

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

А.Н. ВАСИЛЕНКО

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВОЗВЕДЕНИЕ
МОНОЛИТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ
ОПАЛУБКИ**

Учебное пособие

*Рекомендовано научно-методическим советом Воронежского
государственного архитектурно-строительного университета
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся
по специальностям*

*270102 «Промышленное и гражданское строительство»,
270105 «Городское строительство и хозяйство»
и 270301 «Архитектура»*

Воронеж 2010

УДК 624.012.4:69.057.5(07)

ББК 38.626.1я7

В19

Рецензенты:

*кафедра организации строительства и кафедра технологии
строительного производства Санкт-Петербургского государственного
архитектурно-строительного университета;
С.П. Сергеев, директор ООО «Воронежсгражданстрой»*

Василенко, А.Н.

В19 Проектирование и возведение монолитных зданий и сооружений
с применением пневматической опалубки: учеб. пособие /
А.Н. Василенко; Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж,
2010. – 180 с.

ISBN 978-5-89040-268-4

В пособии рассматриваются вопросы проектирование и возведение монолитных зданий и сооружений с применением пневматической опалубки. Приводятся сведения о различных видах конструкций сооружений, даны рекомендации по использованию пневматических опалубок, приводятся технические характеристики опалубок.

Ил. 104. Табл. 54. Библиогр.: 51 назв.

УДК 624.012.4:69.057.5(07)
ББК 38.626.1я7

ISBN 978-5-89040-268-4

© Василенко А.Н., 2010
© Воронежский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Бетон и железобетон широко применяют во всех странах для возведения самых разнообразных сооружений, и в дальнейшем они остаются наиболее используемыми материалами во всех областях строительства.

Общими предпосылками к широкому применению бетона и железобетона являются практически неисчерпаемые запасы сырья для производства вяжущих и заполнителей бетона; экологическая целесообразность использования отходов промышленности в качестве сырья для вяжущих и заполнителей; возможность снижения его средней плотности за счет замены природных заполнителей искусственными пористыми; довольно низкая энергоёмкость технологического процесса изготовления конструкций; сравнительная простота технологии; возможность придания изделиям из бетона любой формы и отделки; конструктивная совместимость бетона со многими строительными и отделочными материалами, что позволяет придать бетонным и железобетонным конструкциям требуемые эксплуатационные и архитектурные свойства.

В практике современного отечественного строительства наряду с наращиванием мощностей для производства строительных конструкций и изделий полной заводской готовности дальнейшее развитие получает возведение зданий и сооружений из монолитного бетона и железобетона.

Этот вариант строительства может быть целесообразнее и эффективнее сборного, в первую очередь, в районах со сложными технологическими условиями, при повышенной сейсмичности, в местах, где отсутствуют или недостаточно развиты мощности полносборного строительства и т. п.

Экономические преимущества строительства из монолитных железобетонных конструкций по сравнению с полносборным или кирпичным строительством заключаются в снижении до 30-40% затрат на создание производственной базы, уменьшении до 20% расхода стали, снижении до 30% энергоёмкости при приблизительно равных общих трудовых затратах на возведение.

Кроме того, монолитный железобетон даёт возможность оптимизировать конструктивные решения зданий и сооружений, существенно повысить эксплуатационные характеристики объектов.

Практика современного строительства подтвердила технико-экономические преимущества возведения промышленных, жилых и общественных зданий из монолитного бетона и железобетона, которые позволяют с минимальными затратами повысить качество и архитектурную выразительность объектов, а также реализовывать ресурсосберегающие технологии монолитных процессов.

Индустриальные методы строительства монолитных несущих и ограждающих конструкций следует рассматривать как важный резерв повышения общего уровня индустриализации и интенсификации строительного производства.

Применительно к комплексному процессу монолитного строительства конструкций, объектов и сооружений это могут быть:

- организационно-технологические мероприятия;
- комплексная механизация и автоматизация работ;
- использование эффективных строительных материалов для изготовления опалубочных форм и готовых конструкций;
- энергосберегающие технологии для приготовления бетонных смесей и их укладки;
- индустриальное изготовление арматуры и опалубок;
- широкое использование научных достижений в области технологии и механизации работ;
- прогрессивные объёмно-планировочные и конструктивные решения;
- прогрессивные виды оснастки и новые технологии на любой стадии выполнения работ.

Комплексный технологический процесс устройства монолитных конструкций и возведения зданий и сооружений состоит из опалубочных работ (установки и снятия опалубки), арматурных работ (установки, монтажа арматуры) и бетонных работ (приготовления и транспортировки, укладки, уплотнения бетонной смеси и выдерживания её в оптимальных условиях твердения).

Помимо достоинств монолитного бетона и железобетона, отмеченных выше, имеются и недостатки данного вида строительства, как, например, большая трудоёмкость выполнения работ. В общем объёме трудовых затрат на выполнение монолитных работ опалубочные работы составляют от 18 до 50%, арматурные – 15-20% и бетонные – до 50% в зависимости от вида строительства, типа и размеров бетонируемых конструкций, применяемых систем опалубок и т.п.

Высшей школе принадлежит важное место в подготовке инженеров в области технологии строительного производства, способных решать сложные задачи научно-технического прогресса, применять полученные решения на практике, обосновывать оптимальность того или иного технического решения.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, изучающих научные основы совершенствования технологии монолитного строительства как одного из разделов дисциплины «Технология строительного производства», в том числе с применением пневматических опалубок. Оно также может быть использовано специалистами строительной отрасли при проектировании и производстве монолитных работ.

Цель пособия – помочь студентам и строителям в расчете, проектировании и эксплуатации пневматических опалубок, что позволит расширить номенклатуру и область их применения.

Пособие состоит из введения и четырех разделов.

В разделе 1 «История и перспективы развития пневматических опалубок» приведены сведения о применении в отечественной и зарубежной практике пневматических конструкций и опалубочных форм различного назначения.

В разделе 2 «Теоретические основы расчета и проектирования пневматических опалубок» изложены основные сведения и положения из теории поверхностей и методов определения напряженно-деформированного состояния мягких оболочек, приведено обоснование выбора параметров деформированного состояния пневмокаркасного опалубочного модуля, даны характеристики резино-тканевых материалов, приведены примеры конструкции швов и раскроя пневматических опалубок различного назначения.

Раздел 3 «Организационно-технологические особенности возведения монолитных конструкций с применением пневматических опалубок» посвящен описанию классификации пневмоопалубок, организационно-технологическим методам возведения монолитных сводчатых и линейно-протяженных сооружений из армоцемента и стеклофибробетона на пневмоопалубках. Здесь же изложены особенности возведения монолитных сооружений на пневмоопалубке в зимних условиях, а также при воздействии ветровых нагрузок, даны рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации пневматических опалубок.

В разделе 4 «Развитие технологии транспортирования и укладки мелкозернистых бетонных смесей для возведения монолитных сооружений на пневмоопалубке» представлены характеристики торкретной техники, используемой для нанесения мелкозернистых бетонных смесей, приведен анализ тенденций развития конструкций торкрет-установок, изложены особенности проектирования технологии нанесения смесей на мягкие (податливые) поверхности пневмоопалубки.

Приведенные в пособии рекомендации по проектированию пневматических опалубок воздухоопорного типа и организационно-технологическим методам возведения монолитных конструкций с их применением прошли проверку при возведении ряда объектов в г.Воронеже, Московской обл., республике Беларусь.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность за содействие в подготовке пособия Арзуманову А.С., Ткаченко А.Н., Чертову В.А., Болтскому Л.В., Казакову Д.А., Арзуманову А.А. и сотрудникам кафедры строительного производства ГОУВПО Воронежского государственного архитектурно-строительного университета.

1. ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОПАЛУБОК

1.1. Анализ использования пневматических конструкций в практике строительства

Одним из основных резервов сокращения трудозатрат при возведении монолитных конструкций выступает совершенствование опалубочных и бетонных работ. Эти процессы за счет применения высокоэффективных и принципиально новых конструкций опалубочных систем в комплексе с современными средствами механизации и автоматизации бетонных работ позволяют сократить сроки строительства, повысить производительность труда и снизить трудоемкость. Одним из таких видов опалубок, позволяющих решить поставленные задачи, являются пневматические опалубки. Пневматические опалубки в свою очередь входят составной частью в широкий спектр пневматических строительных конструкций. Рассмотрим их разновидности и области применения, проанализировав принципиальные различия, достоинства и недостатки.

Пневматическими конструкциями называются мягкие оболочки, предварительное напряжение которых, обеспечивающее их противодействие внешним нагрузкам, достигается благодаря нагнетаемому в них воздуху [30, 31].

Пневматические конструкции нашли широкое применение в качестве элементов большепролетных покрытий, линейно-протяженных зданий и сооружений. Большое развитие пневматические конструкции получили в таких странах, как США, Канада, Франция, Германия, Япония, и меньше в России [30].

Исторически первым изобретателем пневматических конструкций считается английский инженер Фредерик У. Ланчестер, получивший в 1917 году патент на применение воздухоопорного купола в качестве покрытия здания, но, по свидетельству Ермолова В.В. [6], проводившего в 1970 году более глубокие патентные исследования, отмечено, что намного раньше, в 1893 году, русский изобретатель Сумской И.А. в США запатентовал «аэробалку». Этот патент является первым документированным предложением по использованию пневмокаркасных конструкций в строительстве [17]. В 1896 году «Журнал новейших изобретений и открытий» писал о пневмобалках этого изобретателя, предложившего их для строительства понтонных мостов, надземных сооружений. Изобретение предлагалось российскому МПС в 90-х гг. прошлого века.

В Японии в 1929 году изобретатель Конешиге Номура изготовил и запатентовал образец палатки «Тент модерн» размером 2х2х2 м с каркасом из четырех пневматических стержней. Такие палатки серийно производятся в Англии с 1936 г. [17].

В СССР в период 1930 – 1950 гг. проводились исследования в области надувных конструкций. С 1936 по 1964 гг. профессор Покровский Г.И. разрабатывал тему «Пневматическая архитектура», по которой имеются его

публикации с разработками проектов зданий из пневмостержневых и пневмолинзовых элементов. Официальное изучение пневмокаркасных сооружений началось с 1959 г. в лаборатории конструкций с применением пластмасс ЦНИИСК им. Кучеренко В.А. Все они используются в основном как большепролетные элементы и подразделяются на воздухоопорные и воздуходнесомые (пневмокаркасные) [22, 25] (рис.1.1).

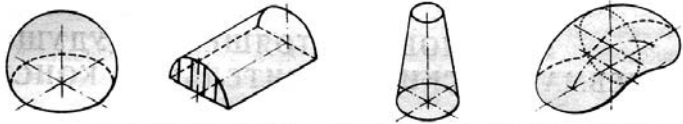
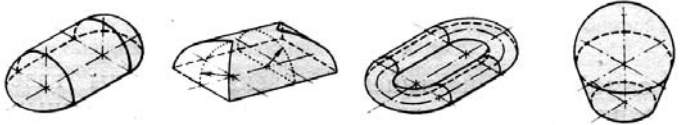
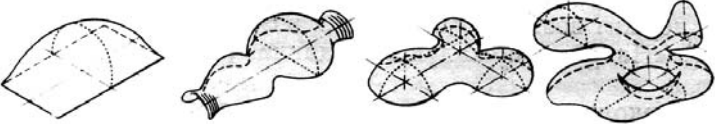
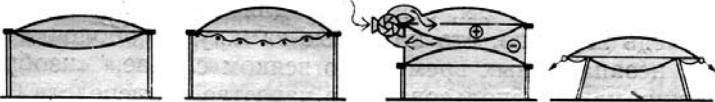
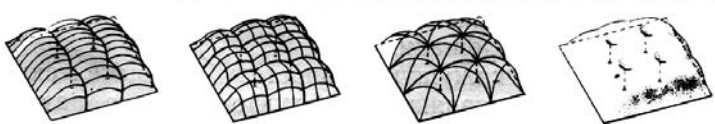
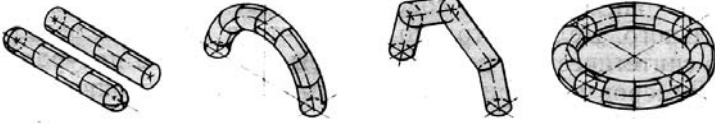
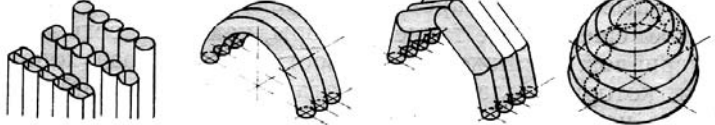
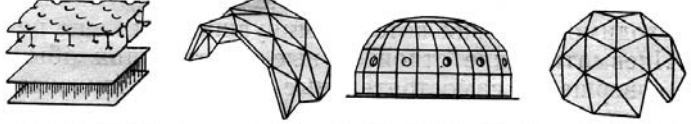
Воздухоопорные	Геометрические формы	Простые	
		Составные	
		Сложные	
		Линзы (подушки)	
	Усиление канатами или сетями	Однопролетные	
		Многопролетные	
Пневмокаркасные	Стержни	Ортогональные	
		Изопротные	
	Панели	Изопротные	

Рис.1.1. Классификация пневматических конструкций

В 1960 г. было изготовлено одно из первых пневмокаркасных сооружений. Оно имело пневматический каркас из арок, установленных с шагом 3 м,

которые были соединены внизу общим пневматическим коллектором, служившим одновременно опорой. Пролёт этой конструкции равнялся 10 м, а длина - 15 м. При диаметре арок каркаса 1 м рабочее давление воздуха внутри них составляло 0,01 МПа. Каркас был изготовлен из однослойной прорезиненной ткани и накрывался тентом с резиновым покрытием. Для улучшения аэродинамических свойств конструкции под тент подавался под небольшим избыточным давлением воздух. В результате сооружение приобретало свойства как воздухоопорной, так и пневмокаркасной конструкции [12, 34].

В 1967 г. во Львове возведено пневмокаркасное сооружение - цех упаковки - длиной 40 м, спроектированное и изготовленное Загорским филиалом НИИРПа. Оно состояло из 28 независимых двухконтурных пневмоарок циркульного очертания, установленных на местных опорах. Их пролёт составлял 8, а диаметр - 0,45 м, внутреннее рабочее давление 0,1 МПа. Силовая оболочка арок выполнялась из высокопрочной капроновой ткани, а герметизирующая камера из тонколистовой резины [12].

В 1969 г. по заказу Киевского республиканского кинокомбината изготовлен пневматический зрительный зал пневмокаркасной конструкции для широкоэкранного кинотеатра на 160 мест (рис.1.2). Его образовывали 5 пневматических арок диаметром 0,45 м, пролётом 12 м, 3 из которых устанавливались вертикально, а 2 - наклонно. Сверху арки перекрывались однослойным тентом из прорезиненной ткани. В плане сооружение имело овальную форму.



Рис. 1.2. Пневматический передвижной кинотеатр на 160 мест

Масса пневматической оболочки зрительного зала составляла 500 кг. Рабочее давление в арках равнялось 0,08-0,1 МПа [12, 34].

В 1971 г. по заказу треста «Уралэлектросеть» изготовлен пневмокаркасный гараж для стоянки автомобилей в районах Крайнего Севера. Сооружение состояло из 21 пневмоарки диаметром 0,45 м и шагом 1,2 м. Рабочее давление воздуха внутри арок 0,1 МПа. В плане гараж имел размеры 12х24 м [12, 34].

Аналитический подход к достигнутым результатам в 1972-1973 гг. позволил дать объективную оценку техническим характеристикам создававшихся ранее сооружений. В частности, определились конкретные недостатки, встречавшиеся в процессах проектирования и эксплуатации, а именно сложность изготовления и вытекающая из неё высокая стоимость, недостаточная устойчивость конструкций от воздействия ветра, снега в зимний период, изменение со временем герметичности камер пневмокаркасных элементов. Указанные недостатки потребовали проведения дополнительных исследований и разработок по улучшению качества применяемых материалов и усовершенствованию конструктивных узлов.

В результате в 1973 г. был изготовлен опытный образец пневмокаркасного сооружения широкого назначения. Его каркас составляли арки с диаметром 0,3 м с рабочим давлением 0,1...0,2 МПа в количестве 11 штук. Их пролёт равнялся 7,3 м, а шаг установки 1,4 м. Сооружение имело размеры в плане 7,3х14 м [12, 34].

Представляют интерес проекты пневмокаркасных конструкций, разработанные в институте ВНИИСТ и Московском архитектурном институте. Это два сооружения из сплошного ряда арок: первое размерами в плане 18х9 м с арками диаметром 1,5 м и рабочим давлением 16 кПа, второе размерами 22х30 м с арками диаметром 2 м и аналогичным рабочим давлением. Оба имели однослойный внешний тент из прорезиненной ткани, связывавший конструкцию в единое целое. Эти сооружения являлись наиболее крупными пневмокаркасными конструкциями в СССР в семидесятые годы. Анализируя возведённые за этот период пневмокаркасные сооружения, возможно классифицировать их следующим образом (табл.1.1) .

Таблица 1.1

Классификация арочных пневмокаркасных конструкций

Тип конструкций	Избыточное давление, МПа	Диаметр сечения, мм	Максимальный пролёт, м
Высокого давления	0,6...1	100 – 300	18
Среднего давления	0,03...0,2	200 – 600	18
Низкого давления	0,005...0,02	600 - 2000	24

Конструкции первого типа в большей своей части являются самонесущими; второго и третьего типа способны воспринимать внешние нагрузки. В бывшем СССР исследовались конструкции всех типов, но более детально изучены среднего и низкого давления.

Начиная с 1975 г., все последующие пневмокаркасные сооружения своими технико-экономическими характеристиками не превосходили созданные ранее. Не создавалось конструкций пролётом более 24 м. В СССР пневмокаркасные сооружения по названным выше причинам распростране-

ния не получили. До 1983 г. насчитывалось лишь несколько экспериментальных образцов [24].

Сотрудниками кафедры технологии строительного производства ГОУВПО Воронежского государственного архитектурно-строительного университета проведены исследования патентов, авторских свидетельств, периодической литературы на предмет регистрации изобретений или данных о возведении пневмокаркасных сооружений в бывшем СССР и России в период 1982-2008 гг. [38, 39, 40]. За обозначенное время было обнаружено чуть более ста свидетельств на изобретения и патентов в области пневматических конструкций обоих типов. Количество разработок пневмокаркасных объектов составляет несоизмеримо меньшую часть по сравнению с воздухоопорными. В хронологическом порядке ниже приводятся некоторые зарегистрированные изобретения, характеризующие дальнейшее развитие конструкций данного типа.

1983 г. Устройство для защиты объекта от атмосферных воздействий.

Сооружение выполнено из секций, которые образованы соединёнными между собой по образующим поперечными надувными арками, нижние концы которых жёстко закреплены на платформе основания. Сооружение предназначено для защиты аэростатов на стоянке от метеорологических воздействий, солнечной радиации (рис. 1.3).

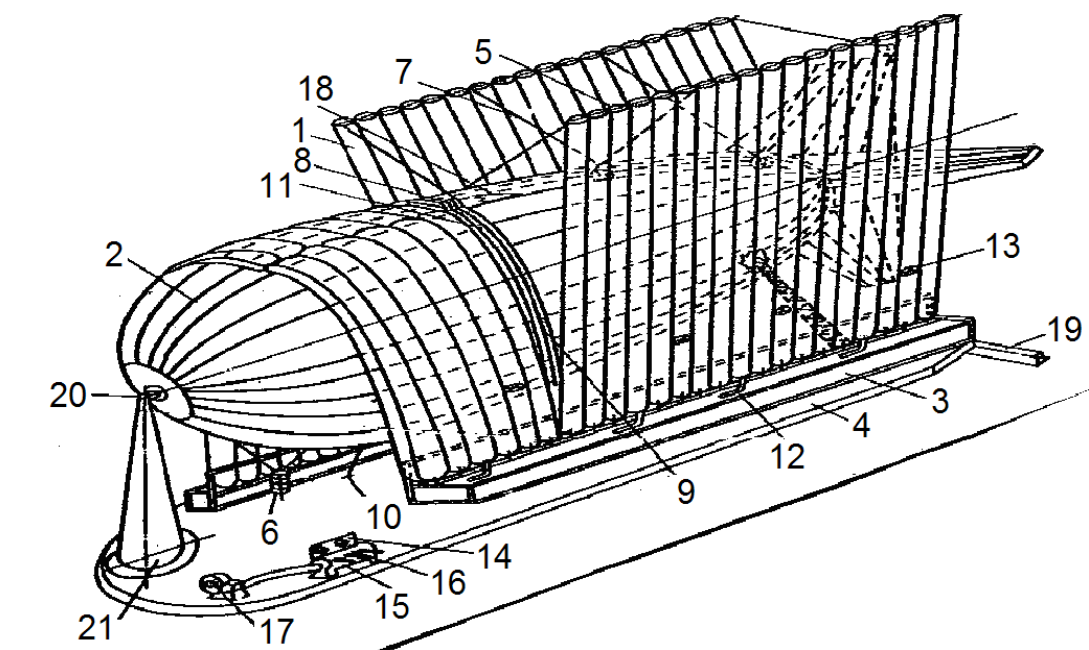


Рис. 1.3. Устройство для защиты объекта от атмосферных воздействий:

1- полуарка; 2 – аэростат; 3 – кронштейны; 4 – платформа удерживающего устройства;

5 – жёсткие стержни; 6 – грузы; 7 – фалы; 8 – ролики; 9 – пояса; 10 – расчалки;

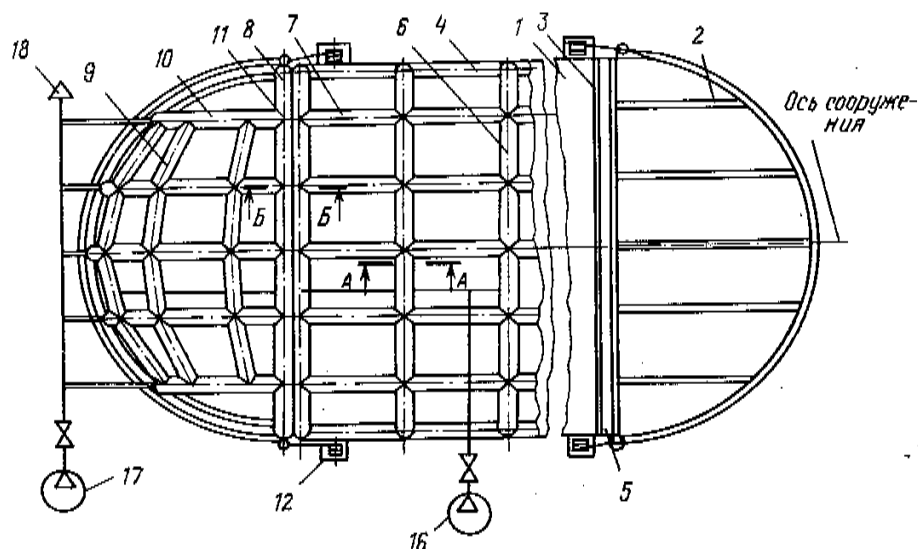
11 – боденовские оболочки; 12 – шланги; 13 – предохранительный клапан; 14 – реле

времени; 15 – клапаны; 16 – воздушный коллектор; 17 – вентилятор; 18 – датчик давления

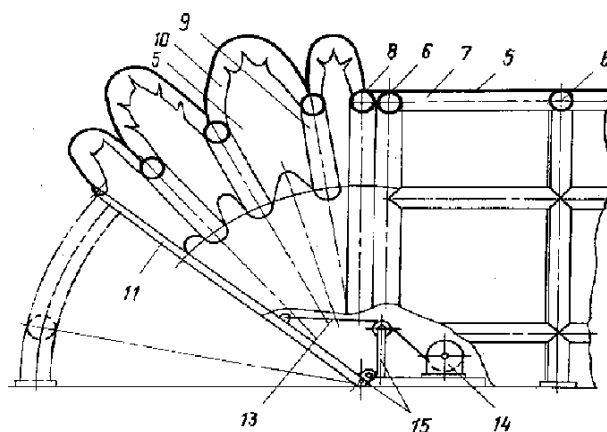
снега; 20 – носовой причал; 21 – рельс аэростатного удерживающего устройства

1987 г. Пневмокаркасное сооружение.

Пневмокаркасное сооружение с открывающимися проёмами в торцах имеет пневматический каркас, который состоит из соединённых между собой рядовых и торцевых секций, содержащих пневматические несущие элементы, расположенные в плоскости поперечного сечения сооружения, и обшивку, систему инженерного обеспечения. Кроме того, в конструкции сооружения предусмотрена трособлочная система, обеспечивающая подъём и раскрытие торца (рис. 1.4, а, б).



а) вид сверху



б) открывающийся торец

Рис. 1.4. Пневмокаркасное сооружение: 1 – рядовые секции; 2 – торцевые секции; 3 – шов; 4 – пространственный пневматический каркас; 5 – обшивка; 6 – пневматические элементы в плоскости поперечного сечения; 7 – пневматические элементы по образующим; 8 – элемент каркаса торцевой секции; 9 – пневмоэлементы под углом к поперечной плоскости; 10 – дополнительные пневмоэлементы; 11 – контурный элемент; 12 – подъемное устройство; 13 – трособлочная система; 14 – лебедка; 15 – система рычагов; 16, 17 – воздухоподушки; 18 – штуцер

1987 г. Хранилище для сыпучих материалов.

Хранилище имеет эластичную оболочку с прикреплёнными к её стенкам снаружи или изнутри стойками из эластичного материала. Стойки включают спиралеобразные трубопроводы, размещённые в стенках (рис.1.5) .

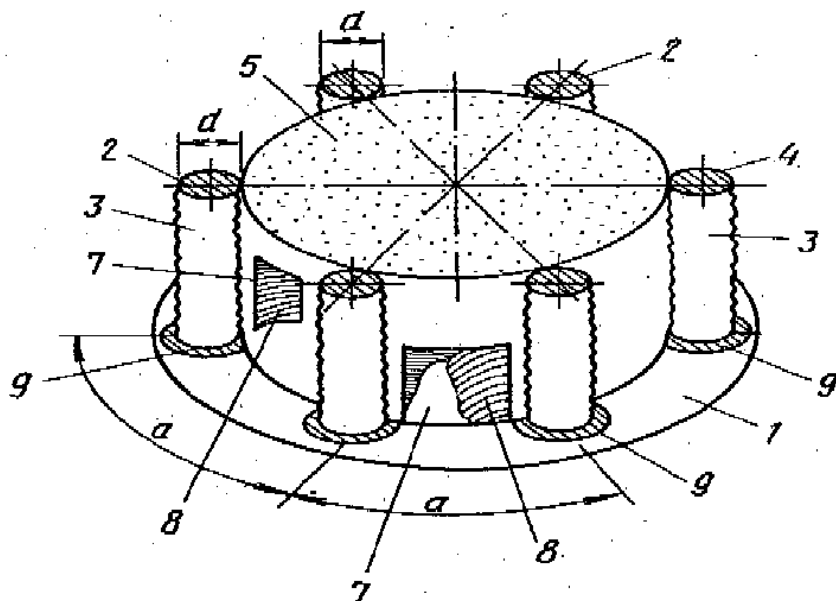


Рис. 1.5. Хранилище для сыпучих материалов:

1 – основание; 2 – спиралевидные стойки; 3 – эластичные стенки; 4 – крышки;
5 – эластичная оболочка; 7 – проёмы; 8 – фартуки; 9 – нижние части стоек

1992 г. Надувная конструкция.

Надувная конструкция представляет собой каркас шара, состоящий из дугообразных пневмоэлементов, форма которых описывается половиной окружности. Свободные концы пневмоэлементов неразъёмно объединены дополнительным тором. При этом внутри каждого пневмоэлемента в одной плоскости и на определённом уровне имеется эластичная герметизирующая перегородка, разделяющая его на два отсека (рис. 1.6) .

Приведенные изобретения являются лишь частью картины, описывающей общее положение и места использования пневмокаркасных конструкций, а анализ показывает, что они встречаются как элементы:

- комбинированных конструкций;
- пустотообразователей;
- опалубок.

В первой выделенной группе определённый интерес среди сооружений 1982 - 1998 гг. вызывает разработка В.П.Полякова и В.В.Полякова «Пневматическое купольное сооружение», отражающая одну из характеристик использования пневмокаркасных элементов: с целью упрощения и ускорения сборки монтажный проём выполнен в виде гибких полых надувных элементов, закреплённых на двух арках, к верхней части которых прикреплен тка-

невая оболочка, а к нижней – замковые соединения, выполненные с подпружиненными поворотными частями (рис. 1.7) [2].

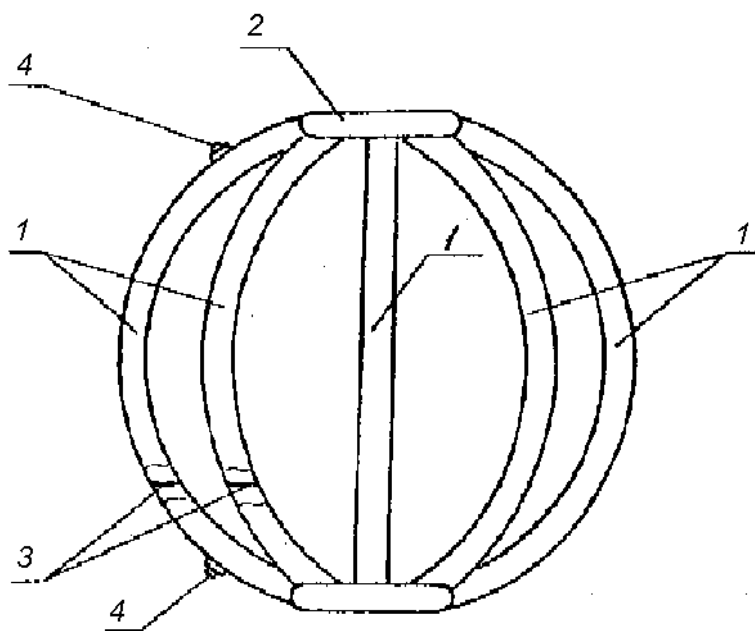


Рис. 1.6. Надувная конструкция:

1 – дугообразные элементы; 2 – дополнительный тор;
3 – эластичная герметизирующая перегородка; 4 – клапан

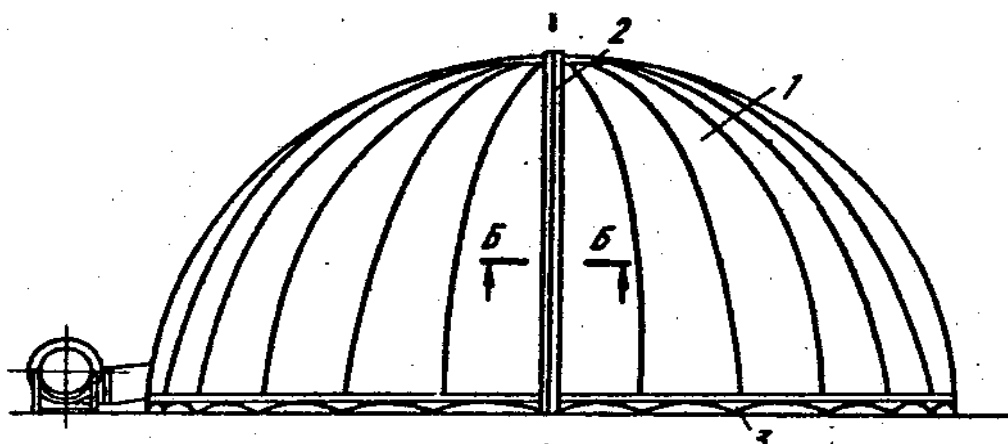


Рис.1.7. Пневматическое купольное сооружение:

1 – тканевая оболочка; 2 – монтажный разъем; 3 – опорный контур

Вторая группа содержит в себе разработки пустотообразователей. Конструкции данного типа совершенствовались достаточно быстрыми темпами в начале восьмидесятых годов.

1982 г. Инженером Кожевниковым Р.З. предложен пустотообразователь, который в отличие от существовавших ранее и обеспечивавших прямое положение каналов конструкций может образовывать каналы

сложной формы. Баллон этого пустотообразователя выполнен в виде надувного тора с замкнутой по всей длине внутренней поверхностью (рис. 1.8) .

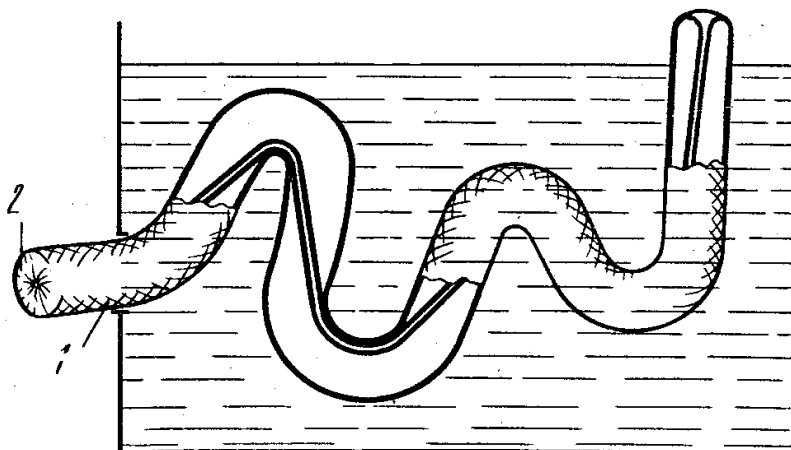


Рис. 1.8. Пустотообразователь:
1 – оболочка в виде надувного тора; 2 – штуцер

И последняя группа - это пневмокаркасные элементы в конструкциях опалубок. Их исследование и совершенствование ведётся и в наше время. Ниже анализируются разработки, отражающие наиболее характерные места применения пневмокаркасных элементов в конструкциях опалубок.

Использование пневмокаркасных конструкций не ограничивается перечисленными группами. Существуют и другие разработки, не нашедшие практического применения.

За рубежом научные исследования пневмокаркасных конструкций начались раньше, чем в СССР. Следует признать, что благодаря этому зарубежные инженеры добились более значительных успехов в разработках конструкций данного типа.

1960 г. Американский инженер Л. Ланде совместно с компанией «Берд эйр», основанной У. Бердом, запроектировал и соорудил выставочный павильон пневмокаркасной конструкции. Сооружение представляло собой двоякую оболочку в виде свода с гантелевидной в плане формой. Длина его составляла 136 м, максимальная высота 24,4 м. Перекрываемая оболочкой полезная площадь составляла 2200 кв.м [9].

1970 г. Крупнейшее до сегодняшнего времени пневмокаркасное сооружение было представлено на выставке “ЭКСПО – 70” (Осака, Япония). Это надувной павильон Фудзи, разработанный инженером Ютакой Муратой. Павильон представлял собой самую большую мембранную конструкцию, состоявшую из 16 пневмоарок диаметром 4 м и длиной 78 м, расположенных по окружности диаметром 50 м. В результате оба торца здания поднялись на 7 м. Через каждые 4 м арки соединялись друг с другом охватывающими их поясами шириной 0,5 м (рис. 1.9) [23].

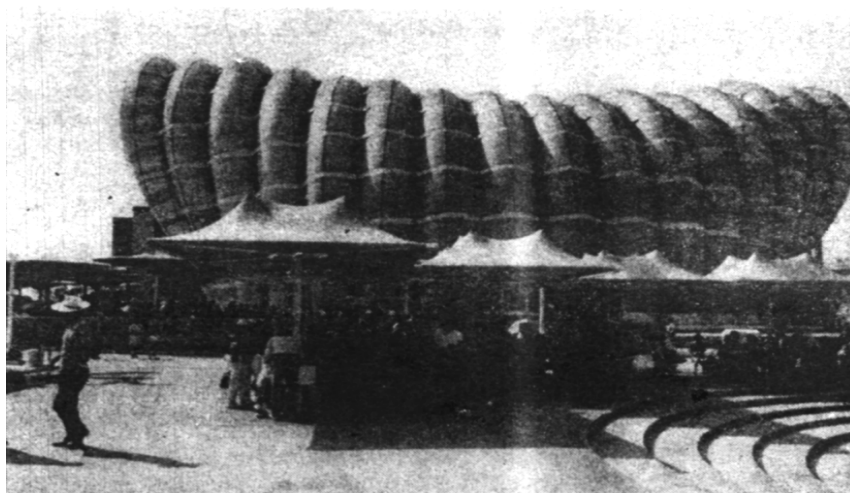


Рис. 1.9. Надувной павильон Фудзи (Япония 1970 г.)

На той же выставке Ютака Мурата представил еще одно пневматическое сооружение – плавучий театр пневмокаркасной конструкции. Театр был установлен на стальной опорной раме диаметром 23 метра. Его поддерживали 48 понтонов. Он покрывался оболочкой, удерживаемой пневмокаркасными трубами диаметром 3 м, образующими 3 арки пролётом 23 м. Рабочее давление воздуха внутри арок от 15 до 30 кПа (рис.1.10).

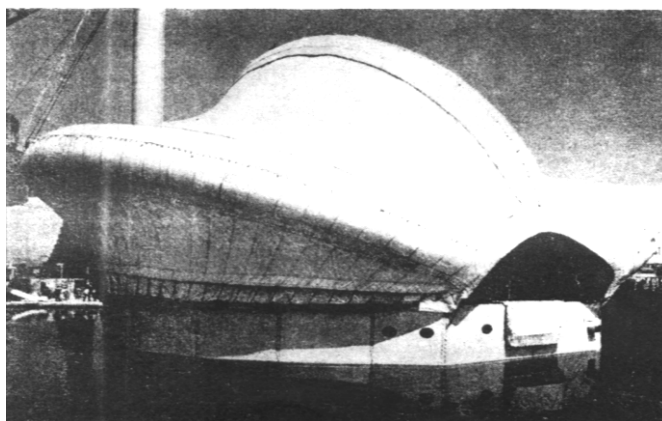


Рис.1.10. Пневмокаркасный плавучий театр (Япония, 1970 г.)

В Англии надутую воздухом трубу применили в качестве моста через водоём. Её диаметр равнялся 4 м, а длина 250 м. По трубе укладывался деревянный настил – проезжая часть. Кроме того, ещё надувные баллоны использовались для устройства понтонных мостов и переправ. В армиях отдельных стран приняты на вооружение пневматические радиомачты. Это труба конической формы с диаметром по низу 0,3...0,5 м и высотой 30 м. В собранном виде она умещается в ранце солдата. Наполненную воздухом мачту вставляют в инвентарный фундаментный стакан и раскрепляют оттяжками.

1978 г. В Терчине (бывшая ЧССР) построено пневмокаркасное сооружение пролётом 9 м и длиной 30 м, которое служило складом деревянных

строительных материалов. Сооружение тех же размеров возведено в Брно и использовалось при производстве железобетонных изделий (рис. 1.11).

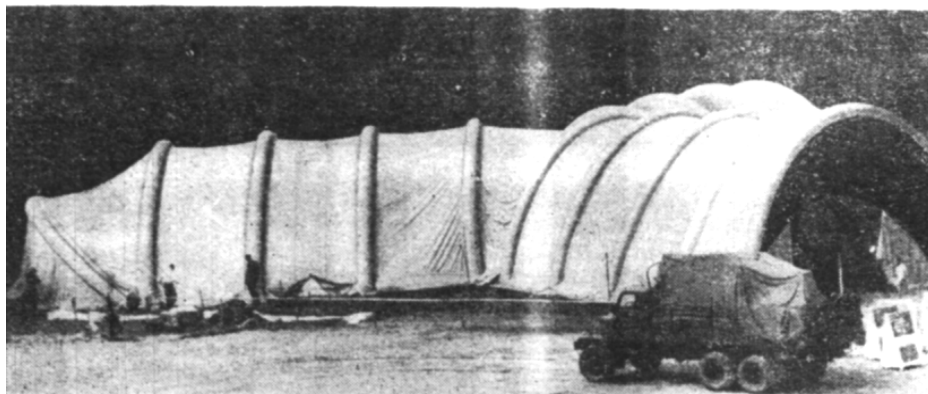


Рис. 1.11. Складское сооружение

В восьмидесятых годах пневмокаркасные конструкции находят большее применение в ФРГ, где надувные баллоны используются в гидротехническом строительстве. В Финляндии пневматические баллоны применялись при работах, выполняемых Управлением дорожного и гидротехнического строительства. Во Франции пневмобаллоны использовались в качестве пустотообразователей при производстве строительных конструкций.

Таким образом, анализируя собранный материал, можно сделать следующее заключение: период развития пневмокаркасных конструкций, отличающийся научным подходом, укладывается в отрезок времени с 1897 г. по настоящее время. При этом с 1897 г. и приблизительно по 1955 г. проводилось осмысление данного типа конструкций как строительных сооружений, отмечалось появление первых моделей и методик расчётов. Начиная с 1956 г. в различных странах мира появляются первые реально используемые пневмокаркасные сооружения, а с 1960 г. их количество возрастает, усложняются конструктивные схемы, увеличиваются геометрические размеры. Однако бурное развитие повлекло и накопление определённого опыта в расчётах, возведении и эксплуатации данного типа сооружений, анализ которого позволил вскрыть ряд общих недостатков. И с 1972 г. начинаются попытки устранения сложности изготовления элементов, недостаточной устойчивости конструкций, вызываемой воздействием ветровых, а в зимний период и снеговых нагрузок, недостаточной герметичности камер, высокой стоимости. Появляются образцы, в конструкции которых учитываются отмеченные недостатки. Но с 1974 – 1975 гг. постепенно темпы исследований в области пневмокаркасных конструкций снижаются и дальнейшее развитие получают отдельные образцы и «экзотические модели». Главный критерий оценки – стоимость – не позволяет им найти широкое применение в строительстве. Этот период в развитии продолжался до девяностых годов, позднее интерес учёных снова возвращается к пневмокаркасным конструкциям [1, 5, 9, 10, 22, 23, 24, 26]. Исследований их в чистом виде не происходит, они изучают-

ся как элементы сооружений. Исследуются их свойства. Подчёркиваются преимущества в сравнении с обычными строительными материалами - лёгкость, возможность унификации, малый удельный расход материалов, экономических затрат на производство и эксплуатацию. Предпринимаются попытки выявить эти преимущества, используя пневмокаркасные конструкции в унифицированных формах и новом качестве.

1.2. Использование пневматических конструкций в качестве опалубок

Одним из перспективных направлений применения пневмонапряжённых конструкций является их использование в качестве опалубки для возведения монолитных сооружений. Сейчас это не только железобетонные конструкции, но и стеклопластиковые купола, волнистые легкие цилиндрические своды. Обширна область применения пневматических опалубок: от возведения гражданских зданий до опор мостов, от линейно-протяженных сооружений до купольных покрытий над испытательными полигонами и спортивно-развлекательными сооружениями. Формы возводимых сооружений чрезвычайно разнообразны. Пневматическая опалубка может довольно быстро внедряться в практику зарубежного и отечественного строительства.

По способу нанесения бетонной смеси различают два вида пневмоопалубок: пневмодинамическая опалубка, которая закрепляется и расстилается в уровень земли, затем на неё укладывается слой бетонной смеси, после чего опалубка напрягается воздухом и приводится в проектное положение; и пневмостатическая опалубка, которая устанавливается в проектное положение, а затем на неё укладывается бетон. Причем в отличие от пневмодинамической опалубки, к которой в основном относятся воздухоопорные конструкции, пневмостатическая опалубка (пневмокаркасные конструкции) предполагает пневмонанесение бетонной смеси методами торкретирования или пневмонабрызга [36]. Анализ существующего положения показал, что технология возведения строительных конструкций торкретированием с использованием пневматических опалубок довольно эффективна, способна снизить трудоемкость опалубочных работ и сократить сроки строительства.

Идея использования пневмонапряжённых оболочек в качестве опалубки статического типа принадлежит американскому архитектору У. Неффу, который в период второй мировой войны предложил строить временные здания для военнослужащих путем набрызга бетонной смеси на пневматическую опалубку. В дальнейшем этот метод стал известен специалистам под названием «*Air form*», который и положил начало развитию так называемой статической опалубки.

Сущность метода возведения заключалась в набрызге одного или нескольких слоев мелкозернистой бетонной смеси на надутую воздухом пневмооболочку, закрепленную по периметру на предварительно подготовленном основании. Наибольшее распространение способ У. Неффа получил при из-

готовлении гладких оболочек в виде полусфер, или цилиндрических сводов, технологические схемы которых приведены на рис.1.12.

Перед началом изготовления монолитной оболочки строители устраивают ленточный фундамент и выравнивают площадку под будущее сооружение. На подготовленной таким образом площадке расстилают резиновую или резиноканевую оболочку пневмобаллона и прикрепляют к фундаменту будущего сооружения. После закрепления в пневмобаллон подают сжатый воздух, избыточное давление которого придает достаточно устойчивую, прочную и жесткую форму поверхности оболочки покрытия, как утверждают авторы настоящего инженерного решения.

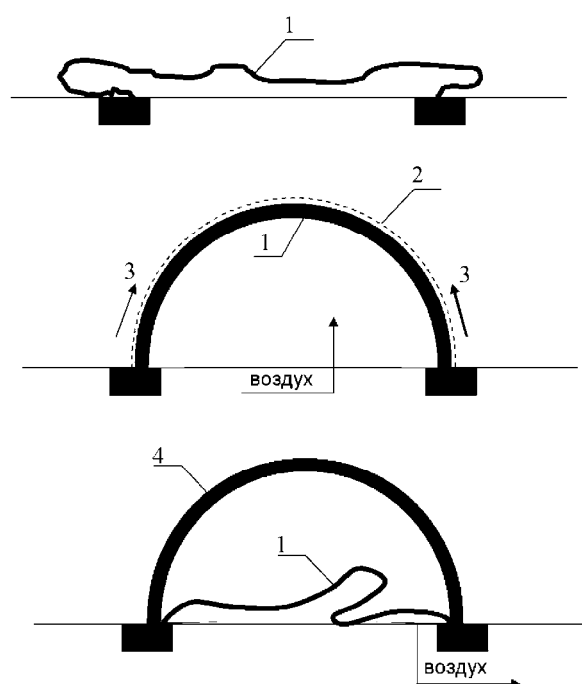


Рис.1.12. Схема возведения оболочек по способу У. Неффа:

1 –пневмоопалубка, 2- бетонная смесь, 3- направление подачи бетонной смеси, 4 – свод или полусфера

Далее технология бетонирования сферических покрытий, по У. Неффу, предусматривает укладку на надутую пневмооболочку арматуры из сеток и отдельных стержней. С помощью торкрет-пушки на поверхность опалубки наносят слой бетона. Избыточное давление в пневмоопалубке поддерживается до момента затвердения бетонной смеси обычно в течение 24-36 ч при нормальных температурно-влажностных условиях, а затем производится распалубка готовой конструкции. По способу У. Неффа в США возводились легкие временные одноэтажные жилые дома. Эти сооружения состояли из многослойных теплых оболочек, которые выполняли функции стен и покрытий. Несмотря на сложность многослойной конструкции, изготовление оболочек осуществлялось в короткие сроки. Так, например, две полусферы четырехкомнатного жилого дома диаметром 7,5 м бетонировали за 7 ч. Техно-

логия изготовления многослойных утепленных оболочек несколько отличается от бетонирования по мягкой опалубке одного армированного слоя.

Пневматический баллон покрывают растягивающейся сеткой из проволоки, на которую укладывают слой мелкозернистого торкрет-бетона толщиной 2,5-3 см. На этот слой укладывают паро- и теплоизоляцию и покрывают слоем металлической сетки, которую также торкретируют слоем мелкозернистого бетона.

Бетонные купола, построенные методом торкретирования поверхности пневматической опалубки, отличаются большой прочностью. Оболочка диаметром 10 м, стрелой подъема 4,3 м и толщиной 2,5 см выдерживала при испытании нагрузку 20 т, которая была приложена к её вершине, без разрушения с незначительным прогибом.

В период 1962-1966 гг. метод У.Неффа развил в своих работах американский архитектор Э. Нойес: который усовершенствовал армирование, изменил очертание формы пневматической опалубки и применил для неё более прочную ткань, что положительно сказалось на качестве железобетонных купольных покрытий [1].

Существенно дополнил и видоизменил способ У. Неффа российский инженер Э.Л. Майлер, разработавший в шестидесятые годы технологию изготовления набрызгом армоцементных пространственных конструкций в условиях закрытых помещений. Сущность этого способа заключается в том, что мягкую воздухоопорную оболочку любой пространственной формы используют в качестве формообразующего элемента, к внутренней поверхности которой прикрепляют арматуру, состоящую из отдельных стержней и тканых сеток, после чего производят набрызг бетонной смеси (рис.1.13).

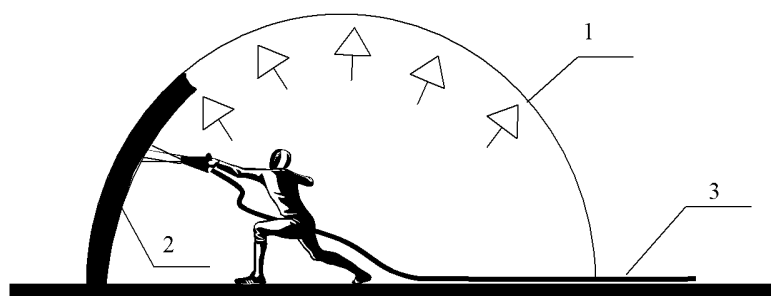


Рис. 1.13. Схема изготовления оболочек набрызгом бетона на внутреннюю поверхность мягкой опалубки: 1- мягкая опалубка, 2 – нанесённая бетонная смесь, 3 – материалы шланги

Как все мягкие оболочки, воздухоопорную опалубку устанавливают в рабочее положение с помощью непрерывной подачи сжатого воздуха. Для обеспечения свободного доступа рабочих в закрытое пространство пневмоопалубки к оболочке пристраивают шлюзовой тамбур. Через этот тамбур можно доставлять к рабочим местам инструмент, некрupную аппаратуру и

строительные материалы. Оболочка воздухопорной опалубки служит одновременно укрытием рабочего пространства строительной площадки от воздействия атмосферной среды. В случае производства работ в зимнее время под оболочку нагнетают подогретый воздух.

В нашей стране предложения о применении пневматической опалубки в строительстве связаны с именем А.Э. Лопатто. В начале пятидесятих годов А.Э. Лопатто предложил возводить вспарушенные плиты междуэтажных перекрытий с использованием линзообразной пневмооболочки-опалубки, натянутой на металлическую раму [12]. Пневмоопалубка состоит из сборно-разборной металлической рамы, периметр которой равен внутренним размерам перекрываемого помещения (рис.1.14). На раму натягивается плоский воздухонепроницаемый конверт-баллон из прорезиненной ткани. Предварительное натяжение конверта осуществляется шнуровкой, огибающей поочередно крюки, расположенные по периметру рамы и конверта.

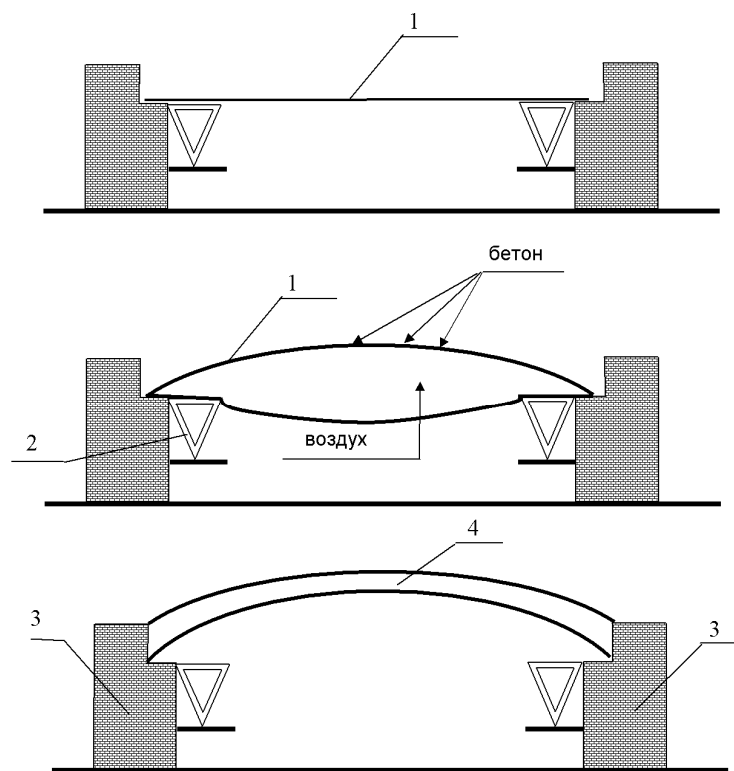


Рис.1.14. Бетонирование вспарушенных плит с использованием пневмоопалубки А.Э. Лопатто: 1- пневмолинза, 2- опорный контур, 3 – несущие стены, 4 – монолитная оболочка

После того как конверт равномерно натянут на раму, что выполняется вне перекрываемого помещения, опалубка поднимается на проектную отметку. Затем конверт надувается до заданной стрелы подъема, и на него, начиная от краёв к центру, наносится торкрет равномерно по всей поверхности. Полученная торкрет-корка толщиной 2-3 см после твердения является основой для возведения на ней, как по жесткой опалубке, собственно оболочки запро-

ектированной конструкции из сборного железобетона либо путем последовательного торкретирования. После этого все детали пневмоопалубки готовы к новому употреблению.

Заслуживает внимания одна деталь технического решения бетонирования конструкций на пневмоопалубке, предложенная А.Э.Лопатто. Речь идет о следящем реле, связанном с воздухоподающим агрегатом, создающим благоприятные условия схватывания торкрет-корки. Реле давления воздуха имеет чувствительность, эквивалентную осадкам конверта величиной порядка 0,02 мм, то есть торкрет находится в гораздо более спокойных условиях схватывания, даже по сравнению с деревянной опалубкой, осадки которой от коробления намокшей и затем высыхающей древесины значительно больше.

Как уже было сказано ранее, в Германии уделялось большое внимание пневматическим опалубкам, например, была предложена следующая конструктивная система воздухоопорной опалубки при возведении резервуара для хранения питьевой воды в Лейпциге [7, 12].

В качестве опалубки купола резервуара использовался комплект криволинейных опалубочных тонкостенных формообразующих панелей. В качестве технологического метода возведения купола резервуара применялось шприц-бетонирование. Шприц-бетонный купол включал в себя натяжное кольцо, опалубку, опорное кольцо. Натяжное и опорное кольцо замоноличивалось с помощью бетононасоса ВК – 20. Купольная опалубка торкретировалась с толщиной наносимого слоя до 100 мм. Для изготовления купола была использована новая опалубочная система. Опалубочная система состояла из 28 сегментных опалубочных панелей из GYP (упрочненный стекловолокнистый полиэстерный элемент), которые состыковывались между собой, образуя воздуонесущий опалубочный купол (рис. 1.15).

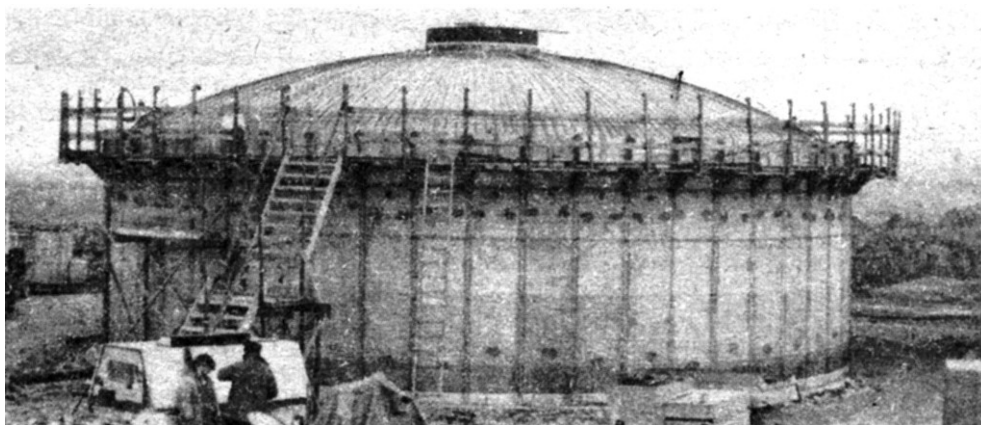
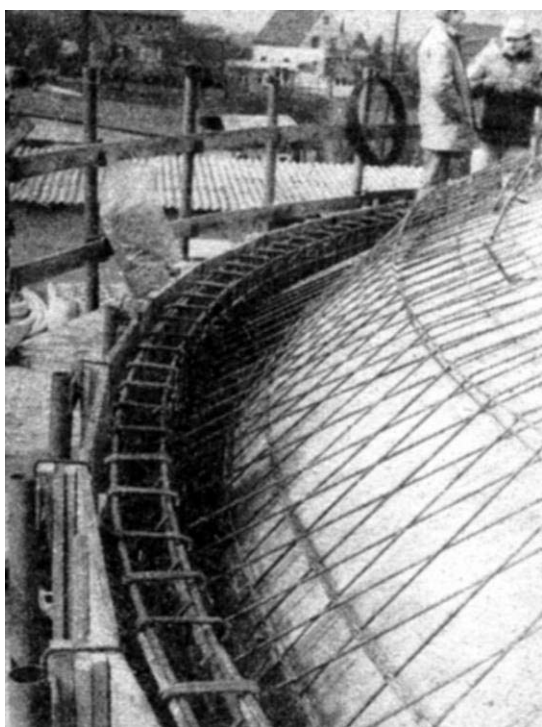


Рис.1.15. Опалубочная конструкция из 28 GYP- элементов

Опалубочная система снабжалась специальными подмостями для нанесения торкрет-бетона. Вспомогательные подмости устанавливались в центре возводимого резервуара. Данная конструкция опалубочной системы была за-

патентована. При зачеканке стыков стенок и устройстве кранового пути для навивочного аппарата устраивались выемки грунта около каждого стыка. После набора достаточной прочности бетона в стыках приступали к нанесению бетона на опалубочный купол. Первый слой выполнял роль защитного слоя арматуры от коррозии. Напрягаемые кольца изготавливались из товарного бетона или приготовляемого на стройплощадке с помощью бетономешалок, так как метод шприц-бетонирования не может гарантированно обеспечить проектные характеристики из-за склероскопических явлений в торкрет-бетоне.

Опалубка торкретировалась после шприц-просушки. Набрызг-бетонные работы начинались от опорного кольца (рис.1.16, а) к натяжному. Бетон наносился по всей толщине (рис.1.16, б).



а)



б)

Рис. 1.16. Технологические этапы возведения свода: *а - армирование опорного кольца; б - торкретирование опалубочной поверхности*

При этом обеспечивалось полное закрытие арматуры и равномерное распределение бетона в соответствии с показаниями специального затирочного маяка. Для устранения склероскопических явлений торкрет-бетона, получения максимальной прочности бетон уплотнялся посредством направления энергии струи смеси перпендикулярно поверхности опалубки. Бетонирование натяжного кольца производилось посредством автобетононасоса из товарного бетона после окончания торкретных работ и тщательной проверки качества нанесенной смеси. После достижения необходимой прочности бе-

тона производилось распалубливание конструкций в опорном и натяжном кольцах, сегментные опалубочные панели раскреплялись посредством трёх лебедок и несущие элементы оболочки нагружались. Резервуар был готов к комплектованию его технологическим оборудованием.

Экономическая эффективность данного проекта обеспечивалась использованием специальной опалубочной конструкции и применением специальных методов возведения. Этот метод позволил сэкономить 2455 кг стали на один резервуар, 5340 кг цемента, сократить срок строительства на 3 месяца [38].

Предложенный метод возведения, несмотря на полученный экономический эффект, не совсем технологичен, поскольку требует использования специальной оснастки - специальных подмостей, лебедок для распалубливания. Помимо этого требуется устройство натяжного кольца из товарного бетона, устройства кранового пути для навивочного аппарата. К тому же одним из главных недостатков метода является то, что воздухоопорный опалубочный купол формируется из сегментных элементов непосредственно на стройплощадке, что может привести к разгерметизации купола, его расстыковке и повреждению в момент нанесения торкрет-бетона, потере устойчивости и, как следствие, к разрушению опалубочной системы.

