика-реле ДН-100 с раздельным регулированием величин давления, замыкания и размыкания контактов. На одном из них устанавливается диапазон избыточного давления для рабочей ВУ, а на втором — резервный. С помощью реле-повторителей типа ПЭ-6 датчики управляют работой ВУ, включая и отключая их магнит-

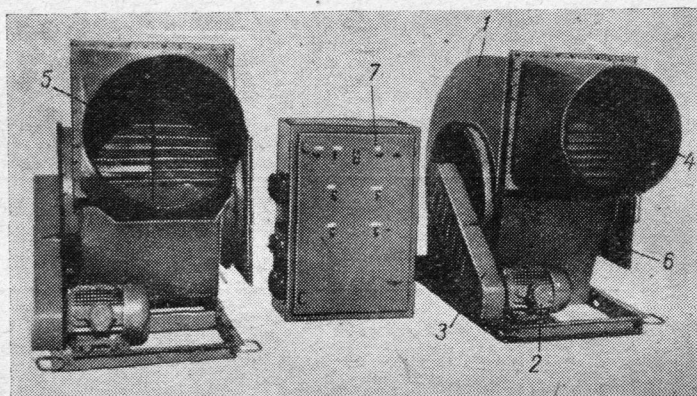


Рис. 6.13. Комплект ВУ-2 с вентиляторами Ц4-94-2 № 6,3 двустороннего всасывания

1 — корпус вентилятора; 2 — электродвигатель; 3 — клиноременная передача; 4 — диффузор; 5 — обратный клапан; 6 — дроссельная заслонка; 7 — шкаф управления

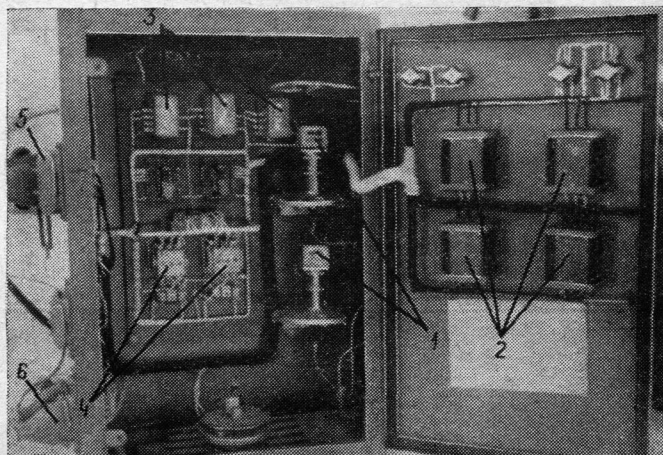


Рис. 6.14. Шкаф управления ВУ

1 — датчик избыточного давления; 2 — автоматический переключатель; 3 — реле защиты; 4 — контакторы; 5 — штепсельный разъем энергоснабжения; 6 — штепсельный разъем подключения ВУ

ные пускатели. Любая из ВУ может быть рабочей или резервной. Схема допускает переход на ручное управление.

Защита электродвигателей ВУ от неполнофазного режима обеспечивается с помощью реле минимальных напряжений типа РН-54, включенных на фазные напряжения. В шкафу также установлена сирена типа СС-1 для сигнализации об отсутствии фазы в сети энергопитания, электроплитка ПКЭ для обогрева его внутреннего объема и стрелочный мембранный напоромер.

Энергоснабжение ВУ осуществляется через шкаф управления от стационарных силовых электролиний или от передвижных электростанций с трехфазными генераторами мощностью не ниже 4 квт.

Мощность электродвигателей ВУ определяется по известной формуле

$$N = \frac{QH}{102 \eta_v \eta_n} \text{ квт}, \quad (6.10)$$

где Q и H — производительность (в $\text{м}^3/\text{сек}$) и напор (в $\text{кгс}/\text{м}^2$) выбранного вентилятора для точки его аэродинамической характеристики с наибольшим расходом мощности;

η_v , η_n — к. п. д. соответственно вентилятора (для расчетной точки характеристики) и клиноременной передачи (принимаемый равным 0,95).

При наборе электродвигателей повышенное потребление мощности при низких эксплуатационных температурах не учитывается.

При проектировании автоматики, управляющей работой ВУ в режиме периодического включения, следует учитывать, что ее рентабельность может быть достигнута при наличии электрооборудования, способного выдерживать необходимую частоту включений, осуществлении надежной герметичности сооружения и окупаемости оборудования автоматики за счет экономии электроэнергии на приводе в течение одного года.

Экономическую оценку рекомендуется производить по данным затрат на потребляемую электроэнергию (C_1 руб/год) и оборудование автоматики (C_2 руб.). Тогда суммарное время остановок двигателя ВУ в течение года, которым окупятся затраты на автоматику, составит

$$t_0 = \frac{C_2}{C_1} \text{ год}. \quad (6.9)$$

Применительно к принятой схеме автоматики и полученным экспериментальным данным на сооружении: $t_0 = 0,25 \div 0,11$ года, а относительное время работы ВУ $75 \div 89\%$.

Проведенные расчеты с использованием экспериментальных данных подтверждают возможность использования автоматики в сооружениях, герметичность которых обеспечивает длитель-

ность снижения избыточного давления от его заданного максимального значения при отключенных ВУ большую, чем время останова двигателя, определяемое из условия термической устойчивости двигателя. Для двигателей мощностью более 2 квт автоматика окупается при относительном времени работы ВУ меньше 75%. Срок окупаемости автоматики при работе одной ВУ в наиболее часто применяемых диапазонах избыточного давления 10—20 и 10—25 мм вод. ст. составляет примерно один год. При одновременной работе двух ВУ срок ее окупаемости сокращается в 1,3—1,8 раза. Применение автоматики наиболее эффективно при поддержании в сооружении низкого давления.

Опыт показывает, что как бы ни была совершенна автоматика, эффективной она может быть лишь в сооружениях с высокой степенью герметичности. Слабо герметизированные, к которым относятся большинство ПС, приходится эксплуатировать при непрерывной работе ВУ.

24. ЕСТЕСТВЕННОЕ И ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Возможность естественного освещения в ПС определяется основными светотехническими показателями материалов оболочки — светопропусканием и отражением в видимой части спектра, которые зависят от состава защитных покрытий материала оболочки, придающего тканям свойства атмосферостойкости и воздухонепроницаемости (табл. 17).

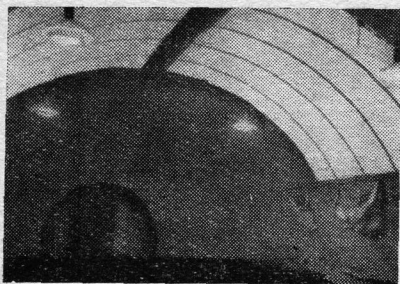


Рис. 6.15. Внутренний вид оболочки УПС-8 со световыми полосами и электрическим освещением

Обычные прорезиненные ткани светонепроницаемы. Поэтому естественное освещение изготовляемых из них сооружений может быть обеспечено устройством иллюминаторов из оргстекла или прозрачной пленки, либо включением в оболочку светопроница-

емых полотнищ с защитными покрытиями из синтетических смол или специальных светлых каучуков (рис. 6.15).

При достаточно большой площади световых полос (15—20% от площади пола и более) значение коэффициента естественной освещенности (к. е. о.) получается близким по величине к нормируемым СНиП II-A.8-62 для производственных помещений с работами по 4—5-му разряду и некоторых жилых и общественных зданий. По данным натурных фотометрических измерений, проводившихся в зимнее время в сооружениях со световыми полосами, имеющими коэффициент светопропускания $\tau_0 = 0,14$, к. е. о. находится в пределах от 2 до 7% (табл. 36, рис. 6.16).

Фактическая освещенность в ПС

Марка сооружения	Ориентация сооружения относительно стран света	Геометрические характеристики сооружения					Светотехнические характеристики материала оболочки		Значение измеренных к. е. о. в %				
		площадь пола в м ² , S _п	площадь световых полос в м ² , S ₀	поверхность оболочки в м ² , S	$\frac{S_0}{S}$	$\frac{S_0}{S_0}$	высота сооружения в м	коэффициент отражения в %, ρ_0	коэффициент светопропускания в %, τ_0	среднее	минимальное	максимальное	отношение минимального к. е. о. к максимальному
К-1	С—Ю	435	96	730	0,22	0,13	5,8	45,2	10,2	4,5	2	7,4	0,28
Н-1	В—З	515	175	900	0,34	0,19	8	56,6	33,3	3,2	1,85	7	0,27
Б-1	ЮВ—СЗ	750	1300	1300	1,73	1	9	61,1	2,6	3,57	3,4	4,2	0,81
Б-2	Ю—С	1116	1920	1920	1,7	1	10	60	2,8	—	3 ÷ ÷5,4	7 ÷5,4	—

Примечания. 1. Значения к. е. о. приведены для точек, расположенных по продольной оси сооружения.

2. В сооружении Б-2 освещенность измерялась в летнее время: ясные (максимальные к. е. о.) и пасмурные (минимальные к. е. о.) дни.

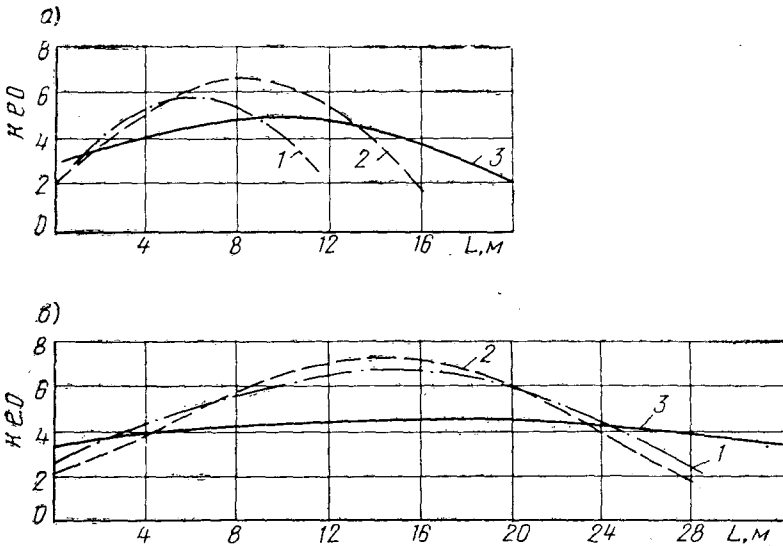


Рис. 6.16. Графики распределения коэффициентов естественной освещенности в сооружении по поперечной (а) и продольной (б) осям

1 — сооружение К-1; 2 — сооружение Н-1; 3 — сооружение Б-1

Неравномерность освещения, характеризующаяся отношением минимального значения к. е. о. к максимальному, составляет 0,27—0,28, что мало отличается от нормируемой величины 0,3. Ми-

нимальная освещенность наблюдается на площадях, примыкающих к сферическим торцам.

Наибольшая освещенность достигается в сооружениях, изготавливаемых из светопроницаемых материалов. Как показывают испытания сооружений Б-1 и Б-2, высокие к. е. о. (3—7%) достигаются при использовании материалов даже со сравнительно небольшими коэффициентами светопропускания ($\tau_0 = 2,6 \div 2,8\%$).

Искусственное освещение в сооружениях проектируется по СНиП II-A.8-62 с учетом особенностей эксплуатационного содержания оболочек. Электропроводка и арматура подвешиваются на специальных петлях, приклеиваемых и пришиваемых к оболочке. Арматура защищается на случай опускания оболочки в связи с прекращением электроснабжения, выхода из строя ВУ и др. В случае установки в сооружении поддерживающего каркаса электропроводка и арматура могут монтироваться непосредственно на нем. В сооружениях из светопроницаемых материалов в ряде случаев можно использовать наружные светильники.

25. МОНТАЖ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ДЕМОНТАЖ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

По таким показателям, как объем в сложенном виде, вес, потребный транспорт, трудоемкость и сроки монтажа (табл. 37), ПС выгодно отличаются от сборно-разборных сооружений других конструкций (каркасно-тканевых, деревянных и стальных).

Монтаж сооружений выполняется в соответствии с заводской инструкцией по монтажу и эксплуатации, где содержатся техническое описание, необходимые сведения о комплектности и упаковке, последовательности развертывания, сборке элементов конструкций и оборудования, режимах работы ВУ, технике безопасности и т. п.

Монтаж ведется бригадой монтажников, как правило, на заранее спланированной площадке, имеющей подъездные пути и водостоки, а также подводку электроэнергии от стационарных или передвижных источников энергоснабжения. Численность бригады зависит от размеров ПС и составляет от 4 до 8 человек.

Работы по монтажу начинаются с разбивки сооружения. На площадке закрепляют продольную ось сооружения, наносят опорный контур оболочки и места установки опор каркасов шлюзов. Затем по периметру опорного контура размечают места установки анкеров или фундаментов, используемых для крепления силового пояса оболочки к основанию.

Анкеры типа винтовых свай или металлических штырей входят в комплект транспортабельного ПС. Фундаменты капитального типа (ленточные или столбчатые) возводятся для сооружений, устанавливаемых на длительный срок эксплуатации. Ввер-

Показатели транспортабельности и трудоемкости монтажа сборно-разборных сооружений

Показатели	Сооружения воздухопорного типа									Сооружения из традиционных материалов							
	без поддерживающего каркаса									с каркасом из			палатки		жесткие сооружения		
	ПС-5	АС-11	К-1	Д-1	Н-1	Б-1	Б-2	УПС-12	УПС-16	металлических конструкций			пневмоарок низкого давления КПС-12г	РС-2	Ю-12 г	из волнистой стали	щитовой деревянной конструкции ЦВЦ
										УПС-16г	ПС-5	АС-11					
Полезная площадь в м ²	335	480	435	330	545	750	1116	430	456	456	335	480	257	195	156	420	446
Количество транспортных мест	8	5	5	4	8	8	8	6	6	12	18	12	4	12	20	—	—
Вес комплекта (брутто) в тс.	3,1	5	3,5	2,1	3,5	7,4	8,5	3,2	2,2	6	4,9	10	1,8	2,4	2,75	34,5	185
Трудоемкость монтажа в чел.-час.	100	120	50	40	80	150	200	70	50	100	220	270	60	160	200	—	3950
Потребное количество автомобилей ЗИЛ-164	2	2	2	1	3	4+1*	4+1*	2	2	5	6	5	2	2	2	20	35

* Прицеп типа трейлер.

тывание свай или забивка штырей в грунт — трудоемкая операция, которую выполняют обычно два человека вручную. Время погружения в грунты 2—3 категории одной сваи длиной 100 см и диаметром лопасти 15 см составляет примерно 3—5 мин. Погружение винтовых свай больших размеров выполняется с помощью специальных машин-кабестанов. Несущую способность анкеров определяют путем выдергивания 2—3 пробных анкеров.

Одновременно с установкой анкеров ведется монтаж каркасов шлюзов (см. гл. 5). На крайние рамы шлюзов навешивают дверные или воротные полотна.

После завершения работ по устройству опорного контура и монтажу каркасов шлюзов раскладывают оболочку. Секции составных оболочек соединяют между собой с помощью монтажных швов. Силовой пояс оболочки крепят к анкерам опорного контура с помощью специальных скоб или карабинов. Переходники оболочки присоединяют к раме шлюза. Разгружающие канаты, заложенные в местах соединения переходников с оболочкой, подсоединяют к анкерам после предварительного поддува оболочки. Подсоединив ВУ к оболочке с помощью воздухопроводов, наполняют ее воздухом. В процессе подъема тщательно следят за ее соединением с опорным контуром для своевременного устранения ошибок в разбивке и креплении, приводящих к образованию в оболочке складок, перекосов и зон чрезмерного натяжения. Монтаж оболочки завершается проверкой режимов работы ВУ и шкафа управления. Сооружение сдается в эксплуатацию, если ВУ обеспечивают создание в нем избыточного давления в диапазонах, указанных в инструкции по эксплуатации.

Если в комплект ПС входит поддерживающий каркас, то его монтаж производят, как правило, внутри оболочки при нормальном режиме работы ВУ.

Опыт монтажа металлических поддерживающих каркасов в воздухоопорных сооружениях показывает, что трудоемкость его оказывается примерно равной трудоемкости монтажа самой оболочки. Менее трудоемки комбинированные сооружения с поддерживающими устройствами в виде пневмоарок низкого давления (рис. 5.22). Подсоединение пневмоарок к оболочке выполняется в процессе ее раскладки, закрепление опорных башмаков к основанию — после подъема в проектное положение.

При недостаточном избыточном давлении воздуха ветровые нагрузки порождают вмятины на поверхности оболочки (см. гл. 4, рис. 4.5), вызывающие опасность повреждения материи об углы и грани находящегося в нем имущества или техники, а обильный мокрый снег (сухой снег на оболочке обыкновенно не задерживается) приводит к образованию на оболочке седловин, к потере оболочки формы или общей устойчивости (см. гл. 4, рис. 4.2). Это особенно опасно для оболочки, под которой находится громоздкое имущество с выступающими узлами

**Рекомендуемые величины избыточного давления в ПС в зависимости
от расчетной скорости ветра в мм вод. ст**

Форма и размеры сооружения	Рекомендуемое давление при скорости ветра в м/сек				
	0—5	5—10	10—15	15—20	>20
Цилиндрические оболочки со сферическими торцами проле- том:					
12—16 м	5—7	10	15	25	30
20—24 м	7—10	15	20	25	40
Сферические оболочки диа- метром до 25 м	7—10	15	20	30	50

Примечание. Данные относятся к сооружениям, к деформациям которых не предъявляются особые требования технологического характера.

и острыми деталями. Оболочка при этом получает поврежде-
ния, выводящие ее из строя. Мерой борьбы с этими явлениями
служит повышение избыточного давления воздуха в оболочке.
Рекомендуемые величины давления в ПС приведены в табл. 38.

Если мокрый снег прилип к поверхности оболочки, его стря-
хивают путем понижения, а затем повышения избыточного дав-
ления воздуха. Если по технологическим требованиям времен-
ное нарушение формы оболочки недопустимо, снег можно
сбрасывать с помощью веревки с узлами, перекинутой поперек
оболочки.

Эксплуатация оболочек сооружений, оборудованных метал-
лическими поддерживающими каркасами, более сложна и от-
ветственна. При отключении подачи воздуха оболочка ложится
на каркас, образуя между несущими конструкциями и связями
«мешки», в которых скапливаются вода и снег (рис. 6.17, а).
Удаление воды и снега из «мешков» представляет значительные
трудности.

Правильная эксплуатация ПС предусматривает: постоянное
поддержание в заданных пределах избыточного давления воз-
духа; наблюдение за креплением оболочки и каркасов; уход за
ВУ и выполнение работ по их техническому обслуживанию;
своевременный ремонт оболочек в случае появления разрывов,
расслоения швов, обрывов петель поясов и т. п.; поддержания
нормального температурно-влажностного режима, если это обу-
словливается технологическими требованиями; соблюдение пра-
вил противопожарной безопасности, особенно при работе отопи-
тельных установок; правильное пользование шлюзами и поддер-
живающими устройствами.

Важно наблюдение за креплением оболочки по ее опорному контуру. Непринятие мер по водоотводу может привести к переувлажнению грунта в основании и к снижению несущей способности анкеров, которое сопровождается их выдергиванием (рис. 6.17, б). Внезапное увеличение утечки воздуха через опорный контур при обрыве петель силового пояса или выдергивании анкеров резко сказывается на несущей способности оболочки

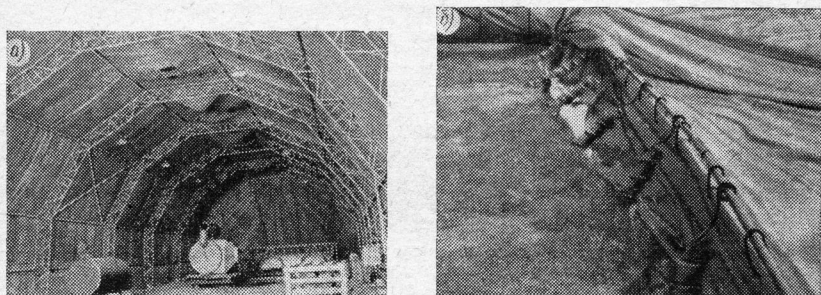


Рис. 6.17. Аварийное состояние оболочек ПС в результате образования «водяных мешков» при отключении подачи воздуха во время выпадения осадков (а) и выдергивания анкеров при снижении их несущей способности вследствие переувлажнения грунта основания (б)

и вызывает опасность ее разрыва, особенно при сильных ветрах. Известен, например, случай, когда в результате разрушения балластных мешков в основании оболочка при порывистом ветре со скоростью 18—20 м/сек разорвалась на участке длиной 11 м, а ее служебный шлюз был отброшен на несколько метров.

Анкерное основание следует осматривать, проверяя его надежность и герметичность, не реже одного раза в месяц, а также после дождя и в процессе оттаивания грунта. Герметичность оболочки надо проверять ежедневно.

Устойчивая работа ВУ достигается бесперебойным энергоснабжением, как потребителей 1 и 2 категории, от двух независимых источников питания через отдельные рубильники или от одного источника, но от двух разных фидеров, а также ежедневным и периодическим техническим обслуживанием их электродвигателей, вентиляторов и пускорегулирующей аппаратуры.

При ежедневном обслуживании ВУ ведется наружный осмотр работающего и резервного оборудования, переключение электродвигателей в соответствии с графиком работ и контроль избыточного давления воздуха под оболочкой. Периодическое обслуживание проводится каждые три месяца и заключается в удалении пыли и грязи со всех узлов ВУ, шкафа управления и его приборов; проверке плавности бесшумности хода вен-

тилятора, зазора между кромками входного патрубка и переднего диска колеса вентилятора, герметичности воздухопроводных шлангов и мест их подсоединения к датчикам и напоромеру; проверке заземления ВУ, шкафа управления и рубильника, а также всех контактов проводов, штепсельных разъемов и пускорегулирующей аппаратуры; осмотре подшипников и добавлении в них смазки.

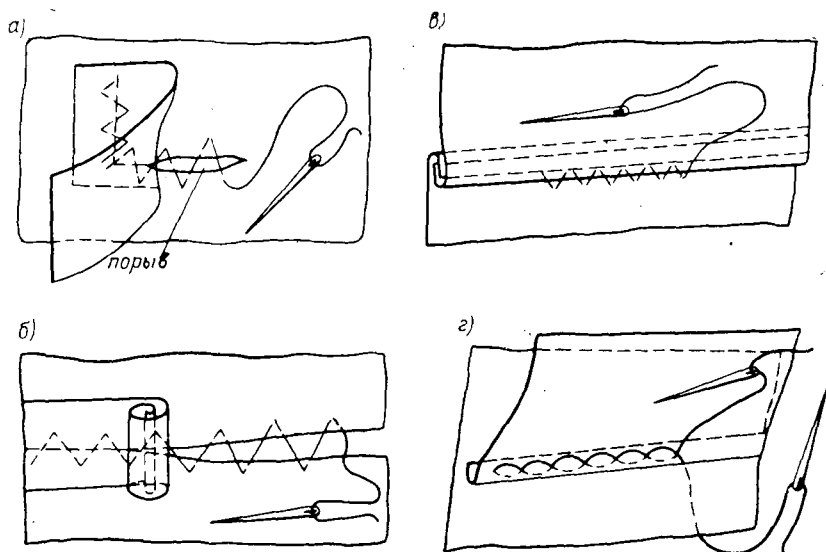


Рис. 6.18. Приемы ремонта оболочки с помощью шитья

При монтаже и эксплуатации оболочки могут получить повреждения в виде проколов, разрывов и расслоений ткани по шву. Такие повреждения ведут к увеличению утечки воздуха, поэтому своевременное их устранение может гарантировать не только устойчивость оболочки, но и ее сохранность.

В зависимости от характера и величины разрыва ликвидируют его можно путем сшивания краев с последующей накладкой заплаты или защитной герметизирующей ленты, прошивания через край и установки заплат (рис. 6.18). Края разрыва подводят друг к другу «встык» и сшивают капроновой ниткой, причем игла с ниткой должна перемещаться восьмеркой. Стягивание краев порыва с образованием складок не допускается. Прошивание через край применяется при расслоении шва (разрыве оболочки по шву). Расслоение швов в местах присоединения к оболочке силовых поясов и фартуков рекомендуется исправлять путем прошивания дефектных мест двумя иглами.

Проколы оболочки заделываются с помощью заплат, которые на прорезиненные материи наклеивают, а на армопленки

наваривают или нашивают. Заплаты должны выступать за края отверстия не менее чем на 50 мм.

По требованиям противопожарной безопасности в ПС не допускается разведение огня и установка агрегатов с открытым пламенем вблизи оболочки; обеспечивается оснащение отопительных установок поддонами для сбора топлива при случайных его проливах; запрещается хранение в ПС запасов топлива, легковозгораемых веществ и материалов.

Демонтаж ПС в теплое и сухое время не вызывает затруднений. Выполняется он в последовательности, обратной монтажу. Демонтаж примерно в 1,5 раза менее трудоемок, чем монтаж. Демонтаж оболочек рекомендуется производить при благоприятных атмосферных условиях и скорости ветра не более 5 м/сек.

В зимнее время демонтаж усложняется; это относится в первую очередь к опорным контурам. Выдергивание штопоров или винтовых свай зимой практически исключено. В связи с этим для повторного монтажа зимой требуется специальный комплект анкерov, которые представляется возможным забить в мерзлый грунт.

ПС транспортируют в таре любым видом транспорта. Мягкую часть сооружения (оболочки, тенты) упаковывают в мягкие чехлы, металлоконструкции — в ящики или связки; ВУ перевозятся без упаковки. Данные о потребном транспорте для перевозки испытанных образцов ПС приведены в табл. 37.

26. САНИТАРНЫЕ УСЛОВИЯ В ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

Возможность использования ПС для длительного пребывания людей часто ставится под сомнение. Обычно опасаются, что в них нельзя достигнуть санитарных норм по температурно-влажностному режиму, скорости движения воздуха, содержанию углекислого газа, уровню шума от работающего оборудования.

Чтобы рассеять эти сомнения, авторы совместно со специалистами-медиками провели под Ленинградом комплекс исследований в ПС размером 50×25×12 м. Сооружение было укомплектовано двумя ОУ теплопроизводительностью 425 и 525 тыс. ккал/ч.

В процессе испытаний измерялись: температура воздуха (в центре, на высоте 0,1 и 1,5 м от уровня пола, и на расстоянии 1 м от стены на высоте 1,5 м), абсолютная и относительная влажность воздуха, скорость его движения в различных точках, барометрическое давление и результирующая температура (в центре, на высоте 1,5 м). Все показатели фиксировались на каждом этапе испытаний в течение нескольких дней при определенных погодных условиях — через 1—2 ч. Для оценки суммарного действия физических свойств воздуха на организм че-

ловека вычислялись эффективная и результирующая температуры.

Санитарные условия в ПС изучались как при отсутствии в нем людей, так и при пребывании внутри нескольких сот человек.

Исходя из экспериментальных данных по санитарным условиям в ПС, были получены следующие результаты:

микrokлиматические условия при отсутствии отопления определяются метеорологическими факторами, главным образом температурой воздуха, его влажностью и прямой солнечной радиацией;

летом, при температурах наружного воздуха 18—26° С, микrokлиматические условия в сооружении находятся в пределах, допустимых для жилых помещений, за исключением повышенной влажности, вызванной отсутствием пароизоляции на земляном полу;

весной и осенью при положительной температуре наружного воздуха создание в ПС относительно благоприятных для размещения людей микrokлиматических условий было возможно только при работе отопительных установок. Отклонение от оптимальных значений наблюдалось лишь по вертикальному перепаду результирующей температуры;

зимой, при использовании отопительных установок, температура воздуха, скорость его движения и эффективная температура в сооружении соответствовали санитарным нормам. Однако наблюдаемое понижение относительной влажности воздуха и результирующей температуры, наряду со значительным перепадом температуры, по высоте оказывали отрицательное влияние на теплообмен и теплоощущение людей, находившихся в сооружении;

ВУ, обеспечивающие кратность воздухообмена от 1,8 до 3,9 объемов в 1 ч, позволяют снизить концентрацию углекислого газа до допустимой величины при нахождении в ПС нескольких сот человек. При работе отопительных установок содержание окиси углерода в воздухе сооружения оказывается ниже допустимого для производственных помещений, но несколько превышает предельную концентрацию для атмосферного воздуха;

избыточное давление воздуха в сооружении не оказывает вредного влияния на здоровье человека;

уровень шума в ПС при работе ВУ и ОУ на 5—20% превышает допустимый для жилых помещений.

ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ВОЗДУХООПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

27. ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА И СПОСОБЫ ЕГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Применение воздухоопорных сооружений во многих случаях связано с необходимостью создания в них определенных температурно-влажностных условий. Например, в строительных тепляках требуется в течение длительного времени поддерживать положительную температуру; в складах, хранилищах и т. п. необходимо обеспечить не только заданную температуру, но и влажность воздуха.

Естественный температурно-влажностный режим воздухоопорных сооружений имеет существенные особенности, обусловленные специфическими свойствами их конструкции (табл. 39).

Опыт эксплуатации воздухоопорных сооружений показывает, что температура воздуха в этих сооружениях по характеру суточного хода близка к наружной. На рис. 7.1, а представлены совмещенные наружная и внутренняя термограммы, полученные для сооружения Н-1 летом при установившейся ясной погоде. Ночью температура в сооружении почти уравнивается с наружной, превышая ее на 2—3°. С наступлением дня и повышением солнечной радиации температура окружающего воздуха поднимается. Одновременно возрастает и температура воздуха в ПС, причем в значительно большей степени, чем вне его. Появление облачности, периодически закрывающей солнце, немедленно отражается на температуре воздуха, о чем свидетельствуют зубцы на термограммах. Температура в сооружении достигает максимума обычно в 13—14 ч, превышая при этом наружную (в данном случае на 10—15°).

Величина температурного перепада, обусловленного воздействием солнечной радиации, часто называемого перегревом, зависит от цвета и светонепроницаемости материала оболочки, ее конструкции, интенсивности воздухообмена в сооружении, местных климатических условий и т. п. Представление о перегреве могут дать сравнительные графики хода максимальных температур в сооружениях различных конструкций, приведенные на рис. 7.2. Более высокие температуры отмечаются под

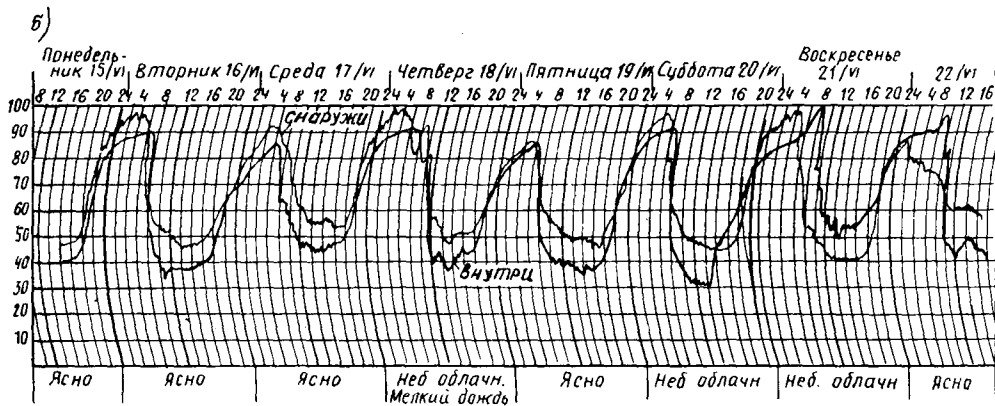
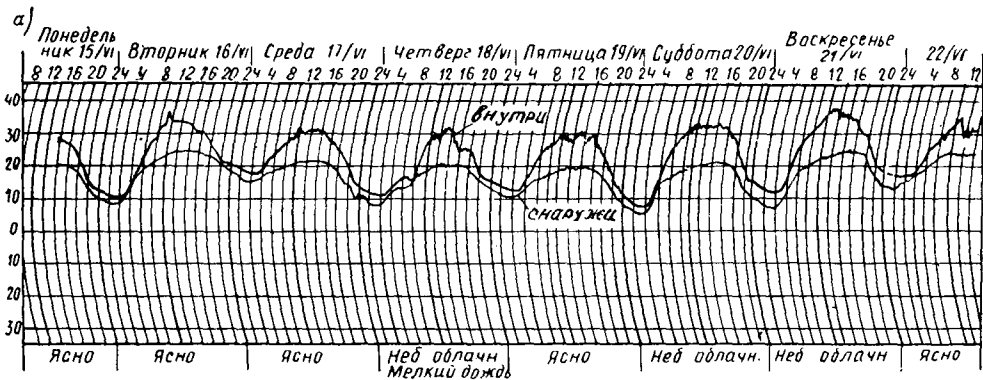
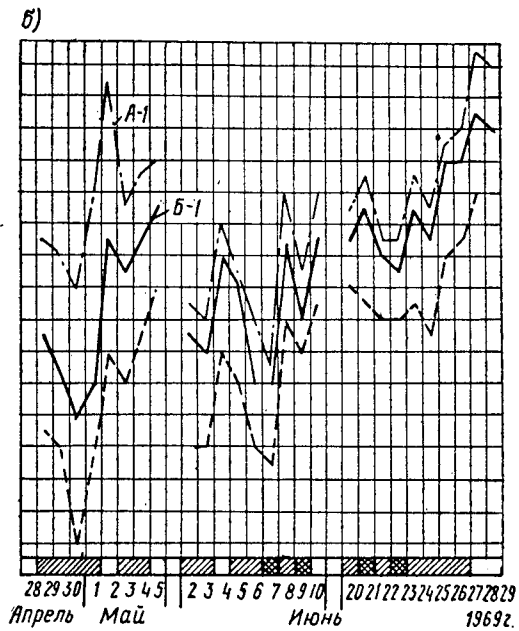
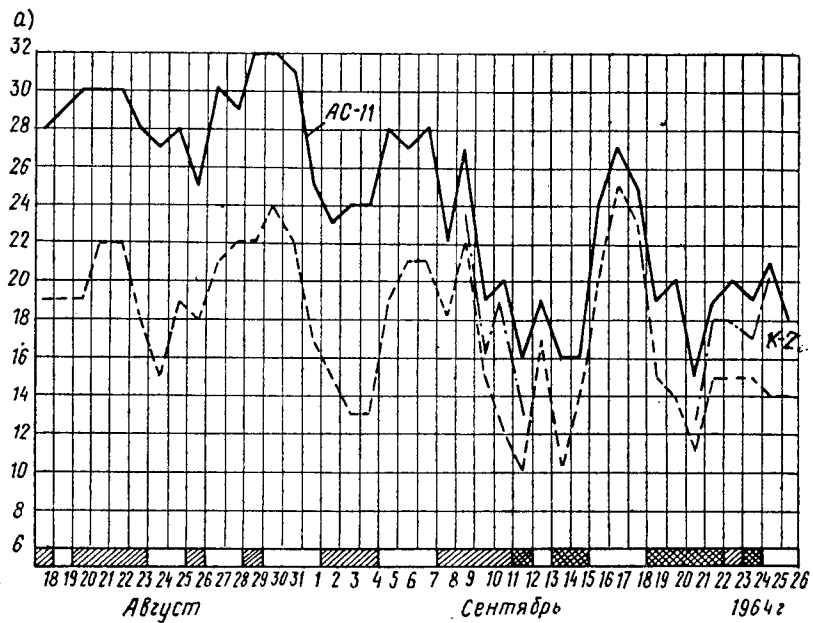


Рис. 7.1. Совмещенные наружная и внутренняя термограммы (а) и гигрограммы (б) для ПС размером 36×16×8 м (Н-1)



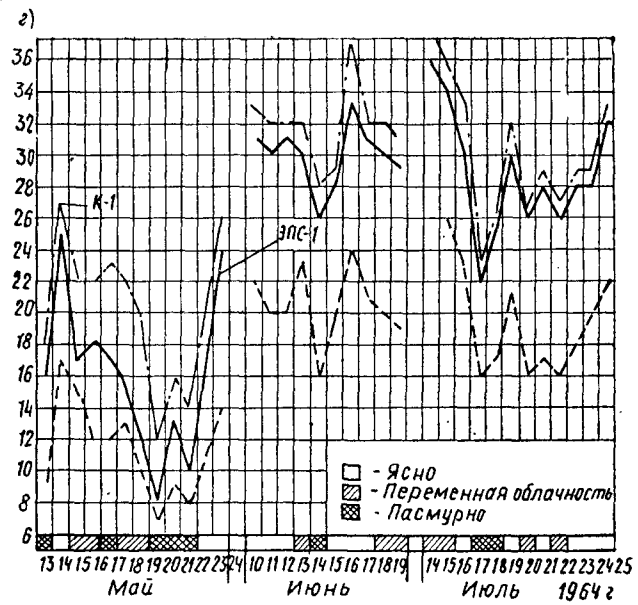
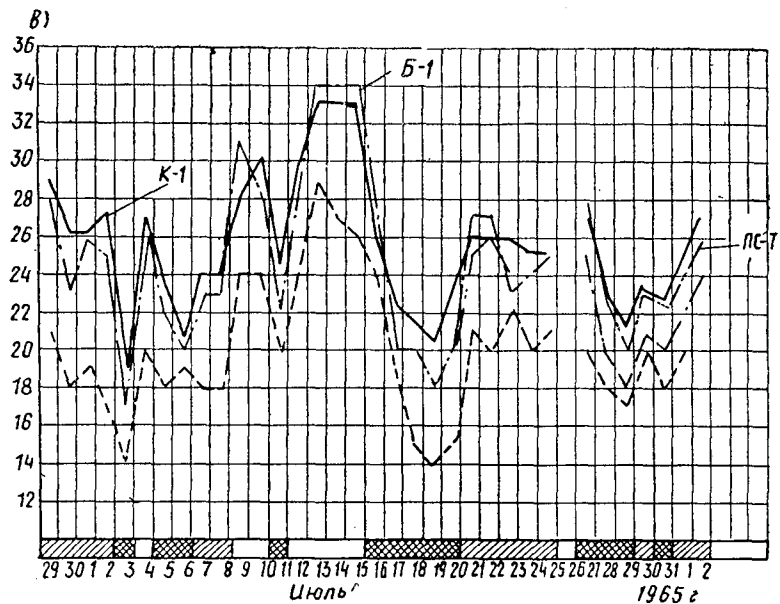


Рис. 7.2. Максимальные температуры в сооружениях

а — АС-11 и К-1 в летне-осенний период; б — Б-1 и А-1 в весенне-летний период; в — Н-1, Б-1 и ПС-7 в летнее время; г — Н-1 и ЭПС-1 в весенне-летний период. Пунктиром показаны термограммы наружного воздуха

Особенности температурно-влажностного режима воздухоопорных сооружений

Основные свойства воздухоопорных сооружений (причина)	Особенности температурно-влажностного режима (следствие)
Постоянная подача в сооружение наружного воздуха	Температура и влажность воздуха в сооружении близки к наружным
Низкие теплоизоляционные характеристики оболочек	Перегрев воздуха в сооружении за счет инсоляции. Большие теплопотери через оболочку при отоплении сооружения. Образование конденсата на внутренней поверхности оболочки
Незначительная масса оболочек (низкая теплоемкость сооружения)	Быстрое нагревание сооружения солнцем или отопительными установками и быстрое остывание его после прекращения действия тепловых факторов
Паро- и воздухонепроницаемость материала оболочек	Увеличение влажности в сооружении при установке его на грунты с повышенным влагосодержанием или на площадке с дерновым покровом. Образование конденсата на внутренней поверхности оболочки
Отсутствие утепленного основания, установка сооружения непосредственно на грунтовую поверхность	Понижение температуры воздуха и основания. Увеличение влажности за счет испарения влаги из грунта

темными оболочками — черного (рис. 7.2, а) и темно-зеленого цветов (рис. 7.2, б). Перегрев воздуха под этими оболочками может достигать 12—17°С. Оболочки светлых тонов (светло-серые, белые и т.п.) нагреваются в значительно меньшей степени. Максимальные перепады температур под ними примерно в 2 раза ниже. С уменьшением напряженности солнечной радиации (например, при облачности или при меньшей высоте солнца) уменьшается и величина перегрева сооружений. Так, температурный перепад в сооружении с темно-зеленой оболочкой, который в летнее время достигает 8—12°С, осенью (в сентябре) уменьшается до 2—6°. Под оболочкой черного цвета максимальная температура в солнечные дни превышает наружную на 8—17°С, а в пасмурные дни — только на 5—8°С.