Поэтому рациональней в данном случае было бы использовать инвентарную пневматическую опалубку купольной формы заводского изготовления. Данная опалубка имеет ряд преимуществ перед ранее описанной опалубочной конструкцией, поскольку при установке её в проектное положение она занимает весь проектный объем одновременно, что позволяет сократить сроки её монтажа. К тому же швы опалубки заводского изготовления повышают её герметичность и, как следствие, уменьшают вероятность возникновения критических ситуаций в момент нанесения торкрет-бетона. Применение данной опалубки позволяет сократить сроки её демонтажа, поскольку она с легкостью отрывается от бетона во всех точках и не требует применения специальных лебедок и других средств.

Перечисленные выше преимущества обосновывают целесообразность применения пневматических опалубок в практике строительства. Наиболее ярким проявлением технологического использования пневматических опалубок в настоящее время становится технология возведения армоцементных сводов, разработанная в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете [11, 29, 31].

Комплексный технологический процесс возведения монолитных сооружений с применением пневмоопалубки (рис.1.17, 1.18) включает подготовительные и основные процессы. До начала производства работ по возведению волнистого свода из армоцемента выполняются все работы по устройству монолитного фундамента, бетонного пола, монтируется опалубка и производится комплектование строительного процесса соответствующим рабочим оборудованием [16].

Приведение мягкой опалубки в проектное положение и придание ей необходимой жесткости осуществляется при помощи сжатого воздуха. Армирование каркаса сооружения производится рулонной тканой сеткой и металлическими тросами. Нанесение пескобетонной смеси на рабочую поверхность опалубки производится послойно при помощи установки «Пневмобетон» [20].

При достижении бетоном проектной прочности производится расплубливание конструкции путем отключения воздухоподающих установок [2].

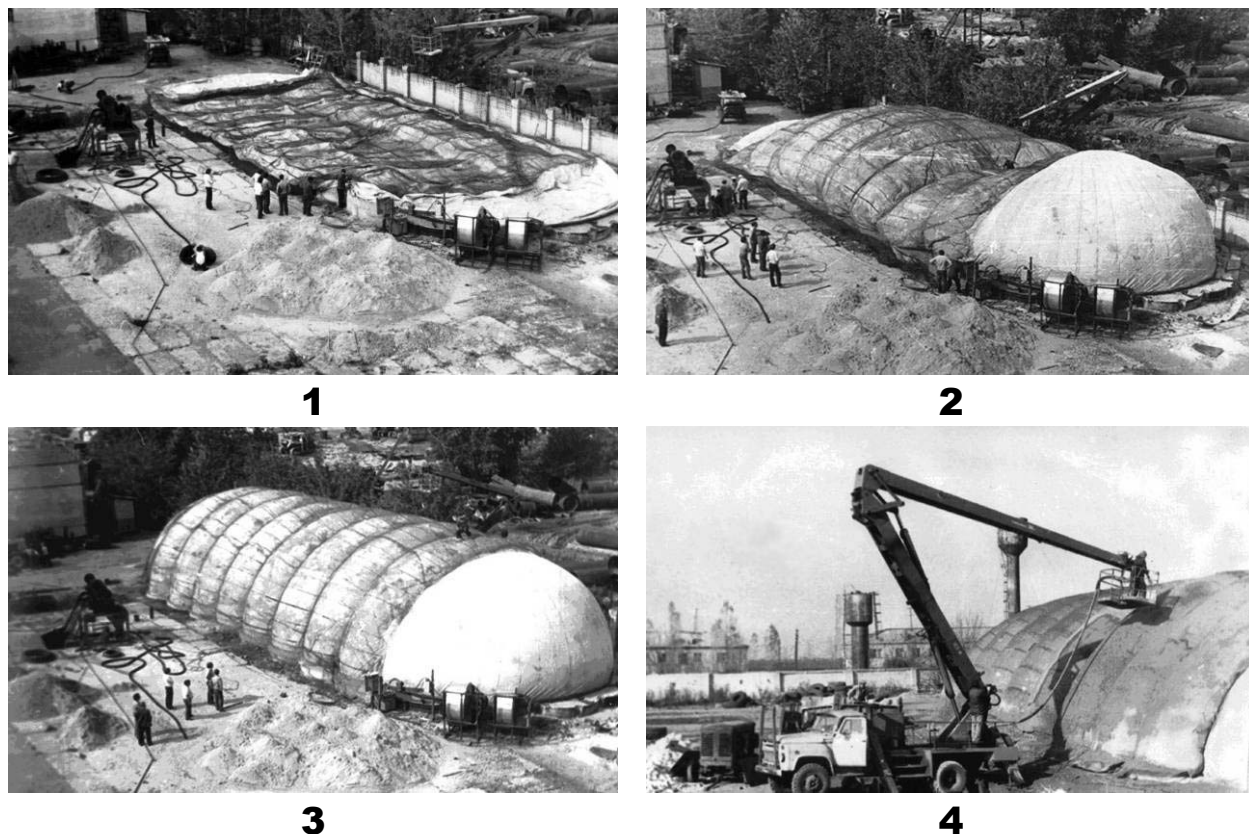


Рис.1.17. Возведение волнистых армоцементных сводов:

1 – укладка пневмоопалубки; 2 – установка в проектное положение сжатым воздухом;
3 – армирование; 4 – нанесение набрызг-бетонной смеси установкой «Пневмобетон»

Данная технология возведения сооружений с использованием пневмоопалубки была успешно внедрена в строительных организациях Воронежа, Минска, Старого Оскола и может быть применена для строительства складов, хранилищ, мастерских по ремонту техники, закрытых стоянок транспорта и т.д. [1]. Применение пневмоопалубки повышает качество бетонируемых поверхностей, поскольку внутренняя поверхность получается практически идеально гладкая, с небольшим количеством раковин, что снижает затраты на последующую доводку конструкции [14]

К тому же пневмоопалубка сокращает сроки выдерживания бетона, позволяет возводить пространственные конструкции оптимальной геометри-

ской формы. В Воронежском государственном архитектурно-строительном университете этой проблемой занималась целая группа ученых под руководством доктора технических наук профессора А.С. Арзуманова.



Рис.1.18. Распалубливание армоцементного свода, возводимого на пневмоопалубке

Основные положения предлагаемой технологии отражены в авторских свидетельствах и патентах. Однако использование воздухоопорной опалубки, помимо достоинств, таких как простота установки, возможность сверххраненного распалубливания, довольно высокая оборачиваемость, небольшая величина рабочего давления, имеет и ряд недостатков. К этим недостаткам можно отнести:

- высокие эксплуатационные затраты от использования воздухоопорной опалубки, так как требуется постоянная подача воздуха, а также эксплуатируется основной и резервный источник энергии;
- высокая материалоемкость опалубок - одна опалубка идет на одно сооружение, то есть, пока не закончен весь комплекс бетонных работ, её нельзя переставлять, поэтому невозможно разбиение возводимого сооружения на захватки;
- воздухоопорные опалубки не универсальны, поскольку один тип опалубки позволяет возводить только один тип сооружений;
- воздухоопорные опалубки в силу своих габаритов предполагают изготовление их на специализированных предприятиях [34].

Поэтому при возведении сравнительно небольших строительных конструкций рациональней использовать пневмокаркасные опалубки, поскольку они просты в эксплуатации, легко транспортируемы, позволяют сократить затраты на эксплуатацию воздухоподающей системы.

Для возведения конструкций малых архитектурных форм, очевидно, можно использовать способ литья монолитных железобетонных оболочек. Для осуществления этого способа используется мягкая пневмоопалубка, состоящая из воздухонепроницаемого внутреннего пневмобаллона и наружного водонепроницаемого чехла. Процесс бетонирования пространственной конструкции на примере сферического купола способом литья схематично изображен на рис.1.19.

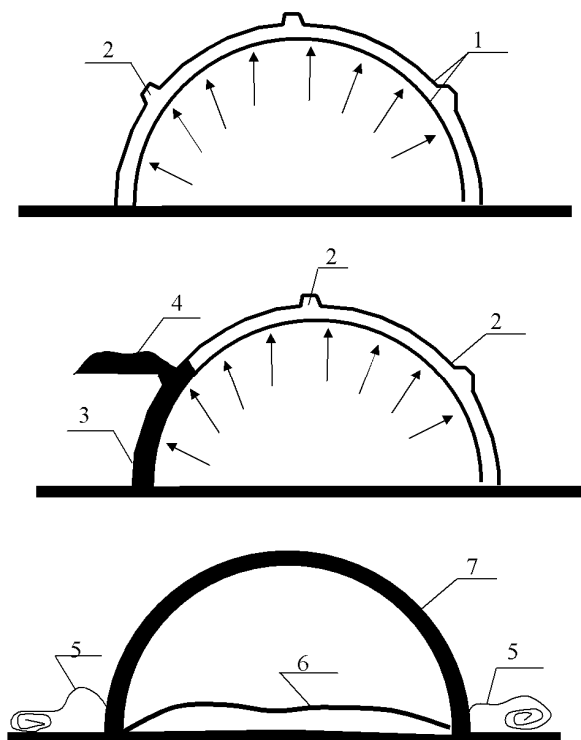


Рис. 1.19. Схема бетонирования оболочек способом литья:

- 1 - пневмоопалубка, 2 - патрубки для подачи бетонной смеси,
- 3 - литая бетонная смесь, 4 - материальные шланги,
- 5, 6 - демонтаж пневмоопалубки, 7 - монолитный свод

На подготовленной площадке расстилают пневматический баллон из прорезиненной ткани, конструкция которого мало отличается от традиционной мягкой опалубки. После заполнения баллона воздухом до приобретения устройством формообразующей поверхности на него укладывают рабочую арматуру из отдельных стержней и сеток и скрепляют пространственный каркас, обеспечивающий проектную толщину будущей оболочки. Пространственный каркас закрывают верхним чехлом, который раскроен таким образом, что повторяет форму пневматического баллона. Между двумя элементами опалубки образуется рабочий зазор, предусмотренный для размещения арматуры и бетонной смеси. В пространство, образованное арматурным каркасом, начиная с нижнего яруса нагнетается подвижная бетонная смесь и подвергается вибрации, во время которой избыточная вода фильтруется че-

рез наружную водопроницаемую оболочку мягкой опалубки и смесь становится жесткой.

Начало применения динамической пневмоопалубки для возведения тонкостенных оболочек относится к началу 60-х годов, когда инженером А.Н. Черновым был предложен метод бетонирования цилиндрических сводчатых конструкций способом погиба опалубочного полотна с предварительно уложенной арматурой и бетоном. Суть способа заключается в том, что бетонную смесь укладывают с уплотнением на разостланную на горизонтальном основании не надутую опалубку и, нагнетая в опалубку воздух, придают бетонной смеси проектную форму. Использование предложенного способа предполагалось при изготовлении криволинейных сборных сводчатых элементов на заводах ЖБИ или полигонах.

Позднее с целью уменьшения трудоемкости арматурных работ и упрощения процесса укладки армирующих элементов итальянский инженер Д. Бини предложил и запатентовал способ бетонирования купольных конструкций на пневмодинамической опалубке.

По способу Д. Бини плоское эластичное полотно (рис. 1.20) мягкой опалубки расстилают на поверхности подготовленной площадки и герметично прикрепляют к контуру кольцевого ленточного фундамента будущего сооружения. На полотне укладывают растягивающуюся арматуру, которую изготавливают в виде спиралей из гладкой стальной проволоки, усиливая арматурными стержнями. Арматуру укладывают вручную, располагая ее на плоскости полотна пересекающимися лучами. Концы арматурных стержней крепят к анкерному контуру фундамента будущего сооружения [32].

После укладки арматуры и закрепления ее по контуру укладывают обычную бетонную смесь. Поверхность уложенной бетонной смеси накрывают полотном из водонепроницаемой пленки или ткани, которое закрепляют по контуру. Полотно вместе со спиральной арматурой удерживает бетонную смесь от сползания во время подъема и вибрирования, а также защищает бетон от размыва дождем и улучшает процесс его затвердения.

Опалубку вместе со строительными материалами поднимают сжатым воздухом, который подают вентилятором под полотно опалубки до создания избыточного давления в 2,5-5,0 кПа. Во время подъема полотно опалубки растягивается. Вместе с полотном растягиваются арматура и бетонная смесь, в результате чего в бетоне образуются трещины. Эти дефекты устраняют, подвергая незатвердевшую оболочку вибрации частотой 60-80 Гц с помощью вибраторов.

По материалам фирмы "Бинишеллз", бригада из 6-8 рабочих возводит сферический купол диаметром 30 м за 3-4 дня. Один день затрачивается на подготовку опалубки и ее закрепление, 1-2 дня - на монтаж арматуры. Укладка бетона, подъем опалубки и вибрирование бетонной смеси осуществляется за один день.

Опалубку снимают в зависимости от степени затвердения бетона и размера оболочки через 1-3 дня после окончания бетонирования путем откачки воздуха из опалубки с помощью обратного клапана в нагнетающем вентиляторе. Полотно опалубки вынимают из-под оболочки через специальное отверстие.

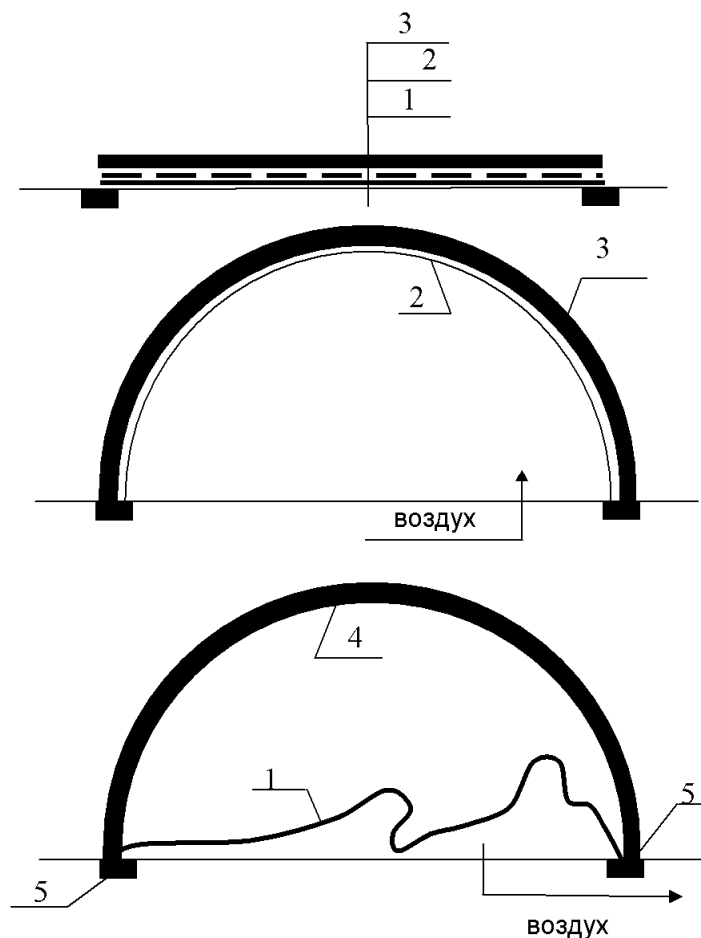


Рис. 1.20. Схема изготовления сферических куполов по способу Д.Бини:

1 - пневматическая опалубка, 2 - арматурный каркас,
3 - бетонная смесь, 4 - монолитный свод, 5 - основание.

Проемы в стенках оболочек вырезают ручной дисковой пилой. В местах запроектированных проемов устанавливают минимальное количество арматуры. Перед вырезанием проемы по контуру часто усиливают архитектурными элементами. С помощью мягкой опалубки фирма "Бинишеллз" возводит куполообразные оболочки не только на земле, но и по опорным контурам.

Недостаток способа - увеличение площади бетона при подъеме конструкции в проектное положение. При случайном характере вытягивания арматуры и бетонной смеси фактическая толщина бетона может отличаться от проектной, бетонная смесь становится рыхлой, поэтому ее уплотняют в про-

ектном положении, перемещая вибратор от вершины сооружения к основанию. При вибрировании бетона на участках, имеющих большой наклон, бетонная смесь вытекает из вышележащих провибрированных наклонных слоев, образуя бетон рыхлой структуры и недостаточной морозостойкости. При этом способе невозможно уложить до подъема облицовку и утеплитель на проектную площадь купола.

Б.И. Петраков, развивая идею А.Н. Чернова, предложил способ возведения цилиндрических сводов из железобетона на пневмодинамической опалубке путем поднятия в проектное положение слоя уложенной и уплотненной на уровне основания армированной бетонной смеси. Отличительной особенностью пневмоопалубки являлось наличие открьлков, пришитых на рабочих участках палубы опалубки (рис.1.21).

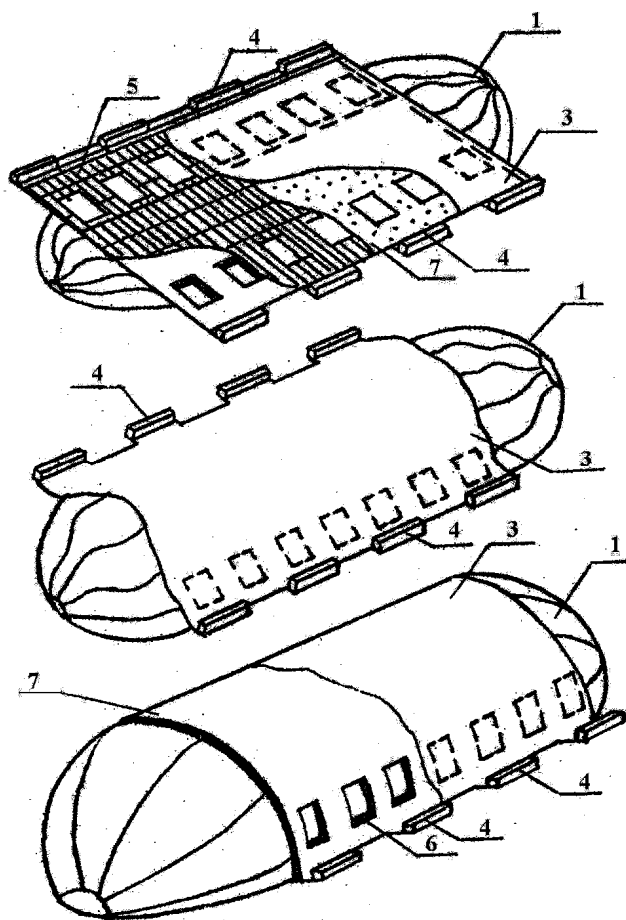


Рис.1.21. Схема изготовления гладкого цилиндрического свода способом погиба: 1 - пневмоопалубка, 2, 3 - формирующее и удерживающее полотнища пневмоопалубки, 4 - пригрузы, 5 - арматурный каркас, 6 - оконные проемы, 7 - бетонная смесь

При раскладе опалубки они заменяли часть цилиндрической поверхности, завернутой в складки. Таким образом, ширина бетонированного участка равнялась длине дуги, образующей цилиндрическую поверхность будущего

свода. При подъеме армированная бетонная смесь, уложенная на открылках, прижималась к пневмобаллону и низ его замоноличивался с фундаментом.

С помощью пневматической опалубки был построен сводчатый склад пролетом 6 м и длиной 7 м [32]. Пневмоопалубка была изготовлена Загорским филиалом НИИРП из ткани № 51-019. Масса оболочки составляла 150 кг, рабочее давление 1,8 кПа. Пневмобаллон испытывался на давление 2,3 кПа. В настоящее время с помощью опытных образцов пневматической опалубки в России возведено несколько монолитных железобетонных сводов с максимальным пролетом 18 м.

Заслуживает внимания конструкция пневмоопалубки, предложенная Б.И. Петраковым и В.П. Селивановым, для возведения многогранных куполов диаметром 21 м. Отличительной особенностью ее конструкции кроме формообразующей оболочки является наличие рабочего полотнища, представляющего собой развертку поверхности купола на плоскость (трапецевидные лепестки). Арматуру и бетонную смесь (рис. 1.22) укладывают на лепестки этого полотнища, расположенного поверх разложенного со складками пневмобаллона, уплотняют и поднимают в проектное положение [33].

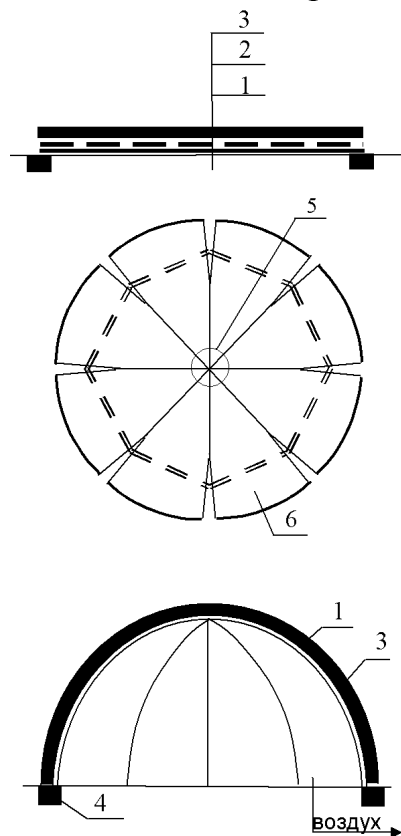


Рис. 1.22. Схема возведения купольных конструкций на пневмодинамической опалубке: 1 - пневмоопалубка, 2 - арматурный каркас, 3 - бетонная смесь, 4 - основание, 5 - элемент вершины пневмоопалубки, 6 - открылки

По достижении необходимой формы замоноличивают в фундаменте концы бетонных лепестков и заделывают стыки между ними. Таким спосо-

бом построено пять куполов диаметром 10 м толщиной оболочки 35-45 мм. Расчетная высота купола отличалась от фактической на 7 %. Купол без теплоизоляции возводился за 4-5 суток, утепленный - за 5-6 суток. Строительство купольных покрытий данным методом, по сравнению с методом фирмы "Бинишеллз", при почти равной трудоемкости позволило снизить стоимость работ в два раза (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Сравнение характеристик купольных покрытий

Показатель	Способ		
	Д.Бини	У.Неффа	Б. Петракова
Трудоёмкость возведения, чел.- дн (на 1 м ² полезной площади пола.)	0,35	6,4	0,27
Расход строительных материалов (на 1 м ² полезной площади пола): бетона, м ³ стали, кг	0,137 9	0,15 6	0,08 6,3

И, наконец, в районе подмосковного города Истра методом набрызга на пневмоопалубку был возведен полусферический железобетонный купол диаметром 32 м [7]. Технологическая схема производства работ запроектирована в Московском архитектурном институте под руководством В.В. Беспалова. На сегодня это самый большой купол в отечественной практике строительства сооружений на пневматической опалубке. В качестве опалубки была использована непригодная для эксплуатации воздухоопорная оболочка. Вместо стержневой арматуры применена дисперсная, замешиваемая в бетоне.

Достаточно богатый опыт применения пневмоопалубок для возведения линейно-протяженных сооружений имеется за рубежом. Так, в Чехословакии и ГДР в 1969 г. с помощью надувной опалубки были проложены бетонные трубопроводы: длиной 200 м с внутренним диаметром 1,2 м и длиной 500 м с внутренним диаметром 1,8 м. Толщина стенок бетонных труб составляла 40-50 мм, железобетонных - 20 мм.

Опалубка представляла собой баллон удлиненной формы из обрезиненной льняной ткани. Диаметр баллона соответствовал внутреннему диаметру труб, торцы баллона имели форму полусферы. Баллон надувной опалубки устанавливался в траншею с помощью торцевых щитов, которые крепились к боковым щитам специальными шпильками. Эти щиты служили и для отделения сферических концов баллона. Наружной опалубкой трубопровода были металло-деревянные щиты, установленные по обе стороны траншеи до уровня днища. Дно трубопровода бетонировалось заранее в форме желоба. В процессе бетонирования была установлена оптимальная длина участка бетонирования для одной опалубки, равная 9,5 м, что соответствует ежедневному расходу 50 м³ бетона. Бетонирование производилось вручную,

отдельными участками (захватками), горизонтальными слоями по 200-300 мм (в траншею бетон подавался транспортером).

В ряде зарубежных стран в настоящее время изготавливают пневматические баллоны для труб диаметром до 2400 мм. При тщательном уходе за баллоном его можно использовать до 80 раз. Пневмобаллон можно применять при температуре наружного воздуха до -15°C . Работы внутри коллектора можно выполнять через 24 ч после удаления опалубки.

В Италии для строительства бетонных труб применяется внутренняя пневматическая опалубка в виде цилиндрического баллона с полусферическими торцами, выполненная из нейлонового полотна, покрытого резиной на основе неопренового каучука. Диаметр баллона от 0,2 до 3,0 м, длина - 12 м и более. Одна из итальянских фирм изготовила баллон длиной 25 м, диаметром 0,6 м. Оборачиваемость опалубки достигла порядка 500 раз, был сооружен трубопровод длиной 10 км.

Мягкую пневмоопалубку применяют также для образования пустот в железобетоне. Таким способом формируют пустоты мягкими пневматическими вкладышами в теле железобетонных плит. Во Франции для этой цели используют мягкие цилиндрические трубы диаметром от 0,15 до 0,40 м и длиной до 10 м. При бетонировании на нижнюю арматуру плиты укладывают пластичный слой бетона, затем между верхней и нижней арматурой укладывают несколько надутых труб из прочной прорезиненной ткани, надувают их воздухом до 35-55 кПа и бетонируют. Через несколько часов воздух из труб выпускают и трубы извлекают из бетона.

В Чехословакии в 1972 г. для формирования овальных цилиндрических отверстий в сборных железобетонных мостовых балках использовали пневмоопалубку из двух полиамидных камер длиной до 8 м, помещенных в силовую оболочку.

Порядок работ был следующий. Вначале в деревянной наружной опалубке монтировали арматуру. В нее помещали пневмоопалубку, надув ее воздухом давлением до 50 кПа. Высота овальной опалубки достигла 0,72 м. Затем уложили с вибрированием бетонную смесь. После затвердения бетона пневмоопалубку извлекли и использовали повторно несколько десятков раз.

Анализ экономических показателей применения воздухоопорных пневматических опалубок позволил установить, что капитальные вложения при строительстве из сборного железобетона в расчете на 1 м^2 полезной площади оказываются больше в 30 раз, чем при строительстве на пневмоопалубке. Вес воздухоопорной опалубки, перекрывающей площадь 500 м^2 , составляет 0,2 т, а опалубки из дерева – 20,0 т. При этом оборачиваемость такой опалубки достигает 50 циклов [14].

На основании перечисленных примеров можно определить следующие основные достоинства пневматических опалубочных систем:

- полное заводское изготовление;
- быстрота и простота монтажа;

- транспортабельность;
- самораспалубливание при снятии давления;
- относительно малая масса.

Вместе с тем воздухоопорные конструкции пневматических опалубок имеют ряд недостатков:

- они изготавливаются на все сооружения целиком, т.е. с применением данного комплекта возможно возведение только однотипных конструкций;
- расход дорогостоящих резино-тканевых материалов на 1 м² бетонированной поверхности довольно высок;
- такие опалубки поддерживаются в рабочем положении за счет непрерывной работы воздухоподающей системы, следствием чего являются высокие эксплуатационные расходы.

Избежать перечисленных недостатков можно путем использования пневмокаркасных опалубок модульного типа.

До недавнего времени пневматические конструкции применялись, как правило, при возведении большепролетных сооружений. Для восприятия внешних эксплуатационных нагрузок необходимо было создание высокого внутреннего давления воздуха. Учет длительных сроков службы (5-10 лет) накладывал дополнительные ограничения по обеспечению герметичности пневмокаркасных элементов. Все эти причины в комплексе приводили к значительному ухудшению эксплуатационных показателей пневматических конструкций и, как следствие, снижению объемов их применения.

Однако использование пневмокаркасных конструкций при возведении плоскостных элементов малых пролетов позволяет значительно повысить эффективность процесса. Это связано с тем, что нет необходимости создавать высокое избыточное давление внутри опалубки (пролет мал) и продолжительность процесса бетонирования относительно невелика, а следовательно, менее жесткими становятся требования по герметичности пневмокаркасной опалубки, что приводит к снижению стоимости пневматической конструкции.

Пневмокаркасные опалубочные системы комплектуются из отдельных пневматических модулей (цилиндров, усеченных конусов и т.п.) на части возводимого сооружения с возможностью перестановки на следующие захваты в процессе бетонирования. Следовательно, снижается материалоемкость работ в пересчете на площадь бетонированной поверхности. В то же время пневмокаркасные опалубочные модули автономны, что снижает эксплуатационные расходы. Кроме того, модульные опалубки могут быть использованы при возведении как пролетных строений, так и ограждающих конструкций разных конфигураций.

Помимо перечисленного, модули просты в изготовлении и не требуют создания специальных цехов. Их производство можно наладить на любом за-

воде резинотехнических изделий. Такой универсальностью воздухопорные опалубки не обладают.

Применение пневмокаркасных конструкций в качестве опалубок сравнительно небольших конструктивных элементов открывает новые возможности их использования при возведении ограждающих пустотных конструкций, желобов, лотков, каналов и т.п.

Внешне элемент (модуль) такой опалубки может представлять баллон цилиндрической, конической формы, изготовленный из прорезиненной ткани, в котором создаётся избыточное давление, необходимое для поддержания его в проектном положении при восприятии технологических нагрузок (рис. 1.23).

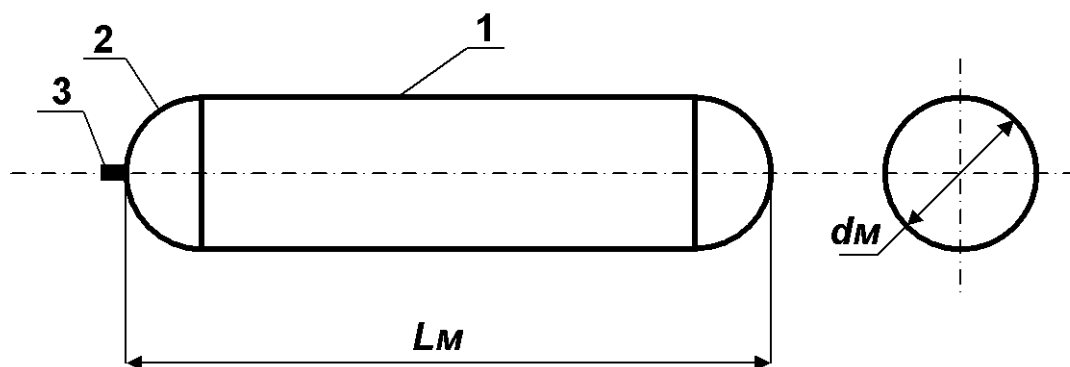


Рис.1.23. Цилиндрический модуль пневмокаркасной опалубки:
1-рабочая поверхность; 2 – торцы; 3 - сосок с ниппелем

Соединённые между собой несколько модулей позволят возводить конструкции, имеющие разные размеры в плане, а также сооружения разной конфигурации.

В 1981 г., в НИИ “Донецкий Промстрой НИИпроект” разработана опалубка для бетонирования перекрытий (рис. 1.24) .

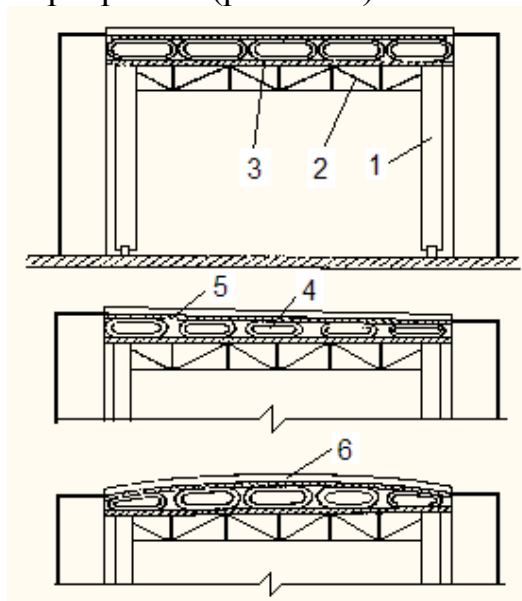


Рис. 1.24. Схема опалубки для бетонирования перекрытий

Опалубка содержит поддерживающую конструкцию, состоящую из портала 1, опорных ферм 2, скреплённых поверху уложенным жёстким настилом 3. По жёсткому щиту вдоль возводимой конструкции уложены резиновые баллоны 4. В качестве формирующего использован податливый металлический щит 5. Авторы разработки предлагают, варьируя величиной избыточного давления в каждом отдельно взятом баллоне пневмокаркаса, получать различные по геометрической форме перекрытия 6. Возможно, эта идея получения конструкций различных геометрических форм при использовании одного опалубочного комплекта присуща не только данной разработке, она вскрывает сущность использования пневмокаркасных опалубок вообще.

В 1987 г. коллектив изобретателей Свердловского архитектурного института предложил схему "Пустотообразователь для образования пустот в строительной конструкции" (рис.1.25). Данная конструкция представляет собой мягкую оболочку (палубу) и каркас из спирально уложенного трубопровода, играющего роль пневматического каркаса.

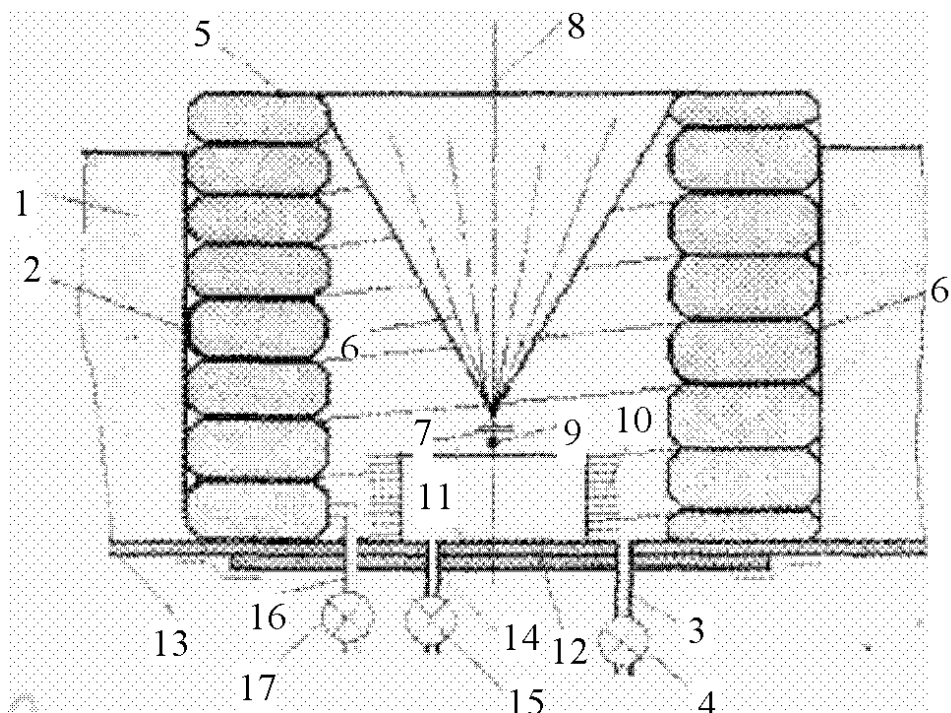


Рис. 1.25. Схема пустотообразователя для образования пустот в строительных конструкциях: 1 - конструкция; 2 - мягкая палуба; 3-4 - вентиль регулировки давления внутри пустотообразователя; 5 - пневмокаркас из трубообразных или шарообразных баллонов; 6-7 - элементы регулировки мягкой палубы; 9-10 - сифон; 11-13 - детали базы установки; 14-15 - вентиль подачи воздуха в сифон; 16-17 - вентиль подачи воздуха в пневмокаркас

Высота оболочки регулируется сифоном, закрепленным на торце оболочки. При достижении избыточного давления в трубопроводе и во внутреннем объеме оболочки пустотообразователь принимает жесткую цилиндрическую форму.

В 1995 г. инженеры Маклин и Скотт (Англия) [7, 12] предложили конструкцию трубной опалубки, позволяющую производить работы по омоноличиванию стыков, бетонированию участков монолитных труб, а также ремонту и реставрации трубопроводов (рис.1.26).

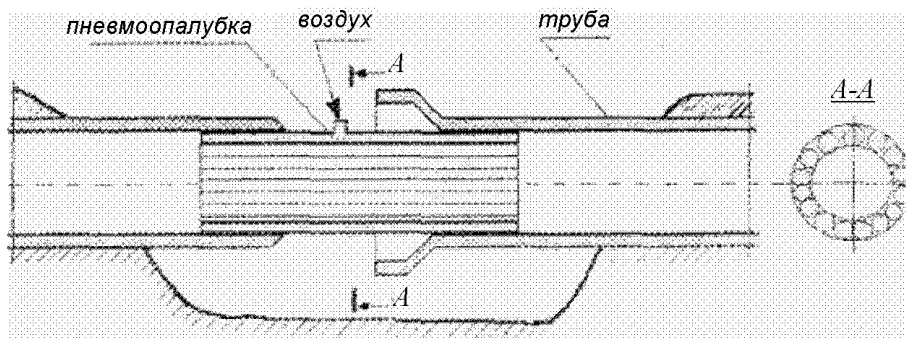


Рис.1.26. Схема надувной трубчатой опалубки Маклина и Скотта

Конструкция опалубки представляет собой ортотропную стрежневую панель, свернутую в трубу. Применение данной опалубки позволяет при ремонте трубопроводов сократить и даже исключить простой участка на период производства работ.

Помимо рассмотренных примеров применения пневмокаркасных опалубочных систем, простые жесткие элементы в сочетании с гибкой палубой могут использоваться при возведении монолитных конструкций в площадочных условиях.

Так, в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете предложены концептуальные решения по использованию пневмокаркасных опалубочных форм в строительном производстве. Некоторые частные технические решения применения пневмокаркасных опалубок приведены на рис.1.27....1.30 [41, 42, 43, 44, 45, 46].

Например, на рис. 1.27 изображена технологическая схема устройства пустотной панели, применяемая в качестве ограждающей конструкции.

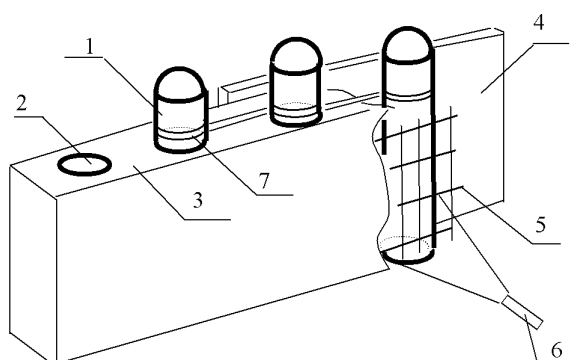


Рис.1.27. Технологическая схема устройства пустотной панели:
1– пневматические модули; 2 – пустота, образованная пневматическим модулем;
3– уложенный торкрет-бетон; 4 - щитовая опалубка; 5 – арматурная сетка;
6– сопло торкрет-агрегата; 7 – закрепляющие хомуты

Одним из недостатков данного способа является использование щитовой опалубки с противоположной стороны обрабатываемой поверхности пневмомодулей. Однако, если расстояние между модулями сравнительно небольшое, можно наносить торкрет-бетон без щитовой опалубки, поскольку торкрет будет забивать зазоры между пневмомодулями. Также пневматические модули применяют для устройства лотков и желобов различной формы (рис.1.28).

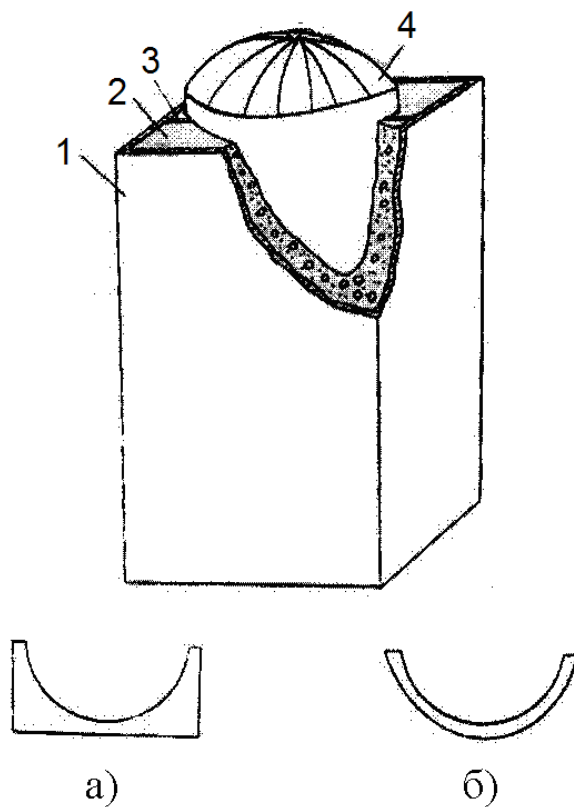


Рис.1.28. Схема устройства и формы лотков, желобов, акведуков:

а) – вариант канала в жесткой кассете; б) вариант, выполненный методом торкретирования; 1 – жесткая кассета; 2 – железобетонный элемент; 3 – разъединительная прокладка; 4 – пневматический модуль

Помимо этого, с помощью пневмокаркасных цилиндрических баллонов можно изготавливать волнистые ограждающие конструкции с продольными ребрами жесткости, образованными за счет криволинейности поверхности пневмоопалубки (рис. 1.29). Волнистую поверхность можно получить также чередованием пневматических модулей различного диаметра. Частным случаем является элемент, показанный на рис. 1.30, который может быть использован для декоративной отделки фасадов.

Кроме пневмомодулей цилиндрической формы, в качестве формозадающей конструкции могут быть использованы тороидальные оболочки [23,

24]. Одним из примеров применения на практике данного вида конструкции является технология возведения монолитных фундаментов под опоры.

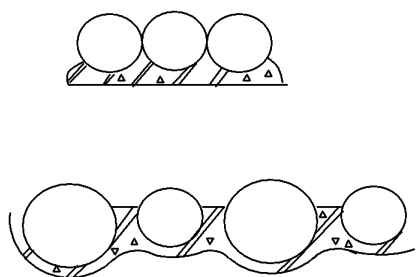


Рис. 1.29. Формы волнистых ограждающих конструкций с продольными ребрами жесткости

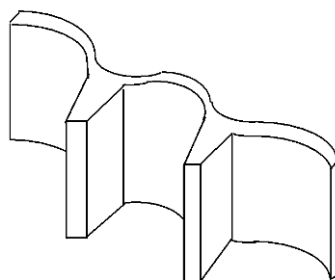


Рис. 1.30. Декоративный волнистый элемент

Эта технология возведения может быть использована в строительстве промышленных дымовых труб, опорных конструкций и т.д. (рис. 1.31).

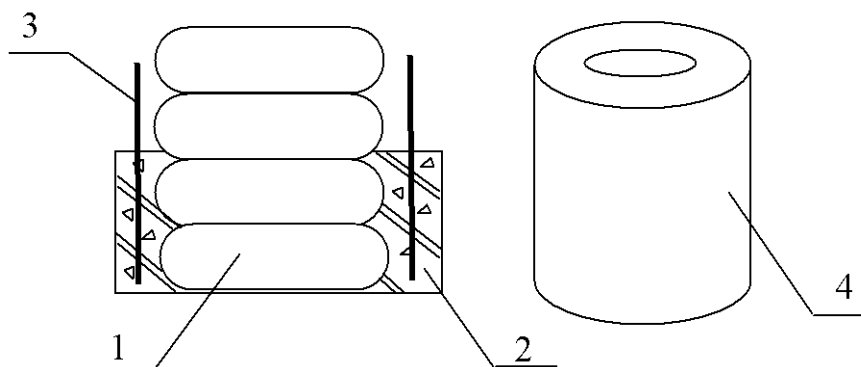


Рис.1.31. Схема возведения и устройства трубных конструкций:
1 – тороидальные пневматические модули; 2 – набрызг-бетонный массив;
3 – арматура; 4 – форма готовой конструкции

В данном случае пневматические модули устанавливаются вертикально друг на друга. Пневматические модули также можно использовать в качестве сотообразователей при возведении сотовых панелей [42], что позволит вынести эту технологию непосредственно на стройплощадку.

При изучении технологических процессов возведения конструкций на пневмоопалубке учеными Воронежского государственного архитектурно-строительного университета были проведены экспериментальные работы по возведению криволинейных сводчатых конструкций, а также другие концеп-

туальные наработки и теоретические исследования формообразования пневмоопалубок [1, 2, 3, 4, 5, 16, 17, 35, 36, 37].

Примером тому может послужить идея специалистов Воронежского и Ленинградского строительных вузов А.С. Арзуманова, Г.М. Бадьина, А.Н. Кусакина, В.В. Мазалова, А.П. Малиновского и В.А. Чертова, предложивших конструкцию пневматической опалубки перекрытий (рис.1.32), сочетающую в себе сущность пневматического подъемника 1 и палубы 2, оснащенной мягкими надувными несущими элементами, позволяющими возводить перекрытия на различных высотных отметках.

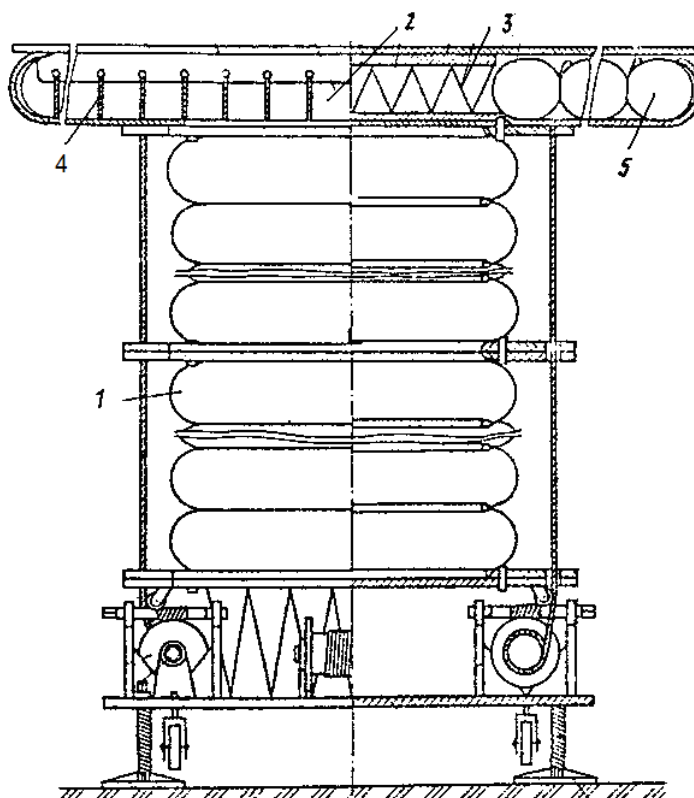


Рис. 1.32. Схема пневматической опалубки перекрытий:

1 - пневмоподъемник; 2 - палуба; 3 - арматурный каркас;
4 - инвентарные распорки; 5 - пневмобаллоны

Кроме того, там же была предложена технология возведения пролетных и вертикальных ограждающих конструкций с применением пневмокаркасных модульных опалубок (рис.1.33), общие принципы которой изложены ниже.

На первом этапе устанавливается арматурный каркас 3 будущего сооружения, который нижними своими концами сваривается с анкерными выпусками арматуры или выпусками стержней ниже расположенного каркаса. Затем он выравнивается, устанавливается в проектное положение и раскрепляется инвентарными распорками 4 с целью получения неизменяемой, жёсткой геометрической формы. Далее в ячейках арматурного каркаса распола-

гаются баллоны модульной опалубки 5, в каждой по одному, подсоединяются к питательному рукаву воздуховода. Результатом этой операции является перевод баллонов в рабочее состояние и создание в них избыточного давления для восприятия последующих технологических нагрузок. Выше проектной отметки нанесения бетонной смеси наполненные воздухом баллоны связываются бандажным поясом из полосовой стали, который закрепляется к арматурному каркасу.

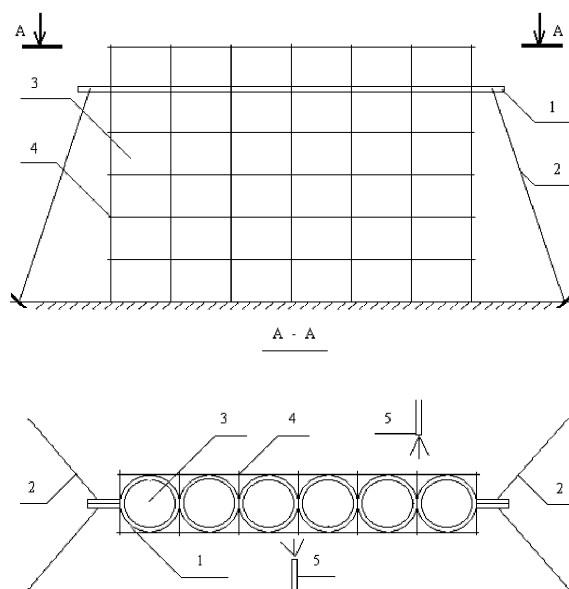


Рис.1.33. Схема выполнения работ при бетонировании ограждающих конструкций на модульной опалубке: 1 – хомут для скрепления модулей; 2 – подкосы; 3 – пневмомодуль; 4 – монтажные каркасы; 5 – сопло торкрет-установки

После выполнения описанных технологических действий опалубочная система готова к работе. Она представляет собой последовательность установленных без промежутков модулей в арматурном каркасе. Использование системы в таком виде приведёт к получению вертикальной ограждающей конструкции с гибкими связями. Если же баллоны устанавливаются с определённым разрывом, тогда ограждающая конструкция характеризуется наличием в своём теле жёстких связей. Следующий технологический этап – нанесение торкрет-смеси мокрым способом.

Торкрет-смесь наносится в несколько этапов. Во-первых, заполняется межмодульное пространство до образования ровного фронта в вертикальной плоскости баллонов. После некоторого схватывания уложенного бетона площадь захватки разбивается на т.н. «картины» длиной 2 м тавровыми либо угловыми элементами, которые крепятся к арматурному каркасу. Лицевая поверхность установленных элементов является маячной, обозначающей на-

ружную поверхность возводимой строительной конструкции. Затем наносится последующий слой, либо слои, заполняющие поочерёдно объёмы «картин». По окончании нанесения наружный слой выравнивается и перетирается. При получении удовлетворительных результатов качества поверхности процесс торкретирования считается завершённым и бетон выдерживается до набора им распалубочной прочности.

По мере набора бетоном величины заданной прочности в баллонах сбрасывается избыточное давление, их извлекают из отформованной конструкции и устанавливают на новую захватку либо собирают в транспортное состояние. Затем снимаются инвентарные распорки и извлекаются маячные элементы. Образовавшиеся дефекты поверхности исправляются. После снятия всех приспособлений остаётся отформованная строительная конструкция, имеющая в своём теле пустоты по форме применявшихся модулей. Окончательным технологическим этапом возведения вертикальных конструкций на пневмокаркасной модульной опалубке является заполнение этих пустот. Характеристики материала для заполнения выбираются в зависимости от необходимости получения ограждения с определённым термическим сопротивлением.

Описываемая технология возведения монолитных конструкций на пневмокаркасных опалубках позволяет несколько отойти от известной технологии бетонирования на воздухоопорной опалубке, прежде всего из-за функциональных различий между пневмоформами. Если воздухоопорные опалубочные системы выполняются на все сооружение целиком, позволяют возводить на опалубочной форме конструкции одного типоразмера и требуют поддержания постоянного избыточного давления в течение всего времени выдерживания, то пневмокаркасные модули дают возможность избежать наличия данных технологических факторов.

Использование данной технологии позволяет расширить ассортимент возводимых монолитных сооружений путём придания пространственным конструкциям оригинальных форм и возможностью строительства как пролётных, так и вертикальных элементов (рис. 1.34).

Наиболее перспективно применение пневмомодулей каркасных опалубок при возведении: свай-оболочек в водонасыщенных грунтах, обладающих малой несущей способностью; фундаментов различного назначения и опорных стен в условиях скальных оснований; ограждающих конструкций различной конфигурации; конструкций покрытий и перекрытий пролётных сооружений.

Простота конструктивного решения мягких цилиндрических форм, их лёгкость позволяет в кратчайшие сроки приводить опалубочную систему в рабочее состояние без привлечения специальных грузоподъемных механизмов и питающего оборудования. Единожды напряжённые воздухом модули не требуют постоянной подкачки, что приводит к снижению эксплуатационных затрат.

В 1992 г. инженерами кафедры технологии и организации строительного производства Воронежского инженерно-строительного института практически апробировано строительство конструктивных элементов и монолитных фундаментов зданий на скальных основаниях с использованием пневмокаркасной модульной опалубки в г. Мурманске.

Известно, что в указанном районе основанием под здания и сооружения служат трудно разрабатываемые скальные породы. Для заложения фундаментных подушек необходимо произвести устройство подготовительной выравнивающей железобетонной стяжки. Особенно трудоёмкими на этом технологическом этапе являются опалубочные работы. В качестве формирующей чаще всего используется деревянная мелкощитовая опалубка.

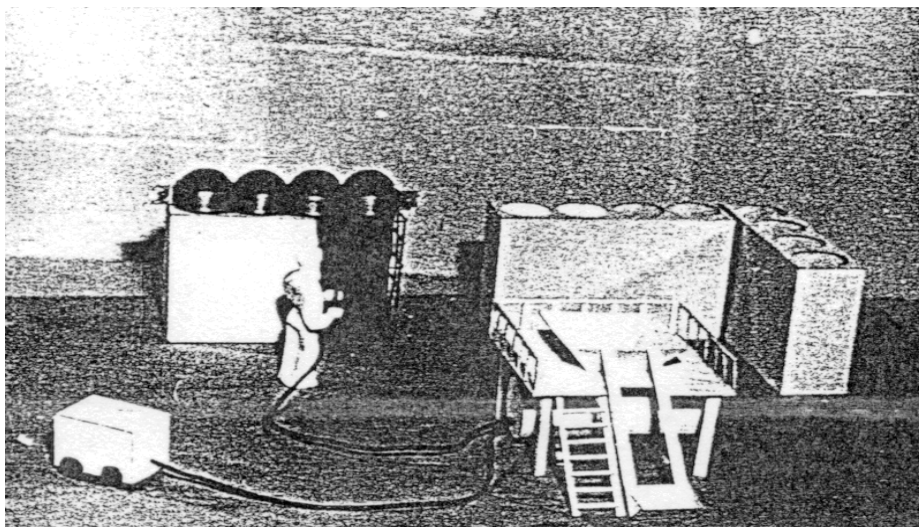


Рис.1.34. Возведение сооружений на пневмокаркасной модульной опалубке (макет)

Решение существовавшей проблемы было достигнуто путём внедрения в строительную практику опалубок пневмокаркасной конструкции. Установленные в бандажные крепления цилиндрические модули довольно чётко повторяли произвольные контуры основания. Применение данной технологии позволило несколько снизить трудоёмкость процесса и получить положительный экономический эффект [5] (табл. 1.3).

Технико-экономические показатели, приведенные в табл.1.3, подтверждают эффективность практического применения новой опалубочной системы, но для соблюдения полной корректности полученных результатов следует обозначить важное условие технологического процесса возведения фундаментов - это наличие положительной температуры окружающей среды. Все технико-экономические показатели ориентированы именно на использование пневмокаркасной опалубки в данных условиях.

В связи с тем, что две трети территории России расположены в зоне с резко континентальным климатом и учитывая, что в нашей стране одна треть

бетона, укладываемого в монолитные конструкции, приходится на зимний период [7], при разработке новых систем оснастки и технологий большое внимание уделялось таким решениям, которые позволяли бы вести производственный процесс в широком диапазоне температур, делая его практически всепогодным.

Существующий сегодня уровень технологии зимнего бетонирования достаточно высок, разработанные методы позволяют возводить сложные инженерные сооружения, различные по назначению, массивности, форме конструкций, из которых преобладающими являются массивные и среднемаассивные, характеризующиеся модулем поверхности $M_p = 0,4 \dots 12 \text{ м}^{-1}$ [19, 38]. Применение новых материалов и разработка новых технологических решений, в частности зимней пневмотехнологии, позволяют обеспечить качественную постройку маломассивных, тонкостенных конструкций с модулем поверхности M_p до 50 м^{-1} . Данный опыт реализован при эксплуатации существующих воздухоопорных формирующих систем.

Таблица 1.3

Технико-экономические показатели применения модульной опалубки

Наименование показателя	Тип опалубочной формы	
	пневмокаркасная	воздухоопорная
Удельный расход опалубки, м/м	66 – 67	33 - 34
Продолжительность работы, ч		
- компрессора	0,1 - 2,5	-
- ВПУ	-	200
- ПЭС	-	200
Затраты на эксплуатацию ПЭС, тыс.р. (в ценах 1996 г.)	-	59,1
Расход электроэнергии, кВт*ч	8 - 198	2000
Стоимость электроэнергии, тыс. р. (в ценах 1996 г.)	0,8 - 19,8	200,0
Оборачиваемость опалубочной формы, раз	150	20
Трудоёмкость опалубочных работ, чел-ч	0,56	0,72

Применение методов зимнего бетонирования позволяет расширить область применения пневмотехнологий. Существуют различные систематизации этих методов, в зависимости от пути получения тепла для обеспечения нормального процесса твердения бетонной смеси. Одни выделяют безобогревные методы и методы прогрева и обогрева смеси. Другие используют более детальную классификацию: методы «активной» термообработки; методы «пассивной» термообработки; применение противоморозных добавок; смешанные способы.

Выбор способа зимнего бетонирования [4, 5,19,30] зависит от ряда факторов, как-то: модуля поверхности охлаждения, температуры окружающего воздуха, вида применяемых материалов и др.

По результатам анализа отдельных методов зимнего бетонирования, опыта эксплуатации греющих пневмоопалубочных систем необходимо сделать следующий вывод: применение технологии возведения монолитных вертикальных конструкций при помощи пневмокаркасных модульных опалубок в условиях отрицательных температур реализуется посредством использования методов «активного» теплового воздействия на бетонную смесь конструкции. Наиболее приемлемым представляется наделение греющими свойствами самих пневмомодулей. Так, наличие внутримодульного объема, возможность аккумуляирования в нём теплоты, а также способность резинотканевых материалов передавать тепловое воздействие говорят о том, что воздух, идущий для напряжения оболочки, одновременно должен быть и теплоносителем.

Горячий воздух может обогревать твердеющую железобетонную оболочку либо изнутри пневмоопалубки - в случае неутепленного снизу свода, либо сверху бетонной оболочки - при расположении утеплителя снизу свода.

В первом случае утепляют дополнительно торцы пневмоопалубки, не покрытые бетоном, и укладывают утеплитель поверх твердеющей железобетонной оболочки. Воздух для подогрева бетона забирается из пневмоопалубки, прогоняется вентилятором через отопительную установку (режим рециркуляции) и подается в пневмоопалубку. Чтобы не вызвать быстрого износа опалубки в результате ее температурного старения, температура воздуха не должна быть более 80 °С. Особую важность в этом случае приобретает применение системы стабилизации давления воздуха внутри пневмоопалубки.

Во втором случае горячий воздух подают в промежуток, между твердеющей бетонной оболочкой и дополнительной мягкой теплоизолирующей оболочкой, укладываемой поверх бетонной смеси до подъема пневмоопалубки в проектное положение. Для подогрева воздуха могут быть использованы установки, серийно выпускаемые промышленностью.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОПАЛУБОК

2.1. Общие сведения и положения из теории поверхностей

Решению теоретических вопросов, связанных с формой пневматических опалубок и возведению с их помощью конструкций, посвящены работы В.В. Ермолова, Б.И. Друзя, В.Э. Магула, А.С. Арзуманова, Б.И. Петракова, С.А. Алексеева, А.Г. Воробьева, Б.И. Сергеева и др. [10, 25, 26].