Сооружения, снабженные световыми полосами из светопропускаемых материалов или изготовленные из них целиком, нагреваются в большей степени, чем сооружения из светонепроницаемых тканей и пленок. В солнечную погоду, например, в сооружении серебристо-серого цвета со световым полотнищем из светопропускаемой ткани наблюдается более высокая темпера-

тура, чем в сооружении из темно-зеленой прорезиненной ткани (см. рис. 7.2, а и 7.2, в). Улучшение отражающих свойств светопроницаемого материала оболочки уменьшает перегрев. На рис. 7.2, б видно, что воздух под оболочкой из белой армированной пленки нагревается умеренно.

Введение в конструкцию оболочки теплоизолирующих прослоек ослабляет влияние солнечной радиации. Воздушная прослойка 50 см в двухслойной оболочке снижает перегрев примерно в 2 раза. Менее эффективно применение поролоновой подкладки. При толщине ее 15 мм перегрев воздуха в одинаковых условиях снижается на 20—30%.

Интенсивное вентилирование сооружений также дает заметный эффект. Например, в ПС, воздухоподача в которое достигает 10—11 объемов в 1 ч при продольном направлении воздушного потока, максимальный температурный перепад, вызванный инсоляцией, на 20—30% меньше, чем при 3—4-кратном воздухообмене.

Свободные данные о влиянии конструктивных характеристик сооружений на степень нагрева их солнцем, полученные авторами в результате экспериментов, содержатся в табл. 40.

Относительная влажность воздуха в воздухоопорных сооружениях ввиду постоянной подачи в них наружного воздуха обычно мало отличается от его влажности, что видно из гигрограмм (рис. 7.1, б). Днем влажность в сооружении ниже, чем снаружи, на 10—15%, что обусловлено повышением температуры вследствие нагревания его солнцем. Ночью влажность в сооружении сравнивается с наружной, а в некоторых случаях и превышает ее. В пасмурную, дождливую погоду относительная влажность в сооружении близка к наружной.

Абсолютная влажность воздуха под оболочкой, характеризующая его влагосодержание, зависит не только от внешних влажностных условий, но и от вида и состояния основания сооружения. Если оболочка установлена на сухой грунтовой площадке или на искусственном влагонепроницаемом основании, абсолютная влажность воздуха под ней практически равна влажности окружающего воздуха. В сооружениях, установленных на влажном грунте или на задернованных участках, влажность длительное время остается более высокой, чем снаружи (рис. 7.3). Это объясняется дополнительным поступлением влаги в сооружение вследствие испарения ее с поверхности грунта или растительности. Изоляция влажного грунта путем укладки по всей площади основания паронепроницаемого материала (пленки, прорезиненной ткани и т. д.) сопровождается уменьшением абсолютной влажности и выравниванием ее с наружной.

Влияние открытой грунтовой поверхности в сооружениях на их влажностный режим усугубляется паронепроницаемостью материалов оболочек, которые, препятствуя фильтрации водяных паров в окружающую среду, способствуют увеличению

Влияние конструктивных и светотехнических характеристик оболочек сооружений на нагрев воздуха под ними

Шифр ПС	Цвет оболочки	Светопроницаемость оболочки в %	Относительная площадь световых полюсов	Светопроницаемость световых полюсов в %	Температурный перепад в град				Примечания
					в солнечную погоду		при сплошной облачности		
					максимальный	средний	максимальный	средний	
Д-1	Черный	0	0	0	17	9	8	6	—
АС-11	Темно-зеленый	0	0	0	12	7	6	4,5	—
ПС-7	»	0	0	0	6	4,5	6	4,5	Оболочка двухслойная с воздушной прослойкой 50 см
Н-1	Серебристо-серый	0	0,193	3	13	10	12	8	—
К-1	Светло-серый	0	0,133	5	10	5	3	2,5	Воздухоподача в 3—4 раза выше, чем в Н-1
ЭПС-1	Серебристый	0	—	—	11	8	8	5	Оболочка с поролоновой подкладкой толщиной 15 мм
Б-1	Белый	3	—	—	8	6	5	3	—

влагосодержания воздуха в объеме сооружения, особенно при наличии в последнем влаговыделений.

Низкие теплоизоляционные свойства оболочек воздухоопорных сооружений являются причиной выпадения конденсата на внутренней поверхности оболочки при понижении температуры наружного воздуха. В сооружениях, установленных на сухих площадках, конденсация обычно незначительна даже во время отопления. Если же в сооружении имеются источники повышенного влаговыделения, например открытая водная поверхность, скопление людей и т. д., то конденсация усиливается, оболочка с внутренней стороны становится мокрой, при морозе покрывается ледяной коркой или инеем. Снижение влажности в сооружении путем изоляции влаговыделяющих поверхностей может

рассматриваться как один из способов борьбы с конденсированием влаги на оболочке.

Задача обеспечения в ПС заданного температурно-влажностного режима в холодное время года может быть решена только путем применения отопительных установок. Большие теплотепе-

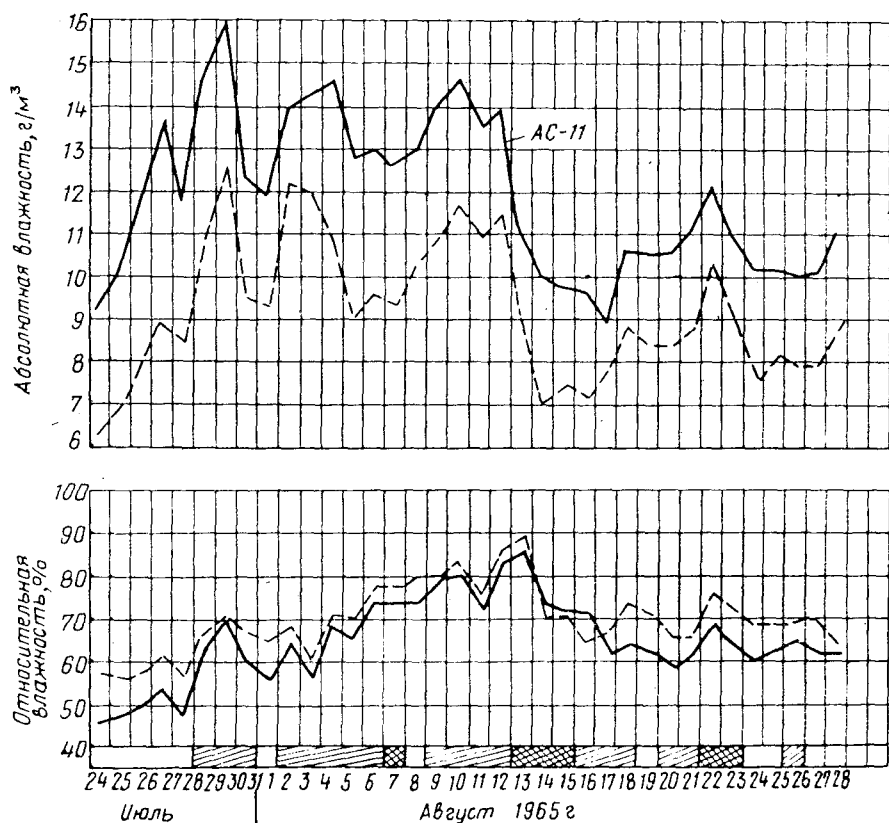


Рис. 7.3. Среднесуточные значения абсолютной и относительной влажности в сооружении АС-11, установленном на увлажненной грунтовой площадке

ри через оболочки и грунтовое основание делают крайне неэффективным использование отопительных агрегатов небольшой теплопроизводительности. Известны примеры неудачных попыток отопления сооружения объемом 3000 м^3 установками теплопроизводительностью 20 и 85 тыс. ккал/ч, сооруженными объемом 1500 м^3 — установкой мощностью 15 тыс. ккал/ч. В то же время достаточно мощные отопительные установки обеспечивают создание и поддержание в воздухоопорных сооружениях требуемой температуры. Например, при отоплении сооружения объемом

Экспериментальные данные отопления сооружения объемом 5000 м³ огневым калорифером номинальной теплопроизводительностью 325 тыс. ккал/ч

Температура воздуха в град						Время достижения установившейся температуры
наружная	на выходе из калорифера	перепад	начальная в сооружении	установившаяся в сооружении	перепад	
-14	—	—	- 9,5	+ 9,1	25,1	1 ч 45 мин
-10	+38	48	-10,4	+ 8,9	18,9	1 ч 45 мин
- 3	—	—	+ 1,4	+23,5	26,5	1 ч 25 мин
- 4,5	+37	41,5	+ 1,2	+18,4	22,9	1 ч 50 мин
- 1,8	—	—	+ 4,5	+28	29,8	4 ч 00 мин
- 3	+39	42	- 1	+16,7	19,7	2 ч 15 мин
- 4,4	+40	44,4	+ 0,6	+16,9	21,3	1 ч 40 мин
-29	+17	46	-25,4	- 8,2	20,8	1 ч 40 мин
-29,4	+20	49,4	-25	- 2,3	27,1	1 ч 55 мин
-24,4	+26,2	50,6	-20,8	+ 1,7	26,1	1 ч 40 мин
-18,4	—	—	-16,8	+ 2,2	20,6	—
-13	+22,5	35,5	-11,7	+ 1	14	1 ч 50 мин
Среднее значение		42			22,7	1 ч 45 мин

5000 м³ калорифером номинальной теплопроизводительностью 325 тыс. ккал/ч средний температурный перепад равен 22,7° при наружных температурах от -1,8 до -29,4°С (табл. 41).

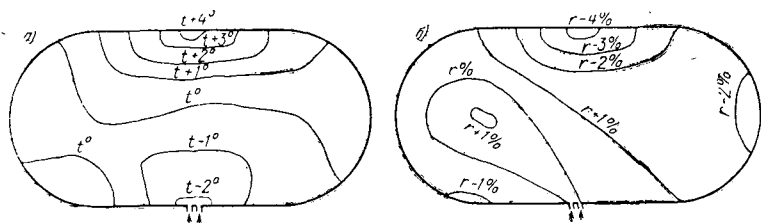


Рис. 7.4. Температурное (а) и влажностное (б) поля на уровне 1,5 м при отоплении сооружения объемом 5000 м³

Применение в качестве отопительных агрегатов калориферов позволяет сравнительно просто решать задачу равномерного распределения тепла в сооружении. Нагретый калорифером воздух подается в среднюю часть сооружения и с помощью дефлекторов на воздуховодах направляется в верхнюю зону. Постепенно охлаждаясь, теплый воздух опускается вниз и хорошо перемешивается с воздухом в сооружении. Это обеспечивает получение достаточно равномерного температурного поля в пределах сооружения. По данным, полученным при отоплении сооружения объемом 5000 м³, колебания температуры на уровне

1,5 м не превышают $\pm 1^\circ\text{C}$ на 85% площади сооружения (рис. 7.4, а). Колебания температуры по высоте сооружений также незначительны; почти по всей его высоте они не выходят за пределы $\pm 1^\circ$ и только у поверхности грунта увеличиваются до -3°C (рис. 7.5). Температура на уровне 1,2—1,5 м может приниматься в качестве средней для всего объема сооружения.

Повышение теплоизоляционных качеств оболочек уменьшает теплотери через ограждение и обеспечивает более высокие температурные перепады при той же мощности отопительных установок или снижении их потребной мощности при неизменном перепаде. Например, в ПС объемом 260 м^3 после утепления его оболочки подкладкой из поролона толщиной 15 мм был получен температурный перепад $12\text{--}20^\circ\text{C}$ применением отопительной установки ОВ-65, теплопроизводительность кото-

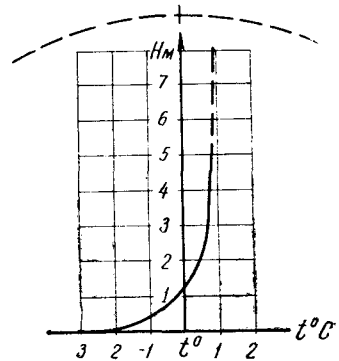


Рис. 7.5. Изменение температуры в сооружении по высоте

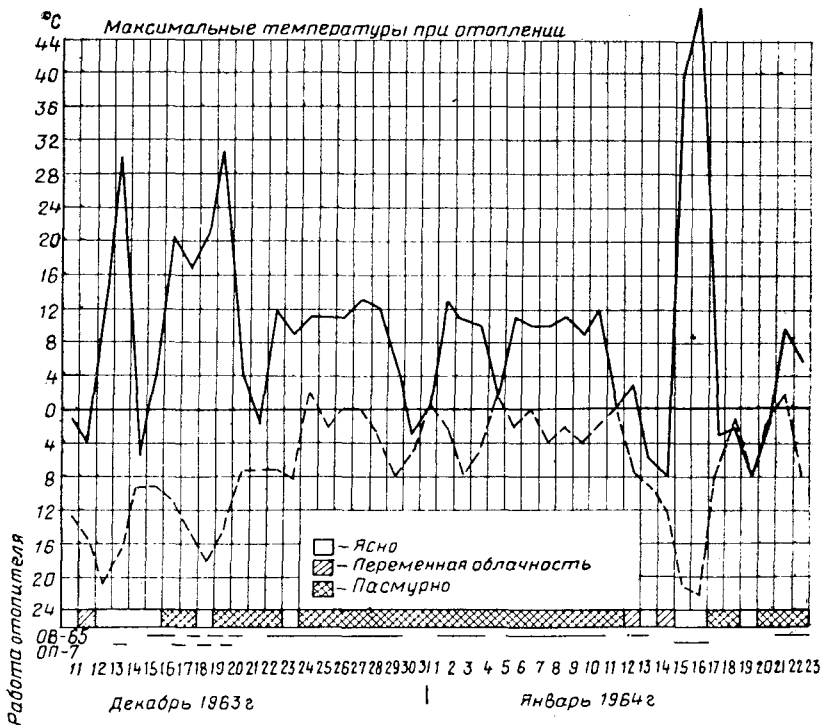


Рис. 7.6. Максимальные температуры в сооружении объемом 260 м^3 при отоплении его отопителями ОВ-65 и ОП-7. Штриховой линией показана температура наружного воздуха

рой равна примерно 5000 ккал/ч (рис. 7.6). Попытки отопления этого сооружения с холодной оболочкой, без поролоновой подкладки, электрокалорифером мощностью 7 кВт (6000 ккал/ч) ощутимых результатов не дали. Применение более мощного отопителя ОП-7 позволило получить перепад в среднем 52°С при наружных температурах от —18 до —22°С. В утепленном сооружении объемом 330 м³ два встроенных электрокалорифера мощностью по 3 кВт поддерживали температуру, превышающую наружную на 12—17°С.

Отопление воздухоопорных сооружений одновременно является действенным способом поддержания в них требуемого влажностного режима. Как известно, при одном и том же количестве водяных паров в воздухе относительная влажность его тем ниже, чем выше температура.

Например, в сооружении объемом 5000 м³ в периоды отопления относительная влажность уменьшается в среднем до 8—17%. При этом колебания ее на отметке 1,5 м на 85% площади сооружения не превышают ±2% (рис. 7.4, б). Зона наименьшей влажности совпадает с зоной наиболее высоких температур. Конденсат на внутренней поверхности оболочки в таких условиях почти не выпадает или выпадает в очень незначительной степени.

В отапливаемых сооружениях, установленных над открытой водной поверхностью, например над плавательным бассейном, обеспечение необходимых параметров температурно-влажностного режима связано с большими трудностями. Однако и в этих случаях при достаточной мощности отопительных агрегатов удается удерживать температуру и влажность в допустимых пределах, обеспечивающих беспрепятственное функционирование сооружений.

В одном из сооружений объемом 3000 м³, которое в течение шести лет используется в холодное время года в качестве перекрытия над летним плавательным бассейном (рис. 7.7), двумя паровыми калориферами общей теплопроизводительностью около 400 тыс. ккал/ч поддерживалась температура 20—21°С и относительная влажность 65—70% при наружной температуре до —15÷20°С. Один из калориферов был установлен в воздухонагнетательном канале в подвальном помещении под сооружением, другой—внутри сооружения. На оболочке наблюдалось образование конденсата: вся внутренняя поверхность оболочки была мокрой, а в зоне забора воздуха внутренним калорифером она была покрыта ледяной коркой толщиной 1 мм (рис. 7.7, в). Опыт длительной эксплуатации этого сооружения подтверждает возможность использования воздухоопорных оболочек для перекрытия открытых плавательных бассейнов.