Известно, что положение рассматриваемой точки на поверхности оболочки определяется пересечением двух линий - ее криволинейных координат (рис. 2.1). Если через точку A провести нормаль к поверхности и принять ее за ось z , а оси x и y (на касательной к точке A плоскости) вращать относительно оси z , то можно найти такое положение, когда кривизны K_1 и K_2 линий mAm' и nAn' на поверхности оболочки, соответствующие криволинейным осям α и β , примут экстремальные значения. В теории поверхностей доказывается, что когда одна из них будет наибольшей, то другая окажется наименьшей. Эти кривизны называются *главными*, а соответствующие им радиусы $R_1 = \frac{1}{K_1}$ и $R_2 = \frac{1}{K_2}$ - *главными радиусами кривизны* [10, 25, 26].

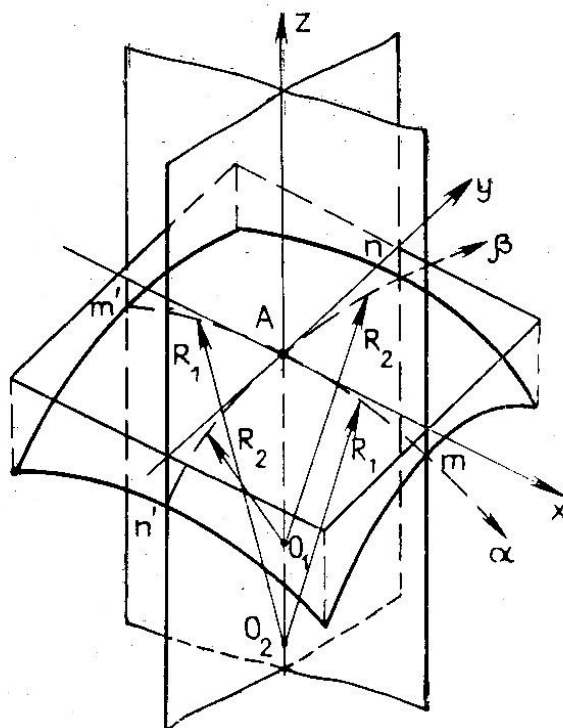


Рис. 2.1. Система координат и обозначений теории оболочек

Средней кривизной поверхности называется выражение

$$H = \frac{K_1 + K_2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.1)$$

Важной характеристикой поверхности является **гауссова кривизна**:

$$\Gamma = K_1 \cdot K_2 = \frac{1}{R_1 \cdot R_2}. \quad (2.2)$$

По этому признаку поверхности оболочки делят на три класса:

I - положительной ($\Gamma > 0$) гауссовой кривизны, т. е. двояковыпуклые, синкластические (сфера, эллипсоид, двухполостный гиперболоид);

II - нулевой ($\Gamma = 0$) гауссовой кривизны — цилиндрические и конические поверхности;

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

Существуют оболочки смешанной кривизны, 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.2.2 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 меридиана, то для точки N дифференциальная геометрия дает следующие соотношения:

$$\sin \phi = \frac{1}{(1+r^2)^{\frac{1}{2}}}; \quad \cos \phi = \frac{r}{(1+r^2)^{\frac{1}{2}}}; \quad \operatorname{tg} \phi = \frac{1}{r}; \quad (2.3)$$

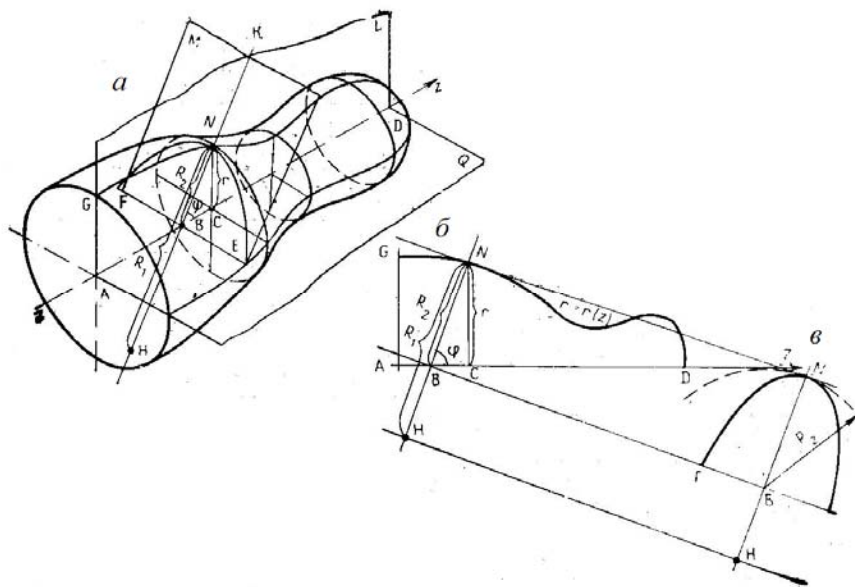


Рис. 2.2. Схема поверхности вращения с произвольной образующей:
а — аксонометрия; б, в — ортогональные проекции на плоскости L и M

$$R_1 = \frac{(1+r^2)^{\frac{1}{2}}}{r''}; \quad R_1 = r \cdot (1+r^2)^{\frac{1}{2}} = \frac{r}{\sin \varphi}; \quad \Gamma = \frac{r''}{r \cdot (1+r^2)^{\frac{1}{2}}}. \quad (2.4)$$

Воздухоопорные оболочки по форме мало отличаются от тонкостенных оболочек из жестких материалов. Однако как объект статического расчета они обладают рядом особенностей, существенно отличающих их от оболочек, жестких по природе материала.

Для материалов пневматических конструкций характерны высокая прочность при растяжении, малое сопротивление сдвигу и полная неспособность к сопротивлению сжатию и изгибу.

Поэтому стабильность их формы при действии таких нагрузок, которые порождали бы сжимающие усилия в геометрически подобных жестких оболочках, может быть обеспечена лишь при условии заблаговременного натяжения мягких оболочек избыточным давлением воздуха, степень которого сообразуется, с одной стороны, с необходимостью погашения сжимающих усилий, с другой - с прочностью материала.

Под действием нагрузок мягкая оболочка деформируется. Можно различать три ее состояния (рис.2.3): начальное, или раскройное (давление воздуха в оболочке превышает атмосферное лишь настолько, чтобы придать ей форму); исходное (давление воздуха достигает эксплуатационного уровня) и конечное (к надутой оболочке приложены внешние нагрузки).

Разработка методики расчета мягких оболочек начинается с выбора модели материала. Можно сформулировать несколько гипотез, полагающих, что материалы наделены определенными свойствами (табл. 2.1).

Первая гипотеза дает наиболее идеализированное представление о материале. Ее принятие равносильно признанию неизменяемости геометрии оболочки.

Вторая гипотеза допускает изменения формы оболочки при условии нерастяжимости материала. Эти изменения являются следствием либо изгиба оболочки с геометрически изгибаемой поверхностью (например, цилиндрической), либо образования складчатых зон, соответствующих местам возникновения сжимающих усилий в оболочках геометрически не изгибаемых. Принятие этой гипотезы позволяет решать задачи, связанные с действием неравномерных и сосредоточенных нагрузок.

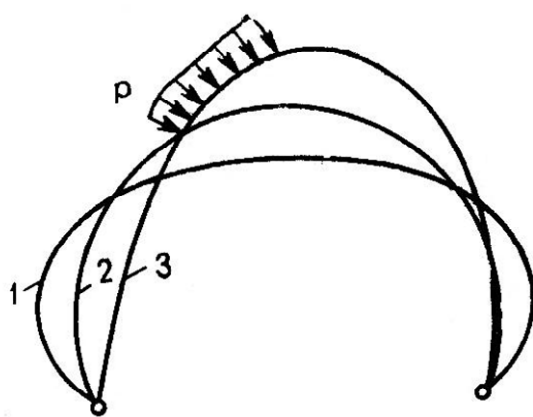


Рис. 2.3. Три состояния воздухоопорной оболочки:
1 - начальное; 2 - исходное; 3 - конечное

Остальные гипотезы считают материал оболочки растяжимым и используются при построении общей теории мягких оболочек, когда напряженно-деформированное состояние оболочки описывается системами уравнений, где исключено раздельное рассмотрение удлинений и перемещений. Различие между этими гипотезами заключается во взглядах на характер связи между напряжениями и удлинениями.

Таблица 2.1

Гипотезы о свойствах материалов оболочек

Гипотеза	Свойство материала	Модуль упругости	
		$E_{раст}$	$E_{сж}$
I	Недеформируемый	∞	∞
II	Нерастяжимый	∞	0
III	Линейно упругий	$const$	0
IV	Нелинейно упругий	$f(\sigma)$	0
V	Нелинейно упруго-вязкий	$f(\sigma, t)$	0

Третья гипотеза полагает, что эта связь линейна, и если материал изотропен (однородные сплошные пленки, металлическая фольга), то

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(T_1 - \nu T_2); \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(T_2 - \nu T_1), \quad (2.5)$$

где ν — коэффициент Пуассона.

Если материал ортотропен (импрегнированные ткани и армированные пленки), то

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(T_1/C - \nu T_2); \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(T_2 C - \nu T_1), \quad (2.6)$$

$$\text{где } C = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}; \quad E = \sqrt{E_1 E_2}; \quad \nu = \nu_{12} E / E_1 = \nu_{21} E / E_2.$$

Основой для такого предположения являются данные эксперимента в виде так называемых нормальных характеристик материала, из которых можно усмотреть, что после сравнительно короткой стадии первоначальной вытяжки материала дальнейшие деформации близки к линейным. С учетом того, что предварительное натяжение - обязательное условие существования пневматических конструкций, это предположение может быть оправдано, тем более что в диапазонах рабочих напряжений материалы растягиваются в сравнительно небольших пределах. Кроме того, деформации строительных оболочек вдоль опорного контура, как правило, стеснены.

Прирост усилий в оболочке от избыточного давления воздуха p как результат увеличения ее размеров при удлинении материала невелик. Для сферических оболочек с начальным радиусом R он составляет:

$$\Delta T = \frac{pR(1 - \nu)}{2E}. \quad (2.7)$$

Физические характеристики реальных материалов еще более сложны. Полимерные материалы обладают по своей природе свойствами упруго - вязко - пластического тела. Мало того, они заметно меняют свои физико-механические показатели под действием факторов света, погоды, температуры и просто времени. Деформации являются следствием неравновесного процесса, развивающегося в функции времени по определенным законам. Для его понимания строят сложные реологические модели, наделенные свойствами упругости, пластичности и вязкости. Эти особенности отражены четвертой и пятой гипотезами, которые на данном этапе не рассматриваются.

Гипотезы III - V позволяют различать все три состояния мягкой оболочки (см. рис. 2.3). Гипотеза II не делает различия между начальным и исходным состояниями. При принятии гипотезы I понятия «начальное», «исходное» и «конечное» состояния оболочки совпадают и, в конечном счете, задача расчета пневматических оболочек сводится к следующему:

- выявлению характера и размера силовых воздействий (нагрузок) на оболочку;
- установлению физико-механических свойств материалов оболочек и обоснованию расчетных сопротивлений;

- определению напряженно-деформированного состояния оболочки.

2.2. Напряженно-деформированное состояние мягких оболочек

Неспособность материала мягкой оболочки сопротивляться изгибу и сжатию влияет решающим образом на ее напряженное состояние. Во-первых, оно может быть только безмоментным, во-вторых, развивающиеся в оболочке нормальные усилия не могут быть сжимающими. Если оба главных натяжения оболочки являются растягивающими, то ее напряженное состояние называется *двухосным*. Если одно из главных натяжений оказывается сжимающим (по деформациям), то напряженное состояние оболочки будет *одноосным*. Нулевые усилия одновременно в двух направлений невозможны.

Элементарная теория мягких оболочек построена на использовании уравнений равновесия классической безмоментной линейной теории.

В практике проектирования воздухоопорных сооружений элементарная теория пока еще распространена. Ее расчетные формулы для сферических и цилиндрических оболочек узаконены нормативными документами Германии, Великобритании, Италии, СССР, США, ФРГ, Японии.

Расчет воздухоопорных оболочек состоит из трех основных этапов:

- определение необходимого уровня избыточного давления воздуха;
- проверка прочности материала оболочки;
- определение деформаций оболочки под действием общих и местных нагрузок.

В соответствии с методикой расчета по предельным состояниям два первых этапа характеризуют первое предельное состояние:

- условие прочности материала оболочки

$$T_1^{\max} \leq P_1^p; \quad T_2^{\max} \leq P_2^p, \quad (2.8)$$

где T_1 и T_2 — растягивающие усилия по двум главным направлениям;

P_1 и P_2 — расчетные сопротивления материала разрыву;

- условие устойчивости оболочки:

$$T_1^{\min} \leq 0; \quad T_2^{\min} \leq 0. \quad (2.9)$$

Третий этап - условие соблюдения нормированных перемещений - соответствует второму предельному состоянию:

$$f \leq [f]. \quad (2.10)$$

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

Напряженное состояние оболочки при ее геометрически стабильной (недеформируемой) форме определяется уравнениями равновесия, одним из которых является уравнение Лапласа:

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} = p \quad (2.11)$$

где T_1 и T_2 - усилия в направленных главных кривизн;

R_1 и R_2 -соответствующие радиусы кривизны;

p - нормальная составляющая поверхностной нагрузки.

Остальные уравнения отражают специфику геометрии и нагрузки в каждом конкретном случае расчета.

Ниже приводятся формулы, таблицы и графики элементарной теории для определения усилий и деформаций воздухоопорных оболочек. При этом их деформации рассматриваются как результат только кинематических процессов, вызванных неспособностью материала к сопротивлению сжатию и изгибу.

Оболочки вращения. Наиболее простой расчетный случай представляют оболочки вращения с осесимметричными нагрузками: избыточным давлением воздуха (табл. 2.2; рис. 2.4 а, б), собственной массой и снегом (табл.2.3, рис. 2.4, в, г).

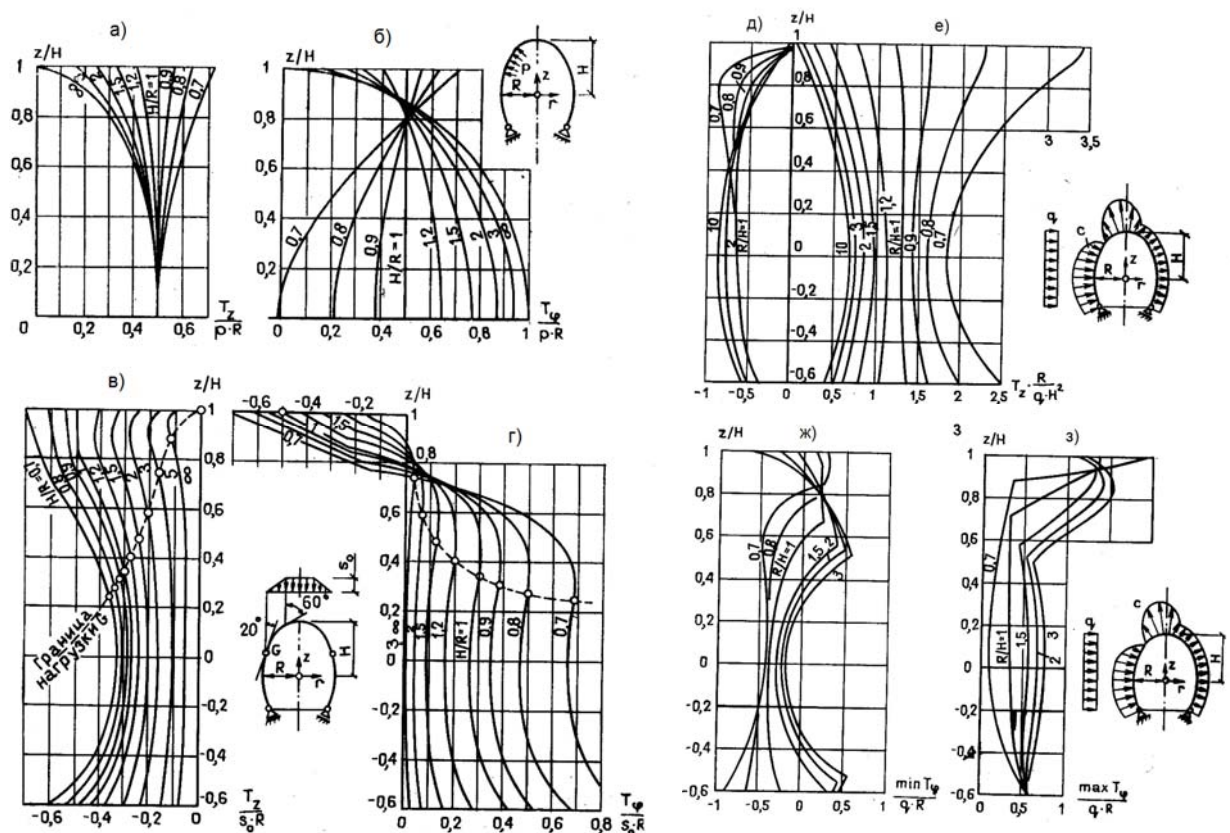


Рис. 2.4. Усилия в эллиптической оболочке:

- а, б - соответственно меридиональные и кольцевые от внутреннего давления;
- в, г - то же, от снега;
- д, е - меридиональные, минимальные и максимальные от ветра;
- ж, з - кольцевые, минимальные и максимальные от ветра

Расчет на несимметричные нагрузки (главным образом ветер) тем сложнее, чем сложнее математическая интерпретация ветрового давления по поверхности оболочки. На рис. 2.4, а...2.4, з приведены графики Эггерса для

расчета оболочек типа эллипсоида вращения в пределах соотношения полуосей $0,7 \leq H/R \leq \infty$

Графики для расчета сферических оболочек на ветровую нагрузку приведены на рис. 2.5.

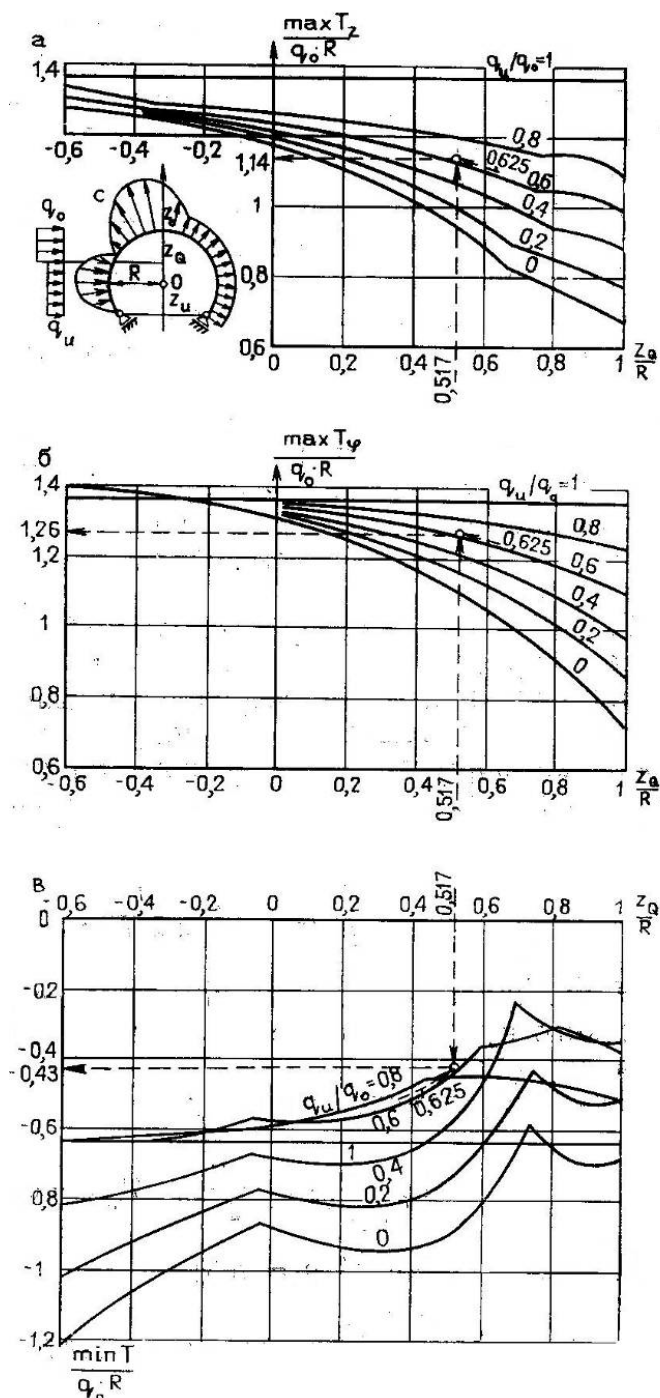


Рис. 2.5. Максимальные усилия в сферической оболочке от ветровых нагрузок для области $-0,6 = Z/R = 1$: Условия примеров, показанных пунктиром:

$R = 10,35 \text{ м}$; $Zq = 5,35 \text{ м}$; $Zu = -2,65 \text{ м}$; $Zq/R = 0,517$; $q_u = 0,5 \text{ кН/м}^2$;

$q_0 = 0,8 \text{ кН/м}^2$; $q_u/q_0 = 0,625$

а — максимальные меридиональные усилия, *б* — максимальные кольцевые усилия,

в — максимальные сжимающие усилия

Таблица 2.2

Формулы для расчета оболочек вращения на избыточное внутреннее давление p

Расчетный параметр	Поверхность					
	тело вращения с произвольной образующей	сфера	конус	цилиндр	круговой тор	параболоид
Эскиз поверхности						
Уравнение меридиональной линии	$r = r(z)$	$r = \sqrt{z(2R - z)}$	$r = z \frac{a}{b}$	$r = R$	$r = A + \sqrt{a^2 - z^2}$	$r = \sqrt{2p^* z}$
Обозначения	-	-	$\alpha = \frac{a}{b^2} \sqrt{a^2 + b^2}$	-	-	$\chi = \sqrt{1 + \frac{2z}{p^*}}$
Первый радиус кривизны R_1	$\frac{(1 + r'^2)^{\frac{3}{2}}}{r''}$	R	∞	∞	a	$p^* \chi^3$
Второй радиус кривизны R_2	$r(1 + r'^2)^{\frac{3}{2}}$	R	$z\alpha$	R	$\frac{ar}{r - A}$	$p^* \chi$
Меридиональное усилие T_1	$\frac{pr}{2} \sqrt{1 + r'^2}$	$\frac{pR}{2}$	$\frac{pz}{2} \alpha$	$\frac{pR}{2}$	$\frac{pa}{2} \left(1 + \frac{A}{r}\right)$	$\frac{pp^*}{2} \chi$
Кольцевое усилие T_2	$pR_2 \left(1 - \frac{R_2}{2R_1}\right)$	$\frac{pR}{2}$	$pz\alpha$	pR	$\frac{pa}{2}$	$\frac{pp^*}{2\chi} \left(1 + 4\frac{z}{p^*}\right)$

Для приближенного вычисления меридиональных T_φ и кольцевых T^θ усилий в сферической оболочках можно предложить формулу

$$T_\varphi = T_\theta = (h/R + 0.25) \cdot q \cdot R + 0.5 \cdot p \cdot R, \quad (2.12)$$

где h и R – высота и радиус купола; q – расчетный скоростной напор ветра; p – избыточное давление воздуха под куполом.

При расчете воздухоопорных оболочек учитывают следующие нагрузки:

Избыточное давление воздуха, создающее предварительное натяжение оболочки, является наиболее характерной, постоянной, а иногда и единственной нагрузкой для воздухоопорных зданий.

Собственная масса оболочки. Материалы оболочек имеют очень малую массу, обычно не более 1-2 кг/м². Она уравнивается избыточным давлением воздуха 10-20 Па. Поэтому, за исключением особых случаев, специальный расчет оболочки на действие собственной массы не производится.

Нагрузка от атмосферных осадков. Нормируемые снеговые нагрузки установлены на основании многолетних наблюдений за накоплением снега на поверхности жестких сооружений.

Установлено, что снеговая нагрузка на поверхности воздухоопорных оболочек значительно меньше, чем на конструкциях аналогичных форм из жестких материалов, что объясняется подвижностью и колебаниями оболочки в результате действия ветра и изменений давления воздуха, а также глянцеви́стостью поверхности, с которой снег легко соскальзывает. В связи с этим не происходит длительного многосуточного накопления снега (рис.2.6).

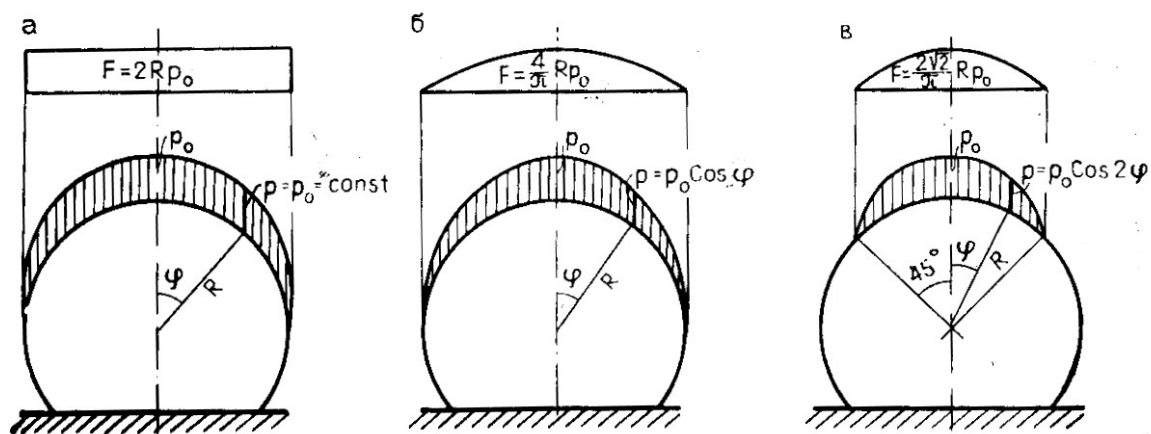


Рис. 2.6. Расчетные схемы снеговых нагрузок:

$a - p_c(\varphi) = \text{const}$; $b - p_c(\varphi) = p_c \cos(\varphi)$; $v - p_c(\varphi) = p_c \cos(2\varphi)$;

F - площадь эпюры нагрузки

Таблица 2.3

Формулы для расчета сферических оболочек на вертикальные осесимметричные нагрузки

Схема загрузки	Усилия в оболочке	
	Меридиональные T_1	Кольцевые T_2
	$-\frac{gR}{1+\cos\varphi}$	$-\frac{gR}{2}$ $-gR\left(\cos\varphi - \frac{1}{1+\cos\varphi}\right)$
	При $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ $-\frac{pR}{2}$ При $\frac{\pi}{2} < \varphi < \varphi_k$ $-\frac{pR}{2\sin^2\varphi}$	$\frac{pR}{2}$ При $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ $-\frac{pR}{2}\cos 2\varphi$ При $\frac{\pi}{2} < \varphi < \varphi_k$ $\frac{pR}{2\sin^2\varphi}$
	При $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ $-\frac{pR}{3}\left(1 + \frac{\cos^2\varphi}{1+\cos\varphi}\right)$ При $\frac{\pi}{2} < \varphi < \varphi_k$ $\frac{pR}{3\sin^2\varphi}$	$-\frac{pR}{2}$ При $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ $-\frac{pR}{3}\cos^2\varphi\left(3\cos\varphi - \frac{1}{1+\cos\varphi}\right)$ При $\frac{\pi}{2} < \varphi < \varphi_k$ $\frac{pR}{3\sin^2\varphi}$
	При $0 < \varphi < \varphi_0$ $-\frac{pR}{2}\cos^2\varphi$ При $\varphi_0 < \varphi < \varphi_k$ $-\frac{pR}{8\sin^2\varphi}$	$\frac{pR}{2}$ При $0 < \varphi < \varphi_k$ $-\frac{pR}{2}\cos\varphi(2\cos 2\varphi - \cos\varphi)$ При $\varphi_0 < \varphi < \varphi_k$ $\frac{pR}{8\sin^2\varphi}$

Гололедные образования на поверхности оболочек обычно не накапливаются в такой мере, чтобы их вводить в расчет как нагрузку. Причиной тому является некоторая подвижность оболочек и растяжимость их материала, способствующие разрушению и осыпанию ледяной пленки. Опыт эксплуатации не дал примеров аварийных ситуаций, вызванных гололедом.

Ветровая нагрузка для воздухоопорных оболочек считается основной. Накопившийся к настоящему времени немалый опыт эксплуатации свидетельствует, что она является едва ли не единственной причиной их разрушения.

Особенность взаимодействия пневматической оболочки с воздушным потоком заключается в том, что ее форма, в отличие от формы жестких оболочек, не остается безучастной к ветровому давлению.

Оболочки податливы и под действием ветра заметно деформируются, подвержены ряду явлений аэродинамического характера, которые усугубляются при неблагоприятных соотношениях между давлением воздуха под оболочкой и скоростным напором ветра. Наибольшей опасности оболочка подвергается при существенно меньшем избыточном давлении p , чем скоростной напор ветра q .

При расчете пневматических оболочек, используемых в качестве опалубки, дополнительно следует учитывать **массу свежееуложенной бетонной смеси** ($0,7 \dots 2,5 \text{ кг/м}^3$), арматуры ($\approx 100 \text{ кг/м}^3$) и, так называемые, **монтажные нагрузки**, возникающие в процессе распалубливания сооружений и обусловленные сцеплением бетона с опалубкой.

Как было отмечено выше, пневматические воздухоопорные опалубки можно подразделить на два типа: **статические и динамические**.

Принципиальное отличие статических и динамических опалубок состоит в том, что бетонные работы в первом случае производятся после приведения пневмооболочки в проектное положение, т.е. в условиях статики, а во втором - уложенный бетон подвергается динамическому воздействию пневмоподъема и формирования конструкции.

Возведение монолитных тонкостенных пространственных конструкций с использованием **статической пневмоопалубки** включает технологические процессы производства арматурных и бетонных работ, в основном идентичные методам бетонирования конструкций в жестких опалубочных формах. Вместе с тем производство опалубочных работ в данном случае отличается от традиционных технологий вследствие особых условий эксплуатации пневмоопалубок.

Оценка технологических режимов эксплуатации пневматических опалубок может производиться путем определения характера взаимовлияния и изменения под действием внешних воздействий ряда технологических параметров.

Опалубка, как известно, должна быть достаточно жесткой и неизменяемой в рабочем положении, способной без сверхдопустимых деформаций вос-

принимать нагрузки и воздействия. Исходя из этого основополагающим параметром эксплуатации пневмоопалубок является **стабильность формы** пневмосистемы.

Качество изготовления, точность монтажа и соблюдение технологических режимов эксплуатации пневмоопалубки непосредственно влияют на получение качественной строительной продукции в виде монолитных конструкций.

Анализ технологических режимов эксплуатации пневмоопалубок для возведения монолитных конструкций позволил сформировать технологические параметры, влияющие на стабильность формы пневмоопалубок, схематично представленные на рис.2.7.

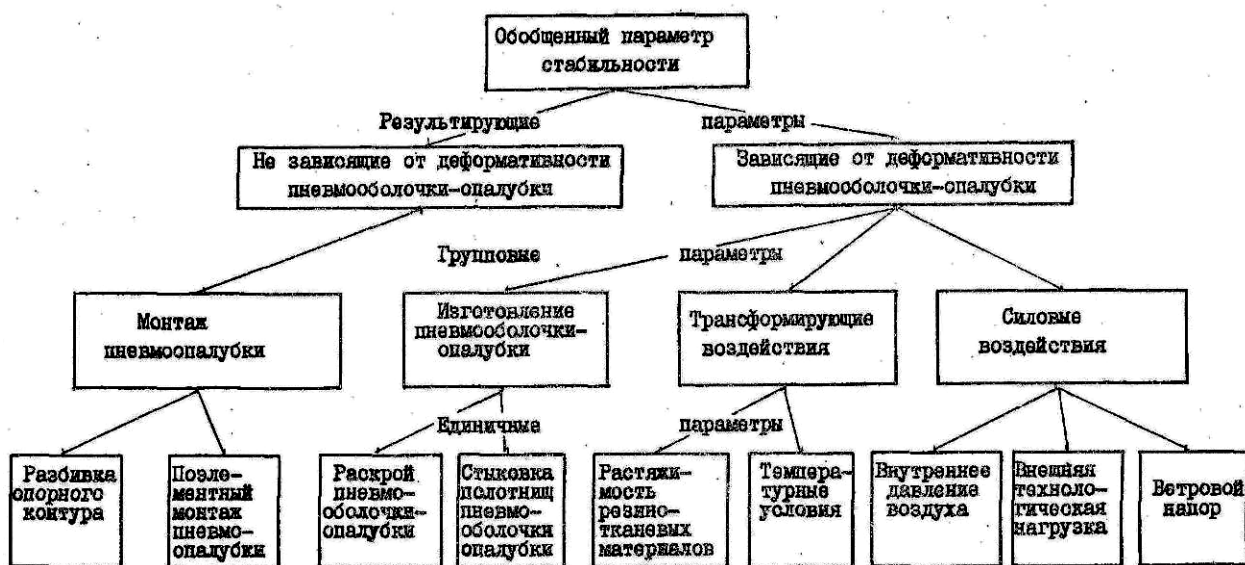


Рис.2.7. Схема технологической стабильности эксплуатации пневмоопалубки

Следует различать два типа результирующих параметров по характеру их влияния на конечную форму пневмоопалубки: не зависящие и зависящие от деформативности пневмоопалубки. Первый тип результирующих параметров характеризуется только одним групповым параметром – монтажом пневмоопалубки. Второй тип включает в себя суммарное изменение эксплуатационных свойств пневмоопалубки в зависимости от изменения следующих групповых параметров: изготовления пневмоопалубки; трансформирующих воздействий на пневмоопалубку; силовых воздействий на пневмоопалубку.

Групповые параметры формируются из единичных параметров, представляющих собой перемещения поверхности пневмоопалубки при: разбивке опорного контура пневмоопалубки; позэлементном монтаже конструкций пневмоопалубки; раскрое отдельных полотен пневмоопалубки; стыковке полотен при сшивке и склеивании пневмоопалубки; изменении растяжимости материала пневмооболочки при многократном использовании опалубки;

различном температурном режиме воздуха внутри и вне пневмоопалубки; колебаниях внутреннего избыточного давления воздуха в пневмоопалубке; загрузке пневмоопалубки технологической нагрузкой от бетона и т.п.; изменениях уровня ветрового давления в процессе производства работ.

Таким образом, первоначально оценка степени технологической надежности пневмоопалубки сводится к нахождению пределов изменения формы пневмооболочки от воздействия единичного фактора. Оценка этих пределов производится сопоставлением геометрической формы пневмооболочки до и после воздействия одного из единичных факторов.

Каждое последующее за начальным состояние пневмоопалубки и стабилизация ее под воздействием внешних факторов зависят от величины внутреннего давления воздуха. Эта особенность работы пневмонапряженных строительных конструкций позволяет принять величину внутреннего давления воздуха за определяющий параметр регулирования стабильности формы пневмоопалубки. Увеличение или уменьшение величины внутреннего давления воздуха обеспечивает необходимую форму палубы на каждом технологическом переделе и конечную форму, определяющую качественные параметры готовой продукции. Заметим, что указанная регулировка в процессе производства работ возможна в пределах допустимых деформативных и прочностных изменений данного типа пневмоопалубки и эта возможность должна быть заложена на стадии проектирования процесса.

Различаются три состояния мягкой оболочки: *начальное*, или *раскройное* (давление воздуха в оболочке превышает атмосферное лишь настолько, чтобы придать ей форму), *исходное* (давление воздуха достигает эксплуатационного уровня) и *конечное* (к надутой оболочке приложены внешние нагрузки).

Использование мягких оболочек в качестве опалубки обуславливает необходимость учета их дополнительных состояний. Так, между исходным и конечным состоянием имеет место деформирование пневмоопалубки в процессе эксплуатации от изменения температуры, давления, деформативности резиноканевых материалов. С учетом этого введем некоторые понятия, характеризующие геометрическую форму пневмоопалубки, а следовательно, и бетонируемой конструкции на различных стадиях технологического процесса.

Начальное состояние – проектная геометрическая форма пневмоопалубки при нулевых погрешностях в процессе монтажа опалубки и нулевых внутренних и внешних воздействиях.

Исходное состояние – "послемонтажная" форма пневмоопалубки с учетом погрешностей в процессе монтажа и нулевых внутренних и внешних воздействиях.

Промежуточное состояние – геометрическая форма пневмоопалубки, интегрирующая возможные изменения от воздействия внутреннего давления

воздуха, температурного перепада, колебаний деформативности тканевых материалов.

Конечное состояние – форма пневмоопалубки после приложения внешних воздействий от массы бетона, арматуры, ветрового напора.

Таким образом, при разработке методов производства работ были изучены технологические режимы возведения монолитных конструкций с применением пневмоопалубки, обеспечивающих ее геометрическую неизменяемость в процессе производства работ и высокое качество монолитных железобетонных конструкций.

Высокая эксплуатационная надежность опалубочной системы в целом обеспечивается физико-механическими свойствами материала опалубки.

2.3. Теоретическое обоснование параметров деформированного состояния пневмокаркасного опалубочного модуля

Как было отмечено выше, расчет мягких оболочек основывается на решении трёх основных задач:

- установление характера и величины силовых воздействий,
- выяснение физико-механических свойств материалов с обоснованием величин расчетные сопротивлений,
- определение напряженно-деформированного состояния оболочки.

Исследованию мягких оболочек посвящены работы А.Б. Губенко, В.А. Усюкина, В.И. Никульшина, В.Я. Магулы, С.А. Огая, И.Б. Друзя и др. Классический подход к проблеме расчета пневмокаркасных конструкций описан в работах А.Б. Губенко [23]. Он считал, что расчет таких элементов следует производить с учетом напряжений в оболочках в результате прогибов от внешних нагрузок и с учетом изменения размеров их сечений в результате деформаций от действия внутреннего давления.

Расчет пневмокаркасных конструкций основывается на безмоментной теории оболочек и производится по состоянию предельной прочности, при этом характеристики материалов назначаются с учетом длительного действия нагрузок и температурно-влажностных факторов

Основные положения методики расчета пневмокаркасных конструкций А.Б. Губенко сводятся к следующему:

1. Расчетом пневматических конструкций всех типов по прочности (первая группа предельных состояний) проверяют условие, чтобы наибольшее растягивающее напряжение σ , возникающее в сечениях оболочек от расчетных нагрузок, не превышало расчетного сопротивления материала, при этом усилия (напряжения) в сечениях оболочек и расчетные сопротивления пленок и тканей принимаются без учета толщины материала. Пневмобалки радиусом сечения r рассматриваются по прочности сечений, параллельных образующей, на действие внутреннего избыточного давления p при изгибе:

$$\sigma = p \cdot r \leq R_{\text{основы}}; \sigma = p \cdot r \leq R_{\text{утка}}. \quad (2.13)$$

где $R_{\text{основы}}$ и $R_{\text{утка}}$ - расчетные сопротивления материала по основе и утку соответственно.

По прочности сечений, перпендикулярных образующей:

$$\sigma = \frac{p \cdot r \cdot \pi}{2} \leq R_{\text{основы}}; \sigma = \frac{p \cdot r \cdot \pi}{2} \leq R_{\text{утка}}. \quad (2.14)$$

2. Расчет элементов пневмокаркасных конструкций по устойчивости проверяют условие, чтобы максимальное усилие (изгибающие моменты, продольные и поперечные силы) от распределенных нагрузок не превышало предельно возможных величин в оболочках, напряженных воздухом. Выражение устойчивости на действие изгибающего момента M от расчетных нагрузок выглядит так:

$$M \leq \frac{p \cdot \pi^2 \cdot r^3}{4}. \quad (2.15)$$

3. Расчет по прогибам (вторая группа предельных состояний) проверяется условие, чтобы максимальные прогибы от действия нормативных нагрузок не препятствовали нормальной эксплуатации конструкций. При этом сохранение положительной кривизны пневматических конструкций всех типов обеспечивается соблюдением условия, чтобы интенсивность наибольшего давления расчетных нагрузок не превышала величины внутреннего давления.

4. Расчет элементов пневматических конструкций по складкообразованию (при недопустимости складок) проверяется условие, чтобы растягивающие напряжения от действия нормативных нагрузок ни в одной точке не снизились до нуля. Это выражение действия изгибающего момента M от расчетных нагрузок выглядит так:

$$M \leq \frac{p \cdot \pi \cdot r^3}{2}. \quad (2.16)$$

Результатом приведенного алгоритма является назначение величины внутреннего давления воздуха в пневмокаркасных конструкциях. Она принимается минимальной, при которой удовлетворяются все условия расчета по предельным состояниям.

Нужно заметить, что работа пневмокаркасного опалубочного элемента отличается от эксплуатации пневмобалки прежде всего жесткими требованиями к форме оболочки и процессу её деформирования. В этом случае особую важность приобретает расчет по второй группе предельных состояний, а именно определение прогибов формирующей поверхности элемента под действием внутреннего избыточного давления и эксплуатационных нагрузок. В то же время, так как при образовании складок ПКО модуль теряет свои эксплуатационные качества, расчет по этому параметру для поставленной в работе задачи не представляет интереса

Наиболее важным моментом работы пневмокаркасной опалубки является его конечное напряженно-деформированное состояние. Это состояние характеризуется приложением всего комплекса воздействий, включая внешнюю (эксплуатационную) нагрузку.

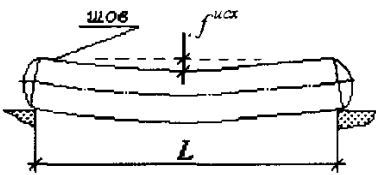
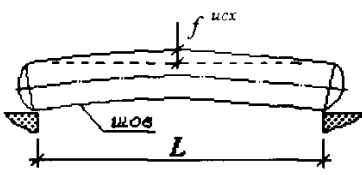
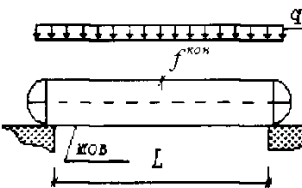
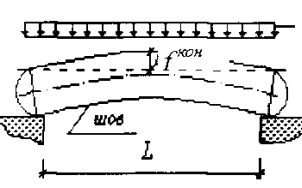
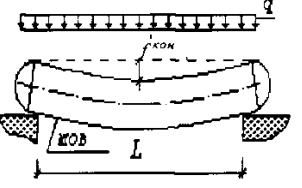
Из практики эксплуатации пневмокаркасных элементов известно, что цилиндрический баллон, находясь в исходном состоянии, то есть под действием только внутреннего давления (табл.2.4), при приложении нагрузки приобретает один из нижеприведенных вариантов конечного состояния:

- когда отклонения конечной фактической формы $f^{\text{кон}}$ пневмомодуля от проектной не превышают значений, допустимых нормами $f^{\text{норм}}$ (табл. 2.4), $|f^{\text{кон}}| \leq |f^{\text{норм}}|$;
- когда конечное состояние оболочки не соответствует требованиям норм, что недопустимо для опалубок (табл. 2.4), $|f^{\text{кон}}| \geq |f^{\text{норм}}|$.

Оптимальной схемой работы пневмокаркасного опалубочного элемента со швом в нижней точке поперечного сечения была бы та, при которой его выгиб, приобретенный под влиянием внутреннего избыточного давления, наиболее полным образом компенсировался приложением к нему эксплуатационной нагрузки. При этом варианте напряженно-деформированного состояния прогиб оболочки был бы равен 0. Однако ввиду неоднородности оболочки, вызванной неизбежным наличием конструктивных соединений и рядом других факторов, достижение подобного состояния равновесия видится задачей сложной и многоплановой.

Таблица 2.4

Варианты исходного и конечного состояний напряженного пневмомодуля при расположении шва внизу баллона

Состояние	Варианты		
	1	2	
Исходное $f^{\text{исх}} = f_{\text{вд}} \neq 0$, т. к. $\varepsilon_{\text{шва}} \neq \varepsilon_{\text{мат}}$			
Конечное $f^{\text{кон}} =$ $= f_{\text{вд}} + f_q + f_{\text{ш}}$			

Случаи конечного состояния можно конкретизировать следующим образом:

- эксплуатация ГКО модуля возможна, если совокупный прогиб от действия всех нагрузок меньше или равен нормативному значению (табл. 2.4, вариант конечного состояния 1);
- эксплуатация невозможна, если прогиб модуля превышает допустимую нормами величину (табл. 2.4, варианты 2 и 3).

Таким образом рассматриваются следующие случаи конечного состояния ПКО модуля [12]:

1. Выгиб баллона

Данный случай характеризуется, как правило, наличием шва в нижней зоне поперечного сечения. Это является причиной выгиба продольной оси балки в сторону, противоположную положению конструкционного соединения. При этом направления прогибов верхней образующей (противолежащей шву, см. табл. 2.4) и самого соединения (нижней образующей) совпадают с направлением прогиба продольной оси ПКО модуля

Наиболее полно напряженно-деформированное состояние пневмобаллона будет описывать следующее неравенство:

$$f^{\text{кон}} = f_q + f_{\text{ш}} + f_{\text{вн}} \leq |f^{\text{норм}}|. \quad (2.17)$$

То есть конечные деформации баллона от совокупного воздействия внутреннего давления $f_{\text{вн}}$ эксплуатационной нагрузки f_q и влияния конструкционного соединения $f_{\text{ш}}$ не должен превышать допустимой СНИП величины $f^{\text{норм}}$.

Отсюда, оптимальный режим работы ПКО модуля определится следующим выражением, записанным для верхней образующей оболочки:

$$|f_q| = -|f_{\text{ш}}|, \text{ если } f_{\text{вн}} \leq f^{\text{норм}}, \quad (2.18)$$

где f_q - абсолютная величина прогиба от действия эксплуатационной нагрузки;

$f_{\text{ш}}$ - абсолютная величина прогиба, вызванная наличием конструкционного соединения.

2. Прогиб баллона

Исследование данного случая приводит к рассмотрению задачи, когда конструктивное соединение расположено в верхней части поперечного сечения пневмобалки. Данный случай характеризуется совпадением направлений прогибов, вызванных как эксплуатационной нагрузкой, так и наличием шва.

Соответственно единственным рабочим состоянием данной системы будет то, при котором суммарный прогиб от всех воздействий для рабочей палубы не будет превышать нормативное допустимое значение.

Приведенная классификация деформированного состояния пневмобалки, нагруженной эксплуатационной нагрузкой, охватывает большинство случаев, возможных до начала момента складкообразования.

При поперечном изгибе цилиндрической пневмобалки до начала образования складок в ее оболочке прогиб обычно определяют по формулам сопротивления материалов без учета действия перерезывающих сил. Стенки пневмобалок имеют относительно малую толщину и изготовлены из эластичных материалов. У таких пневмобалок величина прогиба от действия перерезывающих сил соизмерима и даже превосходит величину прогиба от действия изгибающих моментов.

Согласно рассматриваемой теории, полный прогиб пневмобалки складывается из двух частей (см.рис. 2.8):

$$f(z) = -[f_i(z) + f_{\text{нн}}(z)], \quad (2.19)$$

где $f_m(z)$ - прогиб от действия изгибающего момента;

$f_{\text{сд}}(z)$ - прогиб от действия перерезывающей силы.

Проведенный анализ учитывает «балочный» характер работы расчетной схемы и особенности работы материала оболочек пневмобалок. Оболочка пневмобалки здесь подразумевается целостной, то есть не учитывается влияние разницы деформативных характеристик основного материала оболочки и её конструктивных соединений.

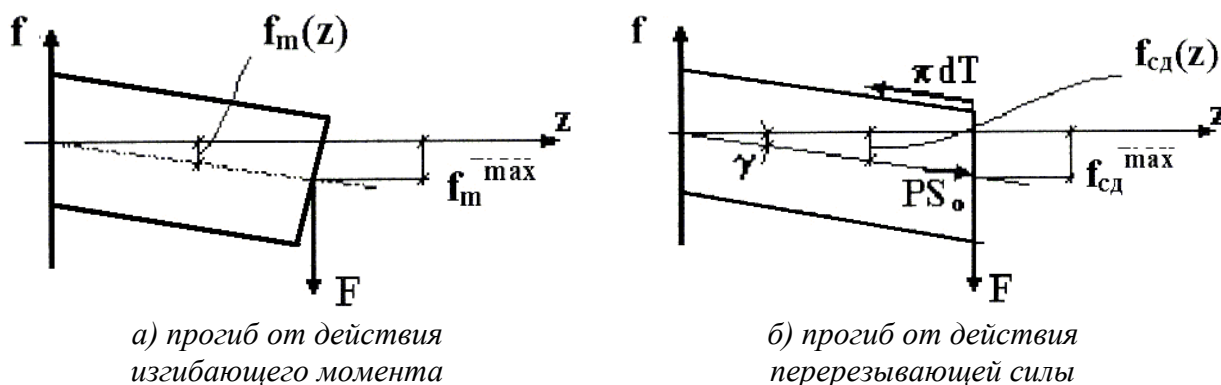


Рис.2.8. Схемы к определению составляющих полного прогиба

При рассмотрении влияния наличия конструктивного соединения материала пневматического модуля возможно несколько равноценных способов учета этого фактора в расчете элемента. Наиболее простым и объективным представляется механико-аналитический метод, позволяющий определить деформированное состояние пневматической балки, оснащенной продольным односторонним швом (рис.2.9).

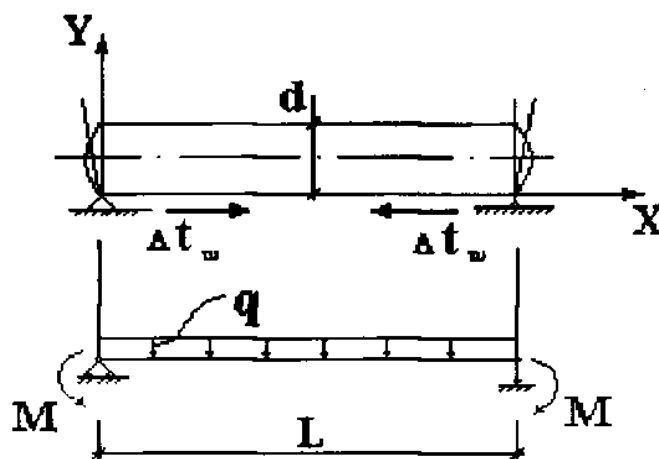


Рис.2.9. Усовершенствованная расчетная схема ПКО модуля

Учет наличия конструктивных соединений имеет алгоритм, применимый для всех случаев. Рассмотрим этот алгоритм на примере первого случая деформированного состояния (т.е. выгиб баллона) как охватывающего большинство вопросов, возникающих при исследовании процесса деформирования ПКО модуля. На основании введенных допущений был разработан алгоритм определения параметров деформированного состояния пневмобаллона, снабженного конструктивным соединением.

Изначально следует определить компоненты действующего на пневмобалку комплекса усилий. Для возможности отдельного учета влияния каждого фактора предлагается рассматривать воздействие внутреннего давления p , эксплуатационной нагрузки q и наличия конструктивного соединения t_w .

На первом этапе необходимо определить расчетную схему исследуемого пневматического элемента. Основное внимание при этом должно быть уделено параметрам прикладываемой нагрузки, условиям закрепления оболочки и деформативным свойствам материала, из которого она изготовлена.

Учет влияния шва в данной схеме деформированного состояния (см.рис.2.9) предлагается провести за счет введения дополнительного усилия Δt_w , возникающих от несоответствия деформативных характеристик материала оболочки и соединения, то есть $\Delta t_w = T_w - T_m$, где T_w - условное усилие в шве, при котором деформации шва (ε_w) будут равны деформациям в материале (ε_m) от действия усилий T_m , то есть $\varepsilon_m(T_m) = \varepsilon_w(T_w)$.

В расчетной схеме влияние описанного усилия Δt_w моделируется введением изгибающего момента, приложенного на опорах и влияющего как на положение продольной оси элемента, так и на положение торцевых сечений пневмобалки.

В этом случае изгибающий момент определится как

$$M_w = \Delta t_w \cdot \frac{d}{2} = \Delta t_w \cdot r, \quad (2.20)$$

где d и r - соответственно диаметр и радиус поперечного сечения пневмобалки.

Дополнительное усилие $\Delta t_{ш}$ определяется экспериментально, и его величина соответствует разнице в усилиях, возникающих в шве и материале оболочки при равных значениях деформаций.

На основе положений традиционной теории цилиндрических оболочек были получены аналитические зависимости деформаций прогиба пневматического баллона (пнеumoкаркасного опалубочного модуля) в середине пролета с учетом влияния конструктивных соединений в зависимости от расположения шва и условий опирания пневмобалки [1, 12, 28, 29].

2.4. Проектирование пневматической опалубки

2.4.1. Материалы для пневматических опалубочных систем

На протяжении всего периода существования практики применения пневматических опалубок отечественными и зарубежными специалистами было предложено и обосновано применение множества материалов для их изготовления. Выбор того или иного материала зависит от типа конструкций, от назначения, технологического режима эксплуатации, а также от условий изготовления.

Существующая на сегодняшний день принципиальная классификация материалов приведена в табл. 2.5.

Специфика работы пневмокаркасных модульных опалубок накладывает определенные требования на характеристики материалов, идущих на их изготовление. Важно, чтобы материал опалубки обладал прочностными характеристиками, обеспечивающими работу пневматического модуля в эксплуатационном диапазоне нагрузок, и деформативными свойствами, способствующими самораспалубливанию при снятии давления.

Так, нецелесообразно использовать жесткие материалы (например, стальной лист) ввиду их малой деформационной способности, а также неармированные резины, прочность которых недостаточна для создания опалубок пролетных конструкций. Следует также отметить высокую стоимость армированных пленок, хотя и обладающих необходимыми прочными и деформационными качествами. Соответственно наиболее приемлемым материалом для изготовления опалубочных модулей являются импрегнированные ткани.

К тканям, идущим на изготовление пневматических опалубок, предъявляются следующие требования:

- достаточная разрывная прочность и воздухонепроницаемость;
- прочность при раздире, стойкость против воздействия среды (солнечной радиации, окисления, увлажнения, плесени, химической агрессии, мороза, нагрева) и против механических повреждений (истирания, проколов);
- негорючесть (самозатухание);
- умеренная стоимость;

- удобство стыковки полотнищ;
- массовость производства.

Таблица 2.5

Классификация материалов для пневматических опалубочных систем

Материалы									
Жесткие		Мягкие							
Армопластик	Стальной лист	Неармированные резины	Армированные пленки			Импрегнированные ткани			
			пленка	арматура		покрытие	основа		
				ткань	сетка		синтетические	искусственные	естественные
Волокнит, текстолит, гетинакс	Листы нержавеющей стали 0,3-1,5 мм	Кремнийорганический каучук	Полиэтилен	Капрон, хлопчатобумажная ткань	Стекловолокно, капрон, лавсан, алюминий	Резина, синтетические каучуки, пластифицированный ПВХ, хлорсульфированный пропилен	Полиамид, капрон, полиэфир, лавсан	Вискоза, стекловолокно	Хлопок, лен

Отечественная резинотехническая промышленность выпускает достаточно широкую номенклатуру импрегнированных тканей. Преимущественно это ткани на капроновой или лавсановой основе. К ним относятся однослойные А-01-1; 35-010; 51-136; 88318; 509; 8315; двухслойные параллельно дублированные Л-1-87; 23; двухслойные диагонально дублированные № 30, 859-2 [9, 12, 37].

Известны примеры изготовления пневматических опалубочных форм из материалов с натуральной тканевой основой (556; ТУ 1205-54р) и покрытием из полиизобутиленового или натрий-бутадиенового каучука. Однако практика показала нецелесообразность их применения в силу низкой сопротивляемости естественных основ увлажнению, гниению и образованию плесени.

Зарубежные фирмы-производители пневматических конструкций предлагают большое количество тканевых материалов на основе стеклотканей и волокон кевлара с покрытием из тефлона или неопрена, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками. Однако стоимость подобных материалов значительно превышает стоимость отечественных импрегнированных тканей, что послужило причиной отказа от применения первых.

Тканевые материалы служат силовой основой оболочки опалубки. На ткани идут нити малой крутки и низких номеров (8 - 20). Наиболее широко применяются ткани полотняного переплетения, в которых и основа, и уток

выполнены из одинаковых нитей. Основы из более тяжелых и прочных тканей имеют рогожечное переплетение из сдвоенных нитей.

Ткани изготавливаются путем протягивания утка между нитями основы, при раздвинутых в вертикальной плоскости смежных нитях основы. После протягивания утка на всю ширину полотна верхние и нижние нити основы меняют взаимное положение, зажимая между собой нить утка. В результате нити основы и утка располагаются под углом друг к другу, что обуславливает повышенную деформативность ткани в сравнении с растяжимостью вытянутых нитей. Наибольшей податливостью растяжению обладают ткани в диагональном направлении, когда возможно взаимное перемещение и нитей утка, и нитей основы. Высокая деформативность тканых оболочек способствует выравниванию погонных усилий в пневматических опалубках.

Для изготовления более прочных тканей для пневмоопалубок используют либо более толстые нити основы, либо при обрезаживании ткань дублируют. Однако при параллельном дублировании прочность материала возрастает не в два раза, а лишь на 50-75 %.

Однослойным и параллельно дублированным прорезиненным тканям присущ один недостаток: обладая высокой прочностью на растяжение в целом полотнище, они легко рвутся по надрыву, т.е. имеют малое сопротивление раздиру, которое снижается быстрее у материалов с жестким или потерявшим эластичность вследствие длительной эксплуатации покрытием. Это явление, видимо, объясняется тем, что при растягивании за достаточно жесткие края надрыва последние действуют как рычаги, что концентрирует приложение усилия только к одной нити с коротким участком возможной ее деформации, ограниченными жесткими краями надрыва.

Для повышения сопротивляемости материала раздиру прибегают к диагональному дублированию тканей (рис.2.10). Прочность таких материалов только на 20-30 % больше прочности однослойных тканей. При этом следует отметить, что при диагональном дублировании ткань теряет ортотропность своих свойств, приближаясь к изотропным материалам.

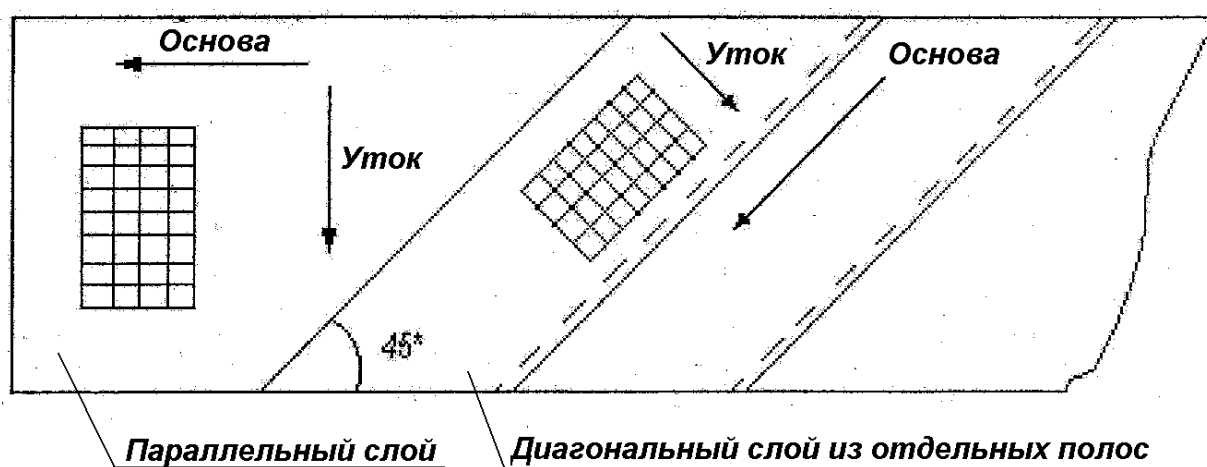


Рис. 2.10. Схема диагонально дублированной двухслойной ткани

В качестве герметизирующих покрытий применяют синтетические каучуки: натрий-бутадиеновые (СКВ), полиизобутиленовые или полихлоропреновые (наирит) и др. Подобные покрытия в силу своей жесткости хорошо защищают тканевую основу от механических повреждений и истирания.