Приведенные фактические данные по температурно-влажностному режиму воздухоопорных сооружений дают основания для следующих обобщений:

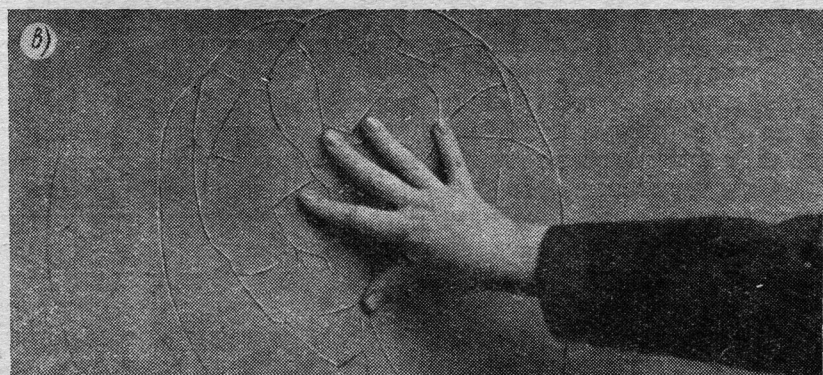
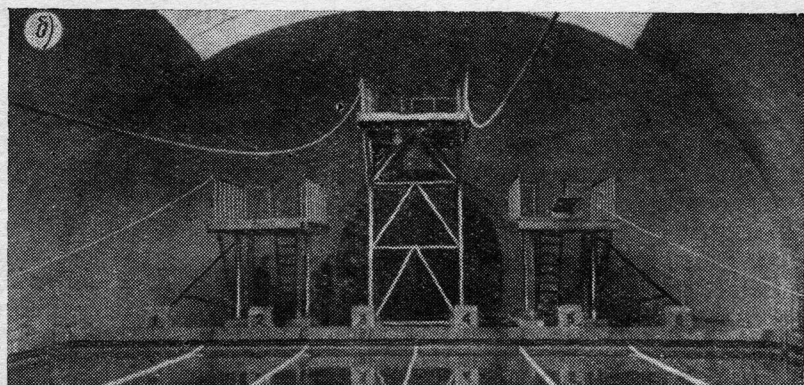
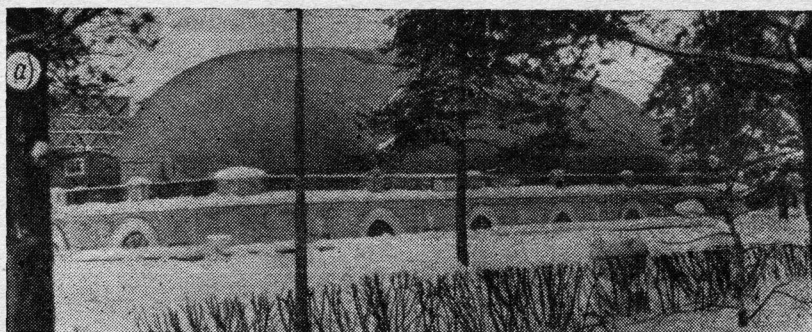


Рис. 7.7. Воздухопорная оболочка над плавательным бассейном
а — общий вид; б — вид изнутри; в — ледяная корка на внутренней поверхности оболочки

отопительные установки большой теплопроизводительности обеспечивают создание необходимых температурных и влажностных условий даже под неутепленными однослойными оболочками;

введение в конструкцию оболочки теплоизолирующих слоев играет вспомогательную роль и может применяться в целях снижения теплотрат на отопление;

для снижения температуры воздуха под оболочкой в результате инсоляции в летнее время могут использоваться светлые наружные покрытия оболочек, дополнительная теплоизоляция и интенсивное вентилирование;

в целях улучшения влажностных условий под оболочкой рекомендуется устройство паронепроницаемого пола, особенно при установке сооружений на переувлажненных грунтах.

28. ОТОПИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Учитывая необходимость постоянной подачи под оболочку наружного воздуха, следует считать наиболее пригодными для отопления воздухоопорных сооружений калориферы. Этим обеспечивается возможность внесения в сооружения с нагнетаемым в них воздухом больших количеств тепла в короткое время.

Калориферы для отопления ПС должны:

обладать достаточной теплопроизводительностью;

иметь производительность по воздуху и напор, гарантирующие создание в сооружении заданного эксплуатационного давления;

быть экономичными, работать на дешевых видах и сортах топлива;

иметь небольшие габариты и вес;

подавать в сооружение чистый воздух, не загрязненный продуктами сгорания топлива;

быть простыми по конструкции, надежными и безопасными в эксплуатации.

Значимость перечисленных требований в разных условиях может быть различной. Например, к калориферам, устанавливаемым внутри сооружений и не являющимся воздухонагнательными агрегатами, требования по производительности и напору могут не предъявляться. В то же время для калориферов, выполняющих одновременно функции эксплуатационных вентиляторных установок, это требование будет обязательным.

Для калориферов, обеспечивающих стационарные сооружения, не имеют большого значения вес и габариты, но на первый план выдвигается требование максимальной экономичности. Поэтому они должны работать на таких дешевых видах топлива, как газ, уголь и торф, или использовать тепло центральных отопительных систем. Калориферы, предназначенные для транспортбельных сооружений, особенно в отдаленных, труднодо-

ступных районах, должны иметь минимальный вес и габариты и работать на высококалорийном, хотя и более дорогим жидком топливе.

В ряде случаев оказываются приемлемыми калориферы, выпускаемые промышленностью для обычных сооружений. В других случаях требуется разработка специальных отопительных установок.

Основными конструктивными элементами калорифера являются теплообменный блок и вентилятор, обеспечивающий принудительную продувку через блок нагреваемого воздуха. В зависимости от источника тепла, используемого для нагрева воздуха в теплообменнике, различают калориферы следующих типов: паровые (водяные), электрические и огневые.

В паровых (водяных) калориферах источником тепла служит пар (горячая вода), поступающий из центральной системы или отдельного котла. Такие калориферы применяют преимущественно при стационарной установке сооружений. Они небольших габаритов, экономичны, но недостаточно подвижны. Технические данные паровых (водяных) калориферов приведены в справочной литературе [4].

Электрические калориферы невелики по габаритам и весу, просты и удобны в эксплуатации. Однако возможность их применения в ПС ограничена из-за большой потребляемой мощности.

Расход электроэнергии электрокалориферами определяется соотношением

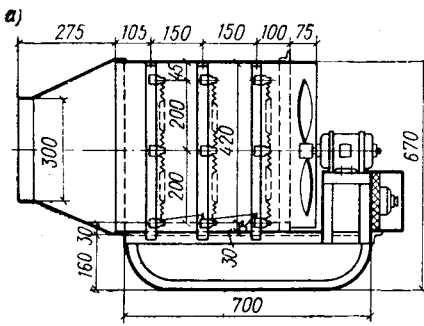
$$N = \frac{Q}{0,86} \text{ квт} \cdot \text{ч},$$

где Q — требуемая теплопроизводительность в тыс. ккал/ч.

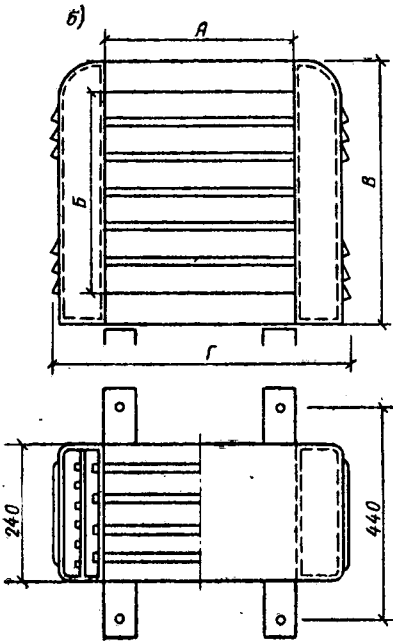
Мощность электрокалориферов для отопления сооружения средних размеров достигает 300—400 квт. Поэтому их применение может быть целесообразным лишь при стационарной установке сооружения и при наличии в непосредственной близости источников электроэнергии достаточной мощности.

Теплообменный блок электрокалориферов представляет собой кожух с открытыми или закрытыми электронагревателями. Открытые электронагреватели — это чаще всего спирали из нихромовой проволоки диаметром 1—3 мм. Срок их службы велик. Тем не менее они достаточно распространены в конструкциях воздухонагревателей, изготавливаемых строительными предприятиями для собственных нужд (рис. 7.8, а). Промышленностью также выпускаются калориферы с открытыми проволочными нагревателями, не укомплектованные вентиляторам, в двух исполнениях: в горизонтальном (08Г, 16Г, 24Г, 30Г, 36Г, 48Г) и вертикальном (08В, 16В, 24В, 30В, 36В, 48В, 60В, 75В и 90В) [4]. Мощность калориферов соответственно равна 8—48 и 8—90 квт.

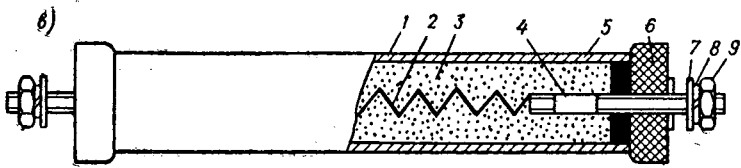
Рис. 7.8. Электрокалориферы



a — с открытыми спиралями конструкции Куйбышевгидростроя; *б* — с набором закрытых трубчатых нагревателей; *в* — прямой трубчатый нагреватель; 1 — корпус; 2 — нихромовая спираль; 3 — наполнитель (окись магния); 4 — шпилька; 5 — герметизирующая заливка; 6 — изоляционная втулка; 7 — шайба; 8 — пружинная шайба; 9 — гайка



Мощность калорифера кВт	Размеры			
	А	Б	В	Г
25	360	410	617	630
40	480	560	767	750
60	600	710	917	870
100	720	860	1067	990
160	960	1160	1367	1230
250	1080	1460	1667	1350



Закрытые электронагреватели — это прямые или изогнутые U-образные трубки диаметром 12 мм из меди, нержавеющей или обычной стали, внутри которых проложены спирали из нихромовой проволоки, защищенные от окисления порошком окиси магния, заполняющим весь внутренний объем трубки

Характеристики электрокалориферов [4, 5]

Наименование, марка	Мощность в <i>квт</i>	Теплопроиз- водитель- ность в тыс. <i>ккал/ч</i>	Габариты в <i>мм</i>	Вес в <i>кгс</i>	Расчетная производи- тельность вентилятора в <i>м³/ч</i>	Напор за ка- лорифером в <i>мм вод. ст.</i>	Количе- ство на- гревате- лей	Темпера- турный перепад в <i>град</i>
---------------------	--------------------------	---	----------------------	---------------------	--	---	--	--

1. С закрытыми трубчатыми нагревателями (поставляются без вентиляторов)

СФО-25/1-Т	25	21,5	480×630×657	76	2 212	Определя- ется типом вентилятора	40	48
СФО-40/1-Т	40	34,5	480×750×807	100	3 375		56	43
СФО-60/1-Т	60	51,5	480×870×957	134	5 130		68	42
СФО-100/1-Т	100	86	480×990×1107	197	9 000		84	46
СФО-160/1-Т	160	137	480×1230×1407	312	12 000		116	47
СФО-250/1-Т	250	215	480×1350×1707	421	18 710		144	47

2. С открытыми проволочными нагревателями

Электровоздуонагреватель Полякова	9,8—27,6	8,5—23,5	1150×690×870	95	2 200	15	12	40
Электровоздуонагреватели Куйбышевгидростроя:								
тип I	10	8,6	850×360×410	40	400	5	18	90—110
тип II	28	24	1170×500×650	63	1 160	5	18	90—110
тип III	52	45	1200×800×750	110	1 800	5	18	90—110

(рис. 7.8, в). Срок службы трубчатых электронагревателей во много раз выше, чем открытых.

Трубчатые электронагреватели изготавливаются серийно предприятиями промышленности (например, заводом «Миасс-электроаппарат»). Ими комплектуют электрокалориферы различных размеров и теплопроизводительности (рис. 7.8, б). Технические характеристики некоторых электрических калориферов приведены в табл. 42.

Электрокалориферы СФО поставляются в комплекте с аппаратурой для управления и регулировки, но без вентиляторов.

В огневых калориферах источником тепла, передаваемого в теплообменнике воздуху, являются горячие газы от сгорания твердого или жидкого топлива. Огневой калорифер представляет собой, как правило, полностью скомплектованный агрегат, конструкция которого определяется видом используемого топлива.

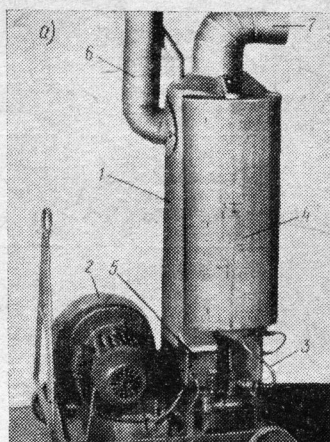
Калориферы, рассчитанные на сжигание твердого топлива (уголь, дрова, торф), наиболее просты по конструкции, но имеют сравнительно небольшую теплопроизводительность, неудобны в эксплуатации и не поддаются автоматизации управления. Поэтому для отопления ПС они мало пригодны и применение их возможно в отдельных случаях, оправданных местными условиями. Попытка использовать для отопления ПС объемом 3000 м³ дровяной калорифер теплопроизводительностью 20—30 тыс. ккал/ч положительных результатов не дала.

Огневые калориферы, работающие на жидком топливе, более сложны по устройству. Их основные элементы: корпус (рама); камера сгорания; форсуночный блок с форсункой, запальными электродами (свечой), повышающим трансформатором и вентилятором; теплообменник; главный вентилятор с приводом; топливный бак; система подачи и подогрева горючего; дымоотводная труба; выходные (раздаточные) патрубки горячего воздуха; система автоматического контроля и управления; пускорегулирующая и защитная аппаратура.

Система автоматического контроля и управления обеспечивает включение подачи горючего в форсунку только после подогрева его до установленной температуры и при нормальной работе всех систем калорифера. В случае какой-либо неисправности, например исчезновения пламени, недостаточном давлении горючего и т. п., автоматически закрывается клапан подачи топлива и выключаются топливный насос и система зажигания. В некоторых конструкциях калориферов системы автоматического управления обеспечивают подачу в сооружение воздуха, нагретого до заданной температуры, независимо от температуры окружающей среды. Оборудование отопительных установок системами автоматического управления повышает их надежность и безопасность, устраняет необходимость в постоянном наблюдении, упрощает и удешевляет эксплуатацию.

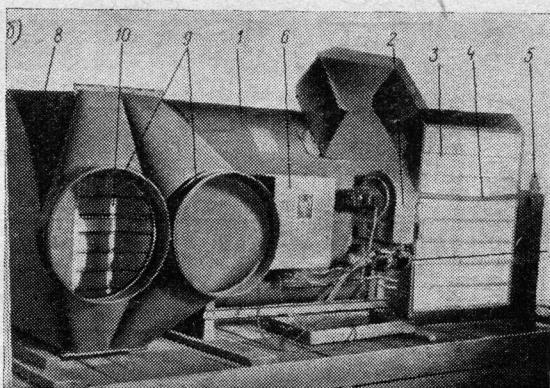
Рис. 7.9. Огневые калориферы

a — воздухоподогреватель ОП-7; 1 — корпус; 2 — вентилятор; 3 — топливопровод; 4 — бак; 5 — кнопка включения; 6 — дымоотводная труба; 7 — выходной патрубок горячего воздуха; 8 — термоблок «Вансон» ТВ-325; 1 — корпус; 2 — форсуночный агрегат; 3 — воздухозаборник главного вентилятора; 4 — топливопровод; 5 — бак; 6 — шкаф управления; 7 — термостаты системы автоматического контроля; 8 — дымоотводная труба; 9 — выходные патрубки горячего воздуха; 10 — многостворчатый обратный клапан



Огневые калориферы, работающие на жидком топливе, в наибольшей степени отвечают перечисленным требованиям. При сравнительно небольших габаритах и весе они имеют высокую теплопроизводительность, достигающую 500 — 600 тыс.

ккал/ч. Потребляя относительно мало электроэнергии (10 — 15 кВт), расходуемой в основном на привод воздуходувки и форсуночного вентилятора, жидкотопливные калориферы могут обеспечиваться электропитанием от передвижных электростанций или местных маломощных электросетей. Поэтому они обладают высокой автономностью, транспортабельностью и незаменимы в условиях неосвоенных или отдаленных районов.



Для ПС можно применять обычные серийные огневые калориферы, выпускаемые промышленностью для различных целей. Наиболее приемлемыми могут считаться теплогенераторы Полоцкого авторемонтного (ТГ-1, ТГ-2,5) и Новоград-Волынского (ТГ-75, ТГ-150 и др.) заводов. В последние годы НИИ сантехники по техническим заданиям, составленным авторами, разработал три типа отопительных установок специально для ПС. Для небольших сооружений могут найти применение воздухоподогреватели ОП-7 НИИ Мосстроя (рис. 7.9, а). Из зарубежных отопительных агрегатов хорошие технические и эксплуатационные характеристики имеют термоблоки «Вансон» (рис. 7.9, б).

В отдельных случаях используются для отопления ПС моторные подогреватели (например, МПМ-85). Однако это нежелательно, так как их конструкция не рассчитана на такое при-

Характеристики огневых калориферов

Название, марка	Теплопроизводительность в тыс. ккал/ч	Габариты в м	Вес в кгс	Характеристики вентилятора				Применяемое топливо	Расход топлива на нагрев в кгс/ч	Температура нагретого воздуха в град
				тип	мощность привода	производительность в м ³ /ч	напор в кгс/м ²			
<i>Отечественные</i>										
Воздухонагреватель ОП-7 . . .	40	0,79×0,6×1,47	65	Ц.-б.	1,7 квт	1 600	40	Дизельное	4,5	80
Автомобильный отопитель ОВ-65	4,8	0,7×0,3×0,3	19	Осевой	0,1 квт (12 в)	150	5	Дизельное, керосин	1	85
Моторные подогреватели:										
МП-44БМ . . .	94	1,7×1,3×1,2	315	»	5,5 л. с.	3 780	5	Керосин, бензин	11	120
МПМ-85 . . .	88,5	2,1×1,3×1,3	340	»	1,5 квт	2 000	5	Бензин	12	130
МП-300 . . .	350	5,7×2,3×2,7 (на ГАЗ-51)	5300	Ц.-б.	70 л. с.	16 000	350	Керосин	46	130
Теплогенераторы:										
ТГ-1	100	1,83×1,04×0,9	280	Осевой	1,5 квт	5 700	18	Керосин	12	59
ТГ-2,5	250	2,83×1,57×1,2	580	»	3 квт	15 000	15	»	30	52
ТГ-150	85—170	2,35×0,92×1,8	920	Ц.-б.	4,5 квт	8 100	35	»	9—18,5	34—67
Огневоздушный калорифер КЭУ МО	20—30	1,38×1,8×0,9	340	Осевой	0,4 квт	1 800	15	Дрова (уголь, торф)	17	50—60

Название, марка	Теплопроизводительность в тыс. ккал/ч	Габариты в м	Вес в кгс	Характеристики вентилятора				Применяемое топливо	Расход топлива на нагрев в кгс/ч	Температура нагретого воздуха в град
				тип	мощность привода	производительность в м ³ /ч	напор в кгс/м ²			

Иностранные

Термоблоки «Вансон»:											
ТВ-525	525	5,4×2,5×1,9	3525	Ц.-б.	9,6 квт	25 000	25	Мазут, дизельное	ди-	61	90
ТВ-425	425	5×2,5×1,9	3225	»	9,2 квт	25 000	25	То же		49	90
ТВ-325	325	5×2,4×1,7	1485	»	5,5 квт	17 700	25	»		37	80—90
ТВ-225	225	4×2,4×1,7	1050	»	5,5 квт	17 700	25	»		26	80—90
ТВ-125	125	3,5×1,5×1,1		»	3 квт	7 600	20	»		15	80—90
ТВ-85	85	3×1,5×1,1	405	»	3 квт	7 600	20	»		10	80—90
Калориферы «Диемо»:											
ЕС-220	55	1,55×0,95×0,65	94	Осевой	0,4 квт	3 500	8	»		6,2	70—80
400А	100	1,55×1,15×0,82	191	»	0,6 квт	5 000	8	»		10	90—100
НР-400А	100	2,1×1,2×0,92	291	»	1,65 квт	7 600	15	»		11	60

менение и не гарантирует полной чистоты подаваемого нагретого воздуха.

Технические данные огневых калориферов приведены в табл. 43.

Отопление воздухоопорных сооружений с помощью калориферов всех типов может производиться по двум схемам:

1) напорной с подогревом нагнетаемого в сооружение наружного воздуха;

2) рециркуляционной, с подогревом воздуха, забираемого из внутреннего объема сооружения.

Напорная схема более приемлема, так как обеспечивает подачу в сооружение теплого воздуха и исключает холодные сквозняки. Однако рециркуляционная схема более эффективна, поскольку обеспечивает нагрев воздуха до более высокой температуры. Поэтому нередко применяют совмещенную схему, когда напорные калориферы нагнетают теплый воздух в сооружение в количестве и под напором, необходимыми для обеспечения эксплуатационной устойчивости сооружения, а дополнительные рециркуляционные калориферы обеспечивают доведение внутренней температуры в сооружении до расчетной.

Если при значительном возрастании внешних нагрузок (сильный ветер, снегопад) и необходимости повышения давления воздуха в сооружении приходится предусматривать подключение параллельно с напорными калориферами обычных вентиляторов, то холодный воздух от них подается в минимальных объемах с отклонением потока от зоны пребывания людей.

Огневые калориферы размещают, как правило, вне сооружения. При работе их по схеме рециркуляции забор воздуха из объема сооружения производится по специальным воздуховодам. Установка калориферов внутри сооружения допускается в отдельных случаях при надежном отводе продуктов сгорания и осуществлении необходимых конструктивных мер по обеспечению пожарной безопасности (устройство поддонов, предохранительных каркасов над калориферами и др.).

Калориферы других типов можно устанавливать как внутри, так и вне сооружений.

29. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Уравнение теплового баланса для воздухоопорного сооружения в установившемся режиме может быть записано в виде:

$$Q_{\text{нк}} + Q_{\text{вк}} - Q_y = Q_{\text{об}} + Q_{\text{гр}} + Q_{\text{осн}}, \quad (7.1)$$

где $Q_{\text{нк}}$ и $Q_{\text{вк}}$ — теплопроизводительность наружной и внутренней отопительных установок (калориферов);

Q_y — количество тепла, теряемое сооружением за счет утечки воздуха;

$Q_{\text{об}}$ и $Q_{\text{гр}}$ — теплотери через оболочку и через грунт;

$Q_{\text{осн}}$ — теплопоглощение грунтовым основанием.

Входящие в это уравнение члены могут быть представлены на основании известных физических зависимостей следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} Q_y &= 0,24 G_y (t_v - t_n) \text{ ккал/ч;} \\ Q_{об} &= k F_{об} (t_v - t_n) \text{ ккал/ч,} \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

где 0,24 — удельная теплоемкость воздуха в ккал/кгс·град;

G_y — весовая утечка воздуха из сооружения в кгс/ч;

t_v и t_n — температура воздуха внутри и снаружи сооружения;

k — коэффициент теплопередачи оболочки в ккал/м²·ч·град;

$F_{об}$ — поверхность оболочки в м².

Теплопередача через грунт под оболочку в наиболее неблагоприятных условиях, т. е. при отсутствии снежного покрова, определяется интегрированием дифференциального уравнения:

$$dQ_{гр} = \frac{(t_v - t_n) dx}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{x}{\lambda_{гр}}}, \quad (7.3)$$

которое выражает количество тепла, передающееся с элементарной полоски грунта площадью $1 dx$, находящейся на расстоянии x от опорного контура, и где α_v и α_n — коэффициенты теплоперевода у внутренней и наружной поверхностей грунта, а $\lambda_{гр}$ — коэффициент теплопроводности грунта.

Таким образом, при обычно принимаемых значениях $\alpha_v = 7,5$; $\alpha_n = 20$ ккал/м²·ч·град теплопередача через единицу длины опорного контура составляет

$$Q_{гр/1м} = \int_0^{b/2} \frac{(t_v - t_n) dx}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{1}{\alpha_n} + \frac{x}{\lambda_{гр}}} = \lambda_{гр} (t_v - t_n) \ln \left(1 + \frac{b}{0,366 \lambda_{гр}} \right),$$

и через весь контур сооружения

$$Q_{гр} = \lambda_{гр} P_c (t_v - t_n) \ln \left(1 + \frac{b}{0,366 \lambda_{гр}} \right), \quad (7.4)$$

где b — ширина сооружения в м;

P_c — периметр сооружения в м.

Расход тепла на оттаивание и нагрев грунтового основания $Q_{осн}$ в пределах сооружения выражается зависимостью

$$Q_{осн} = q_{осн} F_{осн} (t_v - t_n), \quad (7.5)$$

где $q_{осн}$ — удельный расход тепла на оттаивание и нагрев грунта в ккал/м²·ч·град;

$F_{осн}$ — площадь грунтового основания в м².

Подстановка выражений (7.2), (7.4) и (7.5) в (7.1) дает следующее уравнение:

$$Q_{нк} + Q_{вк} = (0,24 G_y + \Phi) (t_v - t_i), \quad (7.6)$$

где Φ — функция параметров сооружения,

$$\Phi = kF_{об} + \lambda_{гр} P_c \ln \left(1 + \frac{b}{0,366 \lambda_{гр}} \right) + q_{осн} F_{осн}; \quad (7.7)$$

откуда

$$t_v - t_n = \frac{Q_{нк} + Q_{вк}}{0,24G_y + \Phi}. \quad (7.8)$$

В установившемся режиме эксплуатации утечка воздуха G_y из воздухоопорного сооружения равна его притоку $G_{пр}$, определяемому производительностью вентилятора. Тогда в окончатель-

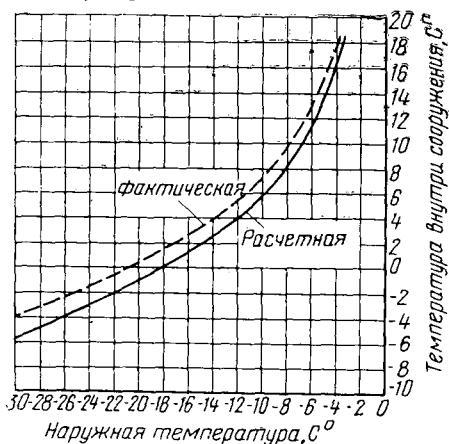


Рис. 7.10. Сравнение расчетных и фактических температур воздуха под обложкой при отоплении сооружения размером $42 \times 20 \times 9$ м

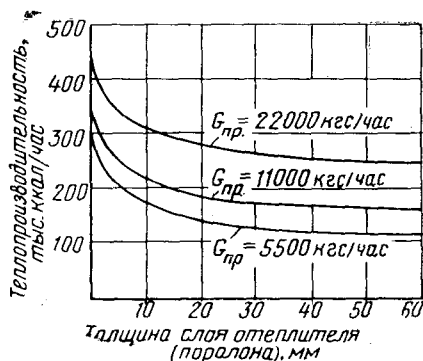


Рис. 7.11. Влияние толщины утеплителя и количества нагнетаемого воздуха на требуемую теплопроизводительность отопительных установок (сооружение объема 5000 м^3 , заданный перепад 33° С)

ном виде зависимость максимальной температуры воздуха в сооружении от параметров последнего и характеристик отопительной установки выражается формулой

$$t_{v, \max} = t_n + \frac{Q_{нк} + Q_{вк}}{0,24G_{пр} + \Phi}. \quad (7.9)$$

Формула обеспечивает получение расчетных данных, хорошо согласующихся с фактическими. На рис. 7.10 представлены графики расчетных и измеренных температур в сооружении размером $42 \times 20 \times 9$ м при различных наружных температурах. Некоторое превышение (на $1-2^\circ \text{ С}$) фактических величин температуры воздуха над расчетными объясняется влиянием солнечной радиации.

Повышение температуры воздуха в сооружении t_v во времени τ определяется выражением, полученным решением уравнения, аналогичного (7.6), с учетом количества воздуха G_c в сооружении

$$t_v = \frac{B}{A} + e^{-A\tau} \left(t_0 - \frac{B}{A} \right), \quad (7.10)$$

где t_0 — начальная температура в сооружении;

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{\Phi + 0,24G_{\text{пр}}}{0,24G_c}; \\ B &= \frac{Q_{\text{нк}} + Q_{\text{вк}} + t_{\text{н}}(\Phi + 0,24G_{\text{пр}})}{0,24G_c}. \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

Формулу (7.8) можно использовать для определения требуемой теплопроизводительности калориферов или других отопительных установок, обеспечивающих достижение заданного температурного перепада $\Delta t = t_{\text{в}} - t_{\text{н}}$:

$$Q_{\text{нк}} + Q_{\text{вк}} = \Delta t (0,24G_{\text{пр}} + \Phi). \quad (7.12)$$

Из функции параметров Φ можно выделить член, зависящий от характеристики ограждения:

$$\Phi = kF_{\text{об}} + \Phi_1,$$

тогда

$$Q_{\text{нк}} + Q_{\text{вк}} = \Delta t (0,24G_{\text{пр}} + kF_{\text{об}} + \Phi_1). \quad (7.13)$$

Формула в такой записи позволяет непосредственно проанализировать влияние теплоизоляционных свойств оболочки на необходимую мощность отопительных агрегатов для сооружения с заданными другими характеристиками.

Пусть, например, к оболочке, в целях улучшения ее теплотехнических качеств, подклеивается слой утеплителя — поролон. График на рис. 7.11, построенный для сооружений размером $42 \times 20 \times 9$ м при $G_{\text{пр}} = 22\,000$ кгс/ч и температурном перепаде 33°C (расчетные температуры: наружная — 15°C , внутренняя — 18°C), показывает, что слой поролон толщиной 3 мм снижает потребляемую мощность ОУ с 440 до 365 тыс. ккал/ч, т. е. на 17%, а толщиной 5 мм — до 340 тыс. ккал/ч, т. е. на 23%. При дальнейшем увеличении толщины утеплителя степень снижения теплопроизводительности ОУ уменьшается. Очень толстый слой утеплителя — 50 мм и более позволяет снизить мощность ОУ примерно на 45%, что для данного сооружения следует считать предельным. Это объясняется наличием теплопотерь через основание, относительное значение которых с уменьшением теплопередачи через оболочку возрастает.

Большое влияние на температурный режим воздухоопорных сооружений оказывает постоянная подача во внутренний объем холодного наружного воздуха. На нагрев этого воздуха расходуется значительная часть тепловой энергии отопительных установок. Из графика на рис. 7.11 видно, в какой степени изменение воздухоподачи в сооружение отражается на необходимой мощности отопительных установок. Например, если для рассмотренных выше условий уменьшить количество нагнетаемого воздуха с 22 до 5,5 тыс. кгс/ч, то для отопления сооружения будет достаточно установок теплопроизводительностью 310 тыс. ккал/ч вместо 440 тыс. ккал/ч, т. е. на 30% меньше. Уменьшение возду-

холодачи по своему эффекту может быть приравнено к повышению теплоизолирующих свойств оболочки. График показывает, что уменьшение количества подаваемого в сооружение наружного воздуха в 2 раза (до 11 000 кгс/ч) эквивалентно введению в конструкцию оболочки слоя поролона толщиной 4 мм, а в 4 раза (до 5500 кгс/ч) — слоя толщиной 11 мм.

Как показано в главе 6, уменьшить необходимую производительность вентиляторных установок без снижения давления в сооружении можно путем улучшения герметизации. Таким об-

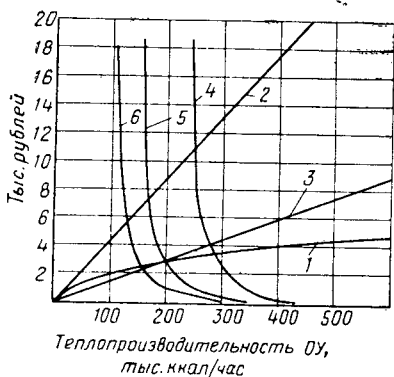


Рис. 7.12. Стоимость отопления и утепления сооружения объемом 5000 м³ при перепаде температур 33° С

1 — стоимость огневых calorиферов; 2 — стоимость горючего за отопительный период (186 дней) при круглосуточной работе ОУ; 3 — то же, при работе ОУ по 8 ч в сутки; 4, 5 и 6 — стоимость утепления (поролон) при воздухоподаче 22 000, 11 000 и 5500 кгс/ч

разом, мероприятия по устранению неплотностей во входных устройствах, своевременному ремонту оболочки, тщательному уплотнению опорного контура и т. п. должны одновременно рассматриваться и как немаловажные факторы обеспечения в сооружении заданного температурного режима.

Сочетание мероприятий по уменьшению воздухоподачи в сооружение и его утеплению позволяет еще больше снизить потребляемую мощность отопительных установок. Например, введение в конструкцию оболочки в качестве утеплителя 5-мм поролон и уменьшение количества нагнетаемого в сооружение воздуха до 5500 кгс/ч дают возможность ограничиться для отопления сооружения при тех же заданных условиях установками вдвое меньшей теплопроизводительности.

Целесообразное соотношение между мероприятиями по отоплению и утеплению сооружения может быть установлено путем экономического анализа.

На рис. 7.12 представлен график затрат на отопление и утепление сооружения объемом 5000 м³, расположенного в средней климатической полосе.

Стоимость огневого calorифера C зависит от теплопроизводительности Q и при серийном производстве приблизительно может определяться по формуле

$$C = 200 \sqrt{Q} \text{ руб.} \quad (7.14)$$

Для рассматриваемых условий она равна 4200 руб. Расход жидкого топлива на отопление при круглосуточной работе за сезон составляет примерно 280 т, а стоимость его — 19 тыс. руб. Утепление оболочки поролоном толщиной 5 мм обходится в 1500 руб. При этом стоимость калорифера уменьшается на 400 руб., а горючего на 4000 руб. Таким образом, затраты на утепление оболочки окупаются уже в течение первой трети отопительного сезона. Применение поролоновой подкладки толщиной 10 мм дает экономию расходов на отопление сооружения до 5600 руб. за год.

Приведенные цифры свидетельствуют как будто в пользу утепления. Однако введение утепляющего слоя усложняет конструкцию оболочки, повышает трудоемкость изготовления и монтажа сооружений и, что особенно существенно, многократно увеличивает его транспортный объем. Уже при толщине поролона 5 мм объем сложенной оболочки увеличивается в 8 раз, достигая 80 м³. При толщине 10 мм объем возрастает до 150 м³. Перевозка оболочек, занимающих такие объемы, значительно затрудняется и удорожается. Поэтому утепление оболочек, например поролоном, не всегда может оказаться выгодным.

Теплотехнический расчет воздухоопорных сооружений производится в следующем порядке.

По заданным параметрам сооружения, климатическим и грунтовым условиям его установки вычисляется по формуле (7.7) функция Φ .

Коэффициенты теплопередачи k для некоторых конструкций оболочек приведены в табл. 44.

Коэффициент теплопроводности грунтового основания находится по таблицам теплотехнических показателей в зависимости от вида и состояния грунта. Для ориентировочных расчетов при мерзлых грунтах можно принимать

$$\lambda_{гр} = 1,5 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Удельный расход тепла на оттаивание и нагрев грунтового основания $q_{осн}$ зависит от вида и состояния грунта, толщины промерзшего слоя, температуры грунта и воздуха в сооружении. Для средних грунтов Московской области при максимальном промерзании значения удельного расхода с достаточной точностью могут определяться по формуле¹

$$q_{осн} = 1 + 0,028 (t_{в} - t_{н}) \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}. \quad (7.15)$$

Вес воздуха в объеме сооружения определяется с учетом температуры. В целях упрощения расчета объемный вес воздуха можно брать при наружной температуре, а последующее его уменьшение не принимать во внимание. Погрешность при этом

¹ Формула получена путем обработки данных о максимальных теплопотерях на оттаивание и нагрев грунта, вычисленных для ряда заданных температур. Вычисления произведены инж. М. В. Мокшиной.

Коэффициенты теплопередачи для некоторых конструкций воздухоопорных оболочек

Конструкция оболочки	k , ккал/м ² ·ч·град	Вес в кг/м ²	Объем в 1 м ² , 1 м ³
Однослойная из капроновой ткани с поливинилхлоридным покрытием	5,3	0,6	0,0007
Однослойная из хлопчатобумажной ткани с резиновым покрытием	5,2	0,3	0,0004
То же, с поролоновой подкладкой толщиной в мм:			
5	3,1	0,55	0,0054
10	2,1	0,8	0,0104
Однослойная из капроновой ткани с поливинилхлоридным покрытием и поролоновой подкладкой толщиной в мм:			
5	2,81	0,95	0,0057
10	1,92	1,1	0,0107
20	1,17	1,6	0,0207
50	0,54	3,1	0,0507
Двухслойная из двух слоев прорезиненной капроновой ткани с воздушной прослойкой толщиной 50 см	2,6	1,2	0,0014

незначительна и ведет к некоторому завышению мощности калорифера.

Общая теплопроизводительность калориферов, необходимая для обеспечения заданного температурного перепада, вычисляется по формуле (7.12).

Производительность наружного напорного калорифера по воздуху принимается в соответствии с его техническими характеристиками. В ориентировочных расчетах можно принимать $G_{пр} = (3 \div 4) G_c$. В случае необходимости более точного расчета $G_{пр}$ пользуются формулой (6.4) для нахождения $Q_0 = G_{пр}$.

Вероятность выпадения конденсата на внутренней поверхности оболочки оценивается путем сопоставления температуры поверхности с точкой росы при данной абсолютной влажности в сооружении. Температура внутренней поверхности оболочки, принимаемой однородной по толщине, τ_B может быть определена по известной формуле (например, из [1]), которую удобнее представить в виде

$$\tau_B = t_B + \Delta t \left(1 - \frac{k}{\alpha_B} \right),$$

где $\Delta t = t_{\text{в}} - t_{\text{н}}$ — температурный перепад;
 k — коэффициент теплопередачи оболочки;
 $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности.