Также возможно применение покрытий из термопластов (ПВХ), что позволяет производить соединение отдельных полотнищ сваркой и, следовательно, делает процесс изготовления опалубок из них более технологичным. С другой стороны, соединение сваркой требует применения сложного технологического оборудования. Поэтому наиболее часто сварные швы заменяются клеепрошивными с использованием соответствующих клеев. Кроме того, ПВХ покрытия обладают лучшей адгезией, нежели резиновые, и более стойки к воздействиям агрессивных сред.

Основным требованием, предъявляемым к материалам, используемым при изготовлении пневматических конструкций и, в частности, пневмоопалубок, является прочность. Критерием оценки данной характеристики выступает сопротивление ткани разрыву, принимаемое за нормативный показатель прочности. Значения этого показателя для некоторых марок тканей приведены в табл. 2.6.

Ткань для пневмоопалубки подбирают по ее расчетному сопротивлению R в соответствии с максимальным усилием растяжения в оболочке T_{max} так, чтобы соблюдалось условие:

$$T_{max} \leq R. \quad (2.21)$$

Расчетное сопротивление ткани R в пневматической конструкции определяют по формуле

$$R = R^H \cdot k_{одн} \cdot k_{дл} \cdot k_{см} \cdot k_{ш} \cdot k_m \cdot k_d, \quad (2.22)$$

где R^H - нормативное сопротивление ткани разрыву в направлении основы или утка;

$k_{одн}$ - коэффициент однородности (0,7 - 0,8);

$k_{дл}$ - коэффициент длительной прочности, учитывающий продолжительность действия нагрузки на конструкцию (0,4 - 0,7);

$k_{см}$ - коэффициент, учитывающий снижения прочности ткани вследствие ее старения, зависящий от материала основы для капрона, $k_{см} = 0,85$ при 1 годе эксплуатации; $k_{см} = 0,4$ при 4-х годах;

$k_{ш}$ - коэффициент, учитывающий снижение прочности ткани в шитых швах, зависящий от количества строчек прошивки (0,56 – при одной строчке; 0,8 – при двух; 0,87– при трехстрочечной прошивке);

k_m - коэффициент, учитывающий воздействие на прочность ткани положительных температур (0,85....1);

k_d - коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние (при $T_o/T_y = 2$; $k_d = 0,77$).

С точки зрения проектирования пневматических сооружений и конструкций деформативность тканей не имела решающего значения и интерес

представляло только ее критическое значение, соответствующее разрушению ткани.

Деформативные характеристики материалов, применяемых в пневмоопалубках, соответствующие некритическим значениям нагрузки при проектировании пневмокаркасных опалубочных модульных систем приобретают особое значение.

Для опалубочных систем вообще наиболее важным требованием является обеспечение геометрической неизменяемости. Ввиду того что пневматические опалубки выполняются из деформируемых материалов, это требование становится определяющим. Как показывает практика, на форму напряженного опалубочного модуля оказывают влияние швы.

Поэтому, наряду с деформативными характеристиками материалов, из которых изготавливается пневмоопалубка, важно знать и свойства конструктивных соединений.

Развитие деформаций ткани при растяжении не подчиняется закону Гука и обладает нелинейным характером, обусловленным неоднородностью материала (рис.2.11).

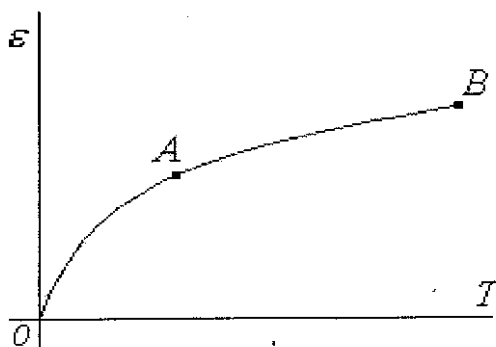


Рис.2.11. Примерный характер зависимости деформаций тканевого образца от усилия T при одноосном растяжении

Можно предположить, что на начальной стадии процесса (участок OA) деформации образца развиваются за счет эластичности резинового покрытия и выпрямления нитей, чему соответствует их быстрый рост. Далее, на участке AB развитие деформаций связано с растяжением вытянутых нитей, податливость которых значительно ниже податливости резинового покрытия, результатом чего становится снижение интенсивности роста деформаций образца в целом. Положение точки B соответствует разрушению образца ткани.

2.4.2. Соединения в конструкции опалубки

Прочностные и деформативные свойства материалов, применяемых для изготовления пневмоконтрукций, их основные физико-механические характеристики исследованы в достаточной степени. В табл.2.6 приведены основные характеристики тканей для пневмоопалубок.

Важными элементами конструкции пневмоопалубки, влияющими на деформативность пневматической опалубки в целом и форму будущего сооружения, являются соединения мягкой рабочей палубы. Немецкий исследователь З. Бубнер [12] указывает на необходимость по возможности отказываться от шитых швов, в которых для обеспечения необходимой прочности и герметичности ткани располагаются в 3 - 4 слоя, образуя жесткие «ребра» на поверхности оболочки. Эти «ребра» имеют значительно меньшую растяжимость, чем сама оболочка, что приводит к преждевременному разрушению ткани вблизи швов. Поэтому швы должны обладать не только той же прочностью, но и той же растяжимостью, что и оболочка. Таким образом, была поставлена проблема исследования деформативности соединений в пневматических конструкциях.

Следует отметить тот факт, что, помимо описанного влияния, разница в растяжимостях швов и основного материала приводит к отклонению фактической формы пневмоконструкций от проектной при ее напряжении воздухом, что было обнаружено при использовании воздухоопорных пневмоопалубок. В зоне крепления оболочки к предварительно возведенному фундаменту, где положение оболочки жестко фиксировалось, деформации опалубки сохранялись на проектном уровне. В то же время вблизи коньковой зоны, где растяжимость оболочки ничем не была ограничена, развивались деформации, превышающие расчетные значения. В результате опалубочная форма приобретала вид, представленный на рис. 2.12. Однако экспериментальные исследования этого вопроса показали, что в случае воздухоопорных опалубочных систем значительного негативного влияния на работу опалубки в целом это не оказывает

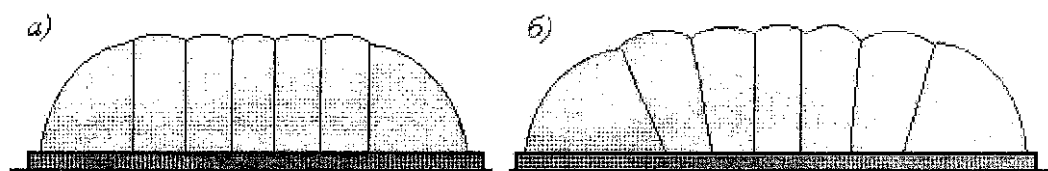


Рис.2.12. Отклонение фактической формы опалубки воздухоопорного типа от проектной:
а) проектная форма; б) фактическая форма

В случае проектирования пневмокаркасных опалубок модульного типа вышеописанные расхождения могут стать причиной сверхнормативных отклонений фактической формы опалубочного элемента от предполагаемой.

Практика изготовления пневматических модулей [5, 12, 37] показала возможность существования ряда отрицательных последствий, среди которых можно выделить следующие:

- нарушение осевой симметрии модуля как результат влияния продольного шва (рис. 2.13, а);

- образование зон - «перетяжек» при наличии поперечных опоясывающих швов (рис. 2.13, б);
- образование зон складок в торцевой зоне модуля, зависящих от конструкции торцов модуля (рис. 2.13, в, г).

Очевидно, вышеописанные явления ограничивают возможности применения пневмоэлемента в качестве опалубки. Это обуславливает настоятельную необходимость исследования влияния конструктивных соединений на форму пневматической оболочки.

Специфика конструирования соединений для опалубочных систем объясняется рядом конструктивных и эксплуатационных условий, характеризующих работу опалубки. Наиболее важными из этих условий являются:

- прочность (способность восприятия внутреннего избыточного давления);
- надежность (способность многократного контакта с агрессивными средами);
- деформативность и эластичность (обеспечение самораспалубливаемости);
- герметичность;
- технологичность изготовления (применение механизированных поточных процессов).

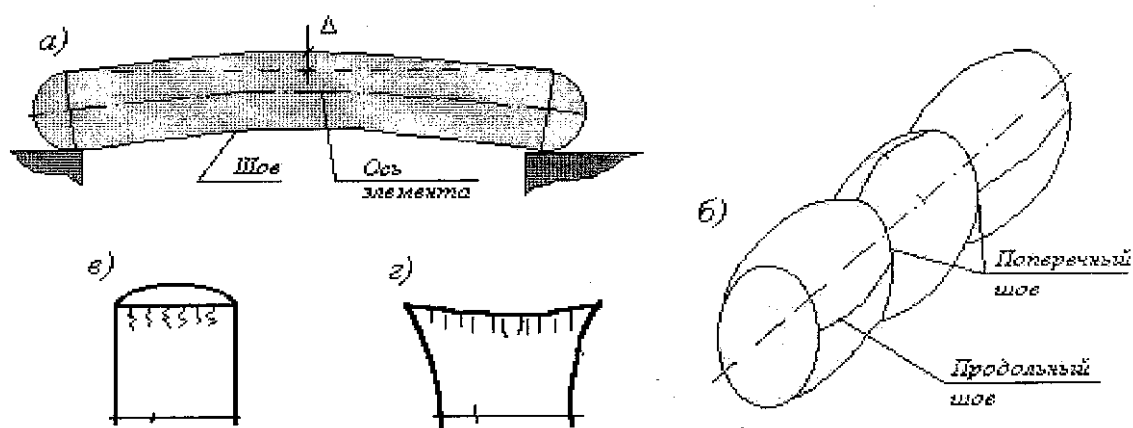


Рис.2.13. Последствия разницы деформативностей основного материала и конструктивных соединений

Применительно к пневматическим системам вообще в литературе [12, 18] рассматриваются два вида швов: заводские и монтажные. Сущность монтажных швов заключается в объединении отдельных картин оболочки либо придании ей проектной формы непосредственно перед использованием.

Таблица 2.6

Основные технические характеристики тканей для пневмоопалубок

Шифр материала	№ ТУ	Артикул	Конструкция	Вид покрытия	Цвет покрытия		Температура воздуха, С		Толщина, мм	Масса, кг/м ²	Нормативное сопротивление, кГ/м	
					наружн.	внутрен.	мин.	макс.			основа	уток
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
51-019	38-5-3-86-9	капрон ПД 56026	с 2- сторонним покрытием	На-бутадиеновый каучук	темно-серый	светло-серый	-50	+50	0,7	0,65-0,70	8400	4200
У-92	105659-74	капрон ПД 56026	с односторонним покрытием	На-бутадиеновый каучук	светло-серый	светло-серый	-50	+50	0,7	0,7-0,8	8400	4200
У-93	105659-74	капрон ПД 56026	то же	На-бутадиеновый каучук	светло-серый	светло-серый	-50	+50	0,5	0,43	4600	3300
23-М	МРТУ 38-5-60-42	капрон ПД 56026	с 2- сторонним покрытием	полиизобутилен	темно-серый	светло-корич.	-40	+50	0,7	0,55-0,70	8400	4200
А-01	ТР-51-50080	капрон ТК-80-РО	с односторонним покрытием	наирит	светло-серый	светло-корич.	-35	+50	1,0	0,80	8000	9000
тентовый материал	17-21-86-76	лавсан ЧЛ-10-90	с 2- сторонним покрытием	поливинилхлорид	синий	светло-корич.	-40	+50	0,7	0,7	6000	5000
У-94	105659-74	капрон ПД 56026	с 2- сторонним покрытием	бутилкаучук	светло-серый	светло-серый	-50	+50	0,5	0,38-0,50	4600	3300
30	38-5453-69	капрон ПД 56026	с односторонним покрытием	полиизобутилен	-	-	-50	+50	-	0,70-0,80	8400	3200
50041	38-05-1-74	перкаль Б	диагонально дублированная	полиизобутилен	-	-	-	-	0,47	0,225	6,6	5,8
1104-1	38-105490-71	перкаль Б	параллельно дублированная	СКВ	-	-	-	-	0,41	-	11,1	1,4
51-060	38-105814-75	капрон 56026	с 2- сторонним покрытием	бутилкаучук	-	-	-50	+50	-	0,46	4200	3100

* - за минимальную температуру эксплуатации принимается средняя температура наружного воздуха наиболее холодных суток;

** - нормативные сопротивления материалов определены по средней величине прочности при одноосном растяжении полосы материала шириной 5 см.

Как правило, этот вид соединений применяется в конструкциях больших размеров (воздухоопорные сооружения, опалубки большепролетных объектов), изготовление и транспортировка которых целиком затруднительна. В пневмокаркасных конструкциях монтажные швы практически не применяются.

При изготовлении пневмокаркасных опалубочных модульных систем, как правило, на предприятиях резино-технической промышленности, применяются соединения, получившие название заводских. Они соединяют между собой полотнища, образующие поверхность мягкой оболочки. Согласно принятой в литературе [1, 12] классификации, существуют пять видов заводских швов (рис. 2.14).

Клеевые швы получили широкое распространение в оболочках, изготавливаемых из прорезиненных тканей. Их конструкция и технология изготовления унаследованы от таких пневматических конструкций, как аэростаты, газгольдеры, лодки и т.д.

Клеевые швы герметичны, но недостаточно прочны и нашли применение только в малонапряженных конструкциях. Ширина нахлеста слоев в таких конструкциях обычно принимается равной 30 - 40 мм. Повышение прочности швов достигается за счет применения клеев, близких по составу к материалам покрытия текстиля.

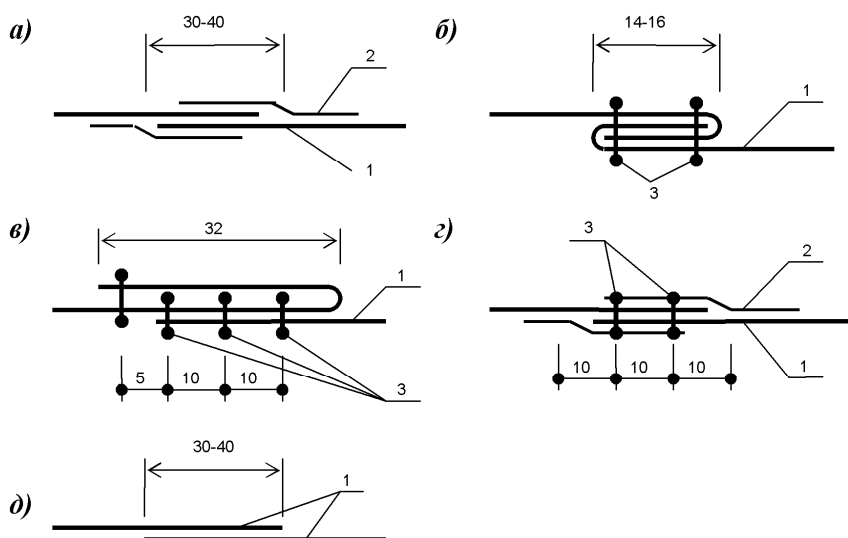


Рис. 2.14. Соединительные швы пневматических конструкций:

- а) клеевой; б) прошивной замковый; в) прошивной накладной;
 г) клеепрошивной; д) сварной; 1 - материал оболочки;
 2 - герметизирующая лента; 3 - нити прошивки

Клеевые швы обладают сравнительно невысокой атмосферной и теплоустойчивостью (менее 60...80 °С). В итоге при эксплуатации происходит рас-

слоение швов и отрыв герметизирующих лент. Стандартные конструкционные каучуковые клеи дают достаточно прочное соединение и рекомендуются, как правило, для соединения без прошивки легких тканей с разрывной прочностью до 15 кН/м [23].

По мнению В.В. Ермолова, наиболее широко употребляемыми являются прошитые швы [10, 26]. Их основное достоинство заключается в высокой скорости изготовления механизированным способом и сравнительно низких трудозатратах. Однако при изготовлении полотнищ криволинейного очертания и в ряде других случаев бывает довольно трудно организовать механическую прошивку и решение этих технологических проблем влечет за собой повышение стоимости, трудоемкости и увеличение времени изготовления.

Прошитые швы требуют применения коррозионностойких нитей, что послужило причиной отказа от их применения в опалубочных системах статического давления. В противном случае возникает необходимость защищать места прошивки дополнительно, что ведет к увеличению расхода материала на 3...5 % по сравнению с открытыми швами.

Сварные швы имеют наиболее высокие эксплуатационные показатели. Однако далеко не всякий материал можно сваривать. Как правило, свариваемостью обладают материалы с покрытием из ПВХ или других термопластов. Сварные швы изготавливают на гидравлических прессах или с использованием контактной сварки. Прочность их достигает 80...95% прочности соединяемых материалов.

Основным «минусом» сварных соединений является то, что их изготовление требует использования дорогостоящего специального технологического оборудования.

Комбинированные соединения применяются при изготовлении оболочек из материалов, у которых разрывная прочность превышает 20 кН/м. Наиболее широкое распространение получила комбинация клеевого и прошитого шва. Соединяемые полотнища перед прошивкой склеиваются, что обеспечивает высокую герметичность шва, и в то же время фиксируют положение деталей раскроя при их сшивании. Прошивка соединения обеспечивает его высокую прочность и делает их выполнение более технологичным. Эти швы менее эластичны, чем сварные. Соответственно они оказывают большее влияние на форму напряженной опалубки.

При необходимости повышения надежности возможна дополнительная защита соединения при помощи герметизирующих лент из более легких видов импрегнированных тканей.

Особенность соединений, применяемых при изготовлении пневмокаркасных опалубок, определяется высоким внутренним давлением и автономностью оболочки, в силу чего использование прошитых или клеевых соединений невозможно. Применение сварных соединений также затруднено, поскольку при их изготовлении необходимо использование сложного технологического оборудования. Такое положение выводит на первый план клее-

прошивные соединения, обладающие необходимыми эксплуатационными качествами и достаточно простыми в изготовлении.

Работы по исследованию физико-механических характеристик соединительных швов пневматических конструкций проводились отечественными специалистами А.Б. Губенко, В.П. Шлаковым, В.М. Прокофьевым, А.М. Смирновым и М.И. Петровниным [12].

Основным показателем работоспособности шва является его прочность. В отличие от материалов оболочки, для которых существует целая система нормативно-технической документации, регламентирующая их деформативные характеристики, для шовных конструкций единой нормативной базы нет.

Как показывают исследования, для материалов разрывной прочностью более 50 кН/м на прочность прошивного шва оказывают влияние число строчек и прочность ниток. Испытаниями установлено, что с увеличением числа строчек характер разрушения шва меняется (рис.2.15). Первоначально (участок графика **AB**) прочность шва увеличивается почти пропорционально их количеству. При этом разрушение шва происходит из-за нарушения целостности строчек.

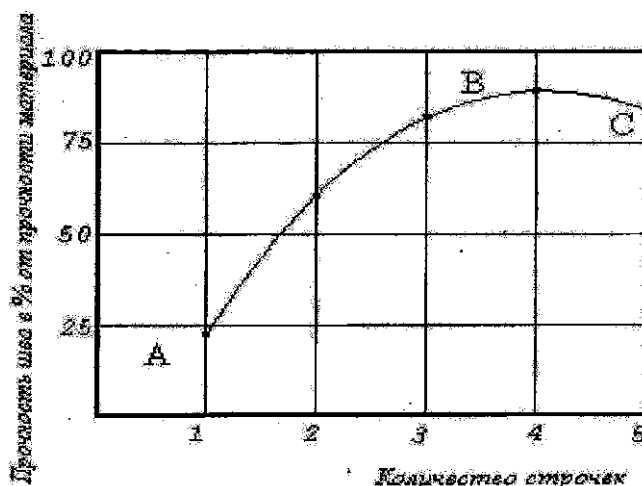


Рис.2.15. Зависимость прочности прошивных накладочных швов от количества строчек прошивки

С дальнейшим увеличением числа строчек (участок **BC**), особенно при соединении материалов прочностью до 40...50 кН/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 нецелесообразно.

Существующие предложения по расчету прошивных швов носят приближенный характер и не всегда охватывают взаимосвязь всех факторов, оказывающих влияние на прочность. Поэтому в практике проектирования оболочек наряду с приближенными расчетами прочностных параметров за-

водских швов обязательно производится проверка их прочности опытным путем. Кроме того, без детального изучения деформативных свойств соединений рабочей поверхности опалубочного модуля разработка технологии применения пневмокаркасной опалубки невозможна.

2.4.3. Примеры раскроя элементов пневмоопалубок пространственных конструкций

Отечественная резинотехническая промышленность выпускает достаточно широкую номенклатуру тканей, применяемых для изготовления пневматических строительных конструкций, в том числе используемых и качестве опалубки.

К материалам, применяемым для изготовления пневматических опалубок, предъявляются следующие требования:

- достаточная разрывная прочность и воздухонепроницаемость;
- прочность при раздире;
- стойкость против воздействия среды (солнечной радиации, окисления, увлажнения, плесени, химической агрессии, мороза, нагрева);
- стойкость против механических повреждений (истирания, проколов);
- негорючесть (самозатухание);
- умеренная стоимость;
- удобство стыковки полотнищ;
- массовость производства и др.

Для изготовления пневматических опалубок применяются преимущественно ткани на капроновой основе. К таким тканям относятся:

- однослойные А-01-1; 3Т-010; 51-136; 8318; 509; 8315;
- двухслойные параллельно-дублированные Л-1-87; 23;
- двухслойные диагонально-дублированные № 30.

Пневмооболочки изготавливаются из стандартных рулонов ткани, раскраиваемых определенным образом и соединяемых между собой швами. Главное требование, предъявляемое к швам, заключается в равнопрочности их с основным материалом оболочки. Кроме этого, выбранный тип шва должен быть технологичен при минимальном расходе материала.

Форма оболочки основного элемента пневматической опалубки выбирается с учетом конструкции и технологического использования будущего сооружения. Одновременно учитывается простота, удобство раскроя и его целесообразность, которая характеризуется полнотой использования площади и минимальной протяженностью соединительных швов. Как правило, оба эти показателя не противоречат друг другу.

Если применяется очень дорогой материал, то естественно стремятся к меньшим отходам при раскрое. Если большую часть стоимости составляет изготовление оболочек, то стремятся к уменьшению длины швов. Соображения рационального раскроя обычно учитывают при компоновке объема

пневматической опалубки. И в тех случаях, когда форму не определяют особые условия (сложность плана или архитектурные соображения), оболочка делается цилиндрической или сферической.

Цилиндрические поверхности раскраивают в виде прямоугольных полотнищ практически без отходов. Протяженность швов, отнесенная к единице площади поверхности оболочки, здесь минимальная. Поверхность двойкой кривизны принадлежит к группе "неразвертываемых" и их раскрой сопряжен с некоторыми трудностями. Поэтому при раскрое пневматических опалубок различных форм требуется выбор наиболее оптимального раскроя, при котором в полной мере используется ширина материала, наименьших затрат времени работ и безотходного производства [9, 12, 18].

Принятые в настоящем пособии методы раскроя отвечают требованиям экономии материала и эффективности работ по его использованию. Рассматриваются три способа раскроя поверхностей: меридиональный, широтный и меридионально-широтный. Порядок их использования для раскроя различных типов пневмооболочек-опалубок приведен в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Методы раскроя поверхностей	
Наименование пневмоопалубок	Способ раскроя
Линейные сооружения: а) рабочая часть б) торцевая часть	широтный широтный и меридиональный
Цилиндрические гладкие покрытия: а) рабочая часть б) торцевая часть	широтный широтно-меридиональный
Купольные сооружения	широтно-меридиональный
Волнистые пологие покрытия: а) рабочая часть б) торцевая часть	широтно-меридиональный Широтный
Волнистые цилиндрические покрытия: а) рабочая часть б) торцевая часть	широтно-меридиональный широтно-меридиональный

В целях упрощения анализа схем раскроя с каталогом все приведенные в нем типы пневмооболочек-опалубок систематизированы согласно шифру, представленному в табл.2.8. Общие виды различных типов пневмооболочек-опалубок представлен на рис.2.16...2.28, а их геометрические характеристики приведены в табл. 2.9-2.43.

Оценка материалоемкости пневмооболочек-опалубок производится по двум показателям: k_m - коэффициент использования материала, F_v - удельный расход материала. Коэффициент использования материала определяется по следующей формуле:

$$k_m = \frac{F_z + F_w}{F_\phi}, \quad (2.23)$$

где F_2 – геометрическая площадь поверхности пневмооболочки-опалубки, м²;

$F_{ш}$ – площадь клеепрошивных швов, м²;

$F_{ф}$ – фактический расход ткани, м².

Удельный расход ткани по группе оболочек покрытия определится как

$$F_{\delta} = \frac{F_{\phi}}{S_{\text{пер}}}, \quad (2.24)$$

где F_{ϕ} – фактический расход ткани, м²;

$S_{\text{пер}}$ – перекрываемая площадь сооружения, м².

Для линейных пространственных сооружений значение удельного расхода составит:

$$F_{\delta} = \frac{F_{\phi}}{L_{\delta}}, \quad (2.25)$$

где F_{ϕ} – фактический расход ткани, м²;

L_{δ} – длина участка бетонирования, м.

Таблица 2.8

Классификация конструкций пневматических опалубок

Наименование опалубки	Шифр
Опалубка линейных сооружений (рис. 2.16)	ОЛ-2; ОЛ-2,5; ОЛ-3; ОЛ-3,5; ОЛ-4
Опалубка гладкого цилиндрического покрытия (рис. 2.17)	ОГЦ-12, ОГЦ-18 ОГЦ-24, ОГЦ-36
Опалубка купольных покрытий (рис. 2.18)	ОК-12, ОК-12-10 ОК-12-15, ОК-12-20 ОК-12-25, ОК-12-30 ОК-18, ОК-18-10 ОК-18-15, ОК-18-20 ОК-18-25, ОК-18-30 ОК-24, ОК-24-10 ОК-24-15, ОК-24-20 ОК-24-25, ОК-24-30 ОК-36, ОК-36-10 ОК-36-15, ОК-36-20 ОК-36-25, ОК-36-30
Опалубка волнистого пологого покрытия (рис.2.19)	ОВП-12, ОВП-18 ОВП-24, ОВП-36
Опалубка волнистого цилиндрического покрытия (рис.2.24)	ОВЦ-12, ОВЦ-18 ОВЦ-24, ОВЦ-36

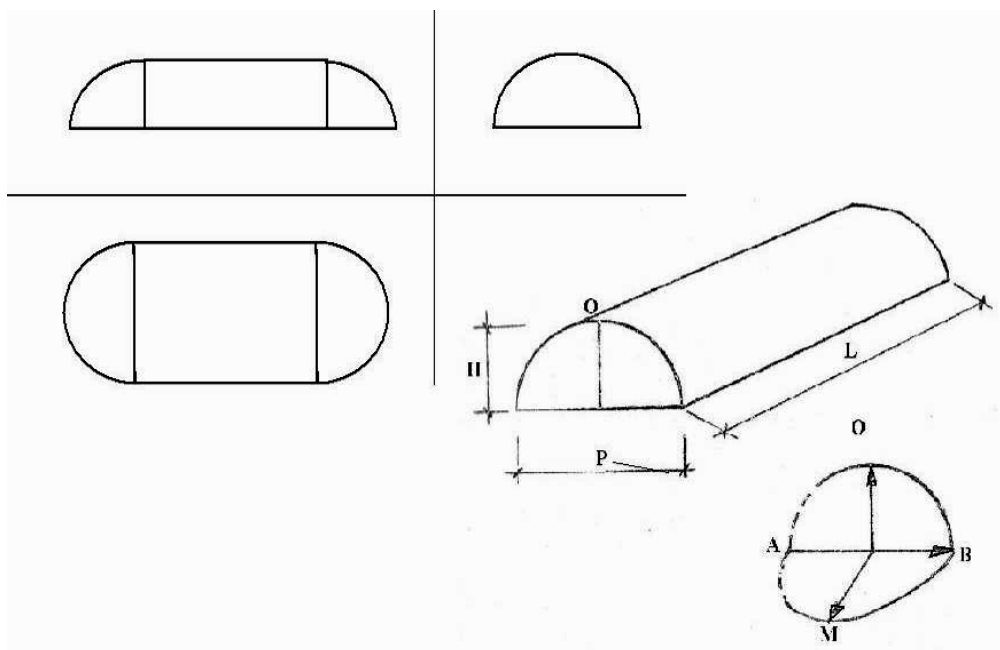


Рис. 2.16. Общий вид опалубки линейных сооружений

Таблица 2.9
Геометрические характеристики опалубки линейных сооружений

Код опалубки	Диаметр D , м	Длина сооружения L , м	Длина AOB , м	Радиус R , м	Примечание
ОЛ-2	2,0	25	3,14	1,0	$H=R$
ОЛ-2,5	2,5		3,925	1,25	
ОЛ-3	3,0		4,71	1,5	
ОЛ-3,5	3,5		5,495	1,75	
ОЛ-4	4,0		6,28	2,0	

Таблица 2.10
Маркировочная схема и спецификация (рабочая область)

Код опалубки	Марка элемента	L , м	Количество элементов	Эскиз элемента	Размеры элемента, м		Площадь элемента $S_{\text{э}}$, м ²	Площадь рабочей зоны S , м ²
					a	b		
ОЛ-2	Эр-1	25	32		3,14	0,78	2,45	78,4
ОЛ-2,5	Эр-2	25	32		3,925	0,78	3,06	97,92
ОЛ-3	Эр-3	25	32		4,71	0,78	3,67	117,44
ОЛ-3,5	Эр-4	25	32		5,495	0,78	4,29	137,28
ОЛ-4	Эр-5	25	32		6,28	0,78	4,90	156,8

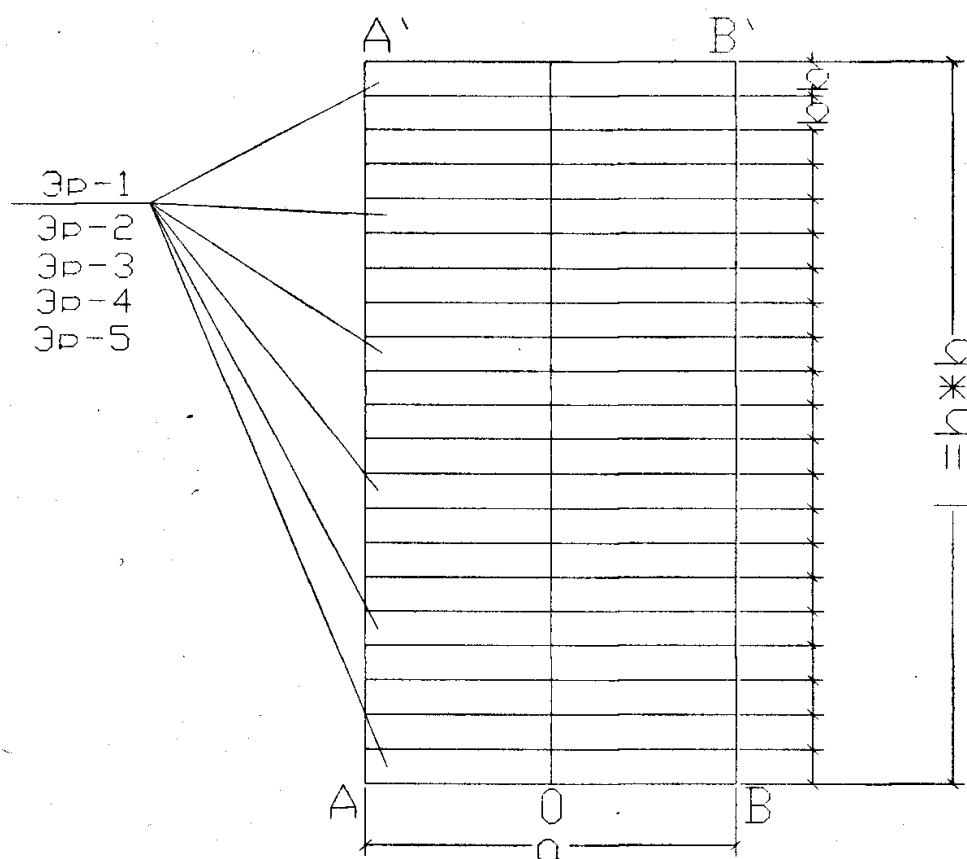
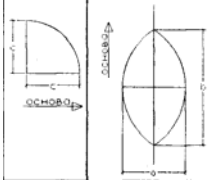


Рис. к табл. 2.10

Таблица 2.11

Маркировочная схема и спецификация.
Торцевая часть (широтный способ раскроя)

Код опалубки	Марка элемента		Количество элементов на торец		Эскиз элемента	Размеры элемента, м			Площадь элемента Sэ, м2		Общая площадь 2-х тор- цов, м ²
						Эц	Эш				
	Эц	Эш	Эц	Эш	Эц	Эш	с	а	б	Эц	Эш
ОЛ-2	Эц	Эш-1	2	2.		0,5	0,79	3,14	0,2	1,44	6,56
ОЛ-2,5	Эц	Эш-2		3			0,65	3,92		1,60	10,4
ОЛ-3	Эц	Эш-3		3			0,78	4,72		2,30	16,6
ОЛ-3,5	Эц	Эш-4		4			0,68	5,48		2,32	19,36
ОЛ-4	Эц	Эш-5		4			0,78	6,28		3,06	25,28

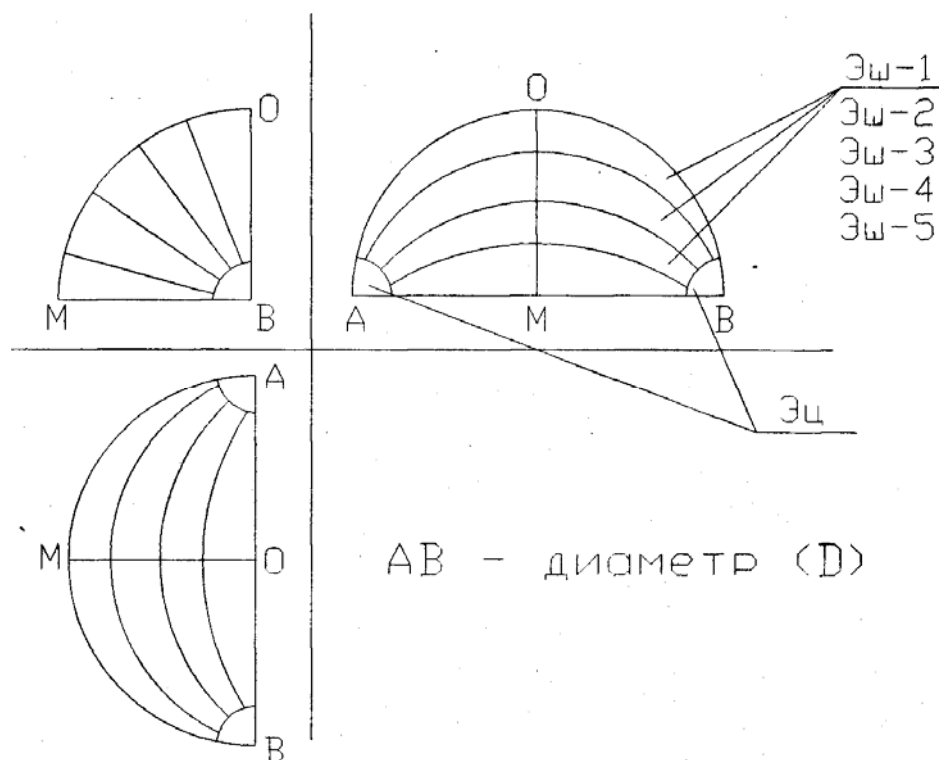


Рис. к табл. 2.11

Таблица 2.12

Маркировочная схема и спецификация.
Торцевая часть (меридиональный способ раскроя)

Код опалубки	Марка элемента		Количество элементов на 1 торец		Эскиз элемента		Размеры, м			Площадь элемента S, м ²		Общая площадь 2-х тор- цов, м ²
							Эц	Эш				
	Эц	Эм					Эц	Эм	Эц	Эм	с	
ОЛ-2	Эц	Эм-1	1	4		0,5	0,78	1,57	0,4	0,76	6,28	
ОЛ-2,5	Эц	Эм-2		5			0,78	1,96		0,91	9,28	
ОЛ-3	Эц	Эм-3		6			0,78	2,36		1,15	14,0	
ОЛ-3,5	Эц	Эм-4		7			0,78	2,74		1,34	19,0	
ОЛ-4	Эц	Эм-5		8			0,78	3,14		1,53	24,63	

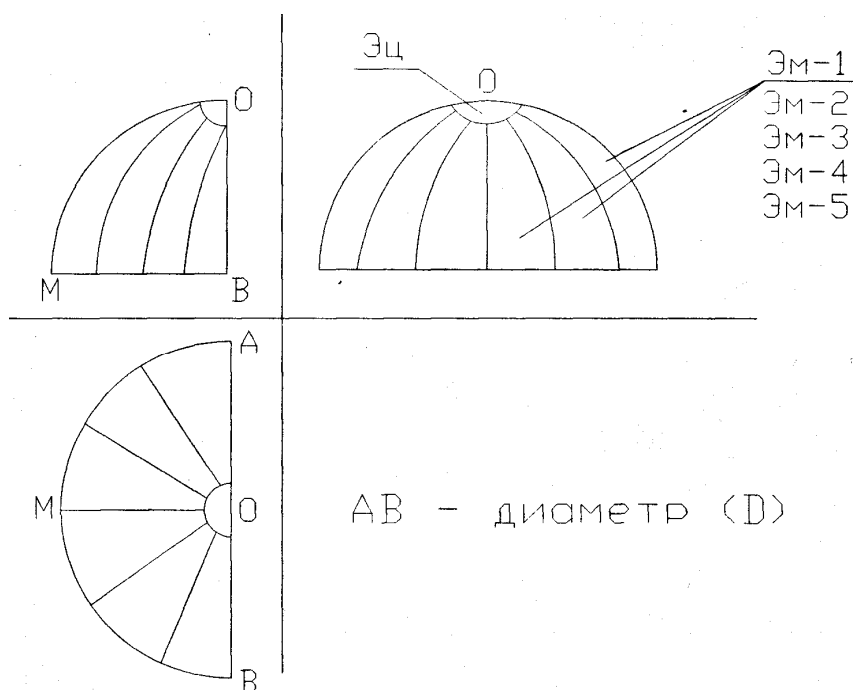


Рис. к табл. 2.12

Таблица 2.13

Элемент торцевой части ЭШ. Широтный раскрой

Код опалубки	Марка элемента	Эскиз элемента	Размеры, м								
			<i>a</i>	<i>a</i> ₁	<i>a</i> ₂	<i>a</i> ₃	<i>a</i> ₄	<i>a</i> ₅	<i>a</i> ₆	<i>a</i> ₇	<i>b</i>
ОЛ-2	ЭШ-1		0,79	0,73	0,56	0,3	-	-	-	-	3,14
ОЛ-2,5	ЭШ-2		0,65	0,62	0,38	0,2	-	-	-	-	-
ОЛ-3	ЭШ-3		0,38	0,75	0,67	0,55	0,3	0,2	-	-	4,72
ОЛ-3,5	ЭШ-4		0,68	0,66	0,61	0,53	0,42	0,29	0,15	-	5,48
ОЛ-4	ЭШ-5		0,78	0,76	0,72	0,65	0,55	0,43	0,29	0,15	6,28

Таблица 2.14

Элемент торцевой части ЭМ. Меридиональный раскрой

Код опалубки	Марка элемента	Эскиз элемента	Размеры, м								
			<i>a</i>	<i>a</i> ₁	<i>a</i> ₂	<i>a</i> ₃	<i>a</i> ₄	<i>a</i> ₅	<i>a</i> ₆	<i>a</i> ₇	<i>b</i>
ОЛ-2	ЭМ-1		0,78	0,72	0,55	0,29	-	-	-	-	1,57
ОЛ-2,5	ЭМ-2		0,78	0,74	0,51	0,46	0,24	-	-	-	1,96
ОЛ-3	ЭМ-3		0,78	0,75	0,67	0,55	0,39	0,2	-	-	2,36
ОЛ-3,5	ЭМ-4		0,78	0,76	0,7	0,61	0,48	0,34	0,17	-	2,74
ОЛ-4	ЭМ-5		0,78	0,76	0,72	0,65	0,55	0,43	0,29	0,15	3,14

Таблица 2.15

Расход резиноканевых материалов на линейную опалубку

Код опалубки	$F_{\text{г}}, \text{м}^2$	$F_{\text{ш}}, \text{м}^2$	$F_{\text{ф}}, \text{м}^2$	$L_{\text{б}}, \text{м}$	$K_{\text{м}}$	$F_{\text{у}}, \text{м}$
Рабочая часть						
ОЛ-2	78,5	9,73	90,43	25,0	0,975	3,62
ОЛ-2,5	98,125	12,16	113,04	25,0	0,976	4,52
ОЛ-3	117,75	14,60	135,65	25,0	0,976	5,43
ОЛ-3,5	137,37	17,03	158,26	25,0	0,975	6,33
ОЛ-4	157,0	19,47	180,86	25,0	0,975	7,23
Рабочая часть, торцевая часть (широтный способ)						
ОЛ-2	84,96	10,36	103,73	25,0	0,92	4,14
ОЛ-2,5	108,32	13,34	136,21	25,0	0,89	5,45
ОЛ-3	134,04	16,02	163,14	25,0	0,92	6,53

Окончание табл.2.15

Код опалубки	$F_{\text{г}}, \text{м}^2$	$F_{\text{ш}}, \text{м}^2$	$F_{\text{ф}}, \text{м}^2$	$L_{\text{б}}, \text{м}$	$K_{\text{м}}$	$F_{\text{у}}, \text{м}$
ОЛ-3,5	156,64	19,22	199,72	25,0	0,88	7,98
ОЛ-4	182,08	21,98	288,08	25,0	0,89	9,12
Рабочая часть, торцевая часть (меридиональный способ)						
ОЛ-2	84,78	10,52	102,63	25,0	0,93	4,11
ОЛ-2,5	107,41	13,34	131,58	25,0	0,92	5,26
ОЛ-3	131,75	16,25	162,03	25,0	0,91	6,48
ОЛ-3,5	156,37	19,22	193,68	25,0	0,91	7,75
ОЛ-4	181,63	22,30	226,98	25,0	0,89	9,08

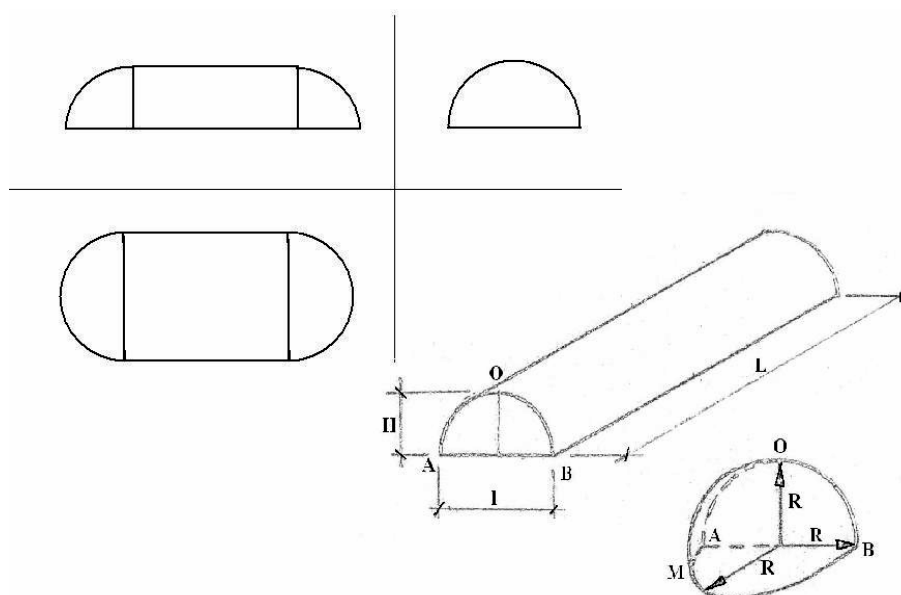


Рис. 2.17. Общий вид опалубки гладкого цилиндрического покрытия

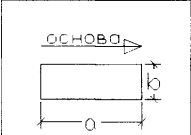
Таблица 2.16

Геометрические характеристики опалубки гладкого
цилиндрического покрытия

Код опалубки	Пролет L, м	Длина сооружения L, м	Длина АОВ, м	Радиус R, м	Примечание
ОГЦ-12	12,0	24,0	18,84	6,0	$H=R$
ОГЦ-18	18,0	36,0	28,26	9,0	
ОГЦ-24	24,0	48,0	37,68	12,0	
ОГЦ-36	36,0	72,0	56,52	18,0	

Таблица 2.17

Маркировочная схема и спецификация (рабочая область)

Код опалубки	Марка элемента	L, м	Кол-во эл-в	Эскиз элемента	Размеры элемента, м		Площадь элемента $S_э$, м ²	Общая площадь рабочей зоны, м ²
					a	b		
ОГЦ-12	Эр-1	24	30		18.84	0.8	15.07	452.1
ОГЦ-18	Эр-2	36	45		28.26	0.8	22.61	1017.4
ОГЦ-24	Эр-3	48	60		37.68	0.8	30.14	1808.4
ОГЦ-36	Эр-4	72	90		56.52	0.8	45.22	4069.8

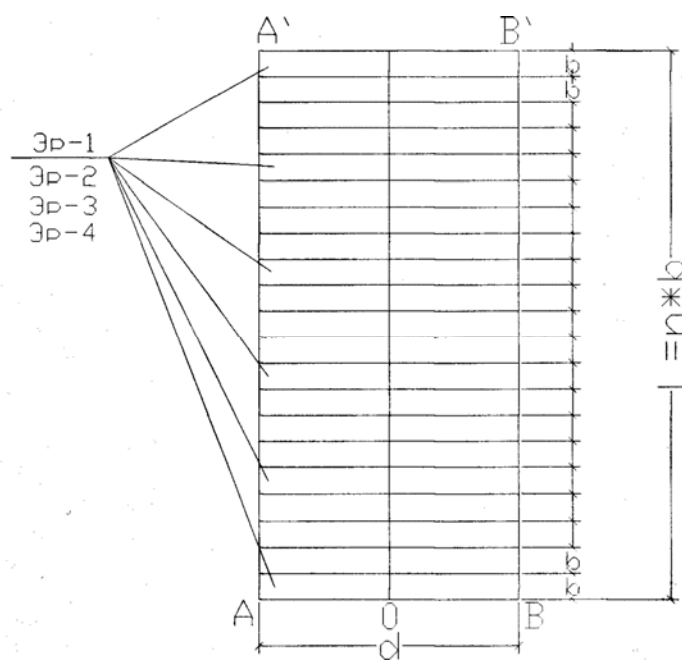


Рис. к табл. 2.17

Таблица 2.18

Маркировочная схема и спецификация.
Торцевая часть (меридионально-широтный способ раскроя)

Код опалубки	Марка элемента		Количество элементов на 1 торец		Эскиз элемента		Размеры, м			Площадь элемента S_{Σ} , м ²		Общая площадь на 2 торца, м ²
	Эц	Эт	Эц	Эт	Эц	Эт	Эц	Эт		Эц	Эт	
ОГЦ-12	Эц	Эт-1	1	10				1,88	9,42		11,27	227,35
ОГЦ-18	Эц	Эт-2		15				1,88	14,13		18,9	509,97
ОГЦ-24	Эц	Эт-3		15				2,51	18,84		30,05	903,5
ОГЦ-36	Эц	Эт-4		15				3,77	28,26		67,77	2035



Рис.к табл.2.18

Таблица 2.19

Элемент торцевой части Эт.

Код опалубки	Марка элемента	Эскиз элемента	Размеры, м								
			a	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈
ОГЦ-12	Эт-1		1,88	1,87	1,82	1,74	1,63	1,49	1,33	1,15	0,94
ОГЦ-18	Эт-2		1,88	1,87	1,86	1,82	1,77	1,71	1,63	1,54	1,44
ОГЦ-24	Эт-3		2,51	2,5	2,49	2,46	2,41	2,37	2,32	2,25	2,17
ОГЦ-36	Эт-4		3,77	3,76	3,75	3,74	3,71	3,68	3,64	3,59	3,54

Продолжение табл. 2.19

Размеры, м														
a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈	a ₁₉	a ₂₀	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃
0,72	0,48	0,25	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,33	1,21	1,08	0,94	0,8	0,64	0,49	0,32	0,16	0	-	-	-	-	-
2,08	1,99	1,88	1,77	1,65	1,53	1,39	1,26	1,12	0,96	0,81	0,65	0,49	0,33	0,16
3,48	3,42	3,34	3,26	3,18	3,09	2,99	2,89	2,78	2,66	2,55	2,48	2,29	2,16	2,02

Окончание табл. 2.19

Размеры, м														
a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}	a_{28}	a_{29}	a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}	a_{36}	b	h
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,42	0,785
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,13	
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18,84	
1,88	1,74	1,59	1,44	1,29	1,13	0,98	0,82	0,65	0,49	0,33	0,16	0	28,26	

Таблица 2.20

Расход резиноканевых материалов на опалубку
гладкую цилиндрическую

Код опалубки	$F_г, м^2$	$F_ш, м^2$	$F_ф, м^2$	$Lб, м$	$Kм$	$Fу, м$
Рабочая часть						
ОГЦ-12	452,1	54,64	508,68	288	0,996	1,77
ОГЦ-18	1017,45	124,34	1144,53	648	0,997	1,77
ОГЦ-24	1808,4	222,31	2034,72	1152	0,998	1,77
ОГЦ-36	4069,8	503,03	4578,12	2592	0,998	1,77
На опалубку						
ОГЦ-12	679,45	107,31	811,04	288	0,970	2,82
ОГЦ-18	1527,42	240,51	1803,99	648	0,980	2,72
ОГЦ-24	2711,91	405,49	3173,16	1152	0,982	2,75
ОГЦ-36	6104,8	864,08	7060,05	2592	0,987	2,72

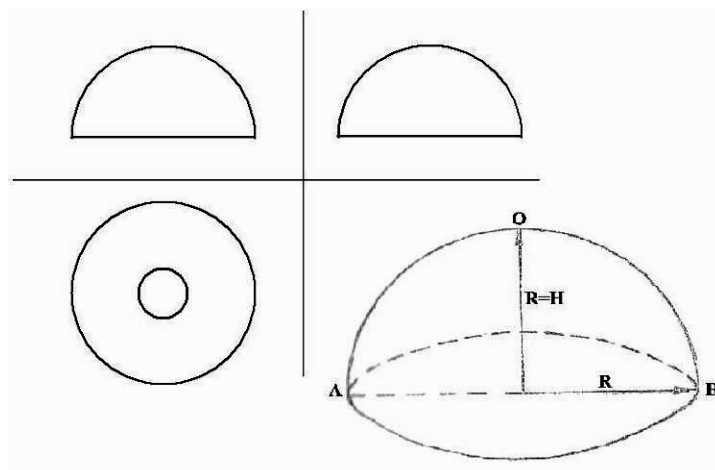


Рис. 2.18. Общий вид опалубки купольного покрытия

Таблица 2.21

Геометрические характеристики опалубки купольного покрытия

Код опалубки	Диаметр D, м	Длина АОВ, м	Радиус R, м	Примечание
ОК-12	12,0	18,84	37,68	$H=R$
ОК-18	18,0	28,26	56,52	
ОК-24	24,0	37,68	75,36	
ОК-36	36,0	56,52	113,04	

Таблица 2.22

Маркировочная схема и спецификация

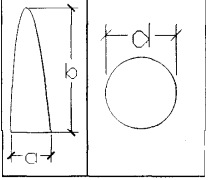
Код опалубки	Диаметр, м	Кол-во элементов		Эскиз		Размеры, м			Площадь эле- мента, м ²		Общая площадь, м ²
						Э-1	Э-2				
		Э-1	Э-2	Э-2	Э-1	a	b	d	Э-1	Э-2	
ОК-12-10	12	1	10		1,6	3,77	9,42	2,01	22,52	227,18	
ОК-18-10	18	1	10			5,65	14,13		50,81	510,09	
ОК-24-10	24	1	10			7,54	18,84		90,35	905,46	
ОК-36-10	36	1	10			11,3	28,26		203,33	2035,27	

Таблица 2.23

Маркировочная схема и спецификация

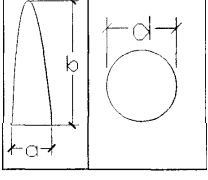
Код опалубки	Диа- метр, м	Кол-во элементов		Эскиз		Размеры, м			Площадь элемента, м ²		Общая площадь, м ²
						Э-1	Э-2		Э-1	Э-2	
		Э-1	Э-2	Э-2	Э-1	a	b	d			
ОК-12-15	12	1	15		1,6	2,51	9,42	2,01	14,99	226,86	
ОК-18-15	18	1	15			3,79	14,13		33,87	510,06	
ОК-24-15	24	1	15			5,02	18,84		60,23	905,66	
ОК-36-15	36	1	15			7,54	28,26		135,55	2035,26	

Таблица 2.24

Маркировочная схема и спецификация

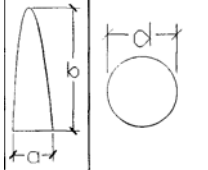
Код опалубки	Диаметр, м	Кол-во элементов		Эскиз		Размеры, м			Площадь элемента, м ²		Общая площадь, м ²
						Э-1	Э-2		Э-1	Э-2	
		Э-1	Э-2	Э-2	Э-1	a	b	d			
ОК-12-20	12	1	20			1,6	1,88	9,42	2,01	11,27	227,41
ОК-18-20	18	1	20				2,83	14,14		25,44	510,81
ОК-24-20	24	1	20				3,77	18,84		45,17	905,41
ОК-36-20	36	1	20				5,65	28,26		101,66	2035,21

Таблица 2.25

Маркировочная схема и спецификация

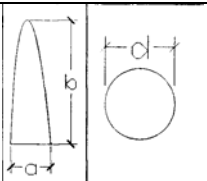
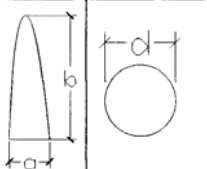
Код опалубки	Диа- метр, м	Кол-во элементов		Эскиз		Размеры, м			Площадь элемента, м ²		Общая площадь, м ²
						Э-1	Э-2		Э-1	Э-2	
		Э-1	Э-2	Э-2	Э-1	a	b	d		Э-1	
ОК-12-25	12	1	25		1,6	1,51	9,42	2,01	9,03	227,76	
ОК-18-25	18	1	25			2,26	14,13		20,32	510,01	
ОК-24-25	24	1	25			3,01	18,84		36,17	906,26	
ОК-36-25	36	1	25			4,52	28,26		81,33	2035,26	

Таблица 2.26

Маркировочная схема и спецификация

Код опалубки	Диа- метр, м	Кол-во элементов		Эскиз		Размеры, м			Площадь элемента, м ²		Общая площадь, м ²
						Э-1	Э-2		Э-1	Э-2	
		Э-1	Э-2	Э-2	Э-1	Э-2	Э-2				
ОК-12-30	12	1	30		1,6	1,26	9,42	2,01	7,51	227,31	
ОК-18-30	18	1	30			1,88	14,13		16,93	509,91	
ОК-24-30	24	1	30			2,51	18,84		30,05	903,51	
ОК-36-30	36	1	30			3,77	28,26		67,77	2035,1	

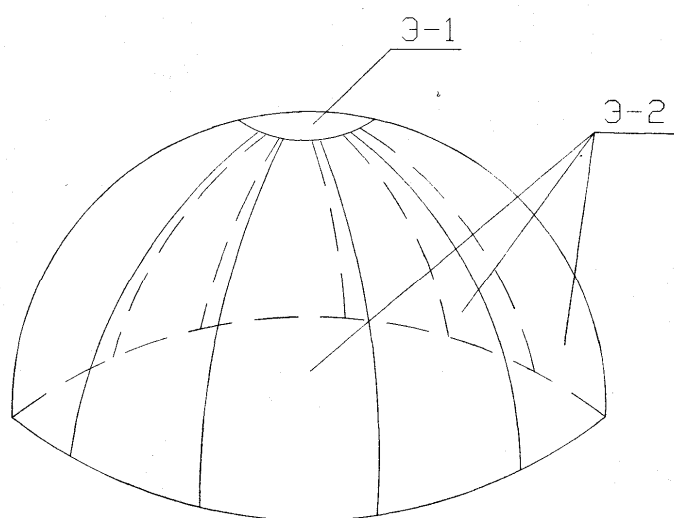
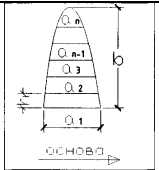


Рис. к табл. 2.22....2.26

Таблица 2.27

Элемент Э-2. Детализация

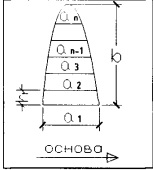
Код опалубки	Кол-во элементов	Марка элемента	Эскиз элемента	Размеры, м			
				a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
ОК-12-10	10	Э-2		3,77	3,74	3,68	3,48
ОК-12-15	15			2,51	2,48	2,41	2,32
ОК-12-20	20			1,88	1,87	1,82	1,74
ОК-12-25	25			1,51	1,50	1,46	1,39
ОК-12-30	30			1,26	1,25	1,21	1,16

Окончание табл. 2.27

Размеры, м									
a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	h
3,26	2,99	2,39	1,88	1,44	0,94	0,16	0,16	9,42	0,785
2,77	1,99	1,77	1,53	1,26	0,96	0,63	0,33	9,42	0,785
1,63	1,49	1,33	1,15	0,94	0,72	0,47	0,25	9,42	0,785
1,31	1,2	1,07	0,92	0,76	0,58	0,32	0,2	9,42	0,785
1,09	1,0	0,83	0,76	0,63	0,48	0,31	0,16	9,42	0,785

Таблица 2.28

Элемент Э-2. Детализровка

Код опалубки	Кол-во элементов	Марка элемента	Эскиз элемента	Размеры, м			
				a_1	a_2	a_3	a_4
ОК-18-10	10	Э-2		5,65	5,63	5,57	5,46
ОК-18-15	15			3,79	3,75	3,71	3,64
ОК-18-20	20			2,83	2,82	2,79	2,74
ОК-18-25	25			2,26	2,25	2,23	2,18
ОК-18-30	30			1,88	1,88	1,86	1,81

Продолжение табл. 2.28

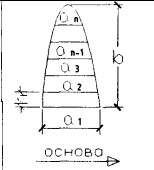
Размеры, м									
a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
5,31	5,12	4,89	4,63	4,33	4,0	3,63	3,24	2,83	2,39
3,54	3,42	3,26	3,09	2,89	2,66	2,42	2,16	1,88	1,59
2,66	2,56	2,45	2,32	2,17	2,0	1,82	1,62	1,42	1,20
2,13	2,05	1,96	1,85	1,73	1,60	1,45	1,30	1,13	0,96
1,77	1,71	1,63	1,54	1,44	1,33	1,21	1,08	0,94	0,74

Окончание табл. 2.28

Размеры, м					
a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	b	h
1,93	1,46	0,98	0,49	14,13	0,785
1,29	0,98	0,65	0,33	14,13	0,785
0,97	0,73	0,49	0,25	14,13	0,785
0,77	0,59	0,39	0,20	14,13	0,785
0,64	0,49	0,32	0,16	14,13	0,785

Таблица 2.29

Элемент Э-2. Детализровка

Код опалубки	Кол-во элементов	Марка элемента	Эскиз элемента	Размеры, м			
				a_1	a_2	a_3	a_4
ОК-24-10	10	Э-2		7,54	7,52	7,47	7,39
ОК-24-15	15			6,02	5,01	4,98	4,93
ОК-24-20	20			3,77	3,76	3,74	3,69
ОК-24-25	25			3,01	3,0	2,99	2,96
ОК-24-30	30			2,51	2,5	2,49	2,46