Для вычисления точки росы, т. е. температуры $t_{\text{р}}$, при которой водяной пар, содержащийся в воздухе, достигает состояния насыщения при неизменном давлении, можно преобразовать формулу Магнуса [3] в следующее выражение:

$$t_{\text{р}} = \frac{235 (\lg e - 0,785)}{\lg e + 6,665}, \quad (7.17)$$

где e — абсолютная влажность воздуха в *мб*.

Условие, при котором конденсат не образуется, выражается неравенством:

$$\tau_{\text{в}} > t_{\text{р}}. \quad (7.18)$$

С учетом этого условия из (7.13) могут быть найдены требуемые температурный перепад Δt и теплоизоляционная характеристика оболочки k , обеспечивающие поддержание достаточной температуры внутренней поверхности.

Проверочный расчет на образование конденсата при необходимости производится на основании задаваемых расчетных температур внутри и снаружи сооружения и влажностного режима. Заданная относительная влажность и внутренняя температура в сооружении позволяют определить допустимое значение абсолютной влажности e и по формуле (7.17) точку росы.

В некоторых случаях, когда по условиям влажностного режима необходимо исключить образование конденсата на оболочке, условие (7.18) может явиться определяющим для расчета отопления и тепления сооружений.

30. РАСЧЕТ НАГРЕВАНИЯ ВОЗДУХООПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ СОЛНЦЕМ

Нагревание воздуха под оболочкой за счет инсоляции обусловлено поступлением тепла с лучами, прошедшими сквозь материал оболочки, и теплоизлучением внутренней поверхности нагретой солнцем оболочки. Уравнение теплового баланса в этом случае имеет вид:

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{п}} + Q_{\text{ив}}, \quad (7.19)$$

где $Q_{\text{в}}$ — количество тепла, расходуемое на нагрев воздуха в объеме сооружения;

$Q_{\text{п}}$ — количество тепла, поступившее в сооружение с лучами, пропущенными материалом оболочки;

$Q_{\text{ив}}$ — количество тепла, излученное оболочкой внутрь сооружения.

Излученное внутрь количество тепла $Q_{\text{ив}}$ представляет собой разность количеств тепла, поглощенного оболочкой при воздей-

ствии солнечной радиации Q_p и излученного оболочкой во внешнее пространство $Q_{ин}$:

$$Q_{ив} = Q_p - Q_{ин},$$

тогда

$$Q_в = Q_п + Q_p - Q_{ин}. \quad (7.20)$$

Сумма $Q_п + Q_p$ представляет собой часть тепловой энергии солнечной радиации, воспринятую оболочкой, т. е. полную энергию за вычетом отраженной ее части. Можно считать, что эта сумма пропорциональна площади проекции освещенной солнцем поверхности сооружения:

$$Q_п + Q_p = qF_{пр}(\eta + \epsilon_n), \quad (7.21)$$

где Q_p — интенсивность солнечной радиации в $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$;
 $F_{пр}$ — площадь проекции сооружения на плоскость, перпендикулярную солнечным лучам, в м^2 ;
 η — коэффициент пропускания материала оболочки;
 ϵ_n — коэффициент поглощения (степень черноты) наружной поверхности оболочки.

Теплоизлучение оболочки сооружения во внешнее пространство определяется выражением:

$$Q_{ин} = \epsilon_n c_0 F_{пов} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ккал}/\text{ч}, \quad (7.22)$$

где c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $4,9 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$;

$F_{пов}$ — площадь поверхности оболочки в м^2 ;

T_1 — температура наружной поверхности оболочки в $^\circ\text{К}$;

T_2 — средняя температура внешнего пространства в $^\circ\text{К}$.

Ввиду небольшой толщины материала оболочки температура ее наружной и внутренней поверхностей может считаться одинаковой.

Для отыскания этой температуры примем следующие допущения:

в установившемся режиме все количество тепла солнечной радиации, поглощенное данным участком поверхности оболочки, отдается путем лучистого теплообмена внешнему пространству и внутрь сооружения;

доля конвективного теплообмена при малых скоростях естественного движения воздуха вблизи оболочки пренебрежимо мала.

С учетом этих допущений уравнение теплового баланса для элементарной площадки dF запишется в виде

$$dQ_p = dQ_{ин} + dQ_{ив}, \quad (7.23)$$

где dQ_p — количество тепла, поглощенное элементарной площадкой;

$dQ_{\text{ин}}$ и $dQ_{\text{ив}}$ — количества тепла, излученные элементарной площадкой во внешнее пространство и внутрь сооружения.

Подставив в (7.23) соответствующие выражения (7.24) и (7.22), получим следующее выражение температуры поверхности оболочки:

$$\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 = \frac{q\varepsilon_{\text{н}}}{(\varepsilon_{\text{н}} + \varepsilon_{\text{в}})c_0} \cdot \frac{dF_{\text{пр}}}{dF_{\text{пов}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{н}} + \varepsilon_{\text{в}}} \left[\varepsilon_{\text{н}} \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 + \varepsilon_{\text{в}} \left(\frac{T_{\text{в}}}{100}\right)^4 \right], \quad (7.24)$$

где $\varepsilon_{\text{в}}$ — степень черноты внутренней поверхности сооружения; $T_{\text{в}}$ — температура воздуха в сооружении.

Полученная зависимость дает возможность составить уравнение вида (7.22) для элементарной площадки. После подстановки в него выражения T_1 из (7.24) и интегрирования по всей поверхности оболочки получим

$$Q_{\text{ин}} = \frac{q\varepsilon_{\text{н}}^2}{\varepsilon_{\text{н}} + \varepsilon_{\text{в}}} F_{\text{пр}} + \frac{\varepsilon_{\text{н}} \varepsilon_{\text{в}} c_0}{\varepsilon_{\text{н}} + \varepsilon_{\text{в}}} \left[\left(\frac{T_{\text{в}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] F_{\text{пов}}. \quad (7.25)$$

В установившемся режиме количество нагреваемого воздуха равно количеству воздуха, нагнетаемого в сооружение в единицу времени, т. е. весовой производительности вентиляторных установок $G_{\text{пр}}$. Тогда расход тепла на нагревание воздуха с учетом перехода на абсолютную шкалу температур записывается в виде

$$Q_{\text{в}} = 0,24G_{\text{пр}}(T_{\text{в}} - T_{\text{н}}), \quad (7.26)$$

где $T_{\text{н}}$ — температура наружного воздуха в °К.

Подстановка выражений (7.21), (7.25) и (7.26) в (7.20) дает после преобразований следующее простое алгебраическое уравнение

$$T_{\text{в}}^4 + cT_{\text{в}} + d = 0, \quad (7.27)$$

где

$$c = \frac{0,24G_{\text{пр}} \cdot 10^8}{B \cdot c_0 F_{\text{пов}}}; \quad (7.28)$$

$$d = -10^8 \left[\frac{0,24G_{\text{пр}} T_{\text{н}}}{B c_0 F_{\text{пов}}} + \frac{qF_{\text{пр}}(\eta + B)}{B c_0 F_{\text{пов}}} + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right], \quad (7.29)$$

причем

$$B = \frac{\varepsilon_{\text{н}} \varepsilon_{\text{в}}}{\varepsilon_{\text{н}} + \varepsilon_{\text{в}}}. \quad (7.30)$$

Величина B представляет собой обобщенную характеристику черноты наружной и внутренней поверхности оболочки и может быть условно названа показателем черноты оболочки.

Уравнение 4-й степени (7.27) решается по способу Феррари:

$$T_{\text{в}} = \sqrt{-\frac{\Phi}{2} + \sqrt{\Phi^2 - d}} - \sqrt{\frac{\Phi}{2}}, \quad (7.31)$$

где

$$\Phi = \sqrt[3]{\frac{c^2}{16} + \sqrt{\frac{c^4}{16^2} - \frac{d^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{c^2}{16} - \sqrt{\frac{c^4}{16^2} - \frac{d^3}{27}}} \quad (7.32)$$

функция расчетных параметров сооружения.

Температурный перепад, вызванный нагреванием сооружения солнцем, равен разности температур в сооружении и вне его

$$\Delta T = T_{\text{в}} - T_{\text{н}}. \quad (7.33)$$

Определение площадей проекции освещенной части сооружения и его поверхности обычно не представляет затруднений. Для сооружений полуцилиндрической формы со сферическими торцами

$$F_{\text{пр}} = R(1 + \sin \alpha) \left(\frac{1}{2} \pi R + l_{\text{ц}} \sqrt{\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \beta} \right); \quad (7.34)$$

$$F_{\text{пов}} = \pi R (2R + l_{\text{ц}}), \quad (7.35)$$

где R — радиус поперечного сечения сооружения;

$l_{\text{ц}}$ — длина цилиндрической части сооружения;

α — высота солнца;

β — угол между осью сооружения и направлением на солнце.

При вычислении площадей $F_{\text{пр}}$ и $F_{\text{пов}}$ необходимо учитывать наличие и расположение входных дверей и ворот шлюзов.

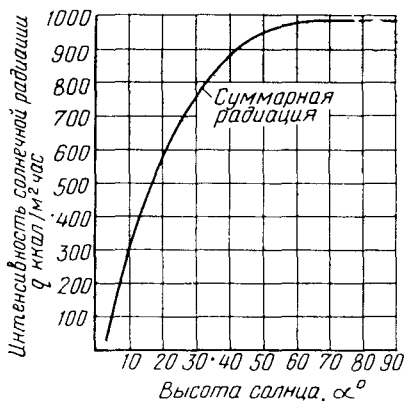


Рис. 7.13. Интенсивность суммарной солнечной радиации в зависимости от высоты солнца в полдень

Интенсивность суммарной солнечной радиации зависит от высоты солнца и состояния неба. Для условий, соответствующих максимальному нагреванию сооружений солнцем, она может быть выражена графиком (рис. 7.13), построенным по данным НИИ строительной техники [2].

Светотехнические показатели некоторых воздухопроницаемых тканей приведены в табл. 45.

Пример расчета. Определить максимальную величину нагрева солнцем полуцилиндрического воздухоопорного сооружения, установленного в

районе Москвы ($\alpha = 56^\circ$) и ориентированного осью в направлении северо-северо-запад ($\beta = 45^\circ$); $R = 10$ м; $l_{\text{ц}} = 22$ м. Воздухоподача в сооружение $G_{\text{пр}} = 19280$ кг/ч. Характеристики материала оболочки: $\epsilon_{\text{н}} = \epsilon_{\text{в}} = 0,48$; $\eta = 0$. Расчетные температуры: $T_{\text{н}} = 293^\circ$ К; $T_2 = 220^\circ$ К.

Светотехнические показатели некоторых воздухопроницаемых тканей

Материал	Характеристика поверхности		Коэффициент отражения поверхности в %		Коэффициент пропускания в %	Коэффициент поглощения поверхности в %	
	наружной	внутренней	наружной	внутренней		наружной	внутренней
Прорезиненная капроновая ткань № 860	Темно-зеленая резина	Светло-коричневый текстиль	16	24	0	84	76
То же, № 42	Зеленая резина	То же	24	25	0	76	75
То же, № 806	Салатная резина	»	37	32	0	63	68
Прорезиненная хлопчатобумажная ткань № 556	Алюминированная резина	Светло-серый текстиль	66	34	0	34	66
Прорезиненная капроновая ткань № 51-019-1	То же	Светло-коричневый текстиль	58	24	0	42	76
Прорезиненная хлопчатобумажная ткань № 565	Темно-зеленая резина	Серая резина	15	27	0	85	73
Найлоновая ткань с хайпалонным покрытием	Алюминированный хайпалон	Серый хайпалон	50	27	0	50	73
То же, с полиуретановым покрытием	Белый полиуретан	Белый полиуретан	62	65	3	35	32
То же	Желтый загрязненный полиуретан	Желтый загрязненный полиуретан	20	23	2	78	75
Найлоновая ткань с хайпалонным покрытием	Светло-серый хайпалон	Светло-серый хайпалон	45	40	0	55	60
То же, с поливинилхлоридным покрытием	Белый поливинилхлорид	Белый поливинилхлорид	57	56	5	38	39
То же	Черный поливинилхлорид	Черный поливинилхлорид	77	7	0	93	93
То же	»	Белый поливинилхлорид	40	40	3	57	57

1. Вычисляются площади $F_{пр}$ по (7.34) и $F_{пов}$ по (7.35):

$$F_{пр} = 10(1 + 0,829) \left(\frac{1}{2} \pi \cdot 10 + 22 \sqrt{0,687 \cdot 0,5 + 0,5} \right) = 657 \text{ м}^2;$$

$$F_{пов} = \pi \cdot 10 (2 \cdot 10 + 22) = 1319 \text{ м}^2.$$

2. По графику (рис. 7.13) находится максимальная интенсивность суммарной солнечной радиации при $\alpha = 56^\circ$:

$$q = 960 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}.$$

3. Вычисляются значения показателя черноты B и коэффициентов c и d по формулам (7.28) — (7.30):

$$B = \frac{0,42 \cdot 0,42}{0,42 + 0,42} = 0,21;$$

$$c = \frac{0,24 \cdot 19 \cdot 280 \cdot 10^8}{0,21 \cdot 4,9 \cdot 1319} = 3,41 \cdot 10^8;$$

$$d = -10^8 \left(\frac{0,24 \cdot 19 \cdot 280 \cdot 293}{0,21 \cdot 4,9 \cdot 1319} + \frac{960 + 657}{2,9 \cdot 1319} + 2,2^4 \right) = -1121 \cdot 10^8.$$

4. Определяется по формуле (7.32) функция Φ :

$$\frac{c^2}{16} = \frac{3,41^2 \cdot 10^{16}}{16} = 0,727 \cdot 10^{16}; \quad \frac{c^4}{16^2} = 0,528 \cdot 10^{32};$$

$$\frac{d^2}{27} = -\frac{1121^2 \cdot 10^{24}}{27} = -0,522 \cdot 10^{32};$$

$$\Phi = \sqrt[3]{0,727 \cdot 10^{16} + \sqrt{0,528 \cdot 10^{32} + 0,522 \cdot 10^{32}}} + \\ + \sqrt{0,727 \cdot 10^{16} - \sqrt{0,528 \cdot 10^{32} + 0,522 \cdot 10^{32}}} = 1,165 \cdot 10^5.$$

5. Определяется температура нагрева воздуха в сооружении по формуле (7.31):

$$T_{в} = \sqrt{-\frac{1,165 \cdot 10^5}{2} + \sqrt{1,165^2 \cdot 10^{10} + 1121 \cdot 10^8}} - \\ - \sqrt{\frac{1,165 \cdot 10^5}{2}} = 302^\circ \text{ К}.$$

6. Находится максимальный температурный перепад ΔT , вызванный нагревом сооружения солнцем:

$$\Delta T = 302 - 293 = 9^\circ.$$

Расчет нагревания воздухоопорных сооружений по изложенной выше методике дает результаты, достаточно близкие к фактическим. Сравнение теоретических значений температуры нагрева воздуха в одном из сооружений с экспериментальными, полученными в июне — июле в течение двух сезонов, свидетельствует о том, что разница в этих значениях не выходит за пределы 2—3°С с некоторой тенденцией в сторону завышения тео-

ретических данных по сравнению с фактическими (рис. 7.14). Такая сходимость результатов может быть признана вполне удовлетворительной.

Нагревание сооружений солнцем зависит не только от свойств наружной, но и внутренней поверхности оболочки. Чем она светлее, т. е. чем меньше степень черноты $\epsilon_{в}$, тем меньше тепла излучается нагретой оболочкой внутрь. Поэтому применение покрытий светлых тонов для внутренней стороны материала,

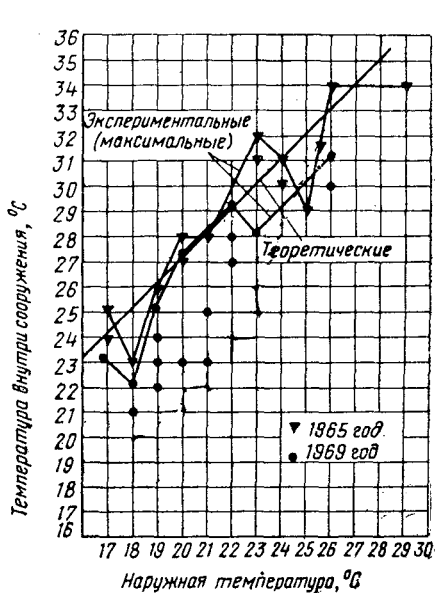


Рис. 7.14. Сравнение теоретических и фактических значений температурного перепада при нагреве солнцем

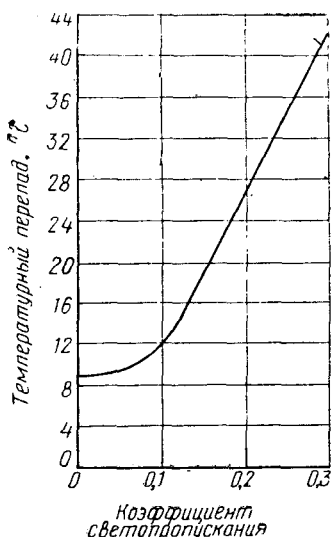


Рис. 7.15. Зависимость нагрева сооружения от светопропускаемости материала (при постоянном коэффициенте отражения $\epsilon_0 = 0,58$)

из которого изготавливаются оболочки воздухоопорных сооружений, является одним из способов снижения радиационного нагрева воздуха в объеме сооружения.

Большую роль в температурном режиме воздухоопорных сооружений играет светопропускаемость материала оболочки, характеризующая коэффициентом пропускания η . График на рис. 7.15, для построения которого были приняты данные примера расчета, показывает, что повышение светопропускаемости материала до 10% приводит к сравнительно небольшому возрастанию нагрева сооружения. Однако если увеличить коэффициент пропускания до 0,2, нагрев усиливается в значительной степени и температурный перепад достигает 27°. Отсюда следует, что имея в виду соображения борьбы с перегревом воздуха под оболочкой, применять материалы с коэффициентом пропускания более 0,1 нежелательно.

Полученные расчетные формулы дают возможность оценить эффективность интенсивного вентилирования, предпринимаемого в целях снижения нагрева сооружений. Для этого из выражений (7.28) и (7.29) выделяется производительность вентиляторных установок:

$$G_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{в}}^4 - d_1}{c_1 (T_{\text{в}} - T_{\text{н}})};$$

$$c_1 = \frac{0,24 \cdot 10^8}{B c_0 F_{\text{пов}}};$$

$$d_1 = 10^8 \left[\frac{q F_{\text{пр}} (\eta + B)}{B c_0 F_{\text{пов}}} + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$
(7.36)

Пользуясь формулой (7.36), можно определить необходимую производительность вентиляторных установок, обеспечивающую

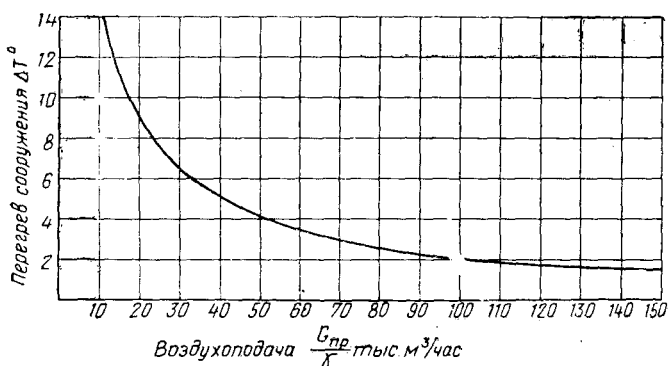


Рис. 7.16. Зависимость перегрева воздуха под оболочкой от производительности ВУ по воздуху (к примеру расчета)

снижение до заданного предела перегрева сооружения солнцем. Например, в условиях, принятых в рассмотренном выше примере расчета, снижение величины перегрева с 9 до 2°С потребует увеличения производительности вентиляторных установок с 20 тыс. до 100 тыс. м³/ч (рис. 7.16). Отсюда видно, что усиление вентилирования ПС не может считаться экономичным способом борьбы с перегревом, так как оно требует увеличения во много раз мощности вентиляторных установок. Кроме того, интенсивный воздухообмен сопровождается повышением скорости движения воздуха в сооружении, с чем не всегда можно мириться.