Продолжение табл. 2.29

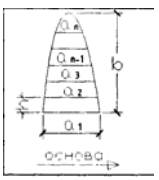
Размеры, м										
a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
7,28	7,14	6,96	6,76	6,53	6,27	5,98	5,67	5,33	4,97	4,59
4,85	4,76	4,64	4,51	4,35	4,18	3,99	3,78	3,55	3,31	3,06
3,64	3,57	3,48	3,38	3,26	3,13	2,99	2,83	2,66	2,48	2,29
2,9	2,85	2,9	2,85	2,78	2,7	2,61	2,51	2,39	2,26	2,13
2,41	2,37	2,32	2,25	2,17	2,08	1,99	1,88	1,77	1,65	1,53

Окончание табл. 2.29

Размеры, м										
a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	b	h
4,19	3,77	3,33	2,88	2,42	1,95	1,47	0,98	0,49	18,84	0,785
2,79	2,51	2,22	1,92	1,62	1,3	0,98	0,66	0,33	18,84	0,785
2,05	1,88	1,67	1,44	1,21	0,98	0,73	0,49	0,28	18,84	0,785
1,67	1,51	1,33	1,15	0,97	0,78	0,59	0,39	0,2	18,84	0,785
1,39	1,26	1,12	0,96	0,81	0,65	0,49	0,3	0,16	18,84	0,785

Таблица 2.30

Элемент Э-2. Детализовка

Код опалубки	Кол-во элементов	Марка элемента	Эскиз элемента	Размеры, м			
				a_1	a_2	a_3	a_4
ОК-36-10	10	Э-2		11,30	11,29	11,26	11,21
ОК-36-15	15			7,54	7,53	7,51	7,47
ОК-36-20	20			5,65	5,64	5,63	5,60
ОК-36-25	25			4,52	4,51	4,50	4,48
ОК-36-30	30			3,77	3,76	3,75	3,74

Продолжение табл. 2.30

Размеры, м										
a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
11,13	11,04	10,92	10,78	10,62	10,44	10,25	10,03	9,79	9,53	9,26
7,42	7,36	7,28	7,19	7,08	6,96	6,83	6,68	6,53	6,36	6,17
5,57	5,52	5,46	5,39	5,31	5,22	5,12	5,01	4,89	4,77	4,63
4,45	4,42	4,37	4,31	4,25	4,18	4,10	4,01	3,92	3,81	3,7
3,71	3,68	3,64	3,59	3,54	3,48	3,42	3,34	3,26	3,18	3,09

Продолжение табл. 2.30

Размеры, м										
a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{24}	a_{25}
8,97	8,66	8,33	7,99	7,64	7,27	6,88	6,48	6,07	5,65	5,22
5,98	5,77	5,56	5,33	5,09	4,84	4,59	4,32	4,05	3,77	3,48
4,48	4,33	4,17	3,99	3,82	3,65	3,44	3,24	3,04	2,83	2,61
3,59	3,46	3,33	3,20	3,06	2,91	2,75	2,59	2,43	2,26	2,09
2,99	2,89	2,78	2,66	2,55	2,42	2,29	2,16	2,02	1,88	1,74

Окончание табл. 2.30

Размеры, м											
a_{26}	a_{27}	a_{28}	a_{29}	a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}	b	H
4,78	4,33	3,87	3,4	2,93	2,45	1,96	1,48	0,98	0,49	28,26	0,785
3,19	2,88	2,58	2,27	1,95	1,63	1,31	0,98	0,66	0,33	28,26	0,785
2,39	2,16	1,93	1,70	1,46	1,22	0,98	0,74	0,49	0,25	28,26	0,785
1,91	1,73	1,55	1,36	1,17	0,98	0,79	0,59	0,39	0,20	28,26	0,785
1,59	1,44	1,29	1,13	0,98	0,82	0,65	0,49	0,33	0,16	28,26	0,785

Таблица 2.31

Расход резиноканевых материалов на опалубку

Код опалубки	$F_2, м^2$	$F_{ш}, м^2$	$F_{ф}, м^2$	$L_б, м$	K_m	$F_y, м$
ОК-12-10	227,18	38,08	219,16	113,04	0,914	2,57
ОК-12-15	226,86	47,13	295,86	113,04	0,926	2,62
ОК-12-20	227,41	52,49	302,36	113,04	0,926	2,67
ОК-12-25	227,76	57,85	308,81	113,04	0,925	2,73
ОК-12-30	227,31	63,1	314,25	113,04	0,924	2,78
ОК-18-10	510,09	84,14	627,20	254,34	0,947	2,46
ОК-18-15	510,06	92,10	635,25	254,34	0,948	2,49
ОК-18-20	510,81	92,10	635,25	254,34	0,949	2,49
ОК-18-25	510,01	108,03	651,46	254,34	0,948	2,56
ОК-18-30	509,91	115,99	659,46	254,34	0,949	2,59
ОК-24-10	905,46	140,76	1094,36	452,16	0,956	2,42
ОК-24-15	905,66	151,39	1105,26	452,16	0,956	2,44
ОК-24-20	905,41	161,99	1115,92	452,16	0,956	2,47
ОК-24-25	906,26	172,57	1126,33	452,16	0,957	2,49
ОК-24-30	903,51	183,0	1135,44	452,16	0,956	2,51
ОК-36-10	2035,27	297,19	2417,46	1017,36	0,965	2,38
ОК-36-15	2035,26	313,12	2433,66	1017,36	0,964	2,39
ОК-36-20	2035,21	329,04	2449,78	1017,36	0,965	2,41
ОК-36-25	2035,26	344,98	2466,05	1017,36	0,965	2,42
ОК-36-30	2035,1	360,88	2481,93	1017,36	0,965	2,43

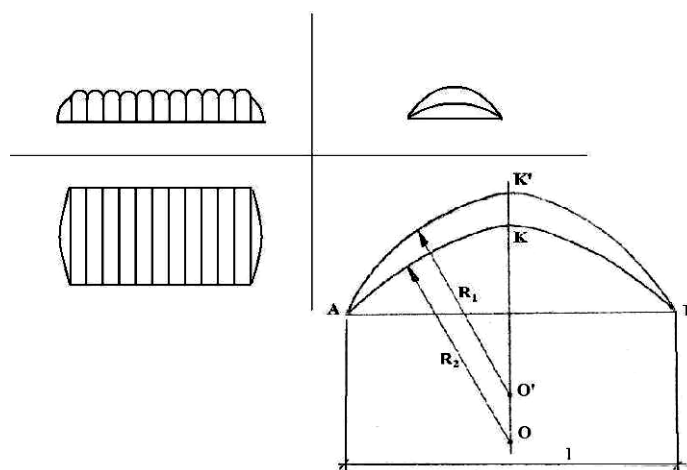


Рис. 2.19. Общий вид опалубки волнистого пологого покрытия

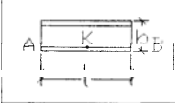
Таблица 2.32

Геометрические характеристики опалубки волнистого пологого покрытия

Код опалубки	Пролет l , м	Длина сооружения L , м	Отметка низа волны, м	Высота волны, м	Угол АО'В , град	Радиус		Угол АОВ , град	Длина дуги	
						верха волны, R_1 , м	низа волны, R_2 , м		АК'В , м	АКВ , м
ОВП-12	12,0	24,0	2,0	0,6	95	8,22	10,0	75	13,62	13,08
ОВП-18	18,0	36,0	3,0	0,9		12,33	15,0		20,43	19,62
ОВП-24	24,0	48,0	4,0	1,2		16,44	22,5		27,24	26,16
ОВП-36	36,0	72,0	6,0	1,8		24,66	30,0		40,86	39,24

Таблица 2.33

Маркировочная схема и спецификация (рабочая часть)

Код опалубки	Марка элемента	Длина сооружения L , м	Кол-во элементов	Эскиз элемента	Размеры элемента, м		Площадь элемента $S_э$, м ²	Геом. площадь рабочей зоны S , м ²
					b	l		
ОВП-12	Эр-1	24	10		2,4	12	50,94	352,4
ОВП-18	Эр-2	36			3,6	18	104,02	804,8
ОВП-24	Эр-3	48			4,8	24	173,56	1421,6
ОВП-36	Эр-4	72			7,2	36	368,98	3219,0

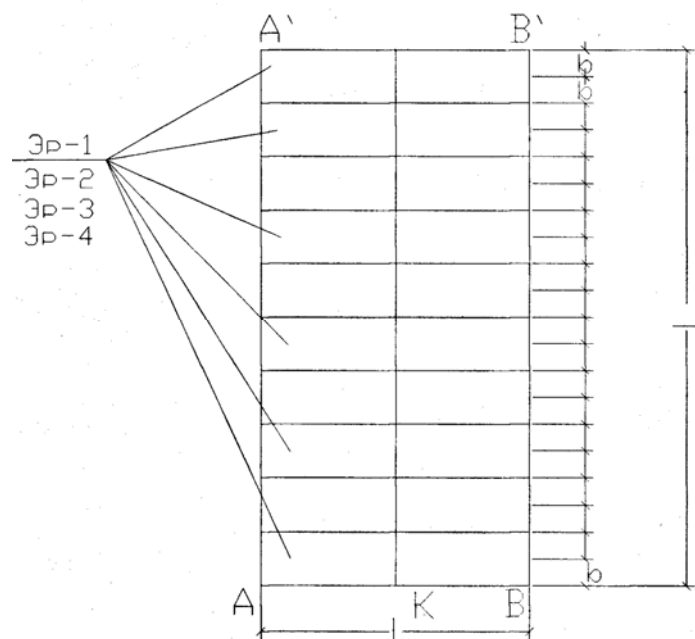


Рис. к табл. 2.33

На рис. 2.20...2.23 приводятся детализировки раскроя элементов волнистой полой пневмоопалубки.

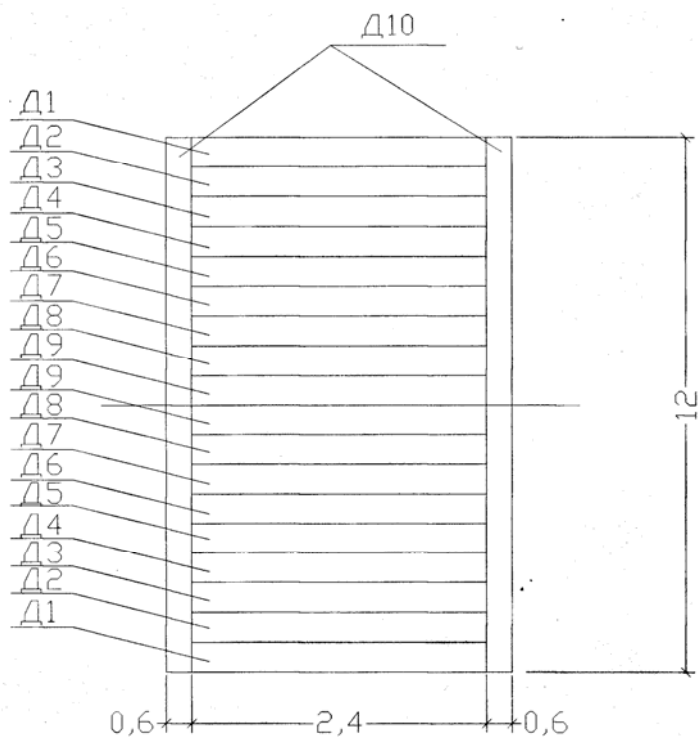


Рис. 2.20. Элемент Эр-1. Детализовка

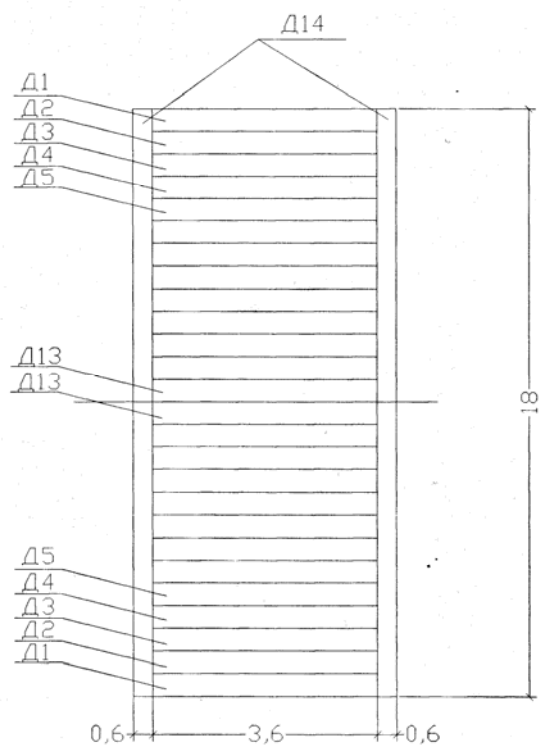


Рис. 2.21. Элемент Эр-2. Детализовка

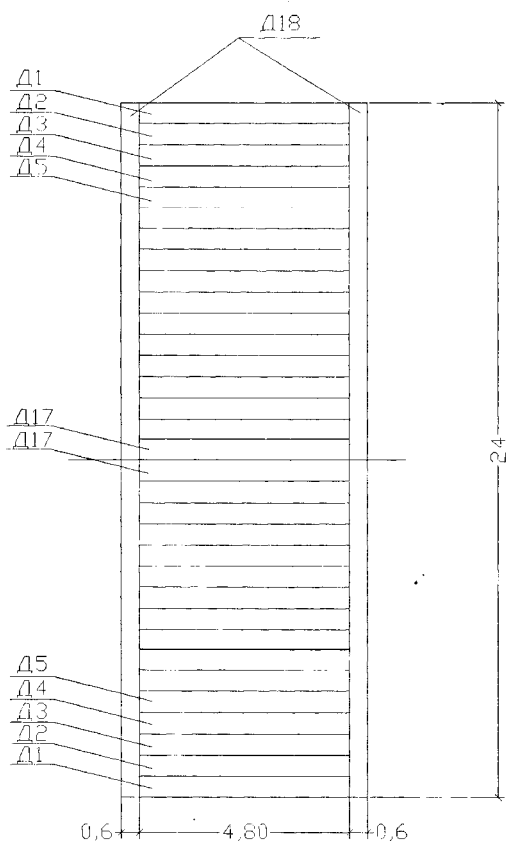


Рис. 2.22. Элемент Эр-3. Детализовка

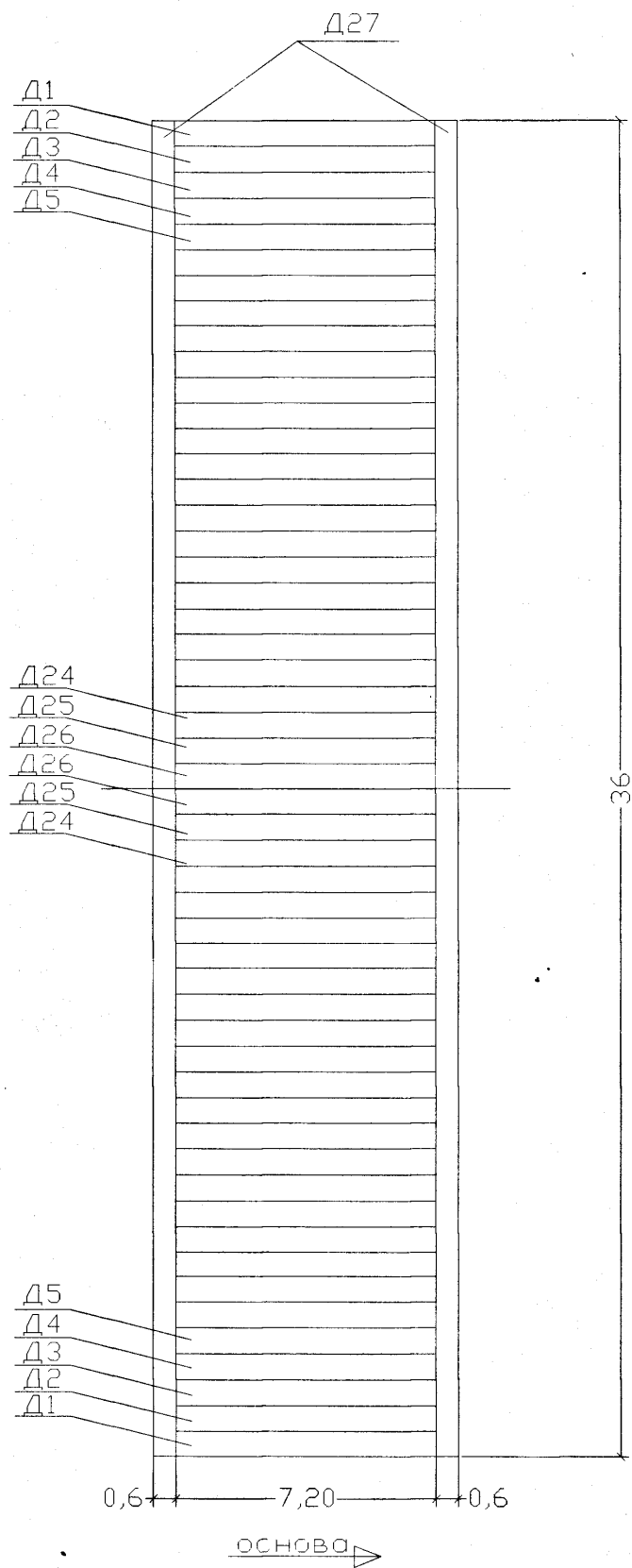
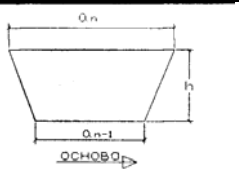


Рис. 2.23. Элемент Эр-4. Детализовка

Таблица 2.34

Спецификация Эр

Код опалубки	Марка детали	Эскиз детали	Размеры, м						
			a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
ОВП-12	Э-2		2,4	2,46	2,48	2,53	2,77	2,62	2,73
ОВП-18			3,6	3,69	3,7	3,73	3,75	3,83	3,84
ОВП-24			4,8	4,86	4,92	4,94	4,96	4,98	5,05
ОВП-36			7,2	7,25	7,32	7,38	7,39	7,41	7,42

Продолжение табл. 2.34

Размеры, м										
a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}
2,74	2,77	2,77	-	-	-	-	-	-	-	-
3,95	4,05	4,1	4,12	4,4	4,16	4,16	-	-	-	-
5,12	5,15	5,25	5,42	5,46	5,46	5,48	5,53	5,55	5,55	5,55
7,5	7,55	7,6	7,67	7,7	7,73	7,76	7,9	8,0	8,1	8,2

Окончание табл. 2.34

Размеры, м										
a_{19}	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}	h	l
-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,79	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,80	
8,2	8,2	8,21	8,24	8,28	8,32	8,32	8,32	8,32	0,79	

Таблица 2.35

Спецификация Эр

Код опалубки	Марка детали	Эскиз детали	Размеры, м	
			h	l
ОВП-12	Дю		0,6	13,08
ОВП-18	Дн		0,6	19,62
ОВП-24	Д18		0,6	26,16
ОВП-36	Д27		0,6	39,24

Таблица 2.36

Геометрические характеристики. Торцевая часть
(широтный способ раскроя)

Код опалубки	Пролет L , м	R_1 , м	R_2 , м	α , град.	Длина дуги АКВ, м	Длина дуги КМ, м	Примечание
ОВП-12	12	10	2	36,7	13,08	3,14	$l = AB$ $AKB = AMB$
ОВП-18	18	15	3		19,62	4,71	
ОВП-24	24	20	4		26,16	6,28	
ОВП-36	36	30	6		39,24	9,42	

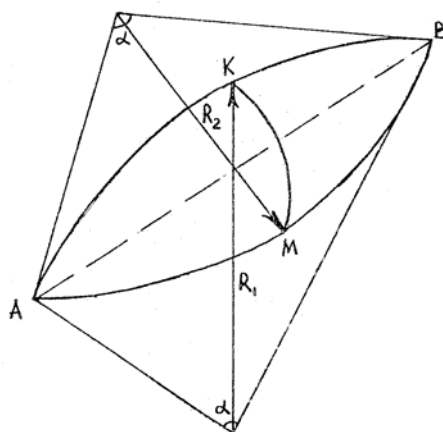


Рис.к табл.2.36

Таблица 2.37

Маркировочная схема и спецификация. Торцевая часть

Код опалубки	Марка элемента		Количество элементов на 1 торец		Эскиз элемента		Размеры элемента, м			Площадь элемента S, м ²		Общая площадь на 2 торца, м ²
							Эц	Эт				
	Эц	Эт	Эц	Эт	Эц	Эт	r	a	b	Эц	Эт	
ОВП-12	Эц	Эт-1		4			0,8	0,79	13,08	0,5	6,92	57,36
ОВП-18	Эц	Эт-2		6					19,62		10,34	
ОВП-24	Эц	Эт-3		8					26,16		13,92	
ОВП-36	Эц	Эт-4		12					39,24		20,56	

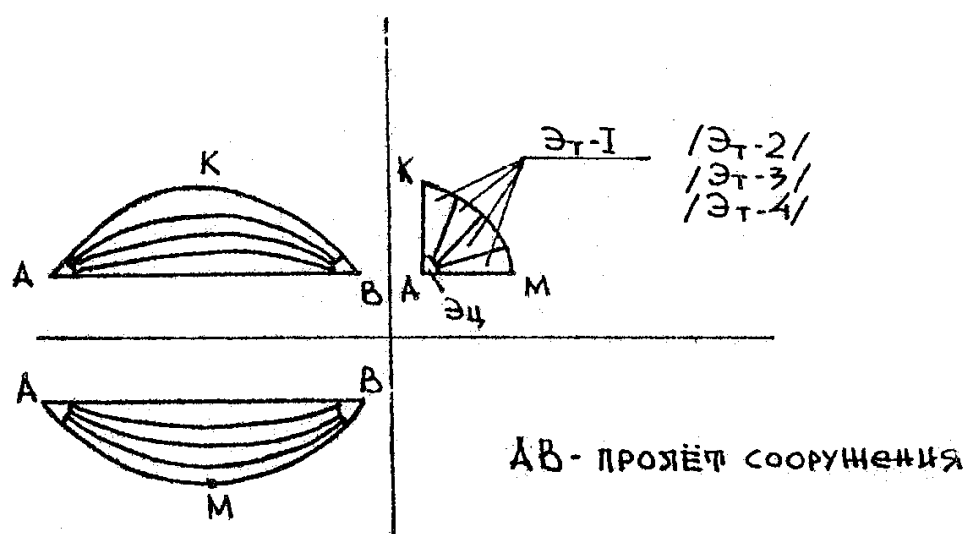


Рис. к табл. 2.37

Таблица 2.38

Элемент торцевой части Эт

Код опалубки	Марка элемента	Эскиз элемента	Размеры, м							
			a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	h	b
ОВП-12	Эт		0,27	0,47	0,61	0,68	0,65	0,79	1,09	13,08
ОВП-18			0,22	0,44	0,62	0,72	0,76	0,79	1,64	19,63
ОВП-24			0,27	0,47	0,61	0,22	0,76	0,79	2,18	26,16
ОВП-36			0,22	0,44	0,62	0,71	0,76	0,79	2,27	39,24

Таблица 2.39

Расход резиноканевых материалов на опалубку волнистого пологого покрытия

Код опалубки	$F_2, м^2$	$F_{ш}, м^2$	$F_{ф}, м^2$	$L_6, м$	K_m	$F_y, м$
Рабочая часть						
ОВП-12	352,4	86,72	682,64	288	0,64	2,37
ОВП-18	804,8	185,82	1311,16	648	0,74	2,02
ОВП-24	1421,6	262,85	2120,98	1152	0,79	1,83
ОВП-36	3219	535,21	4450,5	2592	0,84	1,72
Рабочая часть, торцы						
ОВП-12	409,76	91,96	729,73	288	0,69	2,53
ОВП-18	930,88	177,61	1417,16	648	0,78	2,19
ОВП-24	1646,32	283,78	2309,33	1152	0,84	2,00
ОВП-36	3712,44	582,3	4874,29	2592	0,88	1,88

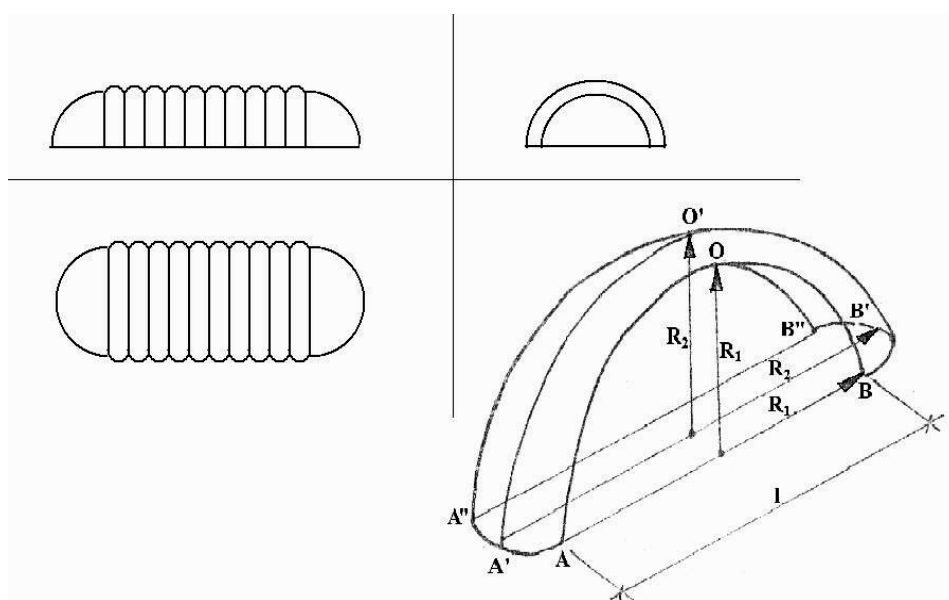


Рис. 2.24. Общий вид опалубки волнистого цилиндрического свода

Таблица 2.40

Геометрические характеристики опалубки волнистого
цилиндрического свода (рабочая часть)

Код опалубки	Пролет L , м	Длина сооружения L , м	Отметка низа волны, м	Отметка верха волны, м	Высота волны в коньке, м	Длина дуги AOB , м	Длина дуги $A'O'B'$, м	Ширина волны AA' , м	Длина дуги AKB , м
ОВЦ-12	12,0	24,0	6,0	6,75	0,75	18,84	21,20	3,0	3,48
ОВЦ-18	18,0	36,0	9,0	10,21	1,125	28,26	31,79	4,5	5,22
ОВЦ-24	24,0	48,0	12,0	13,5	1,5	37,68	42,39	6,0	6,96
ОВЦ-36	36,0	72,0	18,0	20,25	2,25	56,52	63,59	9,0	10,44

Таблица 2.41

Маркировочная схема и спецификация (рабочая область)

Код опалубки	Марка элемента	Длина сооружения L , м	Кол-во элементов	Эскиз элемента	Размеры элемента, м			Площадь элемента $S_э$, м ²	Площадь рабочей зоны S , м ²
					l	a	b		
ОВЦ-12	Эр-1	24	8		12	13,5	3,0	92,26	557,28
ОВЦ-18	Эр-2	36	8		18	20,25	4,5	189,11	1241,60
ОВЦ-24	Эр-3	48	8		24	27,0	6,0	322,24	2216,16
ОВЦ-36	Эр-4	72	8		36	40,5	9,0	691,82	4942,0

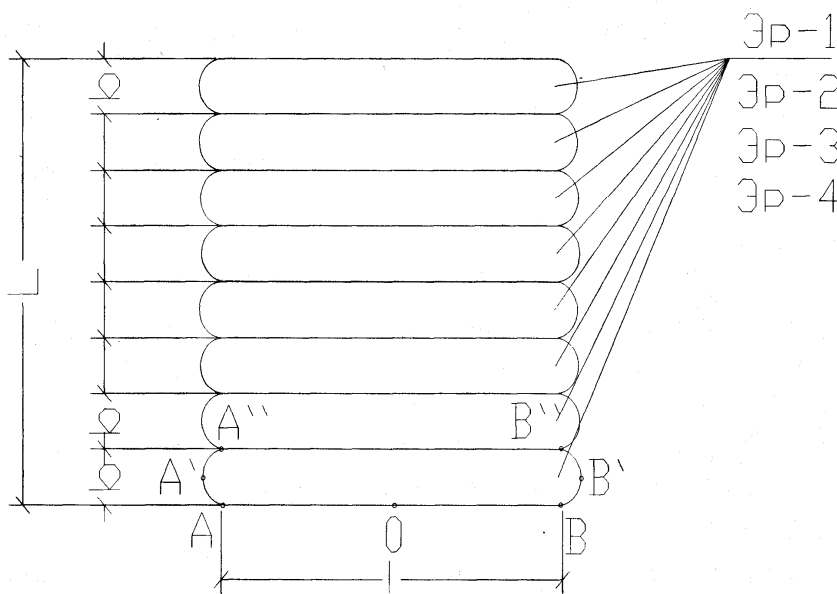


Рис. к табл. 2.41

На рис. 2.25...2.28 приводится детализация раскроя элементов волнистой цилиндрической пневмоопалубки.

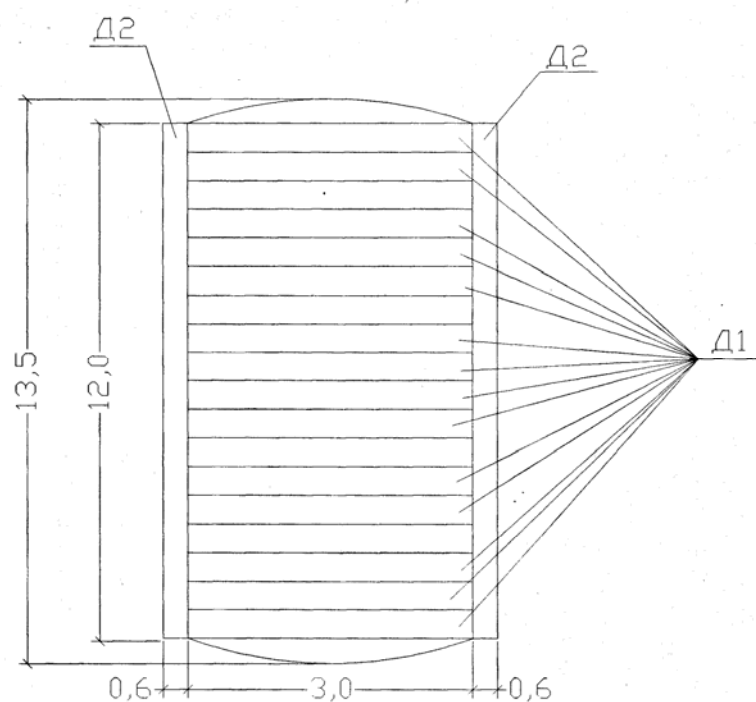


Рис. 2.25. ОВЦ-12. Элемент Эр-1. Детализация

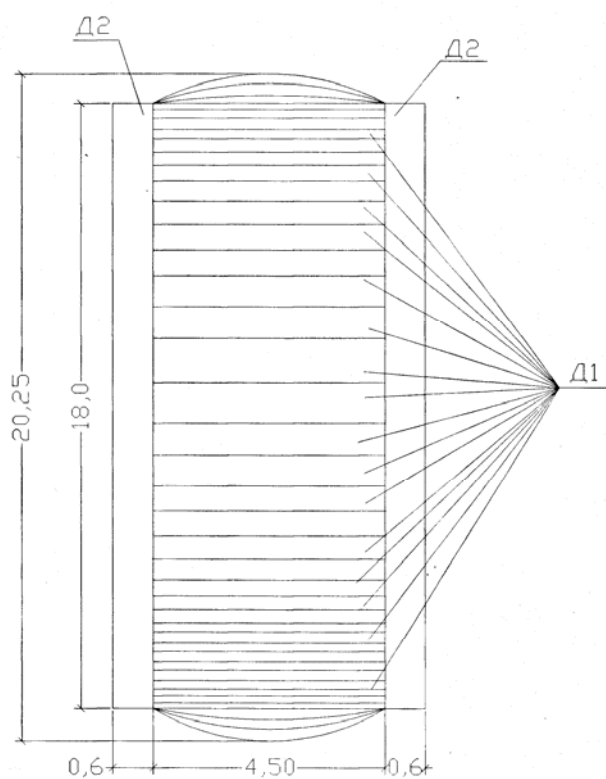


Рис. 2.26. ОВЦ-18. Элемент Эр-2. Детализация

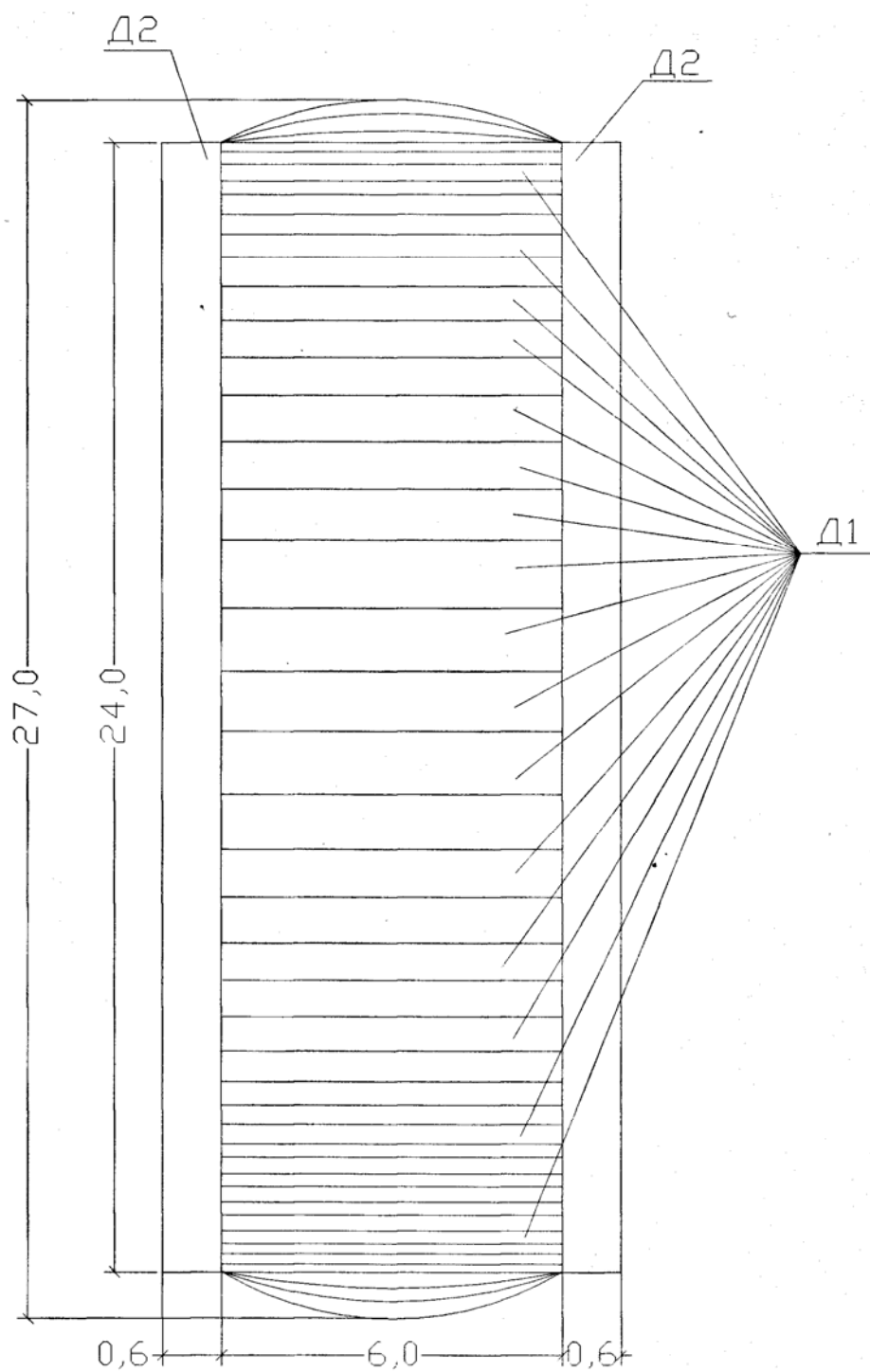


Рис. 2.27. ОВЦ-24. Элемент Эр-3. Детализовка

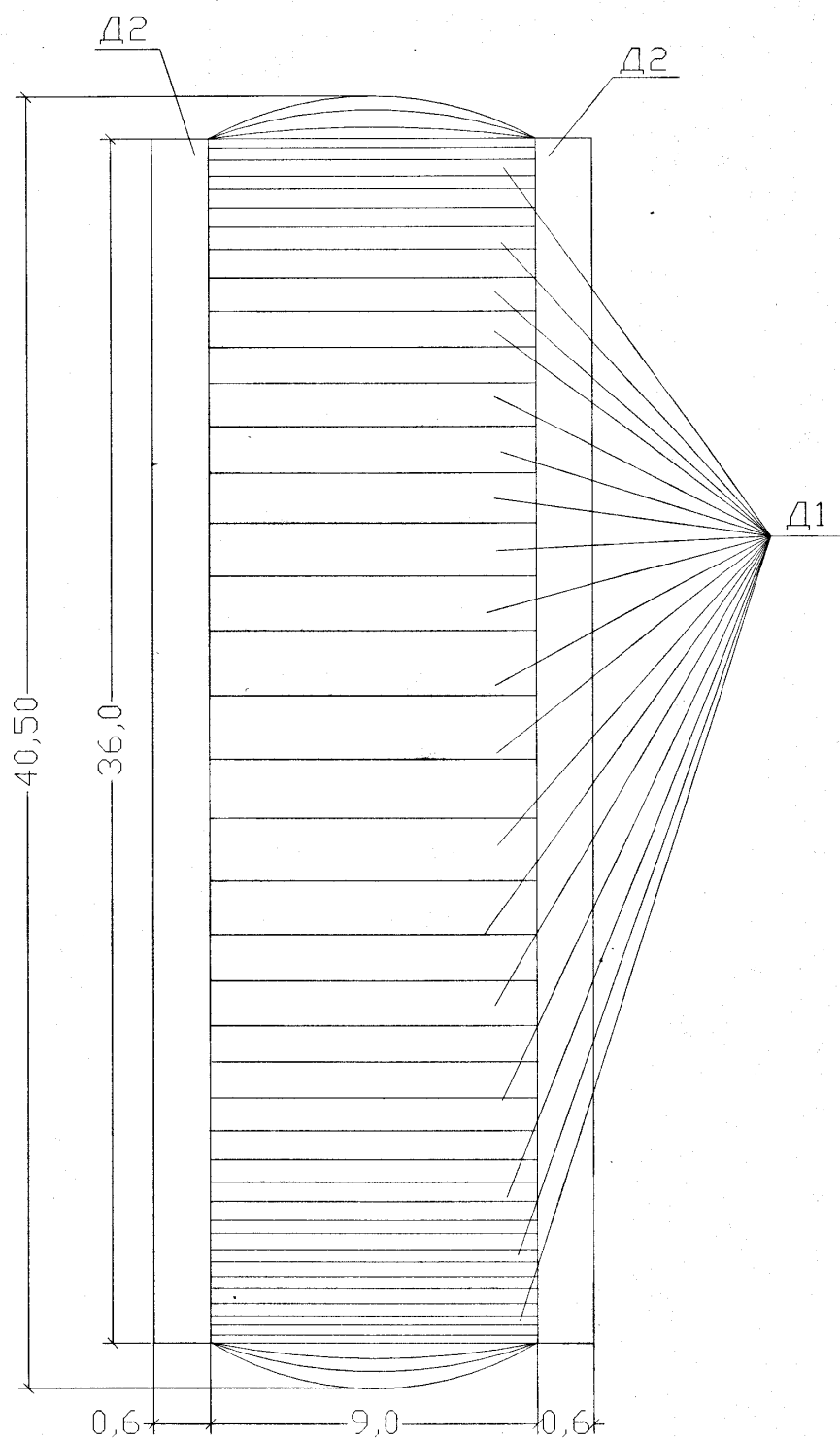


Рис. 2.28. ОВЦ-36. Элемент Эр-4. Детализовка

Таблица 2.42

Спецификация Эр. Деталировка

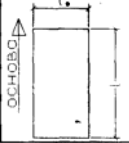
Код опалубки	Марка элемента	Эскиз элемента	Размеры, м							Количество деталей
			C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	1	
ОВЦ-12	Д-1		0,69	0,72	0,73	0,75	0,77	0,79	3,48	27
ОВЦ-18			0,7	0,72	0,74	0,76	0,77	0,75	5,22	40
ОВЦ-24			0,7	0,72	0,73	0,75	0,77	0,79	6,96	54
ОВЦ-36			0,71	0,72	0,74	0,76	0,78	0,79	10,44	80
ОВЦ-12	Д-2		0,6	-	-	-	-	-	18,84	
ОВЦ-18			0,6	-	-	-	-	-	28,26	
ОВЦ-24			0,6	-	-	-	-	-	37,68	
ОВЦ-36			0,6	-	-	-	-	-	56,62	

Таблица 2.43

Расход резиноканевых материалов на опалубку

Код опалубки	$F_{г}, м^2$	$F_{ш}, м^2$	$F_{ф}, м^2$	$L_{б}, м$	$K_{м}$	$F_{у}, м$
Рабочая часть						
ОВЦ-12	557,28	119,48	947,81	288,0	0,71	3,29
ОВЦ-18	1241,6	237,69	1910,30	648,0	0,77	2,94
ОВЦ-24	2216,16	394,87	3248,64	1152,0	0,80	2,82
ОВЦ-36	4992,0	809,46	6827,33	2592,0	0,85	2,63
На опалубку						
ОВЦ-12	784,63	172,15	1250,17	288,0	0,76	4,34
ОВЦ-18	1751,57	353,86	2569,76	648,0	0,82	3,96
ОВЦ-24	3119,67	578,05	4387,08	1152,0	0,84	3,80
ОВЦ-36	7027,0	1170,51	9309,26	2592,0	0,88	3,59

3. ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОПАЛУБОК

Возможность возведения сооружений на пневмоопалубках в нашей стране была обеспечена благодаря:

- решению теоретических вопросов, связанных с формой пневмоопалубок и возводимых с их помощью конструкций (работы А.С. Арзуманова, Б.И. Петракова, С.А. Алексеева, А.Г. Воробьева, В.В. Ермолова, Б.И. Друзя, В.Э. Магулы, Б.И. Сергеева и др.) [1, 10, 15, 22, 26];
- освоению производства недорогих легких прорезиненных тканей;
- разработке методов конструирования и технологии изготовления пневмоопалубок;
- развитию химии цементов и добавок к ним, что позволило получать бетонные смеси и бетоны с заданными свойствами;
- созданию индустриальной базы по изготовлению арматурных сеток, мобильных установок и другого оборудования.

3.1. Классификация пневмоопалубок и методов возведения монолитных конструкций с их помощью

Требуемую форму железобетонной конструкции, возводимой с помощью пневмоопалубки, придают замкнутые герметичные оболочки за счет избыточного давления нагнетаемого внутрь них воздуха. Различают **жесткие** и **мягкие** пневматические опалубки.

Для **жестких пневмоопалубок** используют армированные пластики и стальные листы, соединенные в виде замкнутых параллелограммов, труб и т.п. В них нагрузки от массы бетонной смеси воспринимаются избыточным давлением воздуха внутри замкнутой оболочки. Жесткость листового материала таких пневмоопалубок исключает появление вмятин от местного действия вибраторов при уплотнении бетонной смеси, а также остаточных вмятин от выгрузки бетонной смеси.

Пневмоопалубки из жестких материалов использовались для формирования на месте стен и перекрытий зданий в монолитном домостроении и для формирования отверстий в массивных железобетонных конструкциях. Широкого распространения в практике строительства пневмоопалубки из жестких материалов пока не получили.

Мягкие пневмоопалубки выполняют из мягких материалов, т.е. материалов с малой изгибной жесткостью, вследствие чего такие материалы в напряженном состоянии могут воспринимать только растягивающие усилия. Для обеспечения жесткости пневмоопалубок, достаточной для противодействия нагрузкам от массы бетонной смеси и арматуры, от выгрузки бетонной смеси и ее вибрирования, в мягкие пневмоопалубки нагнетают под давлением воздух.

Мягкие пневмоопалубки конструируют таким образом, чтобы в них под действием заданных нагрузок не образовывались складки и морщины. Форма мягкой пневмоопалубки и возведенной с ее помощью железобетонной оболочки зависит от нагрузок, создаваемых массой уложенных на нее конструктивных элементов, включая арматуру и бетонную смесь, от размеров пневмоопалубки, от упругих характеристик мягкого материала, от расстояния между линиями прикрепления пневмоопалубки к основанию и от формы этих линий. Иногда к мягкой пневмоопалубке для придания ей нужной формы прикладывают дополнительные нагрузки от временных грузов.

Мягкие пневмоопалубки выполняют из прочных армированных пленок или из тканей. Ткани для воздухонепроницаемости обрезают или покрывают пленочными покрытиями, после чего сшивают, склеивают или сваривают в воздухонепроницаемую замкнутую оболочку. Толщина воздухопроницаемой ткани изменяется от 1 до 3 мм, масса - от 1 до 3 кг/м².

Способы возведения железобетонных конструкций при помощи мягких пневмоопалубок можно классифицировать по следующим признакам:

- **по типу применяемой пневмоопалубки:**
 - возведение с использованием воздухоопорной опалубки;
 - возведение с использованием пневмокаркасной опалубки;
- **по степени заполнения пневмоопалубки воздухом в момент бетонирования:**
 - бетонирование по приведенной в проектное положение пневмоопалубки (*статический метод*);
 - бетонирование на уровне основания с последующим пневмоподъемом пневмоопалубки и формированием конструкции (*динамический метод*);
- **по характеру подъема формируемой конструкции в проектное положение при заполнении опалубки воздухом:**
 - подъем с вытягиванием бетонной смеси и арматуры;
 - подъем с изгибанием бетонной смеси без вытягивания арматуры;
- **по способу укладки бетонной смеси:**
 - пневмобетонирование и шприц-бетонирование;
 - торкретирование;
 - бетонирование при помощи бадей с использованием монтажных кранов;
 - бетонирование с использованием бетононасосов или ленточных бетоноукладчиков;
- **по виду возводимых при помощи пневмоопалубок конструкций:**
 - устройство куполов;
 - волнистых сводов;
 - вспарушенных плит;
 - цилиндрических сводов;
 - сводов двойной кривизны;
 - линейно-протяженных сооружений.

Пневматические опалубки являются инвентарными разборно-переставными опалубками. К их отличительным особенностям относятся выполнение палубы из легкого тонкого материала и замена поддерживающих лесов избыточным давлением воздуха внутри пневмоопалубки. Эти две особенности обеспечивают пневмоопалубкам следующие положительные свойства:

- масса комплекта мягкой пневмоопалубки в 15-20 раз меньше массы опалубки из дерева или металла;
- объем комплекта мягкой пневмоопалубки в 30-40 раз меньше объема опалубки из дерева;
- значительно меньшая продолжительность монтажа пневмоопалубки и ее надувания до проектного положения по сравнению с традиционными видами опалубок;
- трудозатраты на монтаж и демонтаж пневмоопалубки в несколько раз ниже трудозатрат на монтаж и демонтаж опалубок других видов;
- методы возведения конструкций при помощи пневмоопалубок позволяют получить сооружения более экономичные по расходу бетона, металла и стоимости по сравнению с методами их возведения на опалубках других видов.

К недостаткам мягких пневмоопалубок относят высокую стоимость комплекта пневмоопалубок, их недостаточную огнестойкость и сопротивление резанию. Тем не менее, отечественный и зарубежный опыт строительства сооружений при помощи пневмоопалубок показывает, что при соблюдении правил эксплуатации комплекты некоторых пневмоопалубок выдерживают 10-40- и даже 500-кратную оборачиваемость.

С помощью инвентарных пневмоопалубок могут возводиться следующие здания и сооружения:

- хранилища и укрытия для техники, в том числе сельскохозяйственной;
- полевые зернохранилища;
- склады, гаражи, мастерские;
- помещения для скота;
- ремонтные базы, оборудованные кран-балками и смотровыми ямами;
- спальные помещения для краткосрочного проживания людей (занятых на сельскохозяйственных работах, в пионерских лагерях и др.);
- производственные предприятия на промышленных базах строительных организаций (арматурные и столярные цеха, цеха заготовки линолеума и др.);
- вертикальные сооружения и хранилища (элеваторы, сенажные башни);
- линейно-протяжённые сооружения (трубопроводы, каналы, коллекторы, тоннели);
- путе- и трубопроводы через малые реки («малые» мосты).

Применение пневмооболочек в качестве опалубок в сочетании с комплексной механизацией укладки бетона позволяет в значительной степени индустриализировать возведение конструкций из монолитного железобетона. Практический опыт возведения конструкций с применением пневмоопалубок показал, что этот метод позволяет приблизить сроки возведения монолитных конструкций к сборным вариантам, значительно уменьшив при этом стоимость сооружения. Использование пневмоопалубок повышает качество бетонируемых поверхностей и оборачиваемость опалубочных форм, снижает затраты на последующую доводку конструкций, улучшает условия и сокращает сроки выдерживания бетона, позволяет возводить монолитные конструкции оптимальной геометрической формы.

В условиях рассредоточенного строительства наиболее эффективно применение поточного метода возведения монолитных сооружений комплексными передвижными механизированными бригадами с использованием пневмоопалубки, имеющей малый вес, транспортабельность и минимальные сроки распалубки.

3.2. Возведение монолитных сводчатых конструкций на пневмоопалубке воздухоопорного типа

Тонкостенные волнистые своды из железобетона, армо-, стеклоцемента и других материалов представляют интерес как один из перспективных типов пространственных конструкций массового применения. Покрытия подобного типа с успехом могут быть использованы при строительстве складских и производственных помещений, хранилищ, стоянок сельхозтехники и т.п.

По экспертной оценке специалистов из всех видов пространственных конструкций волнистые больше других удовлетворяют требованиям индустриализации строительства, так как позволяют возводить сооружения различного назначения.

Разработаны конструкции волнистых сводов из армоцемента пролетом 12-24 м, монтируемые из сборных элементов машинного изготовления, и сборные волнистые своды-оболочки из обычного бетона и стеклоцемента.

Одним из существенных недостатков технологии возведения сводов из сборных тонкостенных элементов является их плохая транспортабельность. В условиях сельского строительства транспортирование тонкостенных элементов, обладающих малой жесткостью, с помощью существующих транспортных средств весьма затруднено. Создание же специализированного транспорта связано со значительными затратами на его оборудование.

Вместе с тем технология монтажа некоторых конструкций сборных волнистых сводов предусматривает применение металлоемких одноволновых кондукторов, эксплуатация которых связана с увеличением продолжительности и трудоемкости возведения.

Статический способ возведения волнистых сводов на пневмоопалубке позволяет получать конструкции минимальной приведенной толщины и высокого качества поверхностей. Объектами первоочередного внедрения

этих конструкций и предложений технологии их возведения мы считаем сельскохозяйственные сооружения складского и производственного назначения. В условиях рассредоточенного сельского строительства особо эффективны компактность, мобильность и транспортабельность приспособлений, получаемых этим методом возведения.

Результаты исследований пневмоопалубки волнистых сводов, выполненные на моделях в Воронежском государственном архитектурно - строительном университете, были проверены в натурных условиях при возведении ряда складских сооружений. В качестве несущей конструкции покрытия и ограждения склада использовались **волнистые армированные своды**, возводимые с использованием пневмоопалубки. При проведении опытно-экспериментальных работ в натурных условиях использовался и другой дисперсно-армированный конструктивный материал – **стеклофибробетон** [1, 3, 4, 8, 17, 28].

Пневмоопалубка для возведения волнистых сводов представляет собой воздухоопорную конструкцию, повторяющую по очертанию бетонируемое сооружение. Формообразование пневмооболочки достигается раскроем из стандартных рулонов ткани шириной 800-900 мм и наличием несущих вантов. Для изготовления пневмоопалубок применяются резинотканевые материалы, серийно выпускаемые промышленностью. Учитывая схему раскроя отдельной волны пневмооболочки, необходимо широтное направление конструкции совместить с продольным направлением рулона ткани. Такой принцип раскроя удовлетворяет характеру распределения погонных усилий в конструкции пневмооболочки. Широтные усилия в ткани совпадают с направлением основы, а меридиональные усилия – с направлением утка (см. подраздел 2.4).

Форма оболочки основного элемента пневматической опалубки выбирается с учетом конструкции и технологического использования будущего сооружения. Одновременно учитываются простота, удобство раскроя и его целесообразность, которую характеризуют полнотой использования площади и минимальной протяженностью соединительных швов. Как правило, оба эти показателя не противоречат друг другу.

На рис. 3.1 представлен общий вид пневмоопалубки волнистого свода АПВ-12 со следующими техническими характеристиками.

Габариты, м	12×36×6
Масса, кг	450
Ширина поперечной волны, м	3
Стрела подъема волны, м	0,75
Внутреннее давление, кПа	1,10...1,50
Размер "пятна" бетонирования, м	12×24
Расчетная оборачиваемость, раз	20

Фундамент свода был решен в виде буронабивных свай с монолитным ростверком, криволинейным в плане, в котором предусмотрены закладные детали для крепления пневмоопалубки. Бетонирование фундамента производилось в разборно-переставной мелкощитовой опалубке. Устройство фундамента при соответствующей производственной базе возможно и в сборном варианте.

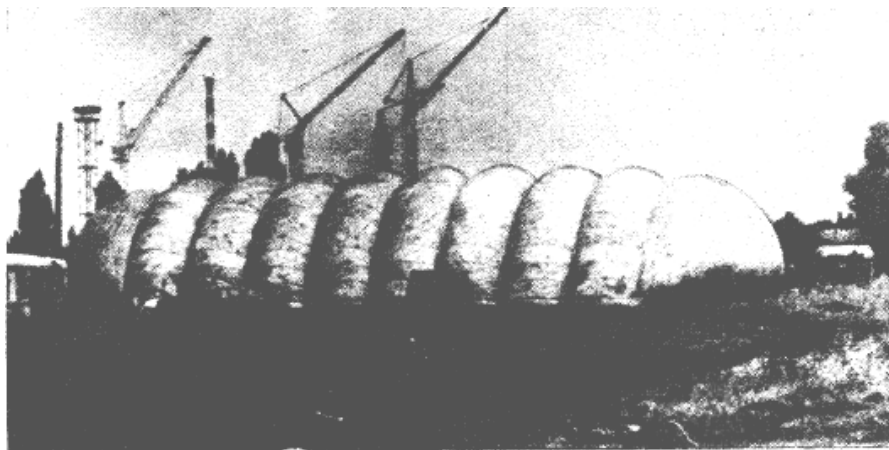


Рис. 3.1. Общий вид пневмоопалубки волнистого свода АПВ-12

Работы по возведению волнистого свода с применением пневмоопалубки выполняются в следующей последовательности.

Пневмоопалубка доставляется на строительную площадку в упакованном виде (рис. 3.2).

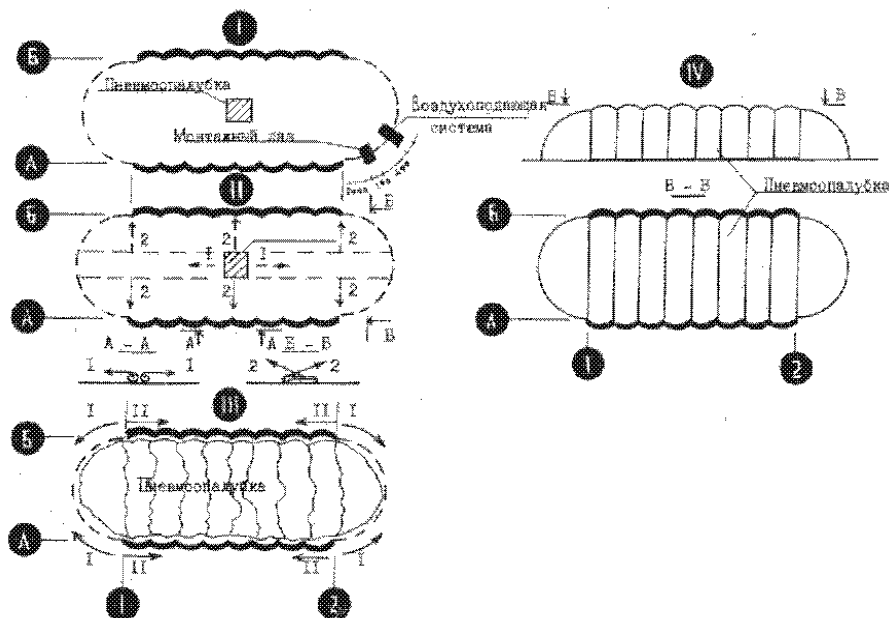


Рис. 3.2. Схема установки пневмоопалубки в проектное положение:

*I – установка пневмоопалубки на подготовленное основание; II – разворачивание пневмоопалубки;
III – крепление пневмоопалубки по периметру фундамента; IV – приведение пневмоопалубки в проектное положение*

На месте производства работ она разворачивается и крепится по периметру фундамента с помощью инвентарных приспособлений таким образом, чтобы обеспечить плотное примыкание опорного контура пневмооболочки к внутренней поверхности ростверка. Торцевая часть опалубки крепится к инвентарным анкерным фундаментам. После монтажа агрегатов системы воздухоподачи, контрольно-измерительных и регулирующих приборов пневмоопалубка приводится в проектное положение комплексом серийно выпускаемых промышленностью воздуходувок. В проектном положении производится осмотр пневмоопалубки: проверка правильности крепления к фундаменту и герметичности швов; геодезический контроль соответствия разбивочным осям; проверка соответствия геометрической формы пневмоопалубки проектной форме бетонируемой конструкции.

Монтаж арматуры (рис. 3.3) свода производится с предварительной укрупнительной сборкой пакета из тканой сетки непосредственно на опалубке на уровне земли. Для этого после освидетельствования пневмоопалубки в проектном положении агрегаты воздухоподачи отключаются, и опалубка в процессе сброса внутреннего давления «сваливается» на одну из сторон.

Пакет арматуры сеток собирается из стандартных рулонов тканой сетки. Рулоны соединяются вязальной проволокой внахлест с обеспечением перекрытия смежных швов в пределах всего "пятна" бетонирования. После соединения по одной из сторон сетки с выпусками фундаментальных арматурных каркасов весь пакет поднимается в проектное положение путем подачи воздуха в пневмооболочку опалубки. На проектной отметке производится "обжатие" пакета арматурных сеток специальной системой тросов и придание ему пневмоопалубочной формы.

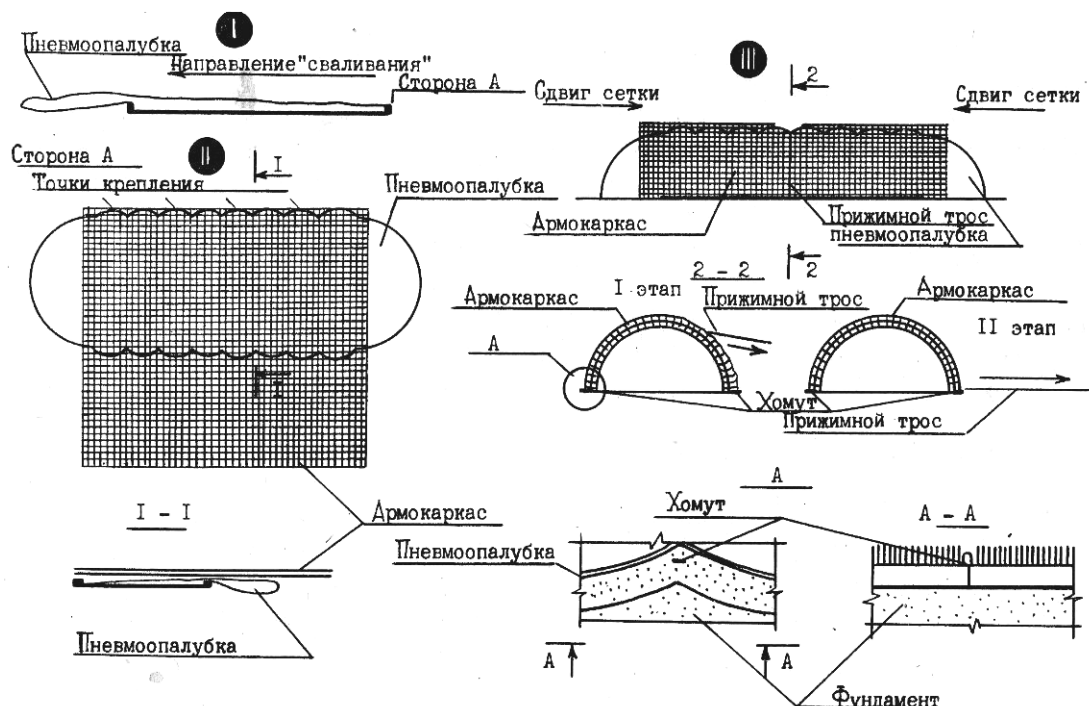


Рис. 3.3. Схема монтажа сетчатой арматуры

После контрольного освидетельствования правильности установки арматурных сеток и маяков, фиксирующих толщину конструкции, выполняются работы по укладке бетона способом мокрого торкретирования. Бетонирование можно вести с использованием установки "Пневмобетон". В этом случае песчано-бетонная смесь приготавливается на месте в растворомешалке, которой оборудована установка, и транспортируется к месту набрызга прямоточным насосом конструкции инженера Н.С. Марчукова по гибким шлангам. Этот способ нанесения песчано-бетонной смеси не исключает использование товарного бетона. Подбор состава бетонной смеси и правила эксплуатации установки "Пневмобетон" выполняются в соответствии с рекомендациями ЦНИИОМТП Госстроя СССР.

Укладка бетона ведется с автогидроподъемника типа АГП-22 (рис. 3.4) послойно в определенной последовательности с обеспечением достаточной плотности бетона во всех частях возводимого свода. В этих целях бетонирование рекомендуется вести от опор к коньку свода, соблюдая направление факела смеси по нормали к бетонируемой поверхности при оптимальном для данного состава смеси расстоянии соплования ($\sim 1 \dots 1,2$ м).

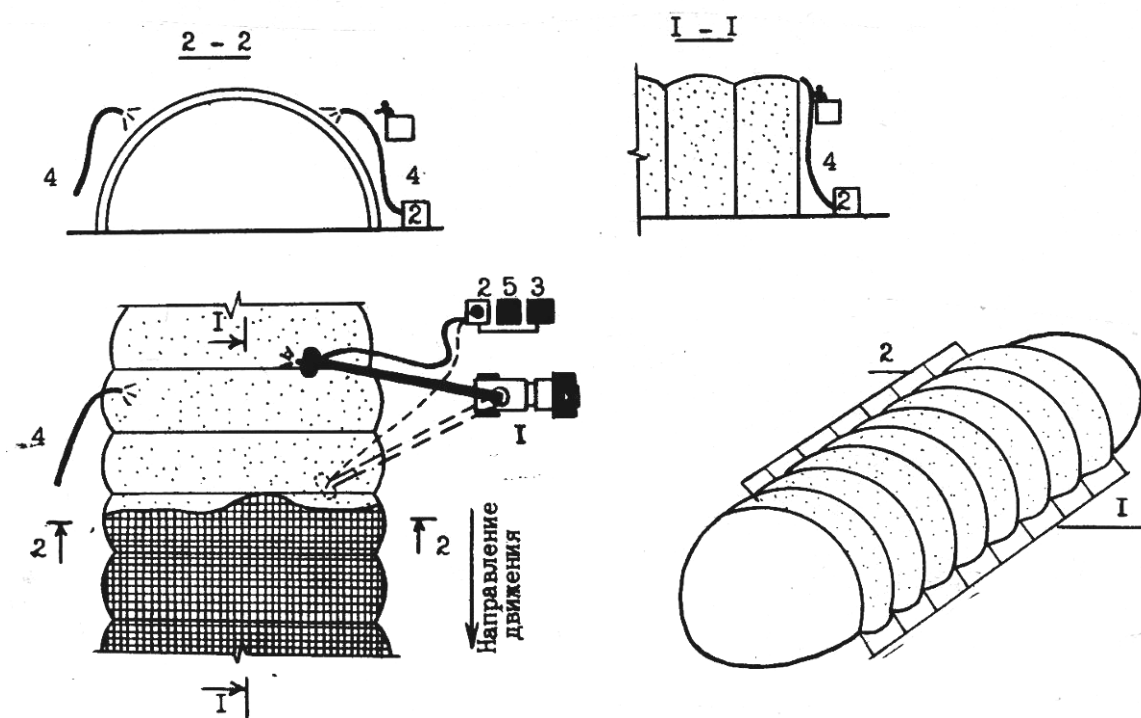


Рис. 3.4. Технологическая схема бетонирования армоцементного волнистого свода: 1 - автогидроподъемник; 2 - установка "Пневмобетон"; 3 - компрессор; 4 - шланги; 5 - растворомешалка

Производство бетонных работ, уход за бетоном и контроль его качества производятся согласно действующим нормативным документам.

По достижении бетоном конструкции проектной прочности производится распалубливание свода отключением воздухоподающих агрегатов (см. рис. 1.18).

При распалубливании пневмооболочка свободно отделяется от забетонированной конструкции за счет действия собственного веса. После распалубливания на внутреннюю поверхность свода наносится отделочный слой песчано-цементной смеси толщиной 5 мм. Приведенная толщина волнистого свода составляет около 40 мм.

Пневмоопалубка и крепежные элементы демонтируются, производится внешний осмотр, просушка, очистка поверхности, сворачивание и укладывание в тару. Таким образом, пневмоопалубка готова для повторного использования.

По окончании бетонирования свода выполняются торцевые ограждения складского сооружения (рис. 3.5) из кирпича или, что более предпочтительно, из торкретбетона по металлической сетке.



Рис. 3.5. Устройство торцевых ограждений

Описанная выше технология производства работ по возведению самонесущих волнистых сводов из армоцемента на пневматической опалубке позволяет оптимизировать основные технико-экономические показатели, характеризующие трудовые, материальные и стоимостные затраты, по сравнению с показателями по сооружению аналогичного назначения (склады, хранилища), выполненными из армоцементных элементов машинного изготовления или плоскостных железобетонных конструкций (табл. 3.1).

В качестве конструктивного материала волнистых сводов, возводимых с использованием пневмоопалубки, применяется также стеклофибробетон, представляющий собой композит из рубленой фибры стекловолокна и цементного теста. Опытные экспериментальные работы по возведению свода из стеклофибробетона были выполнены на полигоне Воронежского государственного архитектурно-строительного университета.

Необходимость получения композиционного материала и непрерывного его нанесения на пневмоопалубку потребовала решения ряда вопросов по технологическому оборудованию, приготовлению и нанесению стеклофибробетона. В основу этих работ была положена технология, разработанная в ЦНИИОМТП Госстроя СССР [13].

Таблица 3.1

Основные технико-экономические показатели

Показатели	Армоцементный свод на пневмоопалубке	Армоцементный свод из элементов машинного изготовления	Сооружение из плоскостных конструкций
Трудоемкость возведения, чел. —ч	1,55	3,63	3,62
Приведенная толщина бетона, см	4,00	9,86	13,82
Расход стали, кг	10,69	14,86	19,71
Выработка, чел. —ч	5-86	4-15	4-81

Технологическая схема приготовления и нанесения стеклоцементной смеси (рис. 3.6) основывалась на применении пистолета-напылителя конструкции ЦНИИОМТП.

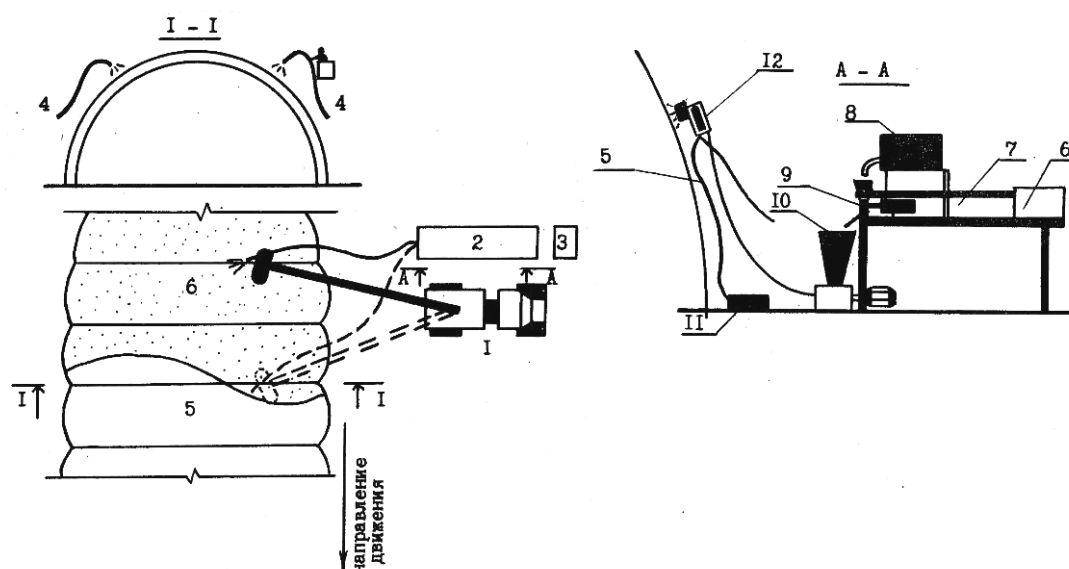


Рис. 3.6. Технологическая схема приготовления и нанесения стеклоцементной смеси: 1 – автогидроподъемник; 2 – механизмы для нанесения стеклоцементной смеси; 3 – компрессорная станция; 4 – материальные шланги; 5 – пневматическая опалубка; 6 – приемный бункер; 7 – шнековый дозатор; 8 – дозатор воды; 9 – струйный диспергатор; 10 – приемный бункер; 11 – преобразователь напряжения; 12 – пистолет-напылитель

Большое значение для получения качественной стеклоцементной смеси имеют непрерывность процесса приготовления и нанесения смеси, дозировка цемента и воды, надежная работа пистолета-напылителя.

Проведение опытно-экспериментальных работ по бетонированию свода обеспечивалось комплектом оборудования и материалов (табл. 3.2).

Системы воздухоподачи и технологического оборудования имели автономное электропитание, а также автономные блоки защитной автоматики.

Основной задачей проведения опытно-экспериментальных работ было обоснование технической возможности возведения монолитных волнистых сводов с применением новой конструкции пневмоопалубки и нового конструкционного материала свода - стеклофибробетона (стеклоцемента). Кроме того, в ходе работ исследовалась геометрическая неизменяемость пневмоопалубки в процессе бетонирования, соответствие свода проектным размерам, оценка напряженно-деформированного состояния пневмооболочки.

Стабильность геометрической формы пневмоопалубки как одно из основных условий, обеспечивающих качество возведенного свода, контролировалась на протяжении всего процесса бетонирования конструкции. Контроль производился методами инженерной геодезии по маркам, закрепленным в характерных точках по сечению оболочки. Измерения проводились в двух сечениях - по коньку рядовой волны и по линии соединения двух смежных волн - и показали, что геометрия оболочки на различных ступенях внутреннего давления близка к расчетной.

Инструментальная проверка качества и соответствия проектным размерам возведенного свода, общий вид которого показан на рис. 3.7, позволяет считать, что предложенная конструкция волнистой пневмооболочки и разработанная технология возведения отвечают требованиям бетонирования тонкостенных оболочек.

Таблица 3.2

Комплект оборудования и материалов для опытного бетонирования волнистого свода на пневмоопалубке

Оборудование, материалы	Кол-во
Гидравлический подъемник ВС-18	1
Компрессор типа ДК-9	1
Турбулентный смеситель СБ-43	2
Насос винтовой для суспензии	1
Нагнетательный пневмобачок (2х35 т) СО-21А	1
Пистолет-напылитель конструкции ЦНИИОМТП	2
Преобразователь напряжения	1
Емкость для воды, дм ³	1000
Шланги дюритовые диаметром 16 мм, м	100
Цемент гипсоглиноземистый, т	8
Стекловолокно, кг	200



Рис. 3.7. Общий вид фрагмента волнистого свода из стеклофибробетона

Таким образом, исследования конструкции пневмоопалубки волнистого свода и его опытно-экспериментальное бетонирование показали техническую возможность и экономическую эффективность предложенного метода производства работ.

Разработана конструкция и изготовлена пневмоопалубка волнистого свода размером $12 \times 24 \times 6$ м, а также исследованы ее основные эксплуатационные параметры: геометрическая неизменяемость; деформативность и стабильность внутреннего давления. Отклонения указанных параметров в объеме проведенных экспериментальных работ находились в пределах расчетных величин. Был также изготовлен волнистый свод из стеклоцемента размером $12 \times 6 \times 6$ м. Приведенная толщина свода составила 20 мм. Внутренняя поверхность свода была без видимых раковин и трещин и практически не требовала дальнейшей отделки. Распалубка свода осуществлялась под действием собственного веса пневмоопалубки.

3.3. Организационно-технологические решения комплексного процесса возведения сводчатых монолитных конструкций на пневмоопалубке воздухоопорного типа

На основе обобщения результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проведенных в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете под руководством проф. А.С. Арзуманова, были разработаны технология возведения монолитных сооружений с использованием пневмоопалубки и рекомендации по ее применению [13, 16].

Комплексный технологический процесс возведения монолитных сооружений с применением пневмоопалубки, включающий подготовительные и основные процессы, схематично представлен на рис. 3.8.

Подготовительные работы включают:

- выполнение работ нулевого цикла и устройство бетонного пола;
- монтаж всех механизмов и агрегатов, устанавливаемых внутри пневмоопалубки;
- монтаж воздухоподающей системы и монтажного лаза (возможен параллельно с работами по монтажу пневмоопалубки);
- установку приборов и приспособлений для измерения и регулирования внутреннего давления в пневмоопалубке;
- подготовку приборов и оборудования, необходимых для операционного контроля качества технологических процессов.

Монтаж пневмоопалубки производится по схеме, представленной на рис. 3.2, используемой в соответствии с проектно-технологическими разработками.

Крепление пневмоопалубки выполняется в следующем порядке:

- к анкерным болтам фундамента крепят швеллеры;
- после установки швеллеров по всему периметру фундамента в зазор между полкой швеллера и фундаментом (полосой по сферическим торцам) закладывают трос нижнего пояса, предусмотренный при изготовлении последней, после чего гайки крепления затягивают;
- для создания необходимого избыточного давления внутри пневмоопалубки и для предотвращения его потерь в процессе эксплуатации опалубочной формы по всему периметру опалубки предусматривают фартук, прикрепленный непосредственно к тросу нижнего пояса;
- после окончательного закрепления опалубки к фундаменту фартук изнутри по периметру присыпают песком;
- устанавливают пневмоопалубку в проектное положение путем создания внутри нее расчетного давления;
- производят геодезический контроль соответствия установки пневмоопалубки разбивочным осям. (Допуски при установке опалубки принимают в соответствии с требованиями СНиП 3.03.01-87 [47]. Прогиб элементов опалубки, в том числе палубы, не должен превышать $l_l/400$ для открытых поверхностей и $l_l/200$ для скрытых поверхностей, где l_l — свободный пролет, м.);
- производят проверку герметичности клеепрошивных швов и мест примыкания пневмоопалубки к фундаменту;

После выполнения опалубочных работ приступают к армированию свода в следующей последовательности (см. рис. 3.3, этап I):

- отключают воздухоподающие установки. По мере падения давления сваливают пневмоопалубку на одну сторону;
- связывают арматурную сетку из отдельных рулонов в два слоя внахлест с разбежкой швов (см. рис. 3.3, этап II);

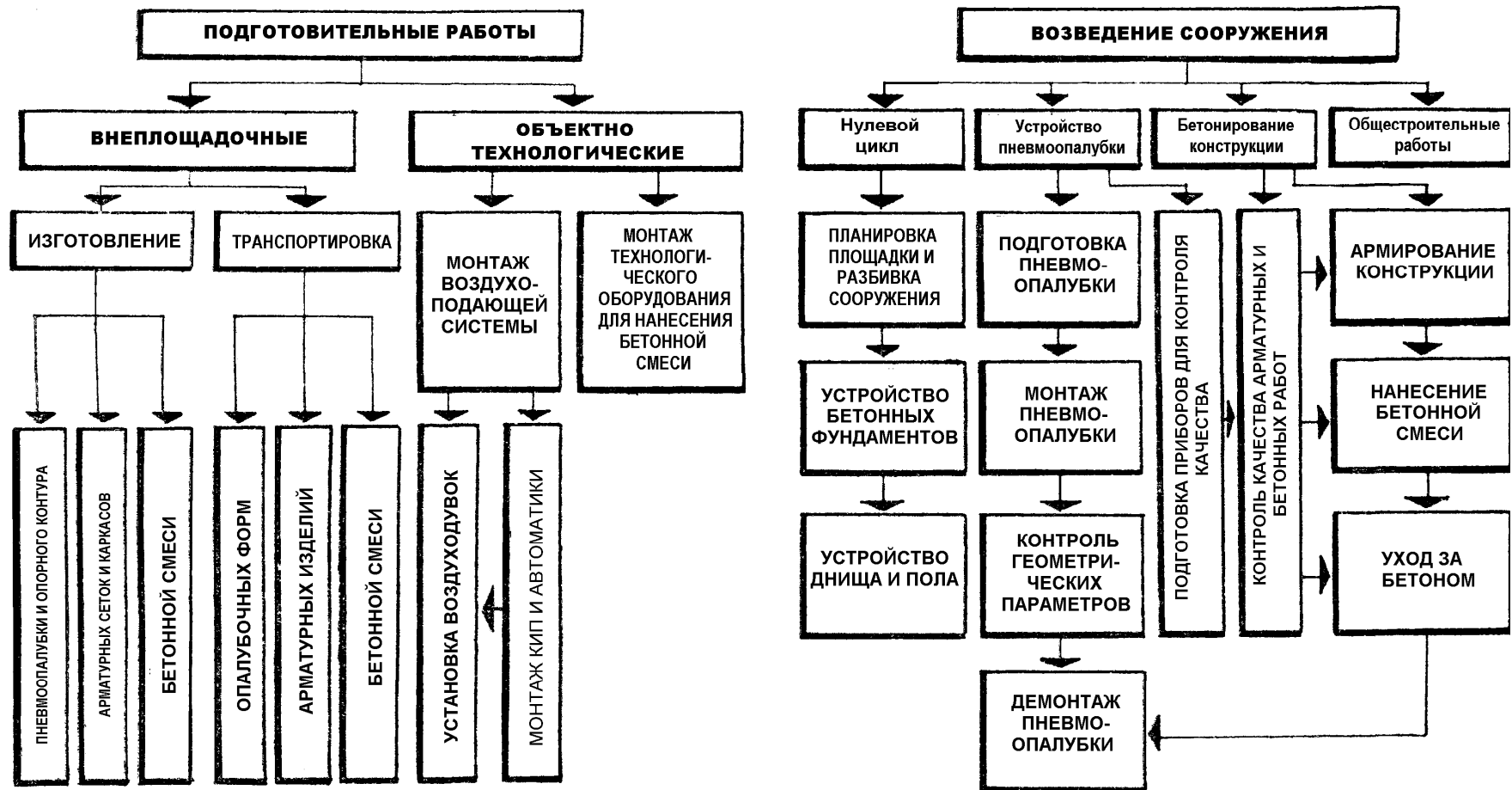


Рис. 3.8. Структура комплексного технологического процесса возведения сооружений на пневмоопалубке

- крепят обжимные тросы на монтажных выпусках арматуры фундамента, свободного конца пневмоопалубки;
- фиксируют сетку в точках крепления для предотвращения ее сдвига;
- поднимают арматурную сетку путем создания в пневмоопалубке расчетного давления (см. рис. 3.3, этап III);
- освобождают арматурный каркас от связей в точках крепления ;
- устанавливают арматурную сетку в проектное положение путем обжатия ребер обжимными тросами, начиная с центрального ребра;
- устанавливают маяки М-1 для фиксации толщины бетонирувания (см. рис. 3.9);
- связывают арматурную сетку с выпусками арматуры фундамента.

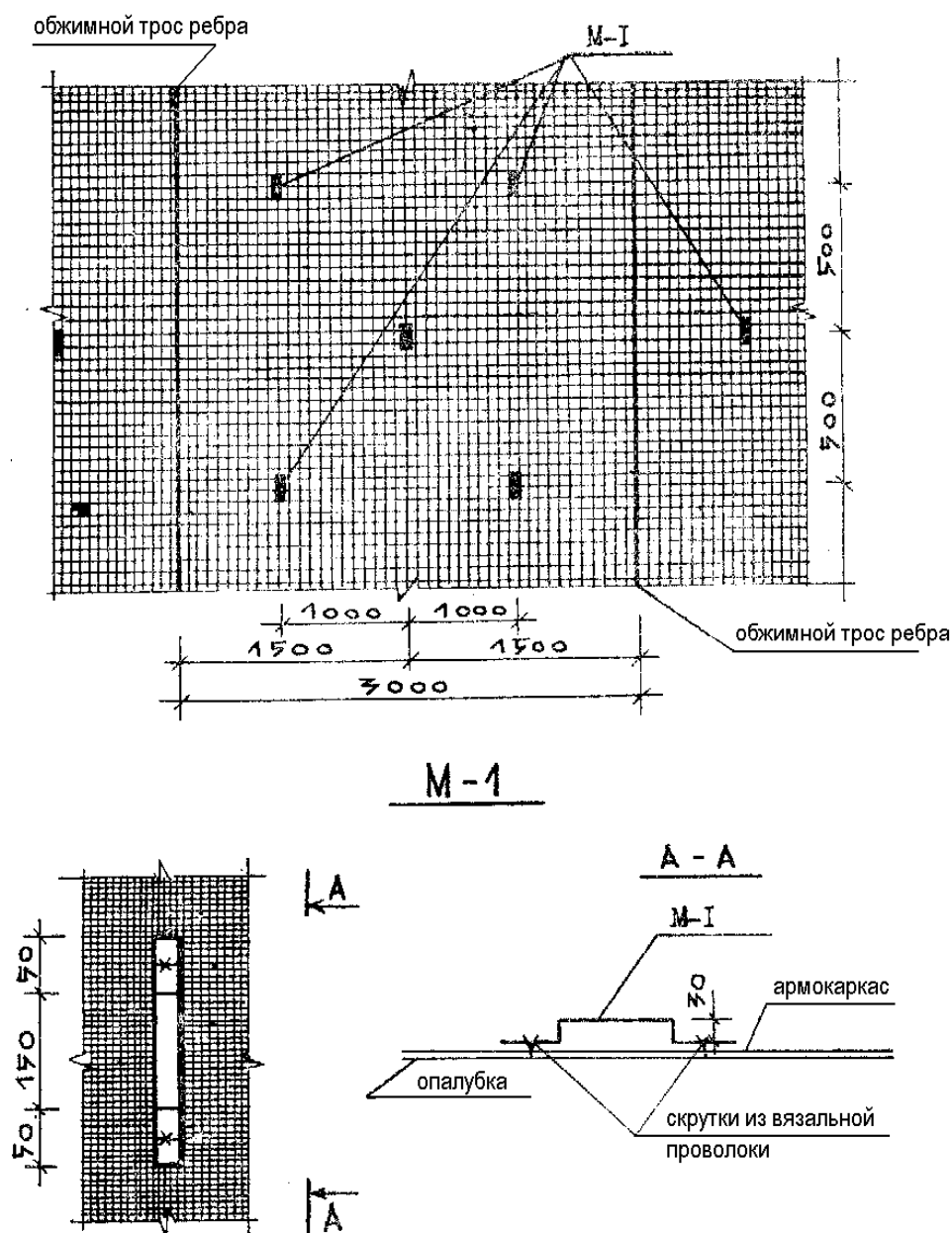


Рис. 3.9. Схема установки маяков

После выполнения перечисленных работ приступают к бетонированию армоцементного свода.

Бетонирование армоцементного волнистого свода производят способом мокрого торкретирования установкой «Пневмобетон» согласно СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», обеспечивая при этом одновременно симметрическую укладку смеси с 2-х сторон от «пят» к «замку» и первоначальную проработку ребер свода (см.рис. 3.4).

Укладку бетона ведут с применением автогидроподъемников типа АГП-22 или ВС-22.

Подбор мелкозернистой песчаной смеси производят согласно методическим рекомендациям ЦНИИОМТП Госстроя СССР [13].

Контроль качества уложенной бетонной смеси производят в соответствии со СНиП 52-01-2003 [51] путем изготовления стандартных образцов в процессе возведения сооружения и определения прочности в лабораторных условиях.

Распалубливание конструкции производят путем отключения воздухоподающих установок.

Перед демонтажем пневмоопалубки следует убедиться в соответствии выполненных работ проекту. Производят визуальный осмотр качества конструкции с учетом результатов лабораторных испытаний контрольных образцов.

Опалубку демонтируют, производят просушку, очистку поверхности, визуальный осмотр, необходимый текущий ремонт, сворачивают и укладывают в тару.

При необходимости наносят набрызгом на внутреннюю сторону готового армоцементного свода защитный (он же отделочный) слой песчаного бетона толщиной не менее 5 мм.

Волнистый свод из стеклофибробетона изготавливают способом совместной укладки цементного клея и рулонного стекловолокна.

Прочностные и технологические характеристики стеклофибробетона должны удовлетворять нормативным требованиям.

Нанесение стеклоцементной смеси на пневмоопалубку осуществляют при помощи пистолета совместного напыления композиционного материала конструкции инженера Девяткова Е.А. по технологии и комплекту оборудования, разработанному в ЦНИИОМТП Госстроя СССР.

Технологическую последовательность возведения волнистого свода из стеклофибробетона и расстановку оборудования осуществляют по схеме, приведенной на рис. 3.4.

После распалубки необходимо произвести освидетельствование и инструментальный контроль стеклофибробетонного свода путем установки гипсовых маяков, наблюдения за усадочными деформациями материала и общих статических испытаний конструкции.

3.4. Возведение линейно-протяжённых сооружений в блочно-передвижной пневмоопалубке

Необходимость индустриализации возведения монолитных линейных сооружений (коллекторов, каналов, тоннелей и т.п.) большого диаметра требует принципиального пересмотра техники и технологии производства опалубочных работ, стоимость и трудоемкость которых составляют значительную часть затрат на бетонирование подобных сооружений.

Так, в общем объеме затрат на возведение протяженных монолитных сооружений до 30-35 % стоимостных и 70 % трудовых затрат приходится на изготовление и эксплуатацию опалубочных форм. Опыт проектирования и внедрения ряда разработок показывает, что необходимо совершенствование опалубочных конструкций, направленное на индустриализацию возведения монолитных линейных сооружений.

Принципиально новые возможности появляются при возведении линейных сооружений с использованием в качестве опалубки пневмонапряженных конструкций из мягких материалов. Применение пневмоопалубки позволяет возводить монолитные сооружения, максимально приближенные по геометрической форме к расчетной, улучшать качество уложенного бетона конструкции, который не требует последующей обработки. При этом оборачиваемость опалубок значительно увеличивается.

В течение ряда лет в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете под руководством проф. А.С. Арзуманова проводились опытно-экспериментальные работы и натурные испытания блочно-передвижной пневмоопалубки для возведения безнапорных коллекторов большого диаметра, которые [1, 27, 40] показали, что применение пневмонапряженных опалубок из мягких материалов для линейных сооружений позволяет сократить сроки строительства на 33 % и повысить производительность труда до 45 %.

Блочно-передвижная пневмоопалубка коллектора (рис. 3.10) состоит из пневмонапряженного резино-тканевого баллона 1, закрепленного на щитах опорного контура 2, который собран из сетчатых щитов, соединенных между собой шарнирами 3 и ленточными пружинами 4, размещенными на поперечных балках 5. Один конец пружин закреплен наглухо, а другой - с возможностью перемещения в пазу 6.

Для установки опалубки в проектное положение в пневматический баллон подают воздух до расчетного давления, под действием которого баллон 1 принимает рабочее положение, а сетчатые щиты 2, сжимая ленточные пружины 4, поворачиваются вокруг шарнира 3 до упора, при этом днище опалубки принимает проектный размер (**B**). В таком состоянии на опалубку укладывается бетон, который выдерживается необходимое время.

Распалубка готовой конструкции производится уменьшением давления воздуха в несущем баллоне 1, ленточные пружины разжимаются и поворачивают щиты опорного контура 2 относительно шарнира 3. Таким образом, га-

баритные размеры днища опалубки уменьшаются, образуя технологический зазор между готовой конструкцией и палубой, то есть происходит распалубливание. Опалубка целиком передвигается на новое место, и процесс повторяется.

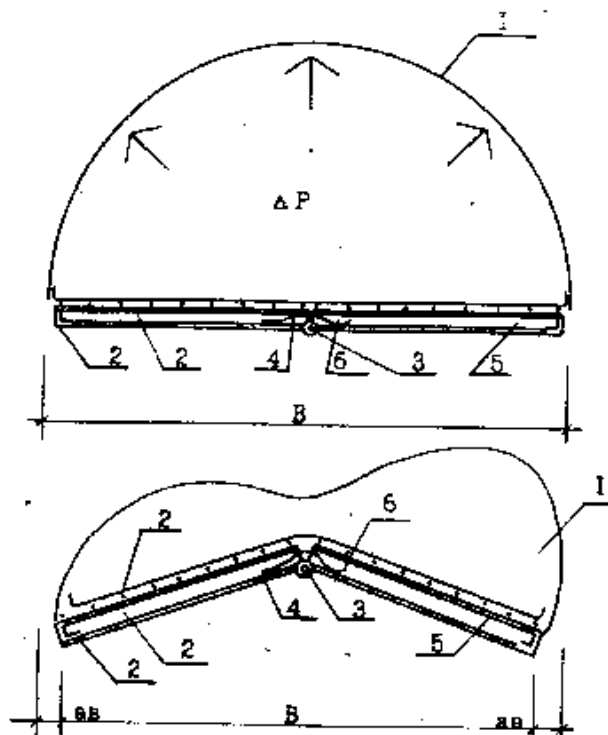


Рис. 3.10. Схема пневмоопалубки для возведения коллекторов

Результаты опытно-конструкторских работ по созданию предложенного технического решения были проверены в натурных условиях при возведении одного из участков монолитного коллектора для отвода ливневых и паводковых вод площадки промышленной базы Оскольского электрометаллургического комбината.

Конструкция опытного образца пневмоопалубки для бетонирования представляла собой пневмооболочку цилиндрической формы со сферическими торцами, закрепленную на передвижной деревометаллической раме (рис. 3.11).

Общая длина опалубочной формы составляла 12 м при длине рабочей зоны 8 м. Некоторые технические показатели пневмоопалубки опытного участка коллектора приведены в табл. 3.3.

Пневмооболочка изготовлена из отечественной прорезиненной ткани № 1186 на основе капронового текстиля артикула 56007. В пределах рабочей зоны пневмоопалубку собирали из полотнищ ткани без дополнительного раскроя, а сферические торцы выкраивали по меридиональной схеме. Соединение полотнищ производилось клеешовыми швами шириной 50 мм.

Деревометаллическая рама обтягивалась воздухонепроницаемой тканью и соединялась с цилиндрической оболочкой в узле крепления по пери-

метру опалубки. Несущая способность пневмоопалубки обеспечивалась за счет создания избыточного давления воздуха с помощью осевого шахтного вентилятора СВМ-6М, соединенного мягким воздуховодом диаметром 300 мм. Расчетное внутреннее давление воздуха в опалубке принято равным 2 кПа. Проектная форма опалубки при производительности воздуходувки 180-200 м³/мин достигалась за 0,3-0,33 мин.

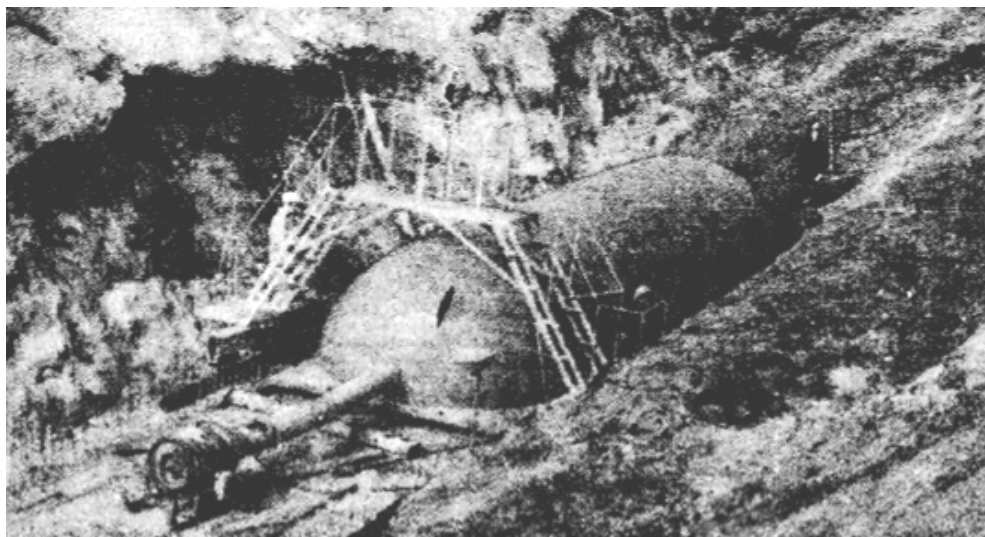


Рис. 3.11. Блочно-передвижная пневмоопалубка коллектора

Арматурный каркас при опытном бетонировании вязали из отдельных стержней периодического профиля диаметром 10 мм в соответствии с проектом при внутреннем давлении воздуха, превышающем расчетное на 0,4 кПа, с целью обеспечения в дальнейшем защитного слоя бетона. Следует отметить, что разработанная технология бетонирования коллектора в блочно-передвижной опалубке предусматривает монтаж арматуры из готовых пространственных каркасов. Для предотвращения сползания свежеложенного бетона на опалубку укладывалась мелкочаеистая тканая сетка, которая крепилась к нижнему ряду стержней арматурного каркаса.

Укладка бетонной смеси производилась методом пневмобетонирования с использованием приставки инженера Н.С. Марчукова. Готовая пескобетонная смесь доставлялась на участок в автобетоносмесителях, что обеспечивало однородность смеси, загружаемой в бункер установки "Пневмобетон". Технологические режимы пескобетонной смеси устанавливались в соответствии с методическими рекомендациями ЦНИИОМТП Госстроя СССР [13].

Бетонирование велось послойно с земли и передвижного мостика - от опор к коньку - слоями толщиной до 30 мм с соблюдением расстояния соплования – 1,0...1,1 м. Укладка бетона по всему сечению производилась без технологических перерывов, что обеспечивало монолитность конструкции.

В процессе опытного бетонирования участка коллектора был определен ряд технологических параметров возведения монолитных сооружений с

применением пневмоопалубки. Так, одним из важных условий возведения линейных сооружений является максимальное приближение его формы к проектной. Способность пневмонапряженной мягкой оболочки опалубки коллектора, закрепленной по периметру, принимать форму минимальной поверхности отчасти позволяет приблизиться к решению этой задачи. Вместе с тем начальная форма относительно податливой поверхности пневмооболочки не определяет ее конечной формы, зависящей от последовательности укладки бетона и условий его вызревания.

Таблица 3.3

Технические показатели пневмоопалубки опытного участка коллектора

Показатели	Значение показателя при длине опалубки, м	
	8	25
Общая площадь поверхности опалубки, m^2	42,7	133,5
Масса опалубки:		
пневмооболочка, кг	51,3	143,4
деревометаллическая рама, кг	1674	5233
в том числе:		
металл, кг	900	2813
древесина, кг	744	2420
Расход материалов опалубки на погонную длину коллектора:		
прорезиненная ткань, m^2	12,3	10,9
металл, m^2	112,5	110,5
древесина, m^2	0,16	0,15

В результате исследований конечной формы забетонированной конструкции в натурных условиях установлено, что наименьшее отклонение от проектных размеров бетонируемой конструкции, равное $0,0012R$, наблюдается при симметричной укладке бетона по сечению коллектора, в то время как при асимметричной укладке по сечению радиальные перемещения достигают значения $0,02R$, где R – радиус кривизны свода коллектора.

Соответствие конечной и проектной формы опалубки кроме соблюдения раскройных размеров и сборки пневмооболочки при изготовлении во многом зависит от деформативных свойств прорезиненной ткани. Исходя из деформативных характеристик материала, были найдены необходимые значения давления воздуха в оболочке на стадиях монтажа арматурных каркасов и бетонирования конструкции. Как отмечалось выше, бетонирование велось при внутреннем давлении 2 кПа, а монтаж арматуры - 2,4 кПа. Разница в давлении обеспечивала зазор между арматурным каркасом и поверхностью опалубки, достаточный для образования защитного слоя бетона толщиной 30 мм.

Конструкция опытного участка коллектора толщиной 60-80 мм была распалублена спустя 18 ч после окончания укладки бетона (рис. 3.12) и его выдерживания при средней температуре $+10^{\circ}C$.

Распалубливание производилось отключением воздухопроводов. По мере снижения давления воздуха внутри оболочки, вследствие работы материала опалубки в упругой стадии, пневмооболочка свободно отошла от бетона и легла на днище.

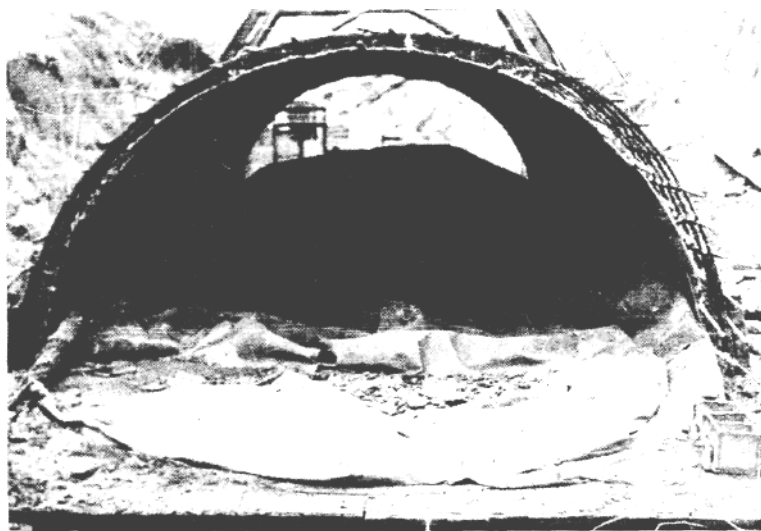


Рис. 3.12. Распалубка опытного участка коллектора

Внутренняя поверхность забетонированной конструкции гладкая, без раковин и выбоин, практически не требует дальнейшей обработки. Пневмоопалубка также была без дефектов, с чистой поверхностью и готова к бетонированию следующего участка

Производство экспериментальных работ на опытном участке коллектора вызвало необходимость разработки ряда дополнительных технологических схем бетонирования линейно-протяженных сооружений с использованием пневмоопалубки.

На рис. 3.13 представлена схема комплексной механизации процессов бетонирования конструкций в блочно-передвижной пневмоопалубке.

Укладка бетона по предложенной схеме может осуществляться двумя способами: с использованием бетоноукладчика на всю конструктивную высоту сооружения или устройством несъемной опалубки из пескобетонной смеси толщиной 30 мм, уложенной методом торкретирования. При первом способе в пределах первой зоны формовочного комбайна бетонная смесь соответствующей консистенции с помощью бетоноукладчика 1 подается в приемный бункер 2 и растекается по сечению канала с принудительной вибрацией бетона. Гидростатическое боковое давление бетонной смеси воспринимается щитом-шаблоном 3, повторяющим по очертанию наружную поверхность канала.

Вторая зона включает устройства для вакуумирования уложенного бетона 4. Вакуум-щиты, изготовленные по форме бетонируемого сооружения,

агрегатируются с насосом, обеспечивающим необходимость разрежения на поверхности уложенного бетона. Это позволяет значительно ускорить сроки схватывания бетона и удаления воздуха из тела молодого бетона

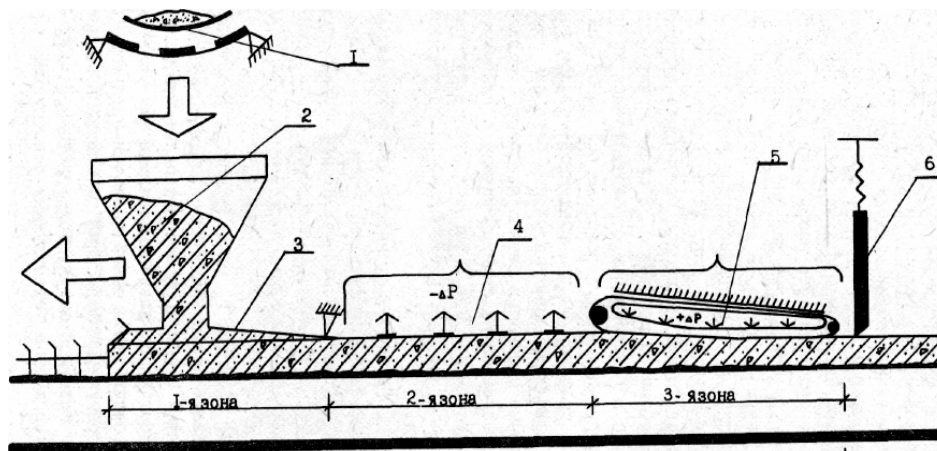


Рис. 3.13. Схема комплексной механизации процессов бетонирования конструкций в блочно-передвижной пневмоопалубке

Назначение агрегата 5, расположенного в третьей зоне, - доуплотнение и отделка поверхности бетонной конструкции. Применение пневмоуплотняющей схемы агрегата позволяет централизовать источники создания избыточного давления воздуха при уплотнении бетона и эксплуатации воздушнонаполненной оболочки - опалубки. Скорость горизонтального перемещения формовочного комбайна зависит от ряда факторов: свойств бетонной смеси, конструктивной длины агрегатов, геометрических размеров бетонируемых конструкций и т.п.

При втором способе бетонная смесь по изложенной технологии укладывается на заранее подготовленную торкретированием несъемную опалубку.

3.5. Организационно-технологическая структура комплексного процесса возведения линейно-протяжённых сооружений на пневмоопалубке

На основе проведенных теоретических и натурных исследований рекомендуются следующие **технологические схемы возведения линейно - протяженных объектов (ЛПО)** с использованием установки «Пневмобетон»:

- многослойное бетонирование;
- «несъемная» опалубка из пескобетонной смеси, уложенной торкретированием и обычная укладка бетона;
- бетонирование на полную толщину с помощью опалубки-шаблона.

Опытно – экспериментальные работы и теоретические расчеты рабочей зоны опалубки позволили установить длину захватки равную 25 м.

Одним комплектом опалубки возможно возводить коллекторы и другие линейные объекты протяженностью до 1250 м.

Ниже приведены основные технологические решения возведения ЛПО различными способами.

При многослойном бетонировании (рис.3.14) в состав работ входят:

- установка объёмно-переставной пневмоопалубки;
- установка сетчатой арматуры;
- устройство пути для движения передвижных подмостей;
- установка передвижной подмости-шаблона;
- укладка бетонной смеси установкой "Пневмобетон" слоем 30-35 мм;
- перестановка передвижной подмости-шаблона;
- выдерживание бетона на пневмоопалубке;
- распалубливание и перемещение объёмно-переставной опалубки;
- установка опалубки для следующего цикла.

До начала бетонирования необходимо выполнить следующие работы:

- разработать котлован с учетом требований СНиП;
- выполнить работы по устройству железобетонного днища коллектора с вертикальными выпусками арматуры;
- укомплектовать установку «Пневмобетон»;
- установить в рабочее положение объёмно-переставную пневматическую опалубку, заранее доставленную к месту работы;
- выполнить армирование коллектора готовыми арматурными сетками;
- проложить временные автодороги и выполнить временное электро-снабжение.

Готовую бетонную смесь доставляют на бровку котлована к двум установкам «Пневмобетон» автобетоносмесителями. После выгрузки в приемный бункер и перемешивания смесь подают в установку через вибросито.

Нанесение пескобетона производят при помощи двух сопел, начиная от пят свода к замку двумя рабочими. Сопла располагают перпендикулярно к плоскости бетонирования и держат на расстоянии 1...1,2 метра от поверхности опалубки.

Бетонирование производят послойно и непрерывно слоями толщиной 25-30 мм. После окончания работ установку промывают водой.

Технологические перерывы в процессе укладки бетона допускаются не более чем на 30 мин.

Бетонирование выполняют песко-бетонной смесью с крупностью заполнителя не более 8 мм, состава (Ц:П) 1:3 или 1:4, подвижностью 7,5 см в начале транспортирования, 2,5 см - в конце.

Распалубливание конструкции производят через 16 часов после окончания бетонирования понижением давления внутри пневмоопалубки.

Строповку опалубки осуществляют за проушины и с помощью лебедок вытягивают из-под забетонированной части вдоль оси сооружения.

После этого производят подачу рабочего давления – на следующей захватке опалубка занимает рабочее положение, и следующие 25 м сооружения подготовлены к укладке пескобетона.

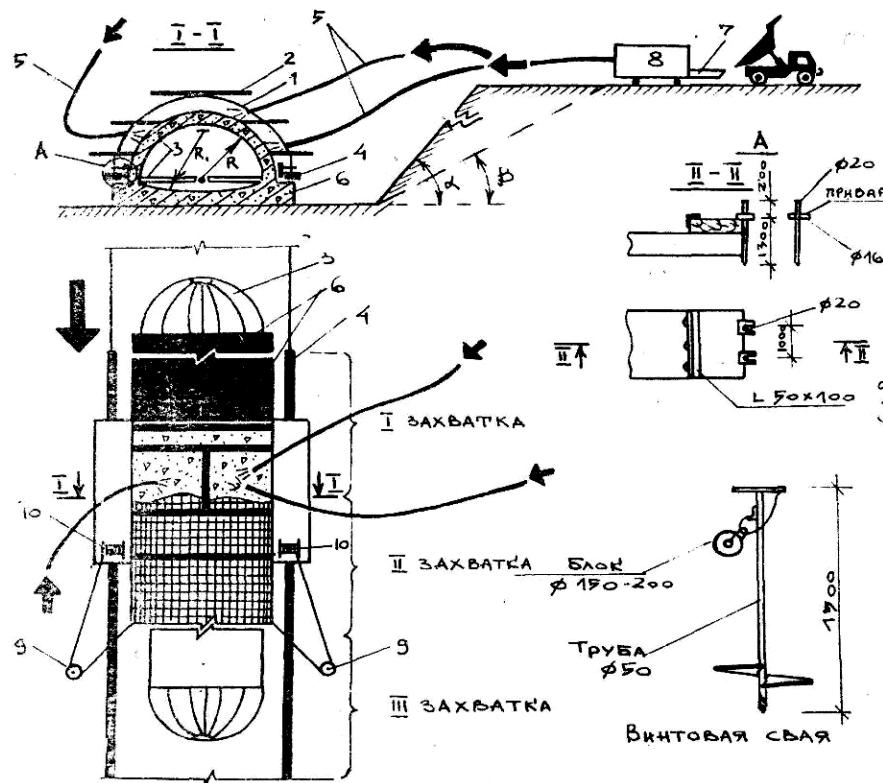


Рис. 3.14. Схема производства работ при многослойном бетонировании:

- 1 - подвижные подмости; 2 - рабочий настил; 3 - пневматическая опалубка;
 4 - направляющие; 5 - шланги; 6 - коллектор (бетон); 7 - приёмный бункер;
 8 - установка "Пневмобетон"; 9 - свайка с блоком; 10 - лебёдка;
 α - угол проектного откоса; β - угол естественного откоса

При бетонировании на несъемную опалубку (рис. 3.15) в состав работ I этапа входят:

- установка объёмно-переставной пневмоопалубки;
- установка сетчатой арматуры;
- устройство пути для передвигающихся подмостей;
- установка передвигающихся подмостей;
- укладка бетонной смеси слоем 30-35 мм;
- выдерживание бетона на пневмоопалубке;
- распалубливание и перемещение опалубки.

В состав работ II этапа входят:

- установка приёмно-формующего бункера;
- подача бетона бетоноукладчиком;
- укладка бетона кл. 22,5 и выше в конструкцию.

На выполненное по традиционной технологии торкретированное основание устанавливают блочно-переставную опалубку, укладывают проволоочную сетку с ячейками 50×50 мм.

С помощью двух установок «Пневмобетон» на сетку наносят слой пескобетона толщиной 30-35 мм состава 1: 4 (Ц:П), цемента М400.

После выдерживания бетона на пневмоопалубке в течение 6-8 часов (в зависимости от наружной температуры воздуха) укладывается армокаркас.

С помощью бетоноукладчика укладывается крупнофракционный бетон В-20 водонепроницаемостью В-8, подвижностью смеси 10-12 см.

Уплотнение производят поверхностными вибраторами.

При производстве работ с помощью опалубки-шаблона (рис. 3.16) бетонирование пескобетоном производится по пневматической опалубке и шаблону при помощи установки «Пневмобетон».

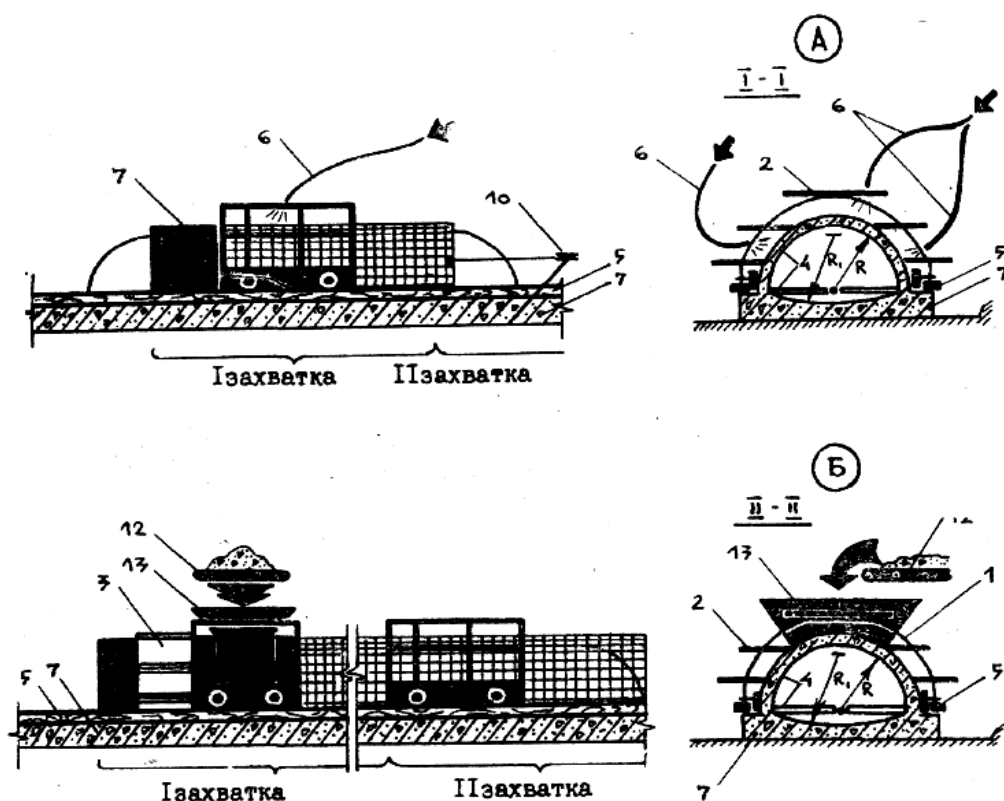


Рис. 3.15. Схема бетонирования на несъемную опалубку:

- 1 - подвижные подмости; 2 - рабочий настил; 3 - шаблон со скользящей наружной опалубкой; 4 - пневматическая опалубка; 5 - направляющие; 6 - шланги; 7 - коллектор (бетон); 8 - приёмный бункер; 9 - установка «Пневмобетон»; 10 - свайка с блоком; 11 - лебёдка; 12 - бетоноукладчик; 13 - вибробункер

Пескобетон наносится поперечными (по отношению к продольной оси сооружения) слоями сразу на полную толщину.

Двое рабочих держат сопло на расстоянии 1,2 м от опалубки под углом 45° к опалубке, наносят слой пневмобетона между опалубкой и шаблоном

толщиной 50 мм (на полную толщину), начиная от пят к замку полосой шириной до 20 см, после чего подмости-шаблон перемещаются с шагом 20-25 см. Далее процесс повторяется.

Сравнительный анализ трудозатрат при возведении ЛПО представлен в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Затраты труда на возведение ЛПО различными способами

Варианты технологических схем	Трудовые затраты, чел.-ч.	
	на 1 пог. м	на захватку (25 пог. м)*
1. Многослойное бетонирование установкой «Пневмобетон», в том числе:	4,48	110,90 / 18,8
опалубочные работы	1,37	33,25 / 5,54
армирование	1,06	26,40 / 4,4
бетонирование	2,05	51,25 / 8,54
2. Бетонирование на несъемную опалубку, в том числе:	3,89	96,15 / 16,02
опалубочные работы	1,37	33,25 / 5,54
армирование	1,06	26,40 / 4,4
бетонирование	1,46	36,50 / 6,08
3. Бетонирование на шаблон, в том числе:	4,86	120,30 / 20,05
опалубочные работы	1,37	33,25 / 5,54
армирование	1,06	26,40 / 4,4
бетонирование	2,43	60,65 / 10,11
4. Изготовление и монтаж коллектора из сборных элементов	-	21,6

*в числителе - без учета оборачиваемости; в знаменателе - при 6-кратной оборачиваемости, соответствующей 150 м коллектора.

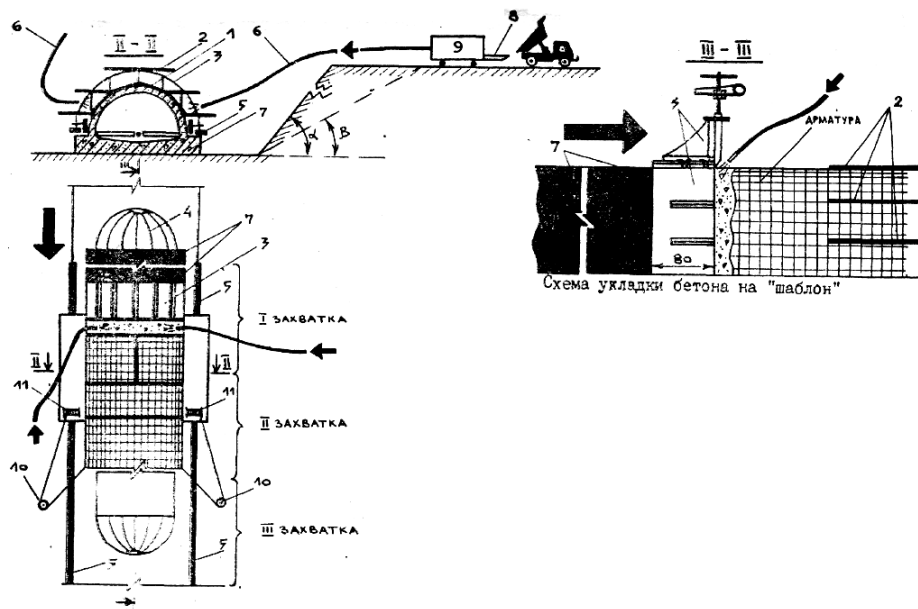


Рис. 3.16. Схема укладки бетона на "шаблон":

1 - подвижные подмости; 2 - рабочий настил; 3 - шаблон со скользящей наружной опалубкой; 4 - пневматическая опалубка; 5 - направляющие; 6 - шланги; 7 - коллектор (бетон); 8 - приёмный бункер; 9 - установка «Пневмобетон»; 10 - свайка с блоком; 11 - лебёдка

Анализ трудовых затрат показал, что наиболее предпочтителен способ возведения в блочно-переставной опалубке с первоначальным бетонированием жесткой корки (несъемной опалубки). При этом использование блочно-переставной пневматической опалубки при возведении монолитных линейно-протяженных сооружений сокращает трудовые затраты на 25-30%, увеличивает выработку в 1,1 раза, снижает стоимость возведения на 20-25% (при расчетной оборачиваемости опалубки, равной 30) по сравнению со сборным вариантом.

3.6. Особенности возведения монолитных конструкций с использованием пневмоопалубки в зимних условиях

Необходимость появления технологий производства бетонных работ в условиях отрицательных и знакопеременных температур стала актуальной еще на заре использования бетона как конструкционного материала. Она вызвана расширением как географии его применения, так и номенклатурой конструкций.

Изучением и совершенствованием методов производства работ при знакопеременных температурах, отбором многочисленных технологических решений и их анализом на протяжении многих лет занимались и занимаются отечественные ученые: В.С. Абрамов, А.С. Арбенев, В.П. Ганин, В.Я. Гендин, С.Г. Головнев, Г.И. Горчаков, И.Н. Данилов, И.А. Жидкевич, И.Б. Заседателев, О.С. Иванов, И.А. Кириенко, Б.М. Красновский, В.Д. Копылов, Б.А. Крылов, В.Н. Лайгода, С.А. Миронов, В.Д. Топчий и др. [1, 10, 15, 22, 23, 24, 25, 26].

Среди зарубежных исследователей следует отметить работы С. Бергстрема, Дж. Мердока, А. Никкенена, Х. Поярви, Р.Г. Тюрена и др.

Благодаря работам перечисленных авторов установлено, что условия бетонирования при среднесуточной температуре наружного воздуха не выше 5°C или минимальной температуре в течение суток ниже 0°C относятся к зимним условиям.

Отмечено, что твердение бетона сопровождается рядом сложных процессов, в которых температурный режим является доминирующим. С повышением температуры смеси происходит более активная гидратация цемента, что приводит к более быстрому набору прочности, а с понижением – вода перестает вступать в химическое взаимодействие и схватывание затормаживается. Замерзание смеси ведет к разрыву связей на молекулярном уровне, которые при оттаивании не восстанавливаются, приводя впоследствии к получению пониженной прочности бетона.

Общие требования к производству бетонных работ в зимних условиях изложены в СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» и СНиП 3.03.01-87 «Несущие и ограждающие конструкции» [51, 47].

Рассматривая процесс возведения монолитных конструкций как один из элементов индустриализации строительства тонкостенных оболочек, нель-

зя опустить вопросы, связанные с производством работ в зимних условиях. Эта специфика производства работ с использованием пневмоопалубки относится к числу малоизученных областей обсуждаемой технологии.

Технологические режимы зимнего бетонирования разработаны Б.И. Петровым [15, 32]. В основе зимней технологии лежит способ прогрева конструкции разогретым воздухом с использованием в бетонных смесях противоморозных добавок, предотвращающих замерзание смеси в период транспортировки, укладки, уплотнения и подъема в проектное положение. В качестве противоморозных добавок обычно используют нитрит натрия и поташ, которые не вызывают коррозии арматуры.

Бетон с добавкой нитрита натрия плохо набирает прочность в первые семь суток твердения, однако эта добавка сохраняет удобоукладываемость бетонной смеси. Добавка нитрита натрия в количестве 7-10 % от веса цемента позволяет эффективно использовать бетонную смесь при температуре до -15 °С.

Бетонная смесь с добавкой поташа быстро схватывается. Для замедления сроков схватывания в бетонную смесь вводят замедлители ГКД-94 или СДБ либо водорастворимые фосфаты, в том числе тринатрийфосфат.

Состав бетонной смеси с противоморозными добавками подбирается в лаборатории с учетом наружной температуры воздуха, времени транспортировки и укладки бетонной смеси. Бетонная смесь не должна замерзнуть к моменту окончания бетонирования конструкций на пневмоопалубке, так как увеличение температуры бетонной смеси и пуск воздухоподогревающих установок можно начинать по мере уплотнения отдельных полос, укрывания их паро- и теплоизоляционными полотнищами.