Задача предотвращения перегрева пневматических сооружений солнечной радиацией должна решаться прежде всего путем повышения лучеотражающей способности наружной поверхности сооружения, снижения коэффициента излучения (степени черноты) внутренней поверхности, а также конструктивными ме-

рами, например введением экранов и т. п. Интенсивная вентиляция может рассматриваться как вспомогательное средство борьбы с перегревом ПС в пределах, определяемых общей мощностью имеющихся в комплекте вентиляторных установок, включая резервные.

В оболочках воздухоопорных сооружений, изготовленных из светонепроницаемых прорезиненных тканей, в целях обеспечения естественного освещения нередко устраивают световые полосы из светопроницаемых материалов. Для расчета радиационного нагрева таких сооружений формулы должны быть несколько видоизменены. В общем случае можно предположить, что оболочка имеет n участков, обладающих различными светотехническими характеристиками ξ_n , ξ_v и η . Тогда в формулах (7.28) и (7.29) произведения $VF_{\text{пов}}$ записываются в виде сумм произведений $\sum_1^n B_i F_{\text{пов}i}$. Последующие вычисления Φ и T_v выполняются по тем же формулам.

К введению и главе I

1. Арсеньев Л. Пневматические сооружения. «Наука и жизнь», 1969, № 6.
2. Лопатто А. Э. Пнемоопалубка вспарушенных плит. «Строительная промышленность», 1952, № 6.
3. Богусевич Е. Н., Степанов И. В. Временные здания и сооружения в строительстве. Стройиздат, 1970.
4. Идей наших предков. «Техника — молодежи», 1969, № 3.
5. «Комсомольская правда» от 1969, 15 ноября.
6. Клятис Г. Я. Конструкции с применением пластмасс за рубежом и перспективы их применения в СССР. Госстройиздат, 1961.
7. Королев А. и др. Подводная пневмолаборатория «Спрут». В сб.: «Спортсмен-подводник», вып. 26, 1971.
8. Майлер З. Л. Объемные конструкции для малых форм строительства. Стройиздат, 1966.
9. Отто Ф., Тростель Р. Пневматические строительные конструкции. Стройиздат, 1967.
10. Пневматические строительные конструкции. Под ред. А. Б. Губенко, Госстройиздат, 1963.
11. Покровский Г. И. Тонкие пленки. «Техника — молодежи», 1936, № 2—3.
12. Allison D. Those ballooning air buildings. «Architectural Forum», July, 1959.
13. Boys C. V. Soap bubbles, their colours and the forces which mould them. New York. 1911/1959. Русский перевод: Бойс Ч. Мыльные пузыри, 1936.
14. Deutsche Bauenzyklopädia, July, 1966.
15. Fabulous fabrics. «Plastics World», vol. 23, No. 6, 1965.
16. Gerber R., Kaden H. Brandversuche an Traglufthallen. «Bauzeitung», H. 5, 1966.
17. Guilyen N. Ballonépületek. «Magyar építőipar», № 10, 1965.
18. Hájek M., Holub Z. Some problems concerning the testing of materials for pneumatic structures. Proceedings of the 1st International Colloquium on pneumatic structures, Stuttgart, 1967.
19. Lanchester F. W., Span. Transaction of the Manchester Assotiation of Engineers. 1938.
20. Lunar shelter. «Spaceflight», No. 8, 1966.
21. Pearson M., Pneumatic structures. «Architectural Review», Oct. 1967.
22. La pneumatique. «Architectural Design», June, 1968.
23. Pohl J. G. Multy-storey pneumatic buildings as a challenge to the plastic industry. «Australian building science and technology». June, 1967.
24. Quarmbay A. Redevelopment of the building industry. In: «Space Structures», Oxford, 1967.
25. Rühle H. Räumliche Dachtragwerke. Bd. 2. Berlin, 1970.
26. Schulz R. Fire tests on an air-supported structure. Proceedings of the 1st International Colloquium on pneumatic structures. Stuttgart, 1967.
27. Stenuit R., The deepest days. «National Geographic», No. 4, 1965.
28. Structure in cemento armato a formazione pneumatica. «La prefabbricazione», № 4, 1970.
29. Ulm R. C., Heathcote R. L. Dome, built top down. «Civil Engineering», vol. 29, No. 12, 1959.

30. Inflatable Communications Satellite. «Spaceflight», 1966, Okt.
31. Kendall R. T. Space rescue in inflatable open reentry cone. «Space/aeronautics», 1968, may.

К главе 2

1. Белозеров Н. В. Технология резин. «Химия», 1964.
2. Гаас Р., Дитциус А. Растяжение материи и деформация оболочек мягких воздушных кораблей. (Пер. с нем. под ред. А. Г. Воробьева). Изд. Института гражданского воздушного флота, 1931.
3. Гаврилов Н. М., Константинов А. С. Текстильные материалы в самолетостроении. Оборонгиз, 1940.
4. Гарстовская Н. Л., Беляева Н. В. Исследование пропиточных составов для полиэфирного волокна на основе блокированных изоцианатов. «Каучук и резина», 1966, № 6.
5. Зазулина З. А., Конкин А. А. Основы технологии химических волокон. «Химия», 1969.
6. Лепетов В. А. Резиновые технические изделия. «Химия», 1959.
7. Николаев Н. Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. «Химия», 1964.
8. Подволоцкая М. Г., Пустовалов А. М., Николаев А. Н. Технология производства комбинированной лавсан-полиэтиленовой пленки. «Пластические массы», 1968, № 11.
9. Полозов Н. П. Воздухоплавательные материалы. Изд. ВВА им. Жуковского, 1959.
10. Пырков Л. М. Химические волокна. «Наука», 1969.
11. Справочник по пластическим массам. (Под ред. М. И. Гарбара). «Химия», т. 1, 1967; т. 2, 1969.
12. Старение и стабилизация полимеров. (Под ред. М. Б. Нейман). «Наука», 1964.
13. Фишман К. Е., Хрузин Н. А. Производство волокна капрон. «Химия», 1967.
14. Чурилин Н. Э. Производство резиновых технических изделий. «Высшая школа», 1965.
15. Шмурак И. Л. Прочность связи текстильных материалов с резинами и пути ее повышения. ЦНИИТНефтехим, 1966.
16. Booth H., Hyde J. Test on balloon fabrics, R & M N 57, March, 1912.
17. Forrester L. The consulting engineer, April, 1963.
18. Kunststoff-Berater, 3, 1963.
19. Mewes H. Beschichtete und gummierte Gewebe aus Polyesterfäden. Chemiefasern, I, 1965.
20. Pearson M. Pneumatic structures. The Architecture Review, October, 1967.
21. Presskonferenz Trevira — Hochfest. Gummi-Asbest-Kunststoffe, VII Bd. 22, 7, 1969.
22. Rayonne fibranne et fibres synthétiques, 10, 1962.
23. Revue generale Caout. Plast, v. 45, 6, 1968.
24. Revue generale du Caout, v. 40, 4, 1963.
25. Rubber-coated dacron provides inflatable army field hospitals. Rubber Age, April, 1965.
26. Rubber India, v. 10, 4, 1958.
27. Topping A. D. An introduction to biaxial stress problems in fabric structures. Aerospace Engineering, April, 1961.

К главе 3

1. Белозерова А. С., Болотская И. С. Пневматическая оболочка как укрытие при производстве кровельных работ. Сообщения лаборатории мягких оболочек, вып. 13, ЦБНТИ ММФ, 1970.
2. Гогешвили А. А. Пневматические строительные конструкции в сельском хозяйстве. ЦНИЭПСельстрой, 1969.

3. Гогешвили А. А. О формообразовании пневматических оболочек. В сб.: «Исследование конструкций зданий и сооружений для сельскохозяйственного строительства». Стройиздат, 1967.

4. Иродов М. Д. Применение винтовых свай в строительстве. Стройиздат, 1968.

5. Катанский В. В. Проектирование баллонно-такелажных конструкций и оборудования оболочек воздухоплавательных судов. ОНТИ НКТП, 1936.

6. Махров В. П., Белов Г. В. Об изготовлении тканевых оболочек сложной криволинейной формы. Сообщения лаборатории мягких оболочек, вып. 12, ЦБНТИ ММФ, 1970.

7. Методика. Расчет прочности прошивных швов пневматических конструкций при одноосном нагружении. НИИРП, рукопись, Загорск, 1969.

8. Овсепян А. П., Бондарева Л. А. и др. Инвентарные сборно-разборные сооружения из светопрозрачной полимерной пленки. «Промышленное строительство», 1968, № 7.

9. Прокофьев В. М., Смирнов А. М., Фалевская Л. А., Шпаков В. П. Пневматические конструкции. ЦНИИТЭнефтехим, 1971.

10. Прокофьев В. М., Шпаков В. П. Новые пневматические строительные конструкции. Сообщения лаборатории мягких оболочек, вып. 11, ЦБНТИ ММФ, 1970.

11. Руководство по проектированию и устройству фундаментов и башен связи из винтовых свай. Стройиздат, 1965.

12. Свайные фундаменты из забивных свай. Нормы проектирования. СНиП II-Б.5-62.

13. Технические условия на проектирование железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб (СН 200-62).

14. Шпаков В. П. Исследование прочности швов пневматических резино-тканевых материалов. Сообщения лаборатории мягких оболочек, вып. 13. ЦБНТИ ММФ, 1970.

15. Штолько В. Г. Покрива з ткани та плівок. Киев, 1966.

К главе 4

1. Азовцев А. И., Магула В. Э. Особенности осесимметричных формоизменений нерастяжимых оболочек вращения. Сообщения ЛМО, вып. 6, 1969.

2. Алексеев С. А. Мягкие нерастяжимые оболочки. Сб. докладов научно-технической конференции по расчету гибких пластин и оболочек. ВВА им. Н. Е. Жуковского, 1952.

3. Алексеев С. А. К теории мягких оболочек вращения. РПК, вып. III, 1955.

4. Алексеев С. А. Условие существования двухосного напряженного состояния мягких оболочек. Известия АН СССР, Механика, № 5, 1965.

5. Алексеев С. А. Основы теории мягких осесимметричных оболочек. РПК, вып. X, 1965.

6. Алексеев С. А. Основы общей теории мягких оболочек. РПК, вып. XI, 1966.

7. Алексеев С. А. Задачи статики и динамики мягких оболочек. Труды VI Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. Баку, 1966.

8. Алексеев С. А. К расчету мягкой сферической оболочки в потоке жидкости. Инженерный журнал АН СССР, 1967, № 3.

9. Алексеев С. А., Голованов Е. В., Смирнов А. М. Экспериментальное исследование нагрузок на сферические оболочки, создаваемых воздушным потоком. РПК, вып. XIII, 1970.

10. Алексеев С. А., Леглер Э. Л., Смирнов А. М. Устойчивость оболочек в потоке жидкости. В сб. докладов на Всесоюзной конференции по проблемам устойчивости в строительной механике. Каунас—Вильнюс, 1967.

11. Бернштейн С. А. О расчете гибкого кольца. В сб.: «Исследования по теории сооружения», вып. 2, ОНТИ, 1936.

12. Гениев Г. А. Некоторые задачи расчета пневмоконструкций из мягких материалов. В сб.: «Исследования по строительной механике», вып. V, Госстройиздат, 1962.
13. Гениев Г. А. К вопросу расчета пневмоконструкций из мягких материалов. В сб.: «Исследования по расчету оболочек, стержневых и массивных конструкций», Госстройиздат, 1963.
14. Гениев Г. А. Большие деформации безмоментных сильно растянутых пневмооболочек. В сб.: «Расчет тонкостенных пространственных конструкций», Стройиздат, 1964.
15. Гениев Г. А. Расчет цилиндрических пневмооболочек на действие ветровых нагрузок с учетом больших перемещений. В сб.: «Прочность и деформативность конструкций с применением пластмасс», Стройиздат, 1966.
16. Григорьев А. С. Напряженное состояние безмоментных цилиндрических оболочек при больших деформациях. «Прикладная математика и механика», т. XXI, вып. 6, 1957.
17. Дишингер Р. Оболочки, тонкостенные железобетонные купола и своды. Стройиздат, 1932.
18. Дроздов О. А. Климат СССР, ч. V, Гидрометеозидат, 1948.
19. Ермолов В. В. Деформации цилиндрической пневматической оболочки под действием ветровой нагрузки. СМ и РС, 1969, № 6.
20. Ермолов В. В. Задачи теории мягких оболочек в области пневматических строительных конструкций. Сообщения ЛМО, вып. 11, 1970.
21. Ермолов В. В., Ермолов С. Б. Развитие методов расчета пневматических конструкций. СМ и РС, 1969, № 4.
22. Затворницкий О. Г. К расчету мягких наливных оболочек. СМ и РС, 1970, № 1.
23. Инструкция по проектированию железобетонных тонкостенных пространственных покрытий и перекрытий. Госстройиздат, 1961.
24. Лебединский Н. А. Графический метод решения задач о равновесии пневмооболочек. СМ и РС, 1966, № 4.
25. Магула В. Э. Некоторые вопросы общей теории и расчета мягких емкостей. Диссертация, 1966.
26. Магула В. Э. и др. Судовые мягкие емкости. «Судостроение», 1966.
27. Магула В. Э. Расчет мягких оболочек. В сб.: «Строительная механика в СССР, 1917—1967», Стройиздат, 1969.
28. Миловидов А. С. Некоторые вопросы расчета оболочек пневматических конструкций. «Каучук и резина», 1966, № 11.
29. Никулин В. И. Действие ветровой нагрузки на воздухоопорные сферические оболочки. Сообщения ЛМО, вып. 12, 1970.
30. Нисневич М. З. Некоторые вопросы прочности цилиндрической оболочки. Инженерный журнал АН СССР, т. II, вып. 4, 1962.
31. Ниточкин Ф. Р. Таблицы $\frac{\sin x}{x}$. Сообщения ЛМО, вып. 4, 1968.
32. Отто Ф., Тростель Р. Пневматические строительные конструкции. Стройиздат, 1967.
33. Петраков Б. И. Натяжение в цилиндрической пневмооболочке. СМ и РС, 1968, № 2.
34. Петраков Б. И., Медведев П. П. Расчет мягкой пневматической плотины. «Известия вузов» «Строительство и архитектура», № 12, 1969.
35. Пшеничнов Г. И. Расчет безмоментной сферической оболочки на ветровую нагрузку. Инженерный журнал АН СССР, т. I, вып. 3, 1961.
36. Рекомендации по проектированию и расчету конструкций с применением пластмасс. Изд. ЦНИИСК, 1969.
37. Ржаницын А. Р. К вопросу о расчете мягких нерастяжимых оболочек вращения на гидростатическую нагрузку. ВВА им. Н. Е. Жуковского, 1952.
38. Смирнов А. М. Исследование напряжений в мягкой сферической оболочке-крытии в потоке воздуха. Диссертация, 1970.

39. Смирнов А. М. К расчету мягких сферических оболочек на произвольную нагрузку. РПК, вып. 14, 1971.
40. Справочник проектировщика. Расчетно-теоретический. Под ред. А. А. Уманского. Госстройиздат, 1960. Изд. 2-е, т. I и II, Стройиздат, 1972.
41. Ярин Л. И. Пневматические зонтичные купола. Труды ЦНИИПромзданий, вып. I, 1964.
42. Anwar H. O. Inflatable dams. Journal of the hydraulics division. Proceedings of the ASCE, May 1967, vol. 93, No. HY 3.
43. Bedienungseinweisung für Krupp Tragluftballen. Friedrich Krupp Baubetriebe. Essen.
44. Beger G., Macher E. Results of wind tunnel tests on some pneumatic structures. FICPS.
45. Chang F. K., Rothman H. B. The design of large deep spherical reticulated shells. In: Space Structures. Oxford, 1967.
46. Cornell Aeronautical Laboratory Report, No. Ub-909-D-2, Rome Air Development Center, March 1956.
47. Dolling J. C., Blackmore R. W., Kindermann W. J., Woodard K. B. The mechanical design of the horn-reflector antenna and radome. The Bell System Technical Journal. July, 1963.
48. Leonard J. W. Inflatable shells: pressurisation phase. Proceedings of the ASCE. Apr. 1967, No EM 2.
49. Leonard J. W. Inflatable shells: in-service phase. Proceedings of the ASCE. Dec. 1967, No EM 6.
50. Leonard J. W. Inflatable shells: nonsymmetric in-service loads. Proceedings of the ASCE. Oct. 1968, No EM 5.
51. Macher F. G. Wind loads on basic dome shapes. Proceedings of the ASCE. June 1965, No ST 3.
52. Macher F. G. Wind loads on dome-cylinder and dome-cone shapes. Proceedings of the ASCE. Oct. 1966, No ST 5.
53. Oden J. T., Kubitzka W. K. Numerical analysis of nonlinear pneumatic structures. FICPS.
54. Rudolf F. A contribution to the design of air-supported structures. FICPS.
55. Rühle H. Development of design and construction in pneumatic structures. FICPS.
56. Rühle H. Räumliche Dachtragwerke. Bd. 2. Berlin, 1970.
57. Soule G. The ocean adventures. New York, 1966.
58. Szilard R. Pneumatic structures for Lunar bases. FICPS.
59. Tarczewski A. Konstrukcje pneumatyczne. Warszawa, 1965.
60. Trostel R. On the analysis of membranes. FICPS.

Сокращения:

СМИРС — журнал «Строительная механика и расчет сооружений».
 Сообщения ЛМО — «Сообщения лаборатории мягких оболочек», изд. Дальневосточного высшего инженерного морского училища, Владивосток.
 РПК — сборник «Расчет пространственных конструкций», Стройиздат.
 FICPS — Proceedings of the 1-st International Colloquium on pneumatic structures. Stuttgart, 1967.