Для обеспечения этого условия бетонную смесь перед укладкой можно подогревать либо ввести в нее химические добавки, понижающие температуру замерзания.

В период выдерживания на пневмоопалубке бетонную смесь подогревают для ускорения твердения. При этом температура смеси не должна превышать +40 °С в случае использования в качестве добавки сульфитно-спиртовой барды и +80 °С - во всех остальных случаях. Во избежание растрескивания разогрев твердеющего бетона осуществляют со скоростью 30 град./ч, а остывание - 25 град./ч.

В соответствии с требованиями СНиП прочность бетона монолитных конструкций к моменту замерзания или охлаждения ниже расчетной температуры должна быть не менее:

- 50, 40 и 30% проектной прочности - для бетона без противоморозных добавок при классах В3,5, В15-В22,5, В27,5-В40 соответственно;
- 70% независимо от класса бетона для конструкций, подвергающихся по окончании выдерживания замораживанию и оттаиванию;
- 100% - для конструкций, подвергающихся сразу после окончания выдерживания действию расчетного давления воды, и конструкций, к которым

предъявляются специальные требования по морозостойкости и водонепроницаемости.

Сроки распалубливания и загрузки конструкций должны приниматься согласно табл. 3.5.

Распалубливание и загрузка конструкций следует производить после испытания контрольных образцов бетона и установления соответствия фактического температурного режима указанному в технологической карте или после испытаний бетона конструкций на прочность неразрушающими методами.

Распалубленные конструкции должны временно укрываться, если разность температур поверхностного слоя бетона наружного воздуха превышает 20°C - для конструкций с модулем поверхности от 2 до 5 и 30°C - для конструкций с модулем поверхности 5 и выше.

Таблица 3.5

Сроки распалубливания и загрузки конструкций

Конструкции	Прочность бетона (проектная) при фактической нагрузке	
	свыше 70% расчетной	менее 70% расчетной
Находящиеся в мерзлом грунте	100	70—85
Несущие длиной менее 6 м	100	70
Несущие длиной 6 м и более	100	80

Применение пневматических опалубок для возведения монолитных конструкций позволяет усовершенствовать технологию зимнего бетонирования за счет использования подогретого воздуха во внутреннем объеме. Это, с одной стороны, способствует созданию нормальных температурно-влажностных условий твердения бетона, с другой - может привести к некоторым изменениям формы пневмооболочки – опалубки. Поэтому изучение технологических режимов тепловой обработки бетона является предметом специальных исследований.

Определение температурных параметров выдерживания бетонной смеси на пневматической опалубке производится путем аналитического расчета, представленного в [3, 5, 15, 19].

В зависимости от вида материала пневмоопалубки и толщины укладываемого бетона определяются интервалы температур наружного воздуха, при которых возможен прогрев бетонной смеси без ее утепления сверху (табл. 3.6) и с утеплителем (см. рис. 3.17; 3.18).

В случае, когда среднесуточная температура наружного воздуха опускается ниже $t_{\text{н}} \leq 1^{\circ}\text{C}$, рекомендуется утепление уложенной смеси.

Рекомендации по выбору температуры воздуха внутреннего объема пневмоопалубки до нанесения бетонной смеси $t_{\text{в}}^1$ после окончания торкретирования $t_{\text{в}}^2$ и после завершения работ по утеплению $t_{\text{в}}^3$ приведены в [2,3, 4, 5].

Таблица 3.6

Рекомендуемые значения температуры наружного воздуха

Ткань А-01	толщина слоя бетона, м	0,02	0,04	0,06
	температура наружного воздуха $t_{\text{н}}^{\circ}\text{C}$	$\geq +1$	$\geq +1$	≥ 0

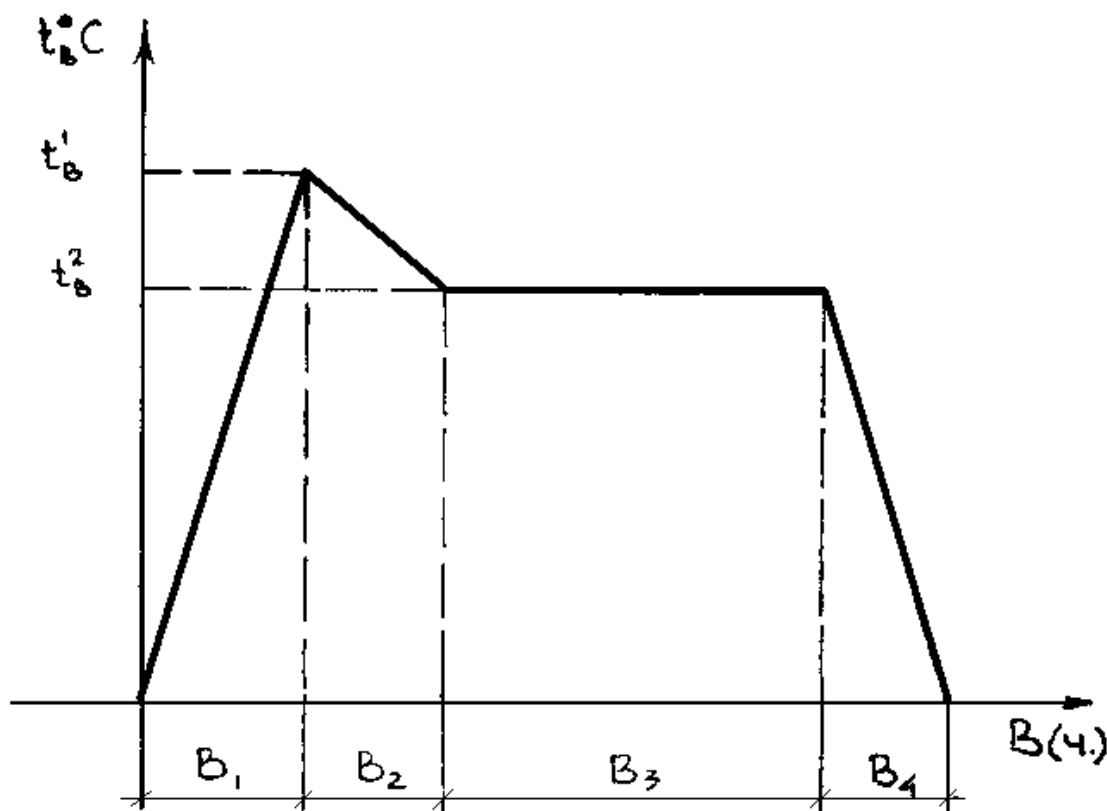


Рис.3.17. График изотермического выдерживания бетона на пневмоопалубке без утеплителя:

$t_{\text{в}}^{\circ}\text{C}$ – температура прогрева воздуха подоболочечного пространства;

B_1 – время подъема температуры под пневмоопалубкой; B_2 – время нанесения на поверхность опалубки бетонной смеси; B_3 – время выдерживания бетонной смеси в определенном температурном режиме; B_4 – время остывания внутреннего воздуха с момента отключения отопительных установок; $t_{\text{в}}^1$ – температура под пневмоопалубкой без бетона; $t_{\text{в}}^2$ – температура под пневмоопалубкой с бетоном

Величины $B_1, B_2, B'_2, B'_3, B'_4, B_4$ определяются исходя из технических возможностей теплоподающего агрегата, входящего в комплект с пневматической опалубкой по методике, описанной в [48]:

$$B_1 = \frac{m \cdot c(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{Q_{\text{кал}} - Q}, \quad (3.1)$$

где m - масса воздуха под оболочкой, кг;

c - удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг град.;

$Q_{\text{кал}}$ - теплопроизводительность калорифера, Дж/ч.

$Q = 1,05 (Q_{\text{об}} + Q_{\text{пол}})$ — потери тепла, Дж/ч.

$Q_{\text{об}}$ - потери тепла через оболочку, Дж/ч.;

$Q_{\text{пол}}$ - потери тепла через пол, Дж/ч., определяются известными теплотехническими приемами.

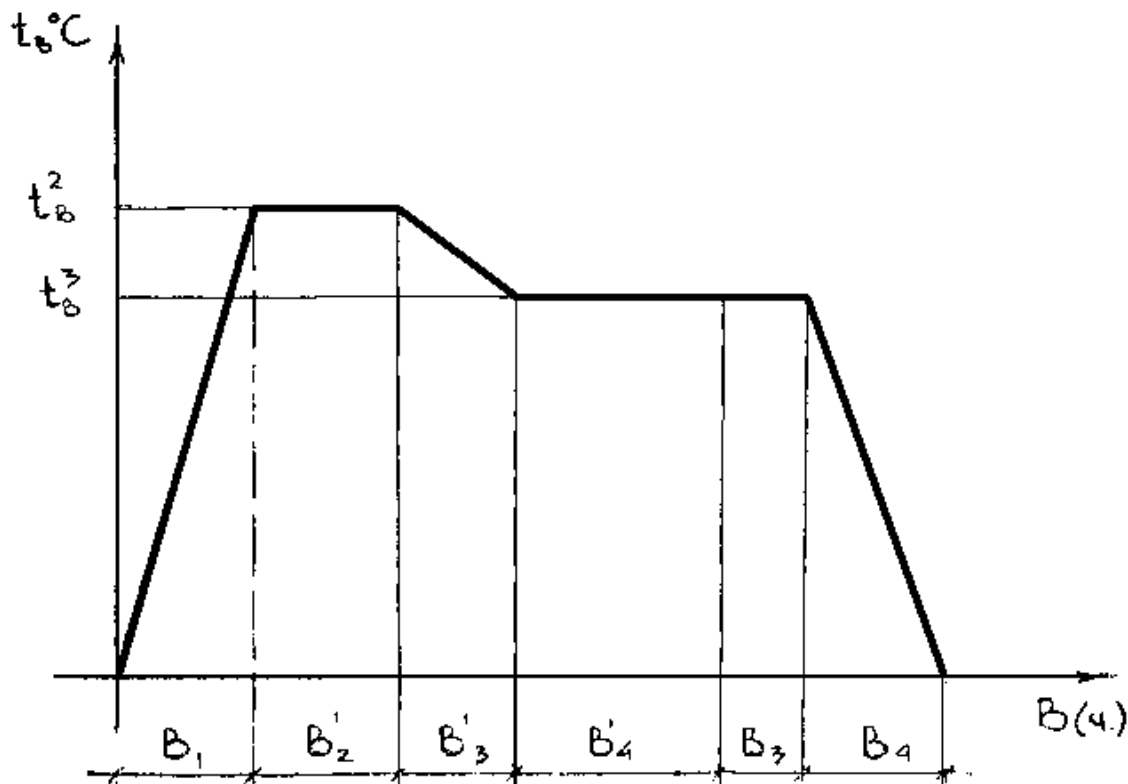


Рис. 3.18. График изотермического выдерживания бетона на пневматической опалубке с утеплителем:

B_1 – время подъема температуры внутри пневмоопалубки до заданной температуры; B'_2 – время нанесения слоя бетона до начала нанесения утеплителя; B'_3 – время с момента начала нанесения утеплителя до окончания нанесения бетона; B'_4 – время нанесения слоя утеплителя после полной укладки слоя бетона; B_3 – время выдерживания бетона с утеплителями в заданных температурных условиях; B_4 – время остывания воздуха под оболочкой после отключения источника тепла; $t_{\text{в}}^2$ – температура под пневмоопалубкой с бетоном; $t_{\text{в}}^3$ – температура под пневмоопалубкой с бетоном и утеплителем

$$B_2 = \frac{V_{\text{бет}}}{\Pi_{\text{бет}}}, \text{ ч}; \quad (3.2)$$

где $V_{\text{бет}}$ - объем бетона в сооружении, м^3 ;
 $\Pi_{\text{бет}}$ - производительность укладки бетона, $\text{м}^3 / \text{ч}$;

$$B_2' = \frac{V_{\text{доп}}}{\Pi_{\text{бет}}}, \text{ ч}; \quad (3.3)$$

где $V_{\text{доп}}$ - дополнительный объем бетона в сооружении, не укрытый утеплителем м^3 .

$$B_3' = \frac{V_{\text{бет}} - V_{\text{доп}}}{\Pi_{\text{бет}}}, \text{ ч}. \quad (3.4)$$

Время B_4' определяется исходя из известной производительности (выработки) по нанесению утеплителя и протяженности участка неукрытого бетона после окончания бетонирования. Считая, что его протяженность не превышает допустимую, а объем работ по укладке утеплителя, необходимой для

окончания работ, равен $V_{\text{ут}}$, $B_4' = \frac{V_{\text{ут}}}{\Pi_{\text{ут}}}$, где $\Pi_{\text{ут}}$ - производительность укладки

утеплителя, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Время выдерживания бетона B_4 определяется в соответствии с данными, приведенными в табл.3.5.

Укладка бетонной смеси на пневматическую опалубку ведется в соответствии с требованиями СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

При температурах наружного воздуха от $+5^\circ\text{C}$ до -20°C укладка бетонной смеси осуществляется по обычным технологическим схемам (при соответствующих требованиях к приготовлению и транспортированию смеси).

В случае более низких температур бетонная смесь укладывается с утеплением сверху. Для обеспечения необходимого фронта работ нанесение утеплителя следует проводить с некоторым отставанием от укладки бетона.

Термоактивная воздухоопорная пневматическая опалубка должна обеспечивать равномерность температурного поля, стабильность теплотехнических характеристик, возможность эффективного контроля регулирования режимов обогрева бетона.

В качестве утеплителя применяют теплоизоляционные материалы плотностью до 200 кг/м^3 , плотность утеплителя не должна превышать паспортную более чем на 15%, влажность - на 6%.

Значительное влияние на теплопотери опалубки оказывает скорость ветра. Увеличение коэффициента теплопередачи опалубки при скорости 3, 9 и 15 м/с составляет соответственно около 30, 65 и 100%. Поэтому при значительной скорости ветра или неравномерном обдувании пневмоопалубки целесообразно проводить дополнительное укрытие форм воздухонепроницае-

мыми оболочками. При укрытии форм брезентом коэффициент теплопередачи возрастает в среднем на 10 - 25% при скорости ветра от 3 до 15 м/с.

Одним из условий качественного возведения сооружений на пневматической опалубке является стабильность рабочего давления, температурного поля воздуха внутреннего объема. Относительное изменение избыточного давления не должно превышать:

$$\frac{\Delta P}{P} \leq 0.18, \quad (3.5)$$

где P - рабочее давление;

ΔP - абсолютное изменение рабочего давления.

Целесообразно оборудовать систему воздухоподачи регуляторами давления. Тип, марка регулирующих устройств выбираются исходя из соответствия их расчетных характеристик величине избыточного давления под оболочкой.

Предельно возможные интервалы колебания температуры внутреннего воздуха, обеспечивающие допустимые перемещения лицевой поверхности пневмоопалубки, зависят от величины рабочего давления.

Рекомендуется применять одну из трех схем прогрева воздуха под пневмоопалубкой:

- а) воздухоподающие установки нагнетают холодный воздух под оболочку, который в дальнейшем прогревается отопительной установкой (рис. 3.19, а);
- б) воздухоподающая установка блокируется с отопительной установкой, и воздух при подаче под оболочку дополнительно подогревается (рис. 3.19, б);
- в) вентиляционная и отопительная установка блокируется таким образом, что часть подогретого воздуха из пневмооболочки дополнительно подогревается калорифером и смешивается с холодным воздухом, проходящим через вентиляторы внутрь пневмоопалубки (рис. 3.19, в).

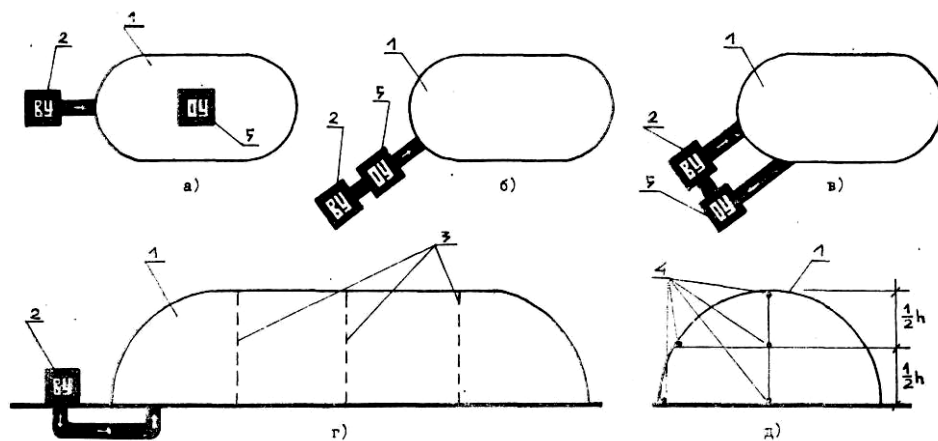


Рис.3.19. Технологические схемы прогрева внутреннего воздуха и контроля его температурных параметров: 1 – пневмоопалубка; 2 – вентиляционная установка; 3 – полости размещения термодатчиков; 4 – термодатчики; 5 – отопительная установка

Для контроля и стабилизации температурного режима пневмоопалубки рекомендуется использовать специальную систему автоматического регулирования, оснащенную датчиками температуры, размещенными по схеме, представленной на рис. 3.19, г и 3.19, д. При этом температура регулируется посредством изменения режима работы отопительных установок.

В качестве отопительных установок целесообразно применять теплогенераторы. Их технические характеристики приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Технические характеристики теплогенераторов

Параметры теплогенератора	Тип теплогенератора		
	ТГ-75	ТГ-150	ТГ-500
Теплопроизводительность, <i>ккал-ч</i>	75000	150000	500000
Кол-во нагреваемого воздуха, <i>м³/ч</i>	5060	8000-9000	24000-25000
Температура нагреваемого воздуха, <i>°C</i>	55°	60°	65°
Расход топлива, <i>кг/ч</i>	—	14-18	40-50
Напор, создаваемый вентиляторами, <i>Па</i>	—	—	1100

3.7. Особенности использования опалубочных пневмосистем в условиях ветровых воздействий

В процессе приведения пневмооболочки-опалубки в проектное положение избыточное давление в ней возрастает от нуля до величины рабочего давления пневмоопалубки. В период, когда внутреннее давление воздуха в пневмоопалубке существенно ниже интенсивности ветрового напора, действие ветра вызывает низкочастотные колебания слабозаполненной оболочки, которые могут привести к разрыву материала опалубки, особенно в местах ее крепления к фундаменту. Для снижения динамических нагрузок в материале пневмоопалубки в процессе ее подъема при одновременном воздействии ветровых нагрузок и проведения этой операции в минимальные сроки необходимо применение специальных устройств, снижающих колебания пневмоопалубки.

При отсутствии указанных устройств проводить приведение пневмоопалубки в проектное положение разрешается при скорости ветра на уровне земли не более 5 м/с.

Поддержание стабильного внутреннего давления воздуха в пневмоопалубке в течение всего цикла строительных работ является одним из главных условий получения проектной формы и качества возводимой конструкции. Кратковременное понижение или повышение внутреннего давления в пневмоопалубке даже в безветренную погоду в процессе укладки и выдерживания бетона может привести к частичному или полному разрушению возводимой конструкции.

Величину максимальных допустимых перемещений пневмооболочек-опалубок цилиндрической и близких к ней форм определяют в соответствии с методикой [1, 4, 16] по графикам, приведенным на рис. 3.20 и 3.21.

Методика определения перемещений оболочки от ветра заключается в следующем:

- определяются соотношения высоты оболочки к её пролету h/b и величины внутреннего избыточного давления к интенсивности ветрового напора p/q ;
- на графике (рис. 3.20) измеряются ординаты точек W/R , мм, пересечения линий h/b с линией P/q , соответствующие расчетным размерам пневмоопалубки;
- по масштабу определяется значение ординаты W_{MAX} , м:

$$W_{max} = \frac{W}{q} R. \quad (3.6)$$

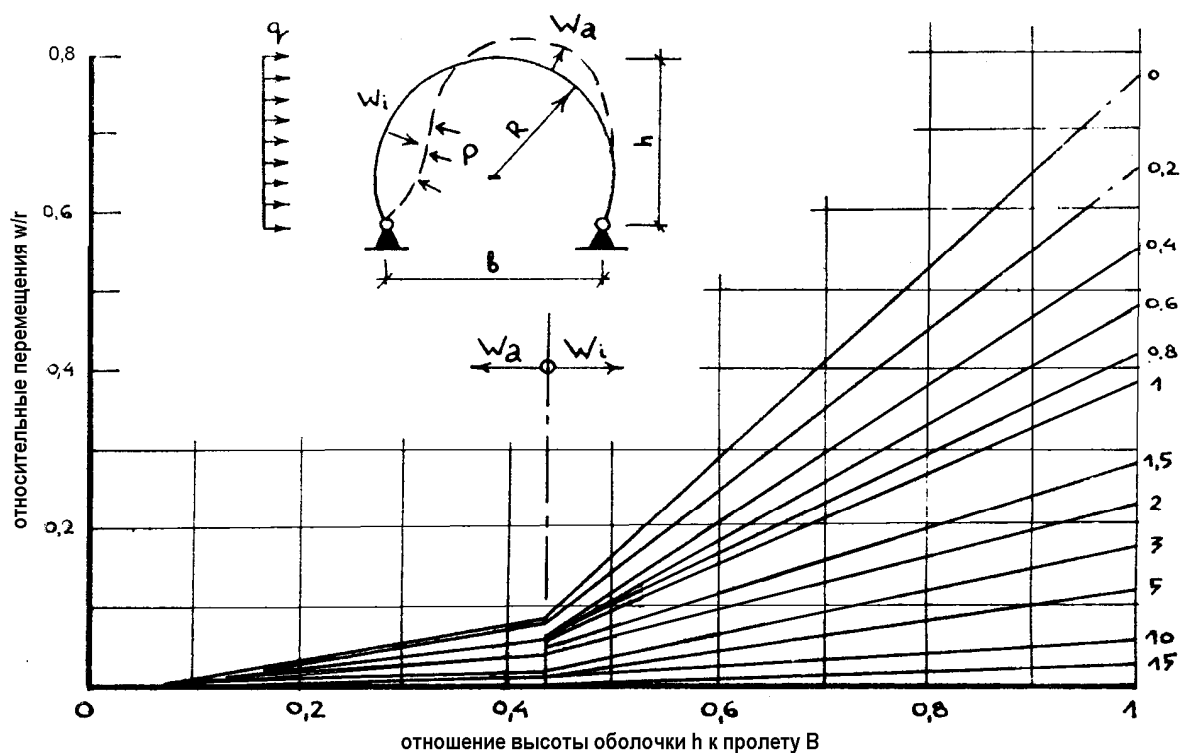


Рис. 3.20. Максимальные перемещения цилиндрической пневмооболочки под действием ветра

Для цилиндрических пневмооболочек с соотношением $h/b = 0,5$ на рис. 3.21 приведены величины перемещений для различных соотношений P/q , определены границы безопасных условий работ при действии ветровой нагрузки.

При торкретировании бетонной смеси на пневмоопалубку ветер, в зависимости от направления его действия, может изменять траекторию движения частиц бетона на пути от сопла до опалубки, увеличивать или уменьшать их скорость. Это приводит к неоднородности свойства возводимой конструк-

ции и снижает ее качество. Поэтому при выполнении бетонных работ необходимо варьировать параметры торкретирования бетона, изменяя расстояние соплования, угол атаки и т.п. с учетом направления действия и интенсивности ветрового напора.

При возведении волнистых оболочек следует начинать торкретирование бетонной смеси с межволновых участков (ребер) для предотвращения засорения арматурного каркаса в этих местах частицами бетона из отскока с выпуклых участков поверхности пневмоопалубки.

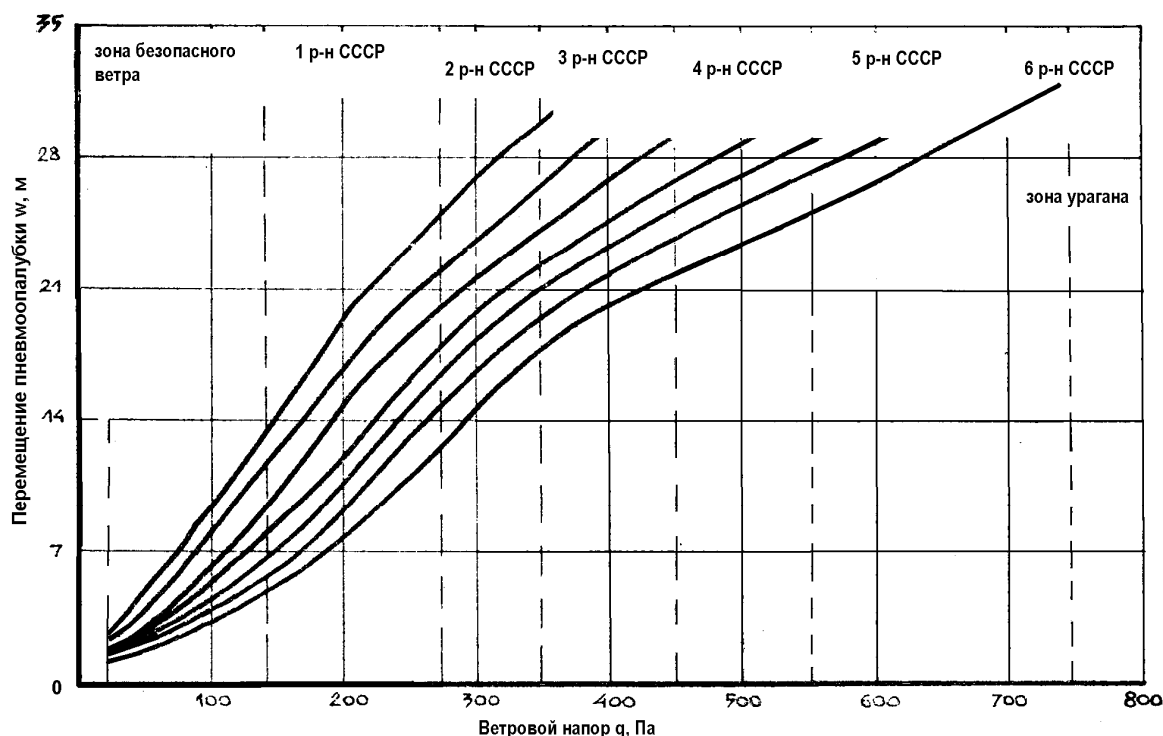


Рис. 3.21. Максимальные перемещения цилиндрической пневмоопалубки от ветровых воздействий при различных величинах внутреннего избыточного давления P

Период выдерживания бетона на пневмоопалубке является наиболее ответственным в ходе строительства, так как оказывает определяющее влияние на качество и форму возводимой конструкции. Следовательно, в это время особенно важно обеспечить стабильность пневмоопалубки при ветровых воздействиях для получения проектной формы и прочности возводимого сооружения.

Для предотвращения высыхания твердеющего бетона его поверхность сразу после укладки на опалубку следует покрывать (также методом напыления) защитной пленкой, препятствующей активному испарению воды от воздействия ветра и солнечной радиации. В этом случае наиболее целесообразно применять какую-либо водорастворимую эмульсию или полимеризующееся вещество (например, помороль, СБС, Н-80, ПВА и т.п.), быстро твердеющие на воздухе, образующие при этом защитное покрытие свеже-

уложенного бетона. После окончания строительства эта защитная пленка может использоваться как гидроизоляционное покрытие сооружения.

После набора бетоном достаточной прочности производят распалубливание готовой конструкции, сбрасывая давление в пневмоопалубке. При этом также возможно возникновение колебаний слабонаполненной оболочки от ветра, последствием которых может быть не только разрыв материала опалубки, но и частичное или полное разрушение самого сооружения. Поэтому распалубливание должно осуществляться быстро, с применением устройств, облегчающих выполнение этой операции и препятствующих возникновению колебаний слабонаполненной оболочки от ветра. В случае отсутствия таких устройств в конструкции пневмоопалубки распалубливание производят в безветренную погоду или при ветре со скоростью не более 5 м/с у поверхности земли.

3.8. Мероприятия по обеспечению безаварийной эксплуатации пневмоопалубок в период строительства

Для обеспечения безаварийной эксплуатации пневмоопалубок в период строительства необходимо осуществить следующие мероприятия.

Во время приема пневмоопалубки в эксплуатацию должен обязательно проводиться контроль качества выполнения соединительных швов. Швы выполняются клеепрошивными с защитной оклейкой лентой на всем протяжении.

В ходе подготовки к строительству следует обеспечить возможность автоматического переключения потребителей стройплощадки на резервный источник электроэнергии в случае выхода из строя основного. Для этого используются либо передвижные дизельные электростанции, либо подключают стройплощадку не менее чем к двум независимым стационарным источникам энергии.

Для обеспечения доступа под пневмоопалубку устраивается входной шлюз с двумя плотно закрывающимися дверями. Регулирование внутреннего избыточного давления воздуха производится через отдельный выпускной клапан, не связанный со входом под пневмоопалубку.

Перед началом работ и регулярно во время их выполнения воздухоподающая установка должна быть обеспечена техобслуживанием в соответствии с инструкцией по ее эксплуатации. На случай внезапной поломки воздухоподающая установка должна быть укомплектована резервным вентилятором.

Все воздуховоды желательно выполнять из жестких материалов (например, оцинкованной стали) во избежание возможности их повреждения в ходе строительных работ.

Выходные отверстия нагнетательных воздуховодов должны быть оборудованы предохранительными заслонками, автоматически перекрывающими отверстие воздуховода при прекращении подачи воздуха.

Работа воздухоподающей установки должна круглосуточно контролироваться дежурными электриками на протяжении всего периода строительства. Пульт управления работой вентиляторов и регулятора внутреннего давления следует размещать во входящий в комплект пневмоопалубки инвентарной кабине, где и организуется дежурство.

Герметизация опорного контура пневмоопалубки выполняется в строгом соответствии с проектом. После выполнения этих работ пневмоопалубка проверяется на стабильность внутреннего давления. Результаты испытаний должны быть отражены в соответствующем акте.

В ходе строительства осуществляется постоянный визуальный контроль состояния опорного контура и выполняются необходимые работы для поддержания его в надежном состоянии.

Для предотвращения прорывов оболочки пневмоопалубки необходимо материалы и оборудование размещать не ближе 3 м от наружной поверхности пневмоопалубки, а при выполнении строительных работ - предусматривать меры предосторожности, обеспечивающие сохранность оболочки.

4. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И УКЛАДКИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПНЕВМОПАЛУБКЕ

4.1. Торкретная техника для нанесения бетонных смесей

Одним из трудоемких видов работ при возведении монолитных сооружений на пневматической опалубке являются работы, связанные с приготовлением, транспортированием и укладкой бетонных смесей, что определило развитие специализированной строительной техники и привело к появлению машин, способных объединить все эти технологические процессы на строительной площадке в единый процесс. Одним из технологических принципов действия таких машин, позволяющих снизить трудоемкости бетонных работ, является принцип пневматического нагнетания. Известно, что возведение монолитных сооружений с использованием пневмоопалубки предполагает использование методов пневмонанесения твердеющих смесей на лицевую поверхность опалубок. Поэтому применение этих двух технологических методов может дать ощутимый экономический эффект. В то же время сложно разделить развитие строительной техники на этапы, но с определенной степенью достоверности можно отметить, что изначально развитие бетононасосов и пневмонагнетателей способствовало появлению торкрет-машин и цемент-пушек. Поэтому первым этапом развития можно считать использование в практике строительства пневмонагнетателей и бетононасосов.

Принцип действия пневмонагнетателя заключается в следующем. В нагнетатель загружается бетонная смесь, закрывается конусный клапан и по воздухопроводу в верхнюю часть нагнетателя подается сжатый воздух. Под действием сжатого воздуха бетонная смесь выдавливается в бетоновод и транспортируется к месту укладки. Среди зарубежных производителей пневмонагнетателей следует отметить наиболее известные фирмы «*Plassi alma-coa*» (Франция), «*Embe – elba*», «*Beton – spritz – maschinen*», «*Torcret*» (Германия), «*Machineri continental*» (Великобритания), «*Press – weld*» (США) [7]. Отличие пневмонагнетателей от торкрет-установок заключается в том, что в применении пневмонагнетателей давление, возникающее в трубопроводе гасится при излете специальным устройством – гасителем и бетон укладывается в опалубочную форму для последующего вибрирования (размеры крупного заполнителя могут быть больше, чем у торкрет-бетона). Все выпускаемые нагнетатели могут быть разделены на две большие группы: вертикальные и горизонтальные. Вертикальные нагнетатели, в свою очередь, можно разделить на нагнетатели с подводом воздуха в верхнюю часть нагнетателя и к выходному колену и на нагнетатели с подводом сжатого воздуха в верхнюю часть и к конусному побудителю, расположенному в центре нагнетателя [20]. Также нельзя не отметить, что принципы пневмонагнетания и пневмонанесения стали использоваться не только для бетонных работ, но и при антикорро-

зийной обработке бетона битумной эмульсией, и для изоляционных работ. Анализируя опыт применения пневмонагнетателей и бетононасосов с точки зрения их использования для возведения конструкций на пневмоопалубке, нельзя не сказать о недостатках технологии укладки бетонов: необходимость применения дополнительных опалубочных средств и мероприятий по уплотнению бетона в конструкции. Решение этой задачи привело к появлению и использованию строительной техники, основанной на пневмонанесении бетонной смеси.

Поэтому следующим этапом развития механизации бетонных работ становится появление установок для набрызга растворов и бетонных смесей, так называемых цемент-пушек. Эти установки применяются в подземном строительстве для закрепления трещиноватых скальных пород, создания гидроизоляции и нанесения покрытий, способных воспринимать горное давление [6, 7]. Кроме того, они используются для сооружения промышленных и гражданских зданий, при ремонтных работах, для изготовления железобетонных труб и создания тонкостенных конструкций. В некоторых странах, особенно в США, подобные установки широко используются при облицовке откосов каналов водохранилищ. Принцип действия цемент-пушки заключается в следующем: сухая смесь загружается в машину и далее по материальному шлангу сжатым воздухом (давление 0,5...0,6 МПа) подается к соплу, где затворяется водой.

Для предотвращения засорения распылительных отверстий сопла к нему от водопроводной сети подается вода под давлением на 0,1...0,15 МПа выше давления сжатого воздуха. Если давления в водопроводной сети недостаточно, то используются специальные бачки, в которых необходимое давление поддерживается сжатым воздухом. В сопле происходит смачивание сухой смеси водой, и образовавшаяся бетонная смесь наносится на поверхность. При этом качество торкрет-бетона в значительной степени зависит от скорости выхода материала из сопла. Скорость выхода материала при этом может достигать 100...150 м/с [20]. Толщина слоя за один проход до 5 см, все остальные слои наносятся с интервалом 10 мин. Наибольшее распространение получили цемент-пушки фирмы «*Torcret*» со шлюзовой камерой моделей - №1, BO, S3 - II, BSA - 1 [7]. Цемент - пушка стала прототипом современных торкрет - машин, которые применяют при выполнении покрытий в виде оболочек, что позволяет сэкономить большую часть затрат на оболочку и проконтролировать полноту закрытия стальных элементов, а также степень уплотнения бетонной смеси.

Кроме цемент-пушек производства перечисленных фирм на этом этапе стали появляться новые модели торкрет- и шприц-бетонных машин, таких как *SSB – 04*, *SSB – 22*, *SSB – 22EK* – эти машины пригодны для санирования труб и других бетонных конструкций при сооружении мостов, тоннелей, в энергетическом строительстве, при возведении дымовых труб, а также при реконструкции и усилении конструктивных элементов стен и изготовлении

водонепроницаемых покрытий. Производительность этих машин составляет 60 л/мин. [7]. В одной из строительных фирм - «*Karger и Hauser*» усовершенствовали модель торкрет-агрегата «*Mixocret M 500 E*»; суть этих доработок заключается в том, что прямолинейное движение сухой смеси преобразуется в спиралеобразное, тем самым обеспечивая равномерность распределения внутреннего давления. Помимо этого добавлен предохранительный клапан для предотвращения образования воздушных пробок в системе в момент, когда рабочий объем смеси заканчивается.

Рассматривая возможность применения цемент-пушек и шприц-машин, предварительно можно сделать вывод о сложности применения данных видов машин при возведении конструкций на пневмоопалубке, так как высокие скорости излета бетонной смеси и достаточно большие размеры фракции крупного заполнителя могут привести к повреждению пневмоопалубки. Особенно это нежелательно при возведении конструкций на пневмокаркасной опалубке, что связано со сложностью ремонта и восстановления пневматических модулей. К тому же опыт применения данных агрегатов связан с частыми выходами из строя в связи с образованием в материальных шлангах пробок из бетона, поэтому при применении подобных машин довольно сложно подобрать технологические режимы их использования и составы бетонной смеси. Данные утверждения позволяют говорить о нерациональности их использования при возведении строительных конструкций на пневматической опалубке.

Следующим этапом развития пневмонагнетательной техники становится появление торкрет-машин как следствие усовершенствования технологических особенностей применения цемент-пушек. Широкое развитие на сегодняшний день получило использование торкрет-агрегатов для усиления изоляционных и теплоизоляционных свойств штукатурок наружных стен и иных покрытий. Это стало особенно актуально в настоящее время при ремонте и реконструкции зданий различного назначения. В настоящее время разрабатываются технологии с применением нанесения различных изоляционных материалов, таких как *Vupsoterm* и *Terfix Drywit* [8, 21].

Однако нельзя не отметить, что использование торкрет-машин возможно не только для изготовления изоляционных покрытий, но и для возведения инженерных сооружений, строительных конструкций. Поэтому необходимо рассмотреть технические возможности существующих на сегодняшний день торкрет-агрегатов с целью анализа их возможностей применительно к возведению сооружений на пневмоопалубке.

Для нанесения торкрет-бетона (набрызг-бетона) при помощи энергии сжатого воздуха применяют специальные машины и установки, которые классифицируют следующим образом [7]:

- по влажности смеси, загружаемой в машину: машины, работающие «сухим» способом, и машины, работающие «мокрым» способом;

- по характеру работы: машины непрерывного действия и машины циклического действия;

- по крупности заполнителя: машины, работающие на заполнителях крупностью до 8 мм; машины, работающие на заполнителях крупностью до 20 мм; машины, работающие на заполнителях крупностью до 40 мм.

Московским ПО «Строймаш» для пневмонабрызга разработаны машины СБ – 177, СБ – 67, СБ – 67А, СБ – 66. Так, бескамерная машина СБ – 177 относится к машинам непрерывного действия (цемент-пушка), работает на сухих смесях максимальной крупностью заполнителя не более 10 мм.

Принцип работы бескамерной торкрет-машины (рис.4.1): сухая смесь вяжущего и заполнителя подается на сетку загрузочного бункера, просеивается через загрузочное отверстие и попадает в отверстия шлюзового барабана, который переносит ее в загрузочные отверстия нижнего уплотнительного диска, через которые смесь поступает в выпускной патрубок машины. Под действием сжатого воздуха смесь из выпускного патрубка по гибкому рукаву – материалопроводу транспортируется в виде аэровзвеси к соплу. В сопле смесь смешивается с водой и с большой скоростью наносится на бетонируемую поверхность, образуя плотный слой торкрета.

ТОРКРЕТ – МАШИНА

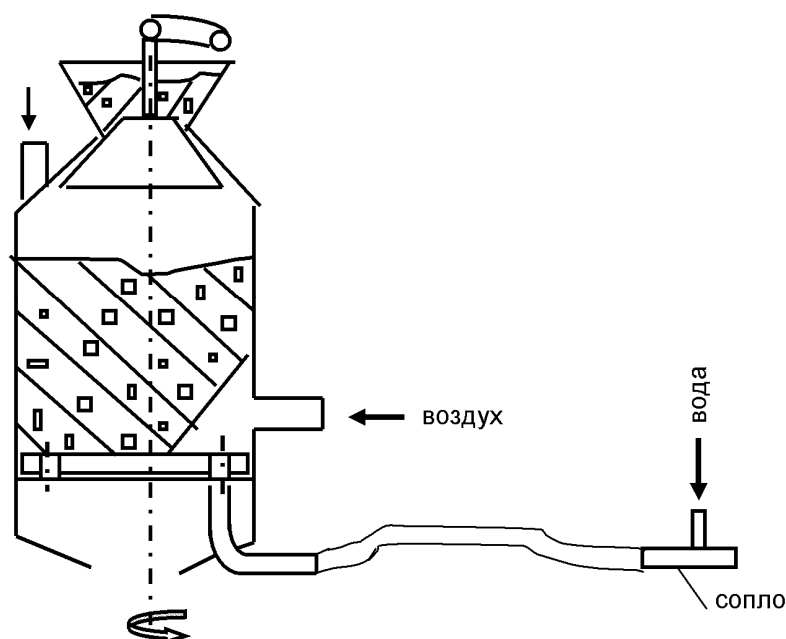


Рис.4.1. Схема торкрет-машины

Опыт показал, что основным недостатком цемент-пушек со шлюзовым барабаном является интенсивный износ резиновых дисков, строгие требования к заполнителям бетонной смеси по влажности и крупности частиц, сравнительно высокая материалоемкость машины [7]. Из зарубежных установок подобного типа наиболее современными следует считать установки, выпускаемые фирмами «*Torkret*», «*Beton – schpritz – maschinen*».

Фирмы США, в отличие от фирм Западной Европы, идут по пути агрегатирования установок, снабжая их всем необходимым для дозирования, перемешивания и непрерывного набрызга бетонной смеси. Фирма «*Air – Placement – Equipment*» выпускает серию установок с двумя соплами производительностью от 3,8 до 15,3 м³/ч, смонтированных на шасси грузового автомобиля грузоподъемностью 1,5 т. Установки снабжены смесителем, ленточным транспортером и материальным шлангом [7].

Существуют машины со сменными шлюзовыми барабанами, в зависимости от применяемого барабана меняется производительность машины (от 3 до 12 м³/ч).

Анализ технологических характеристик машин позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на ряд положительных качеств торкрет-агрегатов (высокая производительность, непрерывность подачи бетонной смеси), данная конструкция торкрет-машин имеет ряд недостатков, таких, как высокая изнашиваемость основных рабочих узлов, возможность возникновения пробок как в шлюзовом барабане, так и в материальном шланге.

Помимо этого сложность подбора необходимой консистенции бетонной смеси в процессе производства работ позволяет говорить о несовершенстве технологических особенностей применения шлюзовых аппаратов.

Вследствие этого возникает необходимость в производстве установок с другими механическими принципами дозирования и подачи бетонных смесей. Одной из таких установок является агрегат со шнековой подачей материала. Подобные агрегаты производит фирма «*Aliva*» (Швейцария), которая выпускает несколько моделей: BS - 12, BS - 200 [39]. В установке BS-12 сухая смесь загружается в открытый приемный бункер, в середине которого расположена вертикальная труба с заключенным в ней шнеком. В нижней части бункера находятся лопасти, подающие при своем вращении материал к шнеку, который поднимает его к нагнетательной камере. В этой камере смесь подхватывается воздухом и транспортируется по материальному шлангу к соплу. Привод шнека осуществляется от электрического или пневматического двигателя. Приводные механизмы установки расположены в пыленепроницаемых масляных ваннах. Шнек и другие детали, соприкасающиеся со смесью, имеют покрытие из твердых сплавов, предохраняющее их от истирания. Однако в данной конструкции проблема износа трущихся узлов решена за счет удорожания стоимости самой машины, что привело к необходимости создания концептуально иного подхода к решению технической задачи по подаче и дозированию материалов.

Эта проблема была успешно решена в свое время в СССР. Так, в НИИСП Госстроя Украины была создана бескамерная машина непрерывного действия – установка для эжекционного торкретирования УЭТ (рис.4.2).

Принцип действия УЭТ основан на способности струи сжатого воздуха, выходящей из сопла эжектора с большой скоростью (200...300 м/с), транспортировать сухую смесь по материалопроводу и обеспечить ее на-

брызг. Аппарат состоит из колесной тележки, на раме которой установлен бункер с закрепленным на нем пневматическим вибратором для предотвращения сводообразования сухой смеси в бункере. Над загрузочным отверстием установлена сеть, препятствующая попаданию в аппарат заполнителей крупностью более 10 мм. Выпускное отверстие бункера сообщается с эжекционной камерой через промежуточную камеру, внутри которой установлен затвор, состоящий из четырех створок, закрепленных на осях. При повороте створок затвора образуется выпускная щель, обеспечивающая требуемую подачу сухой бетонной смеси из бункера. Внутри эжекционной камеры установлен эжектор, к которому подводится сжатый воздух. К эжекционной камере подведен рукав для подачи сухой бетонной смеси к соплу. Сопло установлено на конце материалопровода. Сухая смесь, загруженная через сито в бункер, откуда она через регулирующую щель затвора непрерывно и равномерно подается под действием энергии пневмовибратора и энергии разрежения, возникающей при истечении струи воздуха из эжектора, поступает в эжекционную камеру и оттуда к соплу.

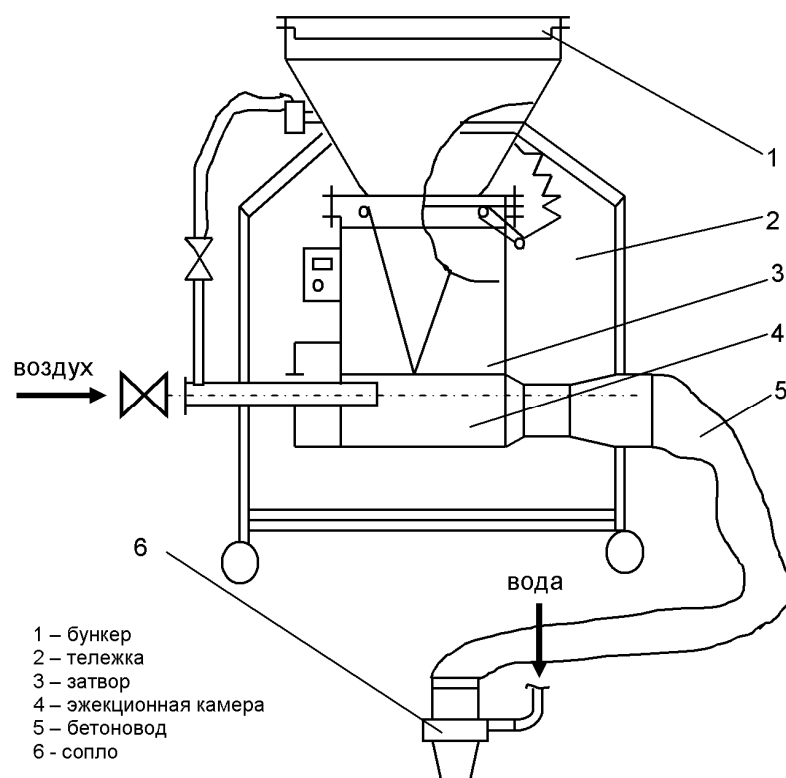


Рис.4.2. Схемы установка для эжекционного торкретирования УЭТ

Достоинства аппарата УЭТ - возможность плавной регулировки, отсутствие трущихся частей, простота конструкции, малая масса (60 кг), равномерность нанесения, использование одного вида энергии сжатого воздуха [7]. Кроме сказанного, торкрет-бетон, уложенный данной машиной, имеет ряд ценных свойств: повышенную механическую прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и др.

В «Мостотряде - 3» Дорстройтреста была разработана, изготовлена и внедрена виброэжекционная торкрет-машина (ВЭТ-машина) для нанесения защитного слоя при ремонте и строительстве искусственных сооружений. Торкрет-бетон изготовлен из цемента М 300, щебня крупностью до 25 мм и песка.

Малые габариты и малая масса ВЭТ-машины определяют простоту ее транспортировки. Безотказная работа со смесями любой влажности – главное преимущество ВЭТ-машины по сравнению с другими конструкциями торкрет-машин. Как показали результаты исследований, при практическом использовании торкрет-бетона, приготовленного ВЭТ-машиной, его прочностные характеристики на 15...25 % выше, чем у вибрированных бетонов.

Дальнейшим развитием конструкции торкрет-машин является торкрет-машина с непрерывной загрузкой [4] (рис.4.3), состоящей из рабочей емкости 3 с загрузочным бункером 1 и колоколообразным затвором 2, двуплечего рычага 13 с противовесом 11, трубопровода 10 и клапанной камерой 9 для перекрытия подачи воздуха в рабочую емкость во время загрузки. В нижней части рабочей емкости установлен эжектор 8, трубопровод 7 и сопло 6, четырех пружинных блоков 4 под воздействием вибратора 5. В верхней части рабочей емкости установлен воздушный кран 12.

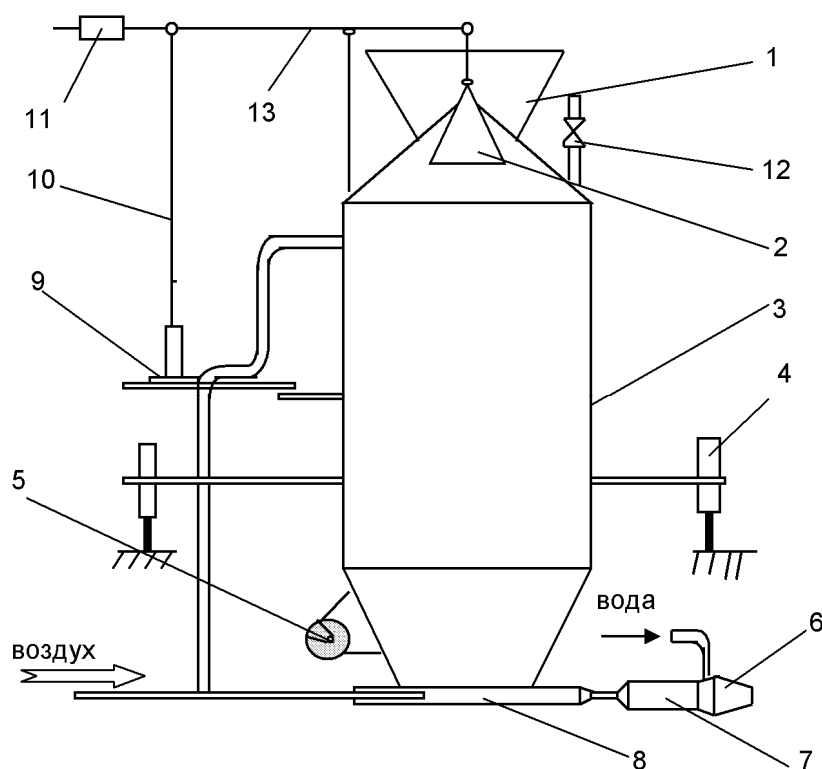


Рис.4.3. Схема торкрет-машины с непрерывной загрузкой

Данный вид машин по сравнению с предыдущими конструкциями торкрет-агрегатов технологически более эффективен, так как простота дозирования и транспортировки материала является одним из важных преимуществ.

Однако, как и описанные ранее машины, этот класс аппаратов относится к машинам для «сухого» торкретирования, поэтому к отрицательным технологическим издержкам её использования относят потери несмоченного материала, вследствие пыления при вылете из сопла. К тому же, как и для всех машин для «сухого» торкретирования, для ВЭТ-машины характерно появление отскока используемого материала при его нанесении. Причем отскок может достигать 40%, что значительно снижает экономический эффект данного технологического метода - нерациональный расход материала.

Технические характеристики торкрет-машины с непрерывной загрузкой.

Производительность, м ³ /ч	2,5
Диаметр трубопровода, мм	50
Крупность заполнителя, мм	20
Максимальная дальность транспортировки, м	
по горизонтали	40
по вертикали	15
Давление сжатого воздуха, МПа	0,5
Давление воды, МПа	0,2
Габаритные размеры, мм:	
длина	1100
ширина	840
высота	1400
Масса, кг	140

Явление отскока при торкретировании – это негативное следствие со- вмещения технологических процессов укладки и уплотнения бетонной смеси. Известно, что применение эффективных опалубок, а к ним относятся и пневмоопалубки, предполагает торкретирование рабочей палубы.

Пневмоопалубка податлива, причем при увеличении избыточного да- вления жесткость рабочей поверхности пневмоопалубки не будет адекватна жесткости щитовых опалубок или иным характерным для торкретирования поверхностям. Поэтому можно предположить, что снижение отскока при по- датливых поверхностях можно уменьшить изменением влажности бетонной смеси (определяемой водо-цементным отношением), скорости её полета и изменением деформативных свойств поверхности нанесения.

В этой связи приобретают актуальность установки для «мокрого» тор- кретирования. Сущность «мокрого» способа состоит в том, что бетонная смесь растворомасосом подается в смесительную камеру, где она подхватыва- ется сжатым воздухом и во взвешенном состоянии по материалопроводу транспортируется к конусной насадке, откуда со скоростью 80...120 м/с по- ступает на бетонируемую поверхность. При движении смеси во взвешенном состоянии по материалопроводу, особенно при набрызге, от смеси отделяется и уносится в атмосферу часть несвязанной воды затворения, вследствие чего на бетонируемую поверхность смесь поступает менее подвижной, чем при приготовлении и транспортировании. Преимущества этого способа заключа- ются в постоянстве состава укладываемой смеси, возможности использовать

заполнители с влажностью более 6...7 %, значительно меньших потерях при отскоке. Смесь сохраняет заданное водоцементное отношение, являющееся одним из основных факторов, обеспечивающих требуемые физико-механические характеристики уложенного бетона. Значительно уменьшается запыление рабочего места, и снижается общее туманообразование. Потери составляющих на отскок сокращаются до 4...6 %. Затраты труда на 1 м³ уложенного бетона снижаются на 20...30 % в сравнении с «сухим» торкретированием. Квалификация обслуживающего персонала может быть ниже. Значительно уменьшается накопление статического электричества, возникающего при движении смеси по материалопроводу. Недостатком метода является повышенный на 30...40 % расход сжатого воздуха [7, 8].

Для производства набрызг-бетонных работ «мокрым» способом необходим растворонасос с пневмоприставкой, компрессорная станция производительностью 9...10 м³/мин, бетоносмеситель со скиповым подъемником, вибросито с ячейками 8х8 мм, приемный бункер, комплект гибких рукавов для подачи сжатого воздуха и бетонной смеси, сопла для нанесения торкрета. Для нанесения торкрет-бетона можно использовать установку «Пневмобетон» (ПБ – 1), оборудованную одной или двумя смесительными камерами для образования раствора-воздушной смеси.

Установка ПБ – 1 состоит из рамы на салазках с размещенной на ней рабочей камерой (рис. 4.4), в которой смонтированы побудитель, загрузочный люк с крышкой пневмосистемы, привода бетоновода.

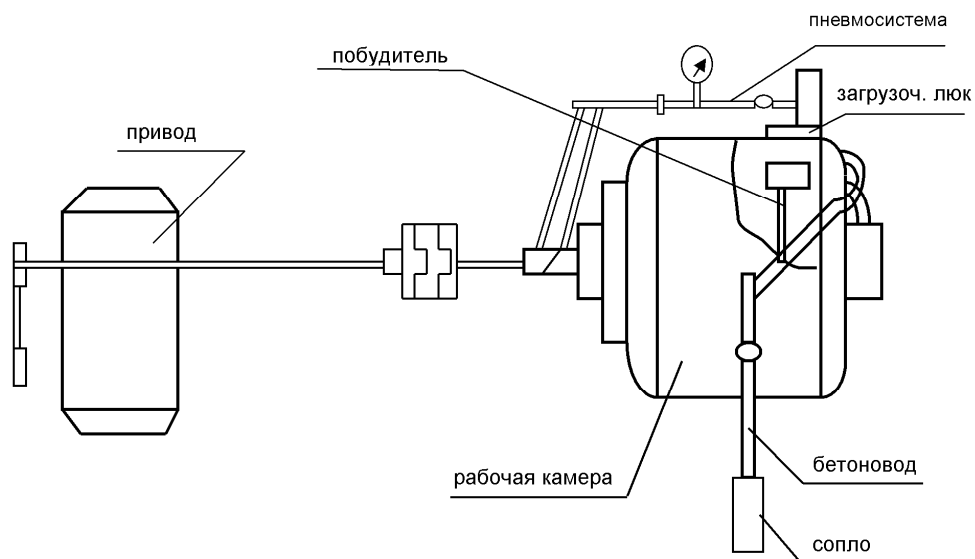


Рис.4.4. Схема установки ПБ – 1

Работает установка следующим образом: рабочую камеру на 60...70 % полного объема через загрузочный люк заполняют бетонной смесью, подвижностью не менее 4...6 см по погружению стандартного конуса. Включают побудитель и после приготовления смеси требуемого состава и подвиж-

ности, рабочую камеру герметично закрывают крышкой и подают сжатый воздух от компрессора. Лопасть побудителя циклически перекрывает выходные отверстия рабочей камеры, препятствуя прохождению бетонной смеси в гибкий рукав с присоединенным соплом для нанесения смеси. Одновременно в рукав на выходе из рабочей камеры через смесительную камеру подается сжатый воздух, который аэрирует бетонную смесь и транспортирует ее во взвешенном состоянии к соплу.

Выбор конструкции установки определяют условиями производства работ и типом сооружения, при возведении которого она будет использоваться. В качестве приемно-перемешивающего устройства рекомендуется применять растворосмеситель СБ–97 вместимостью барабана 325 дм³ или бетоносмеситель СБ–80 вместимостью 250 дм³, оборудованные скиповым подъемником, а также приемно-перемешивающее устройство установки УПТЖР–2.5, конструкции Главмосстроя. Материальный трубопровод монтируют из отдельных рукавов типа Ш–15 с внутренним диаметром 50 или 63 мм (в зависимости от режима работы) при помощи специальных соединителей, которые не уменьшают поперечное сечение трубопровода. На вертикальных участках при строительстве трубопровод собирают из стальных инвентарных патрубков того же сечения.

Сопло, закрепленное на конце материального провода, предназначено для увеличения скорости смеси до 70...90 м/с и образования распыленного факела. Конфигурация и геометрические размеры сопла изменяются в зависимости от вида работ, применяемых материалов и положения сопла по отношению к поверхности. Эти параметры определяют опытным путем [20, 21].

Варианты конструкции наиболее распространенных типов сопел приведены на рис. 4.5.

Необходимый расход сжатого воздуха при работе установки «Пневмобетон» ПБ-1 составляет 7...9 м³/мин, рабочее давление до 0,7 МПа. Для получения сжатого воздуха применяют передвижные компрессорные установки типа ДК – 9М производительностью до 10 м³/мин. В некоторых случаях при большой длине (более 60 м) материального трубопровода необходимо использовать одновременно две компрессорные установки. Воздух, подаваемый в трубопровод, должен быть чистым и не содержать примесей.

Перед началом работы определяют фактические значения производительности и давления, создаваемого компрессорной установкой, по манометру, расположенному на установке «Пневмобетон».

Производительность подсчитывают по формуле

$$П = \frac{VP}{T}, \quad (4.1)$$

где П - производительность компрессора, м³/мин;

V - объем воздухоборника и воздушного трубопровода, м³;

P - рабочее давление воздуха, МПа;

T - время наполнения воздухоборника до рабочего давления P, мин.