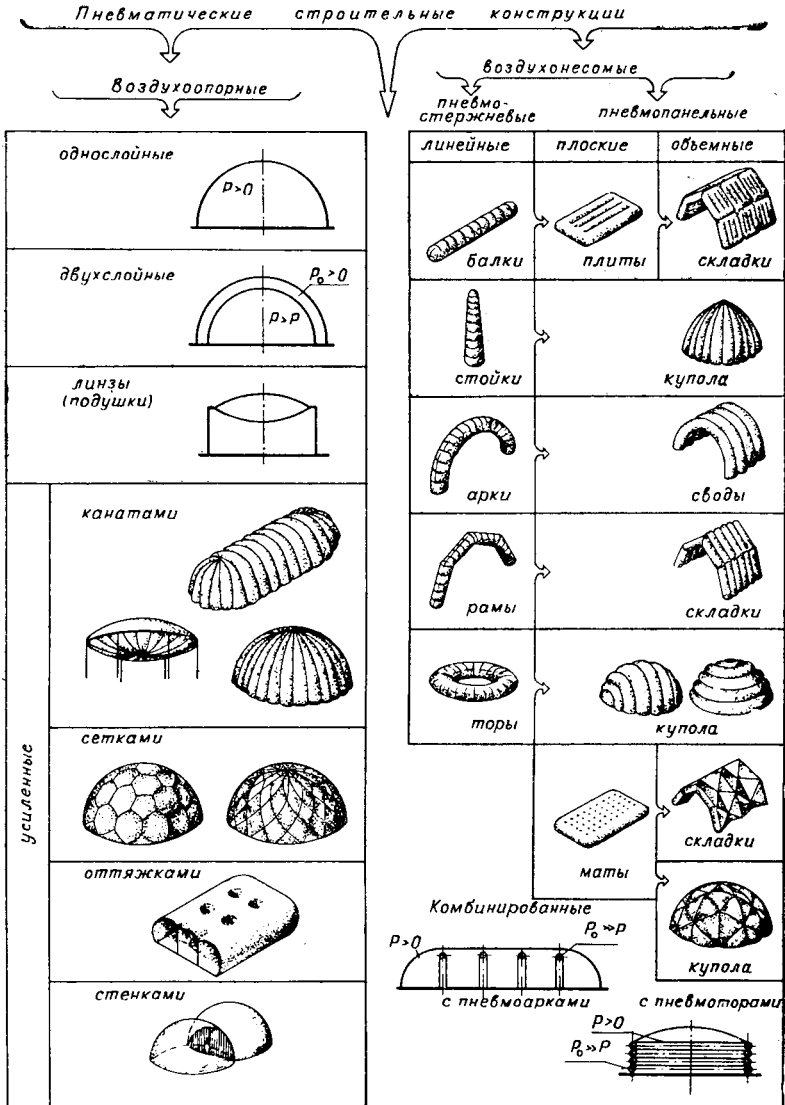
К главе 6

1. Рысин С. А. Вентиляционные установки машиностроительных заводов. Справочник, Машгиз, 1961.
2. Справочник по климату СССР, вып. 1—34, ч. III. 1966—1968.
3. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий. СН 245-63.
4. Вознесенский С. Б. Развитие пневматических конструкций в ЧССР. Экспресс-информация, I серия, вып. 5, 1968 (зарубежный опыт).



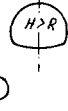
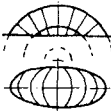
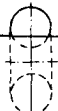
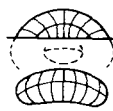
















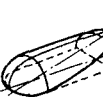

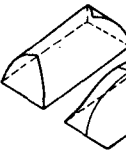
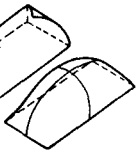

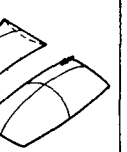
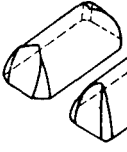
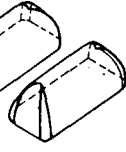
К главе 7

1. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1949.
2. Шкловер А. М., Васильев Б. Ф., Ушков Ф. Б. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий. Госстройиздат, 1956.
3. Кедроливанский В. Н., Стернзат М. С. Метеорологические приборы. Гидрометеоиздат, 1953.
4. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Ч. II. Стройиздат, 1969.
5. Энтин И. А. Средства временного обогрева и сушки строящихся зданий. Стройиздат, 1964.

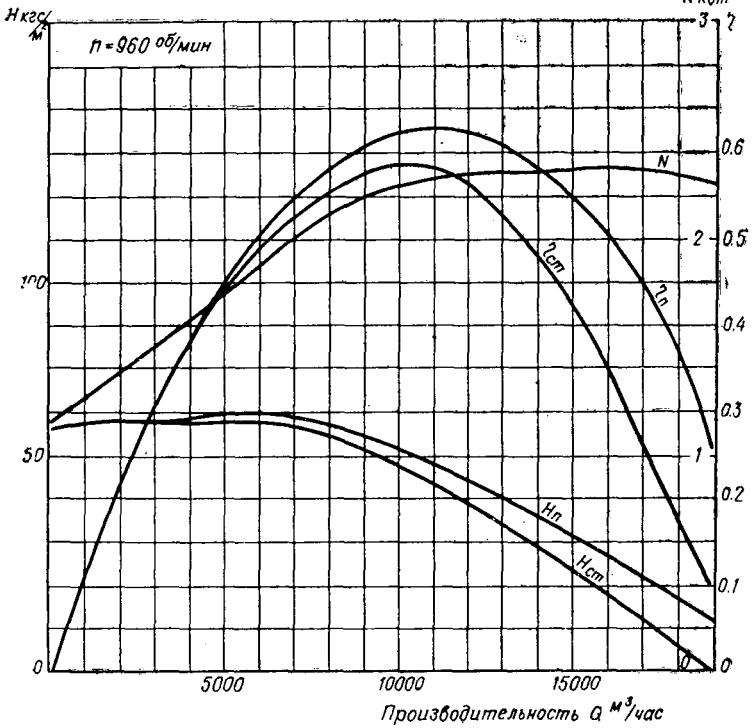
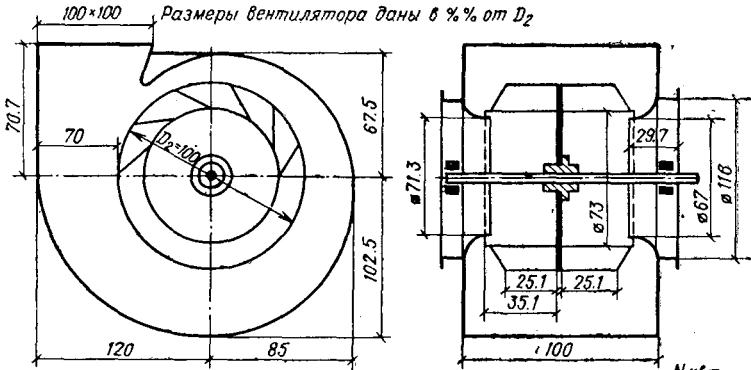
ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ



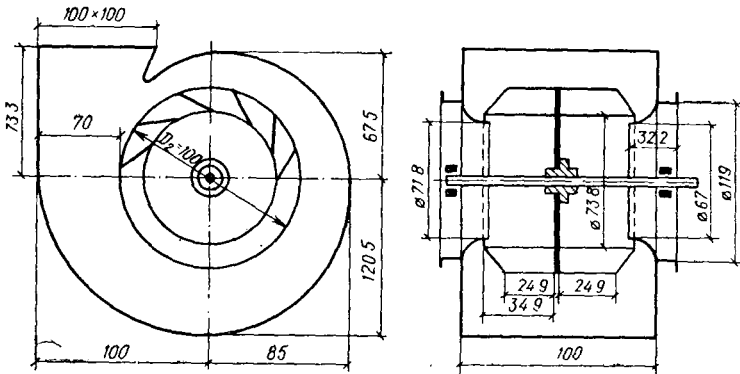
**КЛАССИФИКАЦИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
ПО ВИДУ ПОВЕРХНОСТИ**

		Направление оси вращения		
		Вертикальное	Горизонтальное	Наклонное
Поверхности вращения	Иллюстрирующая			
	Дуга окружности	$H < R$  $H = R$  $H > R$ 	 	 
	Прямая	 	 	
	Произвольная кривая	 	 	 
Сложные поверхности	Комбинированная	 	 	 
	Очертания плана			
	Прямоугольный	Четырехугольный	Многоугольный	
	 	 	 	

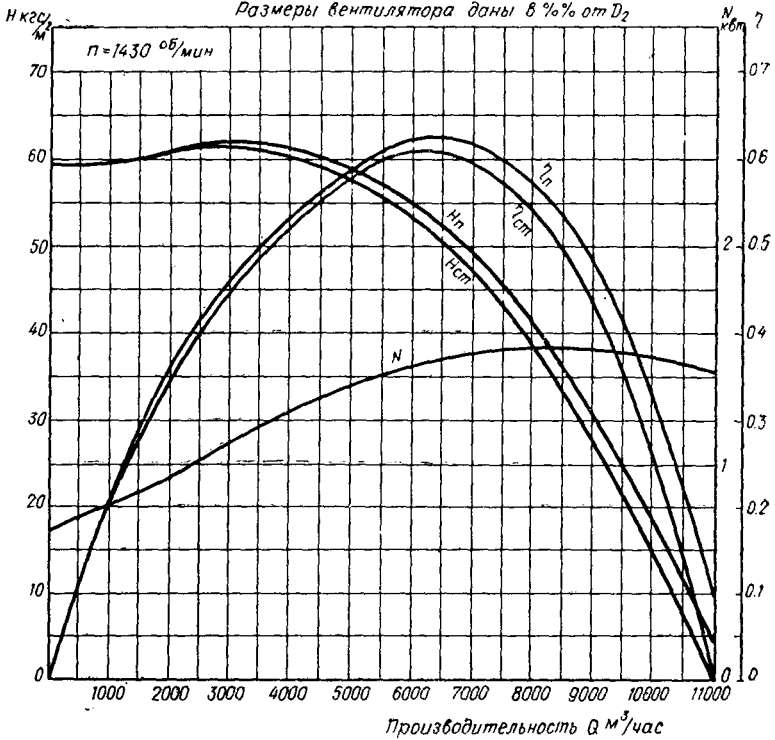
ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР ДВУСТОРОННЕГО ВСАСЫВАНИЯ
 ТИПА Ц4-94/2 № 4, 5, КОМПЛЕКТУЮЩИЙ ВЕНТИЛЯЦИОННУЮ
 УСТАНОВКУ ВУ-1



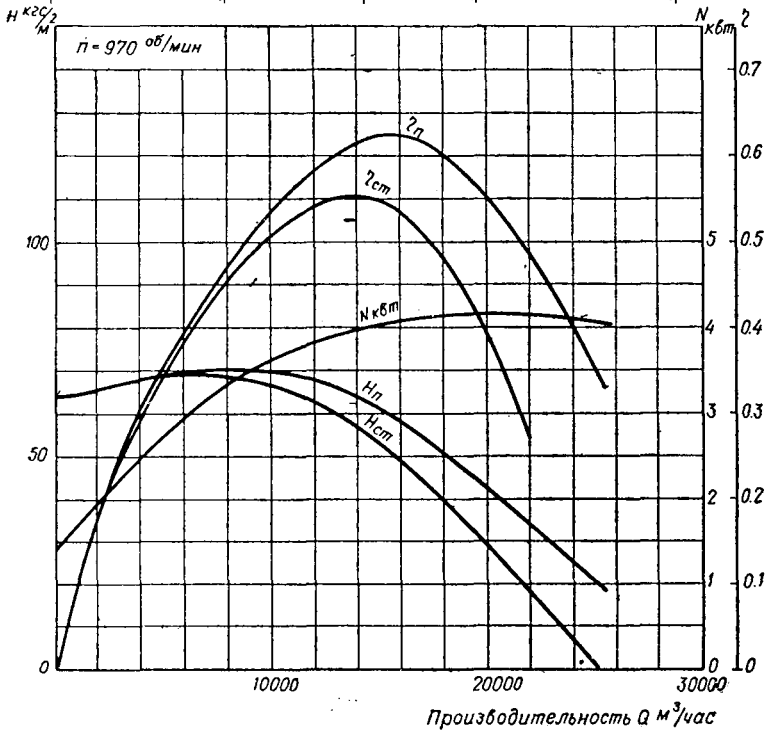
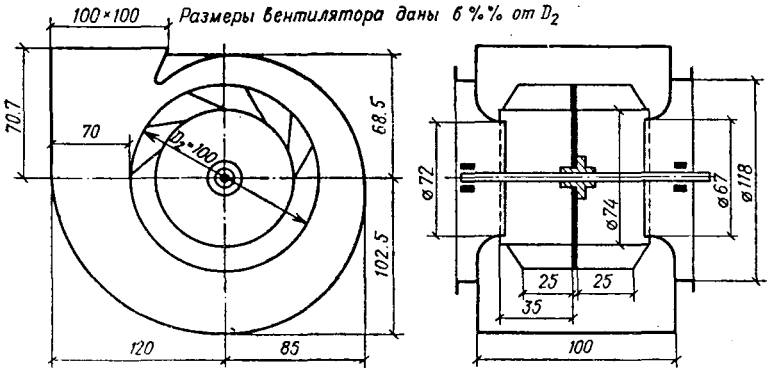
**ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР ДВУСТОРОННЕГО ВСАСЫВАНИЯ
ТИПА Ц4-94/2 № 6, 3, КОМПЛЕКТУЮЩИЙ ВЕНТИЛЯЦИОННУЮ
УСТАНОВКУ ВУ-2**

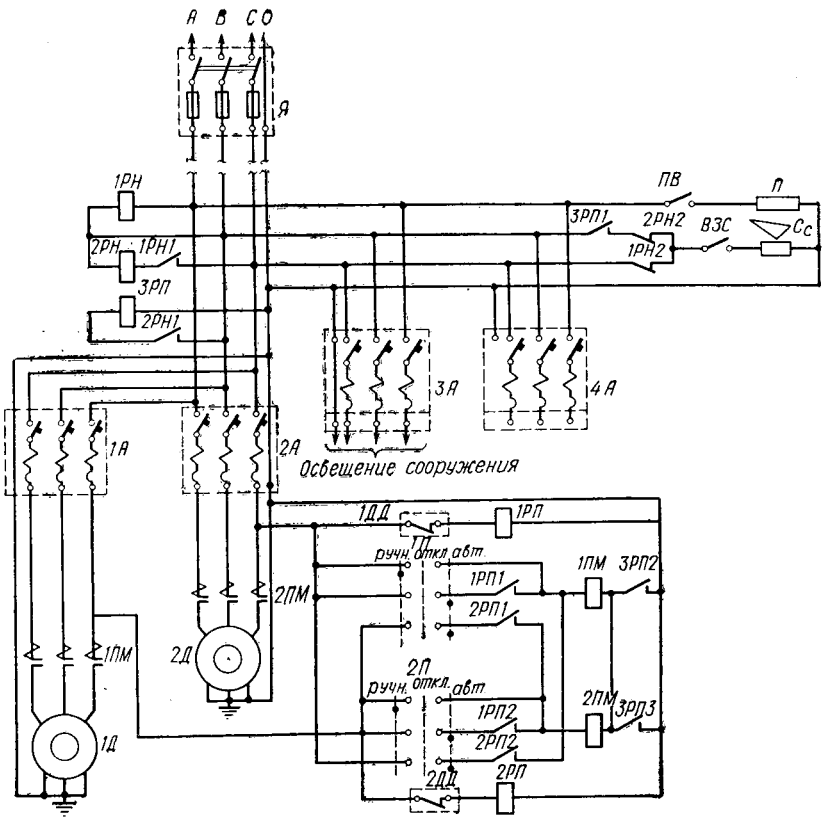


Размеры вентилятора даны в % от D_2



**ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР ДВУСТОРОННЕГО ВСАСЫВАНИЯ
ТИПА Ц4-94/2 № 7, КОМПЛЕКТУЮЩИЙ ВЕНТИЛЯЦИОННУЮ
УСТАНОВКУ ВУ-3**





	Стр.
Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Пневматические сооружения — новый вид строительных конструкций	14
1. Историческая справка	14
2. Классификация	19
3. Формообразование оболочек	26
4. Особенности пневматических сооружений воздухоопорного типа	42
5. Область применения, архитектура, перспективы развития	50
6. Некоторые вопросы экономики	61
Глава 2. Материалы оболочек пневматических сооружений	69
7. Однородные пленки	70
8. Армированные пленки	73
9. Воздухонепроницаемые ткани	74
10. Виды и свойства материалов оболочек	80
11. Расчетные сопротивления тканей	94
Глава 3. Проектирование оболочек пневматических сооружений	99
12. Конструкция оболочек	99
13. Заводские и монтажные швы	108
14. Сопряжение оболочки с анкерным основанием	117
15. Несущая способность анкеров	122
Глава 4. Расчет оболочек пневматических сооружений воздухоопорного типа	125
16. Расчетные нагрузки	127
17. Сведения из теории поверхностей	142
18. Основные направления разработки методов расчета пневматических конструкций	144
19. Инженерные методы определения напряжений и деформаций оболочек	151
Глава 5. Жесткие конструкции воздухоопорных сооружений	185
20. Шлюзы, каркасы, двери, ворота	186
21. Конструкции, поддерживающие оболочку во время открывания со стороны торца	197

	Стр.
Глава 6. Особенности эксплуатации воздухоопорных сооружений . . .	205
22. Эксплуатация сооружений и режим работы вентиляторных установок	205
23. Вентиляторные установки	212
24. Естественное и искусственное освещение	228
25. Монтаж, эксплуатация, демонтаж и транспортирование пневматических сооружений	230
26. Санитарные условия пневматических сооружений	236
Глава 7. Температурно-влажностный режим воздухоопорных сооружений	238
27. Особенности температурно-влажностного режима и способы его обеспечения	238
28. Отопительные установки	250
29. Теплотехнический расчет	258
30. Расчет нагревания воздухоопорных сооружений солнцем	265
Литература	274
Приложения	280

Вадим Владимирович Ермолов,
Андрей Степанович Вобльй,
Александр Иванович Маньшавин,
Михаил Иванович Петровнин,
Юрий Иванович Хрущев

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
ВОЗДУХОПОПОРНОГО ТИПА

*Под редакцией д-ра техн. наук проф.
В. В. Ермолова*

* * *

Редактор издательства Л. Д. Спрыгина
Внешнее оформление художника Н. И. Максимова
Технические редакторы В. М. Родионова, З. С. Мочалина
Корректор Л. Бирюкова

Сдано в набор 30/X 1972 г. Подписано к печати 19/I 1973 г.
Т-01928. Бумага типографская № 2. Формат 60×90^{1/16}—9 бум. л.
18 печ. л. (уч.-изд. 17 л.) Тираж 4000 экз. Изд. № AVI-2902
Зак. № 745. Цена 95 коп.

*Стройиздат
Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 9*

Владимирская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

О П Е Ч А Т К И

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
113	11-я сверху	n_d	n_o
113	Ф-ла (3.5)	$n_g =$	$n_o =$
149	Табл. 27, графа Сложные поверхности, п. 3	*	не читать
166	12-я сверху	$G_{x\theta} = . . .$	не читать
282	3-я сверху	типа Ц4-94/2 № 4, 5, комплектующий вентиляционную установку ВУ-1	типа Ц4-94/2 № 6, 3, комплектующий вентиляционную установку ВУ-2
283	3-я сверху	типа Ц4-94/2 № 6, 3, комплектующий вентиляционную установку ВУ-2	типа Ц4-94/2 № 4, 5, комплектующий вентиляционную установку ВУ-1

Цена 95 коп.

42963

Д4

185