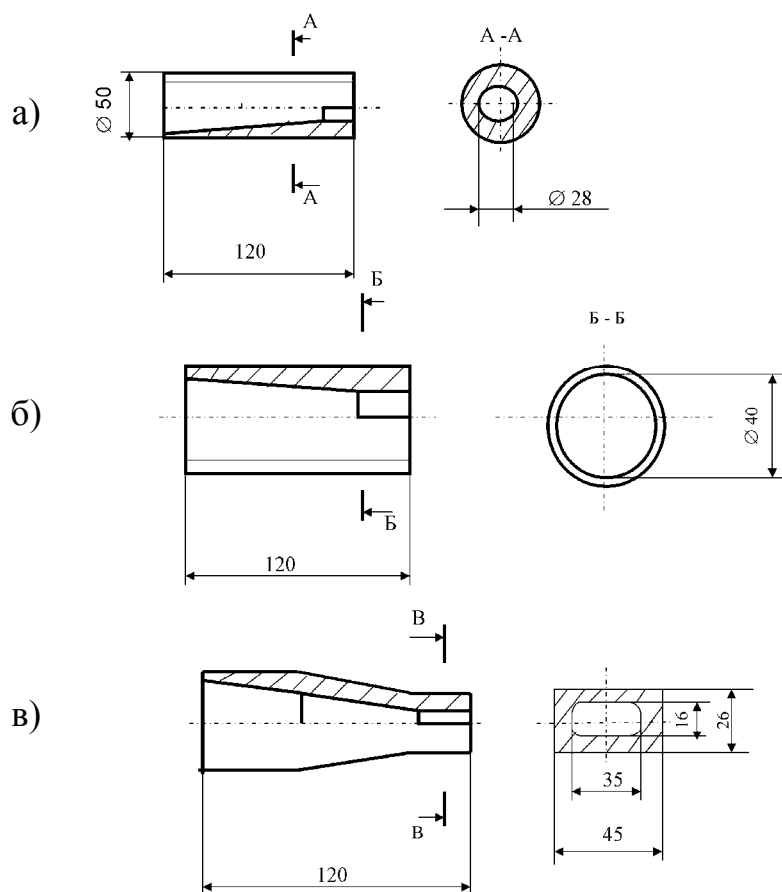


Рис.4.5. Варианты конструкции сопла для нанесения бетонных смесей:
*а – на вертикальную поверхность; б – на горизонтальную поверхность сверху вниз;
 в – при замоноличивании стыков*

Воду для установки ПБ –1 подводят от водопроводной сети. Давление в сети и диаметр подводящего трубопровода должны обеспечивать расход воды не менее 60 л/мин. При отсутствии водопроводной сети допускается подача воды из емкости, оборудованной насосом. Дозирование воды при приготовлении бетонной смеси производят при помощи водомера, входящего в комплект приемно-перемешивающего устройства.

По экономичности расхода материала и постоянству состава наносимой смеси (сохранение гранулометрии и водо-цементного отношения) следует отметить установки, действующие по принципу пневмобетонирования, а именно установку «Пневмобетон» (ПБ – 1) (см.рис.4.4). При работе с этой установкой величина отскока используемого материала уменьшается до 3... 5 %. К недостаткам установки следует отнести повышенный расход сжатого воздуха, что приводит к увеличению затрат на производство работ.

Выбор оптимального комплекта оборудования при производстве набрызг-бетонных работ является одним из важнейших вопросов технологии возведения конструкций из торкрет-бетона.

Поскольку установки для пневмобетонирования позволяют максимально снизить отскок используемого материала, можно говорить о целесообразности их применения при возведении сооружений с использованием пневматической опалубки. Данные установки надежны в работе, имеют минимальный процент образования пробок из бетона в пневмосистеме, что свидетельствует о технологической эффективности их использования.

Подобные установки применялись при описанной ранее технологии возведения армоцементных сводов на пневматической опалубке и хорошо себя зарекомендовали [1, 16, 17, 36]. Анализ технических возможностей данных агрегатов показал, что при возведении конструкций на воздухоопорных опалубках применялись установки «мокрого» типа, выпускаемые отечественной промышленностью, причем помимо положительных качеств вскрывается масса отрицательных, таких как достаточно большой отскок материала; пробки и забивания материальных шлангов вследствие неравномерной подачи бетона; возникновение бетонных «ложек» на поверхности возводимой конструкции. В настоящее время появились торкрет-машин, позволяющие повысить эффективность использования пневматических опалубок. При этом повышение эффективности достигается за счет существенного снижения влияния торкретного факела на устойчивость и деформативность пневматических модулей, что позволяет сократить затраты на дополнительное раскрепление опалубки, улучшить качество поверхности и снизить отскок материала до минимума в связи с более плавным варьированием состава и скорости нанесения бетонной смеси.

В настоящее время налажен выпуск универсальных торкрет-машин нового поколения, но технологические особенности их эксплуатации мало изучены.

Одной из таких машин является установка для пневмонанесения бетонной смеси Р13 (рис.4.6), технические характеристики которой представлены ниже.

Установка Р13 представляет собой комплекс устройств и узлов, установленных на одной раме с пневмоколесным шасси. Она состоит из растворомешалки со шлюзовым затвором, при помощи которого приготовленная смесь поступает в усреднитель. После дополнительного перемешивания в усреднителе смесь увлекается рабочим плунжером растворонасоса через систему обратных клапанов в шланг. По этому шлангу смесь поступает к соплу, где она смешивается со сжатым воздухом, подаваемым компрессором, чем принципиально отличается от установок «Пневмобетон».

Компрессор, двухплунжерный растворонасос, усреднитель и мешалка с виброситом приводятся в движение электродвигателем через систему шкивов, муфт, редукторов и клиноременных передач. Растворонасос имеет два плунжера: один рабочий для подачи бетонной смеси по шлангу, второй - компенсирующий неравномерность работы рабочего плунжера и тем самым

обеспечивающий непрерывную подачу мелкозернистой бетонной или рас-
творной смеси.

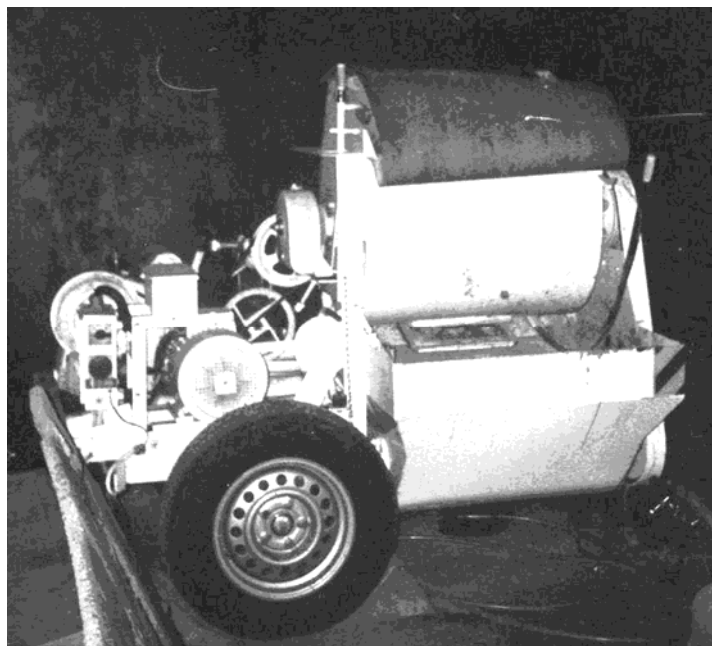


Рис.4.6. Установка для пневмонанесения бетонной смеси Р13

Этот агрегат компактен, мобилен и универсален. К тому же возможность варьирования производительностью этого агрегата открывает широкий спектр области его применения. Основой эффективного использования установки Р13 является обоснованный выбор рациональных технологических режимов нанесения и укладки бетона.

Нанесение смеси данной установкой аналогично пневмобетонированию, но отличается от него в первую очередь меньшими скоростями излета и самим принципом транспортирования и нанесения торкретной смеси. Отличие заключается в том, что сжатый воздух подается не только перед транспортированием бетонной смеси по шлангу, но и перед самым излетом, смешиваясь в смесительной камере сопла агрегата, что существенно повышает надежность работы установки Р13 по сравнению с рассмотренными выше установками для пневмобетонирования.

Практический опыт применения пневмобетонирования [19, 1,2,5,16,17] позволяет сформулировать основные технологические принципы ведения работ, которые справедливы и для установок Р13. Известно, что пневмобетонирование целесообразно выполнять при толщине конструкций до 150 мм [12]. В отдельных случаях при соответствующем технико-экономическом обосновании допускается изготовление таким способом конструкций большей толщины.

Технические характеристики установки для пневмонанесения бетонной смеси Р13

Производительность, м ³ /ч	2...9
Дальность подачи по горизонтали, м	500
Дальность подачи по вертикали, м	до 60
Мощность электродвигателя, кВт	11
Род тока	переменный трехфазный, 380 В
Количество передач	3
Производительность компрессора, м ³ /ч .	10

Сегодня у отечественной промышленности достаточно большая номенклатура выпускаемых машин для торкретного нанесения бетонной смеси. Конструктивно-технологические характеристики некоторых из них представлены ниже.

Установка торкретирования бетонных поверхностей (набрызг-бетона) БМ-86 (ПО «Стройтехника»)



Установка торкретирования бетонных поверхностей БМ-86 (рис.4.7) состоит из компрессора, цемент-пушки, шлангов для смеси, воздуха, воды, сопла, резервуара для воды. Установка предназначена для бетонных работ, возведения монолитной бетонной крепи методом набрызга бетона (торкретирования) на поверхность.

Из загрузочного бункера установки торкретирования подается сухая смесь песка, цемента и щебня, которая, проходя через лопастной дозатор, подхватывается струей сжатого воздуха и поступает в сопло. Там составляющие раствора (бетона) смешиваются с водой и с большой скоростью выбрасываются на поверхность, подлежащую обработке.

Технические характеристики установки торкретирования БМ – 86

Производительность по сухой смеси, м ³ /час....	5...6,6
Максимальная дальность подачи, м	300
Максимальная высота подачи, м	100
Максимальная фракция заполнителя, мм	30
Условный проход материального шланга, мм	65
Потребное давление сжатого воздуха, МПа ...	0,3...0,5
Расход сжатого воздуха, м ³ /мин	9
Мощность электродвигателя, кВт	3
Габариты, мм, (не более)	
длина	1290
ширина	820
высота	1445
Загрузочная высота, мм	1340

Торкрет-машины СБ-67Б1 и СБ-67Б2 (ПО «Стройтехника»)

На рис. 4.8 представлены схема торкретирования и общий вид торкрет-машины СБ-67Б1.



Рис.4.8. Схема торкретирования и общий вид торкрет-машины СБ-67Б1

Ниже приведены технические характеристик торкрет-машин для набрызга цемента и раствора СБ-67Б1.

Торкрет-машина СБ-67Б2 в отличии от торкрет-машины СБ-67Б1 имеет шахтное исполнение и отличается габаритами, в остальном их характеристики одинаковы.

Технические характеристики торкрет-машины СБ-67Б1 для набрызга цемента и раствора

Производительность по загрузке сухой смеси, м ³ /мин ...	4
Емкость установки по загрузке, л	320
Рабочее давление сжатого воздуха, МПа	0,6
Расход воздуха, м ³ /мин	8
Дальность подачи бетонной смеси при прямолинейном бетонировании (макс), м	
по горизонтали	300
по вертикали	45
Крупность фракций заполнителя, мм	20
Мощность электродвигателя привода питателя, кВт	2,2
Габаритные размеры, мм	
длина	1460
ширина	1100
высота	1760
Масса, кг	680

*Торкрет-установки СО-49ПБН и СО-50ПБН
(ООО «ЗСТМ СТРОЙМАШ-ЦЕНТР»)*

Общий вид торкрет-установок СО-49ПБН и СО-50ПБН представлен на рис.4.9; 4.10.

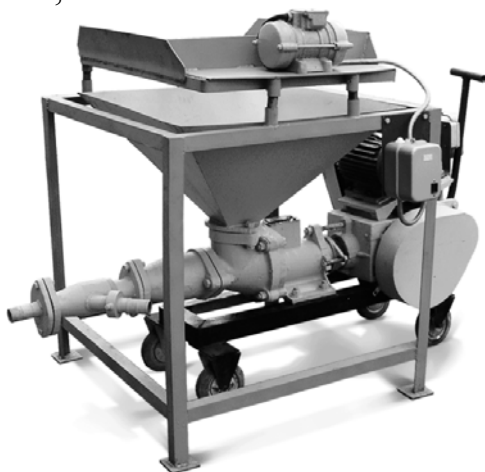


Рис.4.9. Торкрет-установка
СО-49ПБН



Рис.4.10. Торкрет-установка
СО-50ПБН

Пневмобетонасосы СО-49ПБН и СО-50ПБН предназначены для механизации следующих технологических процессов:

- транспортирования и послойного нанесения (торкретирования) на поверхность строительных растворов, в том числе цементно-песчаных непластифицированных и быстросхватывающихся без замедлителей схватывания, при минимальной подвижности 6 см погружения стандартного конуса и наибольшем размере фракции заполнителя 10 мм;
- то же для песчаных и мелкозернистых бетонных смесей;
- нагнетания (инъектирования) растворов в различные полости и конструкции из бетона, камня, грунта и других материалов с целью их упрочнения.

Пневмобетонасосы применяются на объектах, обеспеченных электроэнергией и водой, при температуре окружающей среды не ниже 0°C в закрытых помещениях или под навесом.

Технические характеристики торкрет-установок СО-49ПБН и СО-50ПБН.

Производительность, м ³ /час	
- при подвижности раствора 11 см и более	6
- при подвижности раствора 6 см	4
Наибольшее давление, развиваемое растворонасосом, МПа .	1,5
Количество ходов плунжера в минуту (частота вращения коленчатого вала), об/мин	103
Потребное количество сжатого воздуха, м ³ /мин	
- для набрызга при дальности 40 м и высоте подачи 10 м	9
- для транспортирования при дальности до 150 м и высоте подачи 50 м	9
- для набрызга на высоте подачи более 10 м	18

- для транспортирования на высоту более 50 м	18
Номинальное давление сжатого воздуха, МПа	0,63
Наибольшее допустимое давление сжатого воздуха, МПа ...	1,3
Наибольшая высота подачи при расходе воздуха 18 м ³ /мин (силой сжатого воздуха)	
- при набрызге	50
- при транспортировании	120
Дальность подачи по обычной схеме (силой плунжера), м	
- по горизонтали	150
- по вертикали	35
Электродвигатель	
- мощность, кВт	7,5
- число оборотов в минуту	1500
Габариты, мм	
- длина	1900
- ширина	1150
- высота	1200
Масса, кг	440

Установка приготовления и подачи раствора УППР-1 (ООО «ЗСТМ СТРОЙМАШ-ЦЕНТР»)

Установка приготовления и подачи раствора УППР с пневмобетононасосом СО-50ПБН (торкрет-установка, рис.4.11), в дальнейшем «установка», состоит из бетоносмесителя СБ-82, подставки бетоносмесителя, пневмобетононасоса СО-50 ПБН.

Предназначена для приготовления бетонных смесей и строительных растворов из сухих компонентов, процеживания его с помощью вибросита и нанесения его на обрабатываемую поверхность методом торкретирования.

Условия работы: под навесом при температуре окружающего воздуха от +5°С до +40°С, относительной влажности до 80% и высоте над уровнем моря до 1000 м.

Технические характеристики установки УППР – 1.

Объём готового замеса бетонной смеси, м ³	0,165
Объем по загрузке сухими составляющими, м ³	0,265
Производительность, м ³ /час	3...4
Общая потребляемая мощность, кВт	16,8
Число циклов работы в час, (не менее)	12
Габаритные размеры установки в сборе, мм	
- длина с опущенным ковшом	4300
- ширина	2150
- высота с поднятым ковшом	3300
- высота подставки бетоносмесителя	1300
Масса, кг	
- масса в сборе, кг	2350
- масса бетоносмесителя, кг	1400
- масса подставки, кг	485

- масса насоса, кг	440
Производительность, м ³ /час	4...6
Дальность подачи раствора, м, (не менее)	
- по вертикали	100
- по горизонтали	300
Мощность эл. двигателя, кВт	7,5

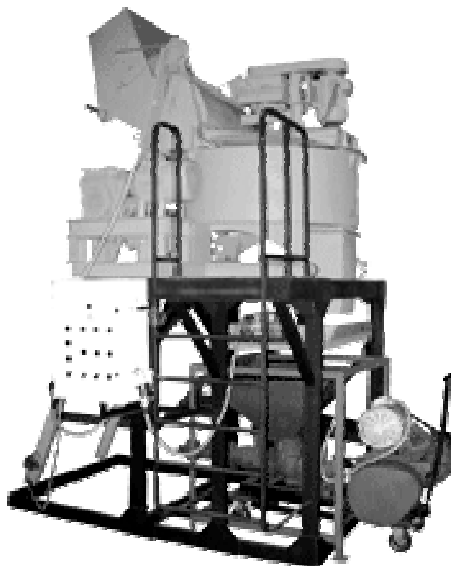


Рис.4.11. Установка приготовления и подачи раствора УППР с пневмобетононасосом СО-50ПБН

Торкрет-установка АС-1 (Украина)

Торкрет–установка АС-1 (рис.4.12) производства фирмы "Альпсервис" предназначена для нанесения бетонных смесей методом сухого торкретирования и может применяться при креплении горных выработок, ремонте гидротехнических и инженерных сооружений, а также для проведения ремонтных работ в строительстве. Установку можно использовать и для нанесения жаростойких бетонных смесей или для транспортировки сыпучих материалов на расстояния до 80 м.

Торкретирование осуществляется так называемым сухим способом. Поток материала из распылительного сопла является непрерывным и подаётся со скоростью, достаточной для полного уплотнения слоя бетона. Для упрощения работы с упакованными в мешки материалами загрузочная воронка установки оснащена насадкой с ситом и пилой для резки мешков.

При производстве работ по торкретированию кроме торкрет-установки необходимо иметь: водяной бак с насосом (или централизованный водопровод) и компрессорную станцию (передвижной компрессор) с производительностью не менее 5 м³/мин с давлением 0,5-0,6 МПа. При наличии сети централизованного воздухообеспечения установка должна быть подключена к ней при условии обеспечения в сети необходимого давления 0,5-0,6 МПа .

Установка для торкретирования бетонных смесей выпускается с электрическим двигателем, на колёсном шасси с литыми резиновыми колёсами.

В комплекте с установкой поставляются основные принадлежности для использования транспортных шлангов различного диаметра (Ду 32, Ду 42).

Установка оснащена вариаторной коробкой передач, которая позволяет плавно изменять количество оборотов барабана для регулирования производительности.

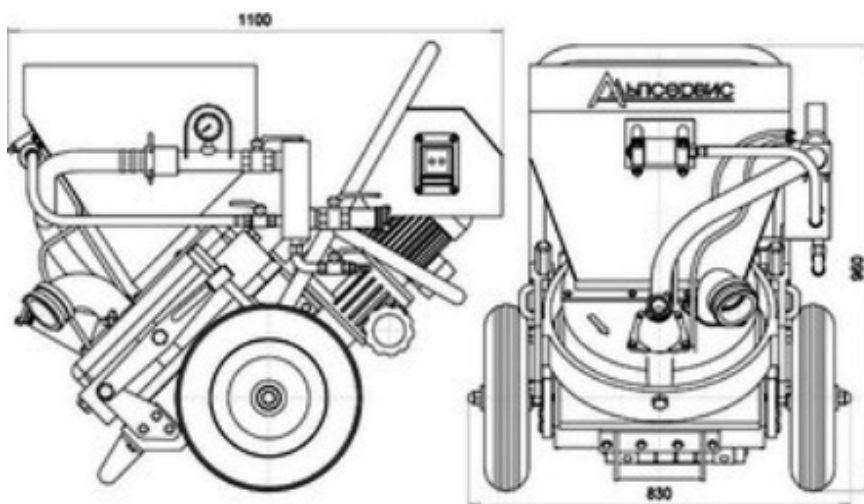


Рис.4.12. Общий вид установки АС-1

Основными преимуществами установки АС-1 являются:

- мобильность и компактность (вес 290 кг, размеры: 1100x830x960 мм);
- возможность непрерывной работы (в отличие от агрегатов периодической загрузки) ;
- наличие вариаторной коробки передач, позволяющей регулировать производительность аппарата;
- возможность работы в режиме «старт – стоп»;
- простая очистка (продувка) аппарата и редкое засорение шлангов;
- длительный срок эксплуатации аппарата по сравнению с аналогами.

Технические характеристики установки АС-1.

Теоретическая производительность, м ³ /час	0,5...2,5
Объём барабана, дм ³	3,0
Сечение транспортных шлангов, мм	Ø 32 – 42
Максимальный размер частиц транспортируемого материала, мм	8
Транспортное расстояние, по горизонтали, м	до 200
Транспортное расстояние, по вертикали, м	до 100
Частота вращения барабана, мин ⁻¹	3,8...18
Давление воздуха, МПа	0,5...0,6
Расход воздуха при транспортировке сухой смеси на расстояние 40 м, м ³ /мин	4...8

Мощность электродвигателя, кВт	2,2
Подключение к электросети	3 х 380 В / 50 Гц
Основные размеры, мм	
- длина	1100
- ширина	830
- высота с ситом	960
Вес (без принадлежностей), кг	290

Торкрет-установка SSB 14 (Чехия)

Торкрет установка SSB 14 (рис.4.13) данного типа предназначена для выполнения работ по сухому торкретированию, таких как санация бетонных конструкций, ремонт и реставрация бетонных поверхностей и т.д. Установки данного типа рекомендуются для торкрет-работ, при которых толщина наносимого слоя не превышает 50 - 70 мм, так как установка имеет сравнительно с торкрет-установкой SSB 24 небольшую производительность.



Рис.4.13. Общий вид торкрет-установки SSB 14

Преимущества:

- легкость манипуляции во время работы благодаря малому весу машины;
- плавная регулировка производительности (исполнение STANDARD и COM);

- ременная передача, предотвращающая повреждение привода в случае нестандартной остановки машины;
- дистанционное управление, которое дает возможность обслуживающему персоналу у распылителя регулировать производительность (исполнение COM-F);
- быстрое и простое окончание работы без трудоемкой чистки машины;
- возможность подачи бетона на большое расстояние и недоступные места (горизонтально до 300 м, вертикально до 100 м);
- большой срок службы изнашиваемых частей (уплотнительной прокладки и дозирующего барабана) благодаря использованию центрального смазывания;
- низкие эксплуатационные затраты.

Установки SSB 14 выпускаются в различных модификациях (рис.4.14) с различным приводом и регулировкой производительности.



Рис.4.14. Общий вид торкрет-установок SSB 14 различных модификаций

Производительность машины регулируется:

- переключением оборотов на переключателе (SSB 14 DUO) ;
- механически вариаторным шкивом (SSB 14 STANDARD) ;
- посредством регулировочного колесика вариатора (SSB 14 COM-V) ;
- дистанционным управлением частотного преобразователя (SSB 14 COM-F) ;
- краном, который управляет воздушным мотором (SSB 14 COM-A) .

Технические характеристики торкрет-установки SSB 14.

Производительность, м ³ /ч	0,5...3
Потребление воздуха при расстоянии подачи 40 м, м ³ /мин	2...5
Давление воздуха, МПа	0,5...0,6
Мощность электромотора, кВт	1,5; /1,35/ 1,87
Подсоединение к электрической сети	3× 380V / 50 Гц

Внутренний диаметр транспортировочных шлангов Ø, мм	25, 32, 40, 50
Максимальный размер фракции заполнителя, мм	
для Ø 40, 50	макс. 16
для Ø 25, 32	макс. 8
Расстояние подачи по горизонтали, м	макс. 300
Длина, мм	1000
Ширина, мм	780
Высота, мм	980
Масса (без принадлежностей), кг	300

*Установка для "мокрого" торкретирования Aliva AL-2000
со смесителем AL-1900*

Смеситель AL-1900 установки Aliva AL-2000 представлен на рис.4.15.



Рис.4.15.Смеситель AL-1900

**Технические характеристики установки для "мокрого"
торкретирования Aliva-2000**

Производительность, м ³ /ч	0,3...2,4
Расстояние подачи по горизонтали, м	до 70
Давление насоса, МПа	макс. 3,0
Размеры, мм	1900х620х620
Напряжение питания двигателя	380 В/50 Гц
Объем бака, дм ³	100
Вес, кг	140

Aliva-302 - Телескопическая торкрет-стрела

Установка Aliva-302 (рис.4.16) является малогабаритной телескопической торкрет-стрелой, специально разработанной для облегчения ведения на-брызга торкрет-бетона на различные поверхности в стеснённых условиях производств и тоннелестроения. Установка состоит из телескопической торкрет-стрелы Aliva-302 с электроприводом с распылительной головкой для

распыления бетонного раствора и предназначена для монтажа на какое-либо технологическое шасси для перемещения в пределах строительного объекта. Установка предназначена для эксплуатации с внешним насосом для торкрет-бетона типа Aliva или Sika-PM.



Рис.4.16. Телескопическая торкрет-стрела Aliva-302

На рис.4.17 и 4.18 представлены: схема рабочей зоны торкрет-стрелы Aliva-302 и общий вид телескопической торкрет-стрелы Aliva-302 в работе

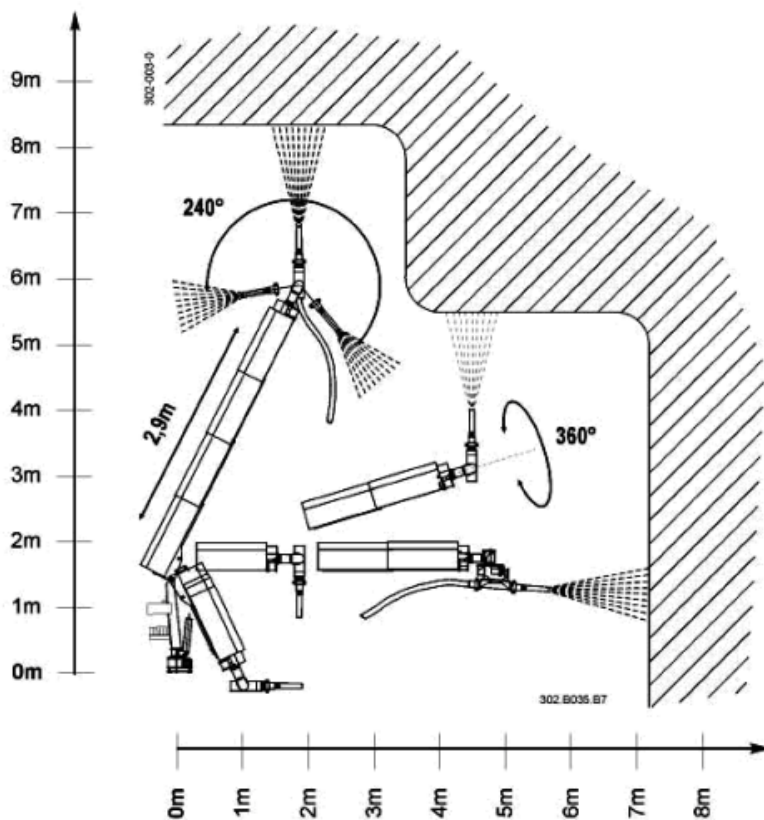


Рис.4.17. Схема рабочей зоны торкрет-стрелы Aliva-302



Рис.4.18. Телескопическая торкрет-стрела Aliva-302 в работе

Технические характеристики торкрет-стрелы Aliva-302.

Привод	Электрический
Мощность двигателя, кВт	5,5
Напряжение питания двигателя	3х380 В, 50 Гц
Степень защиты	IP 43
Давление масла, МПа	18
Объём подачи масла (большой насос), л/мин	21
Объём подачи масла (малый насос), л/мин	3
Ёмкость бака, л	70

Торкрет - установка для «мокрого» торкретирования Sika - PM702

На рис.4.19 представлен общий вид торкрет-установки Sika - PM702.



Рис.4.19. Торкрет-установка Sika-PM702

В торкрет-установке Sika-PM702 применен бетононасос фирмы *Путц-майстер*, имеющий гидравлический привод.

Привод насосов гидравлической системы осуществляется от электрического двигателя. Поршни бетононасоса связаны друг с другом посредством гидравлических приводных цилиндров (рис.4.20).

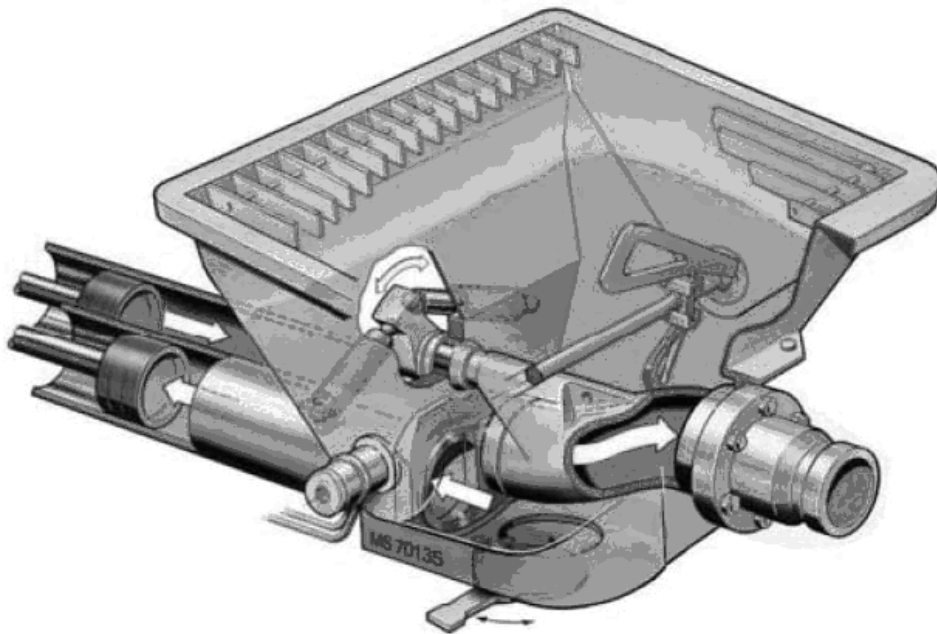


Рис.4.20. Двухпоршневой насос фирмы *Путцмайстер*

Важным элементом конструкции насоса является S-образный трубчатый шибер. Данный шибер располагается в приёмном бункере и поочерёдно, подходя то к одному, то к другому подающему цилиндру, соединяет их с напорной магистралью. В момент совершения рабочего хода поршень вытесняет материал из цилиндра через трубчатый шибер в магистраль. Одновременно с этим поршень другого цилиндра засасывает через свободное отверстие из бункера материал внутрь цилиндра. В момент достижения поршнями конечных точек трубчатый шибер переводится от одного цилиндра к другому. Направление движения поршней меняется и рабочий цикл повторяется.

При бетонировании особо сложных конструкций целесообразно предварительно отработать технологию производства работ на фрагменте, изготовленном в натуральную величину.

При производстве работ способом пневмобетонирования необходимо соблюдать следующие требования [13]:

- сопло при нанесении бетонной смеси на горизонтальную и вертикальную поверхность поверхности располагают перпендикулярно к ним;
- допускаются отклонения сопла на небольшой угол от нормали к поверхности нанесения при заполнении пространства за арматурными стержнями диаметром более 16 мм ;

- бетонную смесь на вертикальные поверхности наносят снизу вверх;
- нанесение смеси осуществляют вертикально-поступательным перемещением сопла относительно рабочей поверхности;
- для уменьшения отскока и снижения преждевременного обрастания арматуры бетонной смесью сопло размещают на расстоянии 0,7...1,2 м от рабочей поверхности;
- толщина единовременно наносимого слоя не должна превышать 15 мм при нанесении на горизонтальные (снизу вверх) поверхности, 25 мм - при нанесении на вертикальные поверхности, 50 мм - при нанесении на горизонтальные (сверху вниз) поверхности. При этом толщину слоя определяют исходя из температурно-влажностного режима нанесения и условиями окружающей среды, а также реологическими свойствами смеси;
- при появлении признаков оползания бетонной смеси толщину наносимого слоя уменьшают;
- при нанесении на опалубку или затвердевший бетон используют мелкозернистую бетонную смесь;
- каждый последующий слой наносят после окончания схватывания предыдущего;
- при перерывах в работе перед нанесением следующего слоя поверхность ранее уложенного бетона увлажняют.

Эти предпосылки легли в основу создания технологии нанесения мелкозернистого бетона при возведении монолитных конструкций на пневматических опалубках.

4.2. Особенности проектирования и нанесения смесей на «податливые поверхности»

Основным принципом технологической эффективности применения пневмонабрызга является достижение проектной прочности бетона в конструкции при минимально возможном отскоке [6, 7]. Фактически отскок и прочность зависят от целого ряда факторов. Отскок зависит от скорости частиц (силы удара); размера и формы частиц; направления струи (наиболее рациональное – это перпендикулярное поверхности нанесения); гранулометрии и количественного состава заполнителя (например, уменьшение в смеси цемента и увеличение доли заполнителя); содержания воды, так как она снижает отскок, поэтому «мокрое» торкретирование экономичнее; скорости в момент выхода из устья сопла; геометрии факела торкретной струи; расстояния от сопла до поверхности нанесения торкрет-бетона.

Прочность бетона в конструкции зависит от марки цемента; водоцементного отношения; качественно-количественных характеристик заполнителей; плотности частиц; скорости излета торкрет-струи; работы трамбо-

вания струи и т. д. Прочность в значительной степени зависит и от величины отскока.

Аналитически зависимость количества отскока при нанесении на жесткие поверхности имеет вид

$$K_0 = \frac{\alpha \delta k_m}{\alpha \delta k_m + 1} \cdot 100 \% , \quad (4.2)$$

где K_0 - количество отскока в % от общего объема заполнителя.

δ - отношение объемных частей заполнителя и цементного теста (состав смеси);

k_m - коэффициент, учитывающий форму зерен, для окатанной формы равен 0,76 – 0,95, для зерен неправильной формы равен 1,1...1,25;

α - относительная глубина проникания.

При однофракционном заполнителе величина отскока имеет максимальное значение. Уменьшение отскока достигается применением фракционированного заполнителя либо, в случае нанесения на пневмоопалубку, подбором соответствующего напряженного состояния пневмоопалубки.

Исследования Дружинина С.И., Глузге П.И., Дюженко М.Г. [6, 7] показали, что минимальная величина отскока возможна в случае, когда отдельные фракции в общем объеме взяты в равных количествах. Расчетные значения количества отскока при оптимальном фракционном составе [7] для заполнителя с гладко окатанными зернами и удельным весом 2,5...2,6 г/см³ приведены в табл. 4.1.

Для торкрет-бетона отношение частей заполнителя и цемент-песчаного теста, рассчитанных по объёму - δ_{HO} , с учетом потерь материала при отскоке, можно выразить формулой, предложенной в [33]:

$$\delta_{HO} = \frac{\delta(1 - K_0)\gamma_{Ц}(1 - K_Y)}{\gamma_{Ц}(1 - K_Y) - \delta K_0 \gamma_3 K_Y} , \quad (4.3)$$

где $\gamma_{Ц}$ - объемная масса цемента;

γ_3 - объемная масса заполнителя;

K_Y - эмпирический коэффициент, учитывающий потери цемента при отскоке (колеблется в пределах 0,05...0,07);

K_0 - количество отскока;

δ - отношение частей заполнителя и цемент-песчаного теста.

По результатам экспериментальных исследований при использовании в качестве заполнителя кварцевого песка оптимум прочности торкрета достигается при скорости смеси на выходе из сопла 140...145 м/с и расстоянии от

сопла до торкретируемой поверхности 95...100 см. При проектировании состава сухой исходной смеси для набрызг-бетона следует учитывать возможный отскок и рассчитывать необходимое соотношение цемента и заполнителя, при котором обеспечивается механическая прочность материала в соответствии с данными конструктивного расчета, и гранулометрический состав заполнителя, при котором для заданной прочности набрызг-бетона величина отскока была бы минимальной [6].

Таблица 4.1

Количество отскока для различных составов сухой смеси, %

Состав сухой смеси δ_{HO} (по объему)	Номера фракций мелкого заполнителя				
	I	II	III	IV	V
1:1	25	16,9	12,1	9,7	8,2
1:2	39,9	26,5	20,1	16,2	13,7
1:3	49,9	34,5	26,2	21,2	17,8
1:4	57,1	40,9	31,3	25,2	21,2
1:5	62,4	46,2	35,5	28,7	24,1
1:6	66,6	50,8	39,2	31,7	26,6

Переход от состава по объему к составу по массе производится по следующей формуле:

$$\delta_{HB} = \delta_{HO} \cdot \frac{\gamma_3}{\gamma_ц}, \quad (4.4)$$

где δ_{HB} – отношение частей заполнителя и цемент-песчаного теста, рассчитанных по массе.

Предел прочности при сжатии образовавшегося набрызг-бетона может быть выражен в виде функции от водоцементного отношения

$$R_H = k \cdot R_ц \left(\frac{ц}{B} - 0,4 \right), \quad (4.5)$$

где R_H – предел прочности набрызг-бетона при сжатии;

$R_ц$ – активность цемента;

k – эмпирический коэффициент, который для «сухого» торкрета может приниматься 0,35...0,4, а для «мокрого» и шприц-бетона - 0,32...0,38.

Анализ выражения (4.5) показывает, что в нем не учитываются технологические особенности нанесения торкрет-бетона на упругоподатливую поверхность пневматической опалубки. В Воронежском государственном архитектурно-строительном университете были проведены исследования, в результате которых были установлены зависимости прочности торкрета, нанесенного на пневматическую опалубку, от технологических параметров.

В связи с особенностью технологии набрызга отпадает требование обеспечения необходимой подвижности, поскольку при укладке торкрет-бетона одновременно происходит его уплотнение. Поэтому общее водосодержание набрызг-бетона оказывается, как правило, значительно ниже, чем у вибрированного бетона аналогичного состава.

Оптимальное водосодержание [7] определяется равенством

$$B = \ddot{O} \cdot \hat{A}_f + \zeta \hat{A}_{\hat{N}l} , \quad (4.6)$$

где B – абсолютное водосодержание;

B_H – количество воды, необходимое для получения цементного теста нормальной густоты;

B_{CM} – количество воды для смачивания поверхности заполнителя;

ζ – расход цемента на 1 м³ набрызг-бетона;

$\hat{Z}$ – расход заполнителя на 1 м³ набрызг-бетона.

Тогда B/ζ при оптимальном водосодержании выражается уравнением

$$\frac{\hat{A}}{\ddot{O}} = \frac{(\ddot{O} \hat{A}_f + \zeta \hat{A}_{\hat{N}l})}{\ddot{O}} , \quad (4.7)$$

или

$$\frac{B}{\zeta} = B_H + \delta_{HB} . \quad (4.8)$$

При торкретировании по «мокрому» способу модель набрызга упрощается, так как в этом случае протекает процесс формирования пластичного слоя из гранул раствора – основного компонента торкретной струи при «мокром» способе торкретирования. Их соударения с торкретируемой поверхностью неупругие, и гранулы, сливаясь воедино, образуют слой торкрета. Ввиду незначительного отскока состав смеси практически не меняется. Подбор состава торкрета сводится к элементарному расчету по известным формулам состава раствора с консистенцией по конусу СтройЦНИЛ 3...3,5 см. Заполнители и состав мелкозернистого (песчаного) бетона подбирают в соответствии с [7, 13]. При затворении водоцементное отношение бетонной смеси, в зависимости от условий нанесения, типа конструкции и физико-механических свойств составляющих смеси может быть 0,4...0,5. В уложенной смеси водоцементное отношение снижается на 10...20 % вследствие уноса сжатым воздухом части воды затворения. Расчет состава бетонной смеси по упрощенному способу производят в следующем порядке.

Прочность при сжатии и ζ/B для мелкозернистого бетона, твердеющего в естественных условиях, определяют по формуле

$$R_B = 0,4R_{Ц} \times \left(\frac{Ц}{B} - 0,43 \right) \quad (4.9)$$

или

$$\frac{Ц}{B} = \left(\frac{R_B}{0,4R_{Ц}} \right) + 0,43, \quad (4.10)$$

количество материалов на 1 м³ смеси определяют по формулам:

$$Ц = \frac{\gamma_{ПБС}}{1 + \frac{П_1 + Ц_1 + B_1}{Ц_1}}, \quad (4.11)$$

$$B = \frac{B_1}{Ц_1} \times Ц, \quad (4.12)$$

$$Д_M = \frac{Д_{1M}}{Ц_1} \times Д_M, \quad (4.13)$$

$$П = \frac{П_1}{Ц_1} \times Ц, \quad (4.14)$$

где $Ц, П, Д_M, B$ – расходы цемента, песка, минеральной добавки и воды, кг/м³;

$Ц_1, П_1, Д_{1M}, B_1$ – то же, в пробных замесах;

$\gamma_{ПБС}$ – объемная масса песчаной бетонной смеси.

С учетом изложенной выше методики подбора состава бетонных смесей, скорости нанесения, производительности торкрет-установки, податливости поверхности опалубки и ряда других параметров в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете была предложена математическая модель взаимодействия торкретной струи с пневматической опалубкой, позволяющая с достаточной для практики точностью определять оптимальные значения скорости торкретной струи, обеспечивающие минимальный отскок и высокую степень уплотнения наносимого слоя бетонной смеси.

Кроме этого, в результате экспериментальных исследований установлено, что для наиболее эффективного и безопасного транспортирования бетонной смеси целесообразно назначать водоцементное отношение в пределах

0,55. Упругоподатливые свойства поверхности пневматической опалубки и сравнительно небольшие скорости нанесения ($V \approx 20 \dots 45$ м/с) по сравнению с ранее известными значениями обосновывают максимальное снижение отскока при обеспечении проектной прочности бетона.

На основании результатов экспериментальных исследований была получена эмпирическая номограмма, позволяющая осуществлять подбор основных параметров рационального технологического режима нанесения торкрета на податливую поверхность пневматической опалубки с заданными значениями проектной прочности бетона (рис.4.19).

Данная номограмма позволяет определить границы варьирования технологических параметров нанесения с учетом критерия минимального отскока и ведения «безоткосного» торкретирования на пневмоопалубку. Штриховкой выделены зоны, в границах которых можно наносить торкрет-бетон без его отслоения при перемещении сопла вдоль поверхности нанесения. В первом квадранте номограммы представлены графики изменения скоростей движения смеси в зависимости от расстояния нанесения. Во втором квадранте – зависимости скорости движения возврата пневмоопалубки в исходное положение от производительности и диаметра выходного отверстия сопла. В третьем квадранте – зависимость скорости движения возврата пневмоопалубки в исходное положение от линейного натяжения материала опалубки по утку. В четвертом квадранте находятся зависимости различных пределов прочности торкрет-бетона от скорости нанесения и линейного натяжения ткани пневмоопалубки по утку.

Эта номограмма позволяет с достаточной для инженерной практики точностью проектировать рациональные технологические режимы нанесения мелкозернистой бетонной смеси на вертикальную, упругоподатливую поверхность пневматической опалубки при различных показателях прочности бетона с минимальным количеством отскока и устранением явления отслоения торкретного массива от поверхности пневмоопалубки.

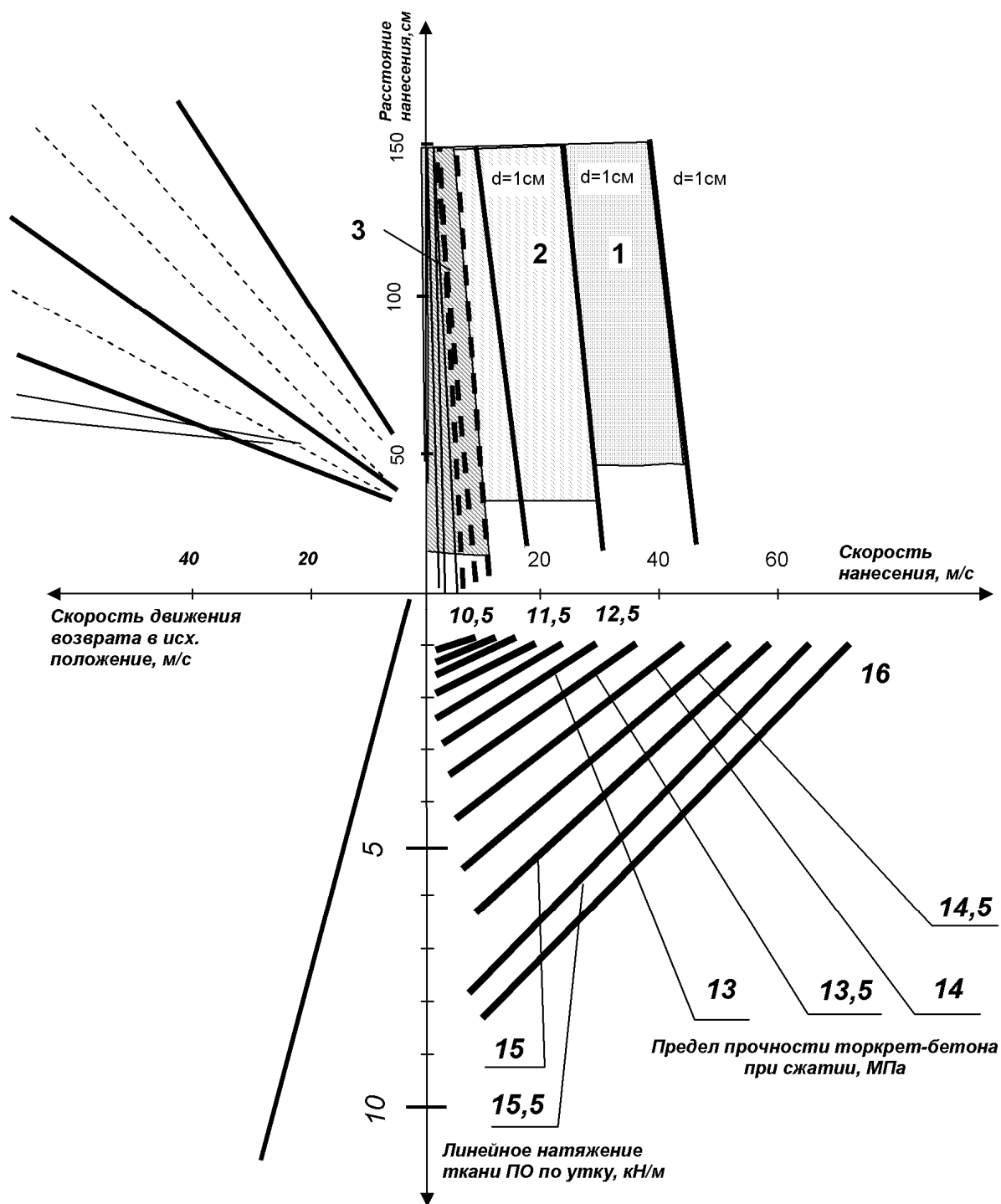


Рис.4.21. Экспериментально-теоретическая номограмма для подбора рациональных технологических параметров нанесения:

1 – границы безотскокной зоны, при производительности $9 \text{ м}^3/\text{ч}$ и критическом расстоянии нанесения $0,5 \text{ м}$ для диаметра сопла 10 мм ; 2 – то же, при производительности $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и расстоянии $0,5 \text{ м}$ для диаметра сопла 10 мм ; 3 – то же, при производительности $2 \text{ м}^3/\text{ч}$ и расстоянии $0,3 \text{ м}$; 4 – то же, для диаметров выходного отверстия сопла $20, 30 \text{ мм}$ и расстоянии 20 см

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии обобщен опыт применения пневматических конструкций различного назначения и их использования в качестве опалубочных систем. Пневматические опалубки являются одним из прогрессивных методов совершенствования комплексного механизированного процесса устройства монолитных конструкций, зданий и сооружений. Вместе с тем, конструктивное решение пневмоопалубок и технологические режимы их эксплуатации, позволяющие обеспечить качественное возведение конструкций, практически не изучены и носят разобщенный характер, сведения о них сосредоточены в ряде монографий, специальных журналах и сборниках научных трудов, что существенно затрудняет использование этих материалов.

В целях оказания студентам и специалистам строительной отрасли методической помощи в изучении данного вопроса в учебной пособии обобщен научный и практический опыт расчета и проектирования пневматических опалубок, разработаны методика раскроя и технологические режимы их эксплуатации при возведении пространственных и линейно-протяженных сооружений, представлены технические характеристики торкретной техники и особенности нанесения мелкозернистой бетонной смеси на «податливые» опалубочные поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. Арзуманов, А.С. Возведение конструкций с применением пневмоопалубки: теория и технология / А.С. Арзуманов. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1990. - 152 с.
2. Арзуманов, А.С. Создание и исследование эффективных всепогодных ресурсосберегающих технологий возведения монолитных конструкций на базе использования пневмокаркасных модульных систем / А.С. Арзуманов, А.Н. Ткаченко, А.Н. Василенко // Изв. вузов. Строительство. - 1994. - №1. - С. 101-104.
3. Арзуманов, А.С. К вопросу о влиянии колебаний температуры и внутреннего давления на проектную форму пневмооболочек-опалубок / А.С. Арзуманов, А.Н. Ткаченко // Тез. докл. VII Дальневосточной конференции по мягким оболочкам. - Владивосток: Изд-во ДВВИМУ, 1983. - С. 112-114.
4. Арзуманов, А.С. Эффективная технология возведения монолитных сооружений в зимнее время / А.С. Арзуманов, А.Н. Ткаченко // Тез. докл. межвуз. научн. конф. «Совершенствование экономических методов и организации управления строительным производством». - Воронеж: НТО Стройиндустрия, 1988. - С. 96-97.
5. Арзуманов, А.С. Технология возведения монолитных конструкций с ис-

- пользованием пневмокаркасных модульных систем в условиях знакопеременных температур / А.С.Арзуманов, А.Н.Ткаченко, А.Н. Василенко // Изв. ВУЗов. Строительство. - 1996. - № 8. - С. 72-74.
6. Болотских, Л.В. Экспериментальная оценка зависимостей прочностных характеристик слоя торкрет-бетона от технологических параметров нанесения бетонной смеси / Л.В. Болотских // Межвуз. сб. науч. трудов /ВГАСУ.- Воронеж, 2001. - С. 63-67.
 7. Болотских, Л.В. Технология торкретирования мелкозернистой бетонной смеси на вертикальные поверхности пневмоопалубки: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: защищена 15.05.2003: утв. 11.07.2003/ Болотских Л.В./ВГАСУ.- Воронеж, 2003. - 153 с.
 8. Василенко, А.Н. Совершенствование технологии укладки мелкозернистых бетонных смесей на пневматические опалубки / А.Н.Василенко, Л.В. Болотских, А.А. Арзуманов // Межвуз. сб. науч. трудов.ВГАСУ - Воронеж, 2001. - С. 61-63.
 9. Возведение тонкостенных пространственных конструкций с использованием пневмоопалубки: учеб. пособие / А.С. Арзуманов, А.Н. Василенко [и др.],ВИСИ. - Воронеж, 1990.-91 с.
 10. Ермолов, В.В. Пневматические строительные конструкции / В.В. Ермолов.-М.: Стройиздат, 1983.- 437 с.
 11. Иванов, Л.Т. Пневматическая опалубка для возведения армоцементных сводчатых сооружений: инф. листок / Л.Т.Иванов, А.Н.Василенко // - Воронеж: Воронежский МГЦНТИ. 1985.- №85-43
 12. Казаков, Д.А. Технология применения пневмокаркасных опалубочных систем с учетом влияния конструкционных соединений: автореф. дисс... канд. техн. наук: защищена 26.05.2005, утв. 11.09.2005 / Д.А. Казаков – ВГАСУ.- Воронеж, 2005. - 22 с.
 13. Методические рекомендации по производству бетонных работ способом пневмобетонирования : Госстрой СССР. - М.: ЦНИИОМТП, Бюро внедрения.- 1983.- 35 с.
 14. Пальчикова, А.Н. Методика оценки технологического процесса возведения монолитных сооружений с применением пневматической опалубки / А.Н. Пальчикова // . - М.: Деп. в НИИИС Госстроя СССР, 1981. -№2393.
 15. Петраков, Б.И. Возведение конструкций с использованием пневмоопалубок в районах Севера / Б.И. Петраков. - Л.: Стройиздат, 1984.-128 с.
 16. Рекомендации по возведению монолитных сооружений на пневмоопалубке / под ред. А.С. Арзуманова. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1988. - 94 с.
 17. Ткаченко, А.Н. Скоростной метод мобильного возведения зданий и сооружений с применением пневматических опалубок: накопленный опыт и пути дальнейшего развития / А.Н. Ткаченко, А.Н. Василенко // Тез. докл. конф. «Быстровозводимые и мобильные здания и сооружения в современных условиях», Санкт-Петербург , 10-11 дек. 1998 г.- С-Пб.ГАСУ, 1998.-С. 21-23

18. Ткаченко, А.Н. Учет влияния несоразмерности деформаций материала ПКО модуля и его конструкционных соединений / А.Н. Ткаченко, Д.А. Казаков // Строительство и недвижимость. Актуальные проблемы экономики, управления, технологии: межвуз. сб. научн. тр/ ВГАСУ.- Воронеж, 2001.- С. 34-35.

Дополнительная литература

19. Арбенев, А.С. Проектирование технологии бетонных работ в зимних условиях / А.С. Арбенев.- Новосибир. инж.-строит. ин-т. - Новосибирск , 1979. - 80 с.
20. Афанасьев, Е.А. Напорное бетонирование конструкций / Е.А.Афанасьев, С.Н.Дубинина // Промышленное строительство.- 1986.- №2.- С.14-15.
21. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов.- М.: Высшая школа, 1987.-208 с.
22. Беспалов, В.В. Основы образования архитектурно – конструктивных элементов, бетонируемых на пневмоопалубке / В.В. Беспалов.- М.: Высшая школа, 1978.-143 с.
23. Губенко, А.В. Пневматические строительные конструкции / А.В. Губенко.-М.: Стройиздат, 1983. –115 с.
24. Дыховичный, Ю.А. Пространственные составные конструкции / Ю.А. Дыховичный, Э.С. Жуковский.- М.: Высшая школа, 1989. - 288 с.
25. Ермолов, В.В. Воздухоопорные здания и сооружения/ В.В. Ермолов.- М.: Стройиздат, 1980. - 304 с.
26. Ермолов, В.В. Пневматические конструкции воздухоопорного типа / В.В. Ермолов.-М.: Стройиздат, 1980.-214 с.
27. Ефремов, В.В. Возведение сооружений с помощью пневмоопалубки. / В.В. Ефремов, А.М. Петровнин // Промышленное строительство.-1992.- №3.- С. 19-21.
28. Комаров, С.С. Пневмоупругость мягких конусообразных пневмоамортизаторов / С.С. Комаров, И.Н. Житкова // Тез. докл. IX Дальневосточной конференции по мягким оболочкам, 1991.- Владивосток: Изд-во ДВВИМУ, 1991.- С.17-21.
29. Комаров, С.С. Нелинейные задачи взаимодействия пневмокаркасных конструкций с окружающей средой / С.С.Комаров, И.Н.Житкова, И.И.Мискактин // Тез. докл. X Дальневосточной конференции по мягким оболочкам, 1995 .- Владивосток.: Изд-во ДВГМА, 1995.- С. 53-56.
30. Красновский, Б.М. Развитие теории и совершенствование методов зимнего бетонирования:автореф. дис...д-ра техн. наук.-М.: Изд-во МИСИ, 1988.- 45 с.
31. Мешкуров, В.А.Исследование напряжённо - деформированного состояния воздухоопорного гофрированного свода / В.А.Мешкуров // Исследования строительных конструкций из тканевых материалов: сб. научн. тр. - М.: ЦНИИСК им. Кучеренко,1984.- С. 22 – 33.

32. Петраков, Б.И. Бетонирование конструкций с использованием пневмоопалубки / Б.И. Петраков. - Л.: Стройиздат, 1974. - 88 с.
33. Петраков, Б.И. Возведение тонкостенного монолитного железобетонного купола диаметром 21 м при помощи пневмоопалубки / Б.И. Петраков, В.П. Селиванов, А.С. Никитин // Промышленное и гражданское строительство.-1990.- №7.- С. 16-17.
34. Поляков, В.С. Пневматические конструкции в строительстве / В.С. Поляков, В.П. Шпаков. – М.: Стройиздат, 1975. - 39 с.
35. Ткаченко, А.Н. Моделирование технологических режимов использования многофункциональных пневмокаркасных опалубочных систем / А.Н. Ткаченко, А.В. Лобода // Тез. докл. науч.- прак. конф. «Передовые технологии в промышленности и строительстве на пороге XXI века», Белгород, 26-27 ноября, 1998.- Белгород: Изд-во БелГТУ, 1998.- С. 32-34.
36. Ткаченко, А.Н. К вопросу обоснования технологических режимов эксплуатации пневмокаркасных модульных систем // Тез. докл. междунар. научн. - практ. конф. «Строительство – 99» / А.Н. Ткаченко, А.В. Лобода, РГСУ - Ростов н/Д, 1999.- С. 27-29.
37. Ткаченко, А.Н. Математическое моделирование формоизменения пневмокаркасных опалубочных систем на стадии укладки и выдерживания бетонной смеси / А.Н. Ткаченко, А.В. Лобода, А.Н. Василенко // Тез. докл. межвуз. научн. - техн. конф. «ВУЗ - Черноземье», ВГАСА .– Воронеж, 1999.- С. 41-42.
38. Юмашев, Ю.Б. Возведение вертикальных ограждающих конструкций на пневмокаркасных модульных опалубках в зимних условиях / Ю.Б Юмашев // Тез. докл. междунар. научн.-практ. конф.«Строительство -99», РГСУ. -Ростов н/Д, 1999.- С. 19.
39. Юмашев, Ю.Б. К вопросу о возможности использования пневмокаркасной модульной опалубки в качестве греющей / Ю.Б Юмашев // Строитель.- 1997. – № 7. – С. 25.
40. Юмашев, Ю.Б. Обоснование температурных параметров эксплуатации греющих пневмокаркасных опалубок / Ю.Б Юмашев // Тез. докл. конф. «Проблемы реформирования экономики российской федерации в переходный период», Воронеж, 1999. ВГАСУ- Воронеж, 1999 . - С. 48.
41. А.с. 777182. СССР, МКЛ 04 С 11/04. Пневматическая опалубка / А.С. Арзуманов, А.А. Захаров, Л.Т. Иванов, Н.Л. Клименко. - №270924; Заявл. 23.11.78; Оpubл. в Бюл. изобретений - 1980.- №41. - С. 38-39.
42. А.с. 1081318. СССР, МКЛ Е 04 С 11/04. Пневматическая опалубка для возведения железобетонных сводчатых сооружений / А.С. Арзуманов. Г.П. Быковский, Л.Т. Иванов, А.П. Нищенков. - №3538610; Заявл. 12.01.83; Оpubл. в Бюл. изобретений, - 1984.- №11 - С. 56.

43. А.с. 968268. СССР, МКЛ Е 04 С 17/02. Устройство для крепления пневматической опалубки / А.С. Арзуманов, Н.П. Клименко, В.Ф. Евко. – № 3259615; Заявл. 13.03.81; Оpubл. в Бюл. изобретений, - 1982. - №39. - С.67-68.
44. А.с. 941517. СССР, МКЛ Е 04 С 11/04. Пневматическая опалубка / А.С. Арзуманов, Г.П. Быковский, Л.Т. Иванов, Н.П. Клименко. - №2444082; Заявл. 14.01.77; Оpubл. в Бюл. изобретений. - 1982. - №25. – С. 77.
45. А.с. 1278429. СССР, МКЛ Е 04 С 11/04. Устройство для бетонирования протяженных сооружений в зимних условиях / А.С. Арзуманов, М.И. Думбровский, В.П. Насонов, А.Н. Ткаченко, - №3849519; Заявл. 30.01.85; Оpubл. в Бюл. изобретений. - 1986, - №47. – С. 10.
46. А.с. 1293304. СССР, МКЛ Е 04 С 11/04. Пневматическая опалубка / В.А. Чертов, А.С. Арзуманов, В.Е. Тройнин. - №3958671; Заявл. 01.10.85; Оpubл. в Бюл. изобретений. - 1987. - №8, - С. 105-106.
47. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции / Госстрой СССР.- М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1992.- 192 с.
48. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий / Госстрой России. - М.: ФГУП ЦПП, 2004.- 28 с.
49. СНиП 12-01-2004. Организация строительства / Госстрой России. - М.: ФГУП ЦПП, 2004.- 24 с.
50. Безопасность труда в строительстве. Ч.1. Общие требования. СНиП 12-03-2001. Ч.2. Строительное производство. СНиП 12-04-2002.- Ростов н/Д: Феникс, 2005.-192 с.
51. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения / Госстрой России. - М.: ФГУП ЦПП, 2004.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОПАЛУБОК	6
1.1. Анализ использования пневматических конструкций в практике строительства	6
1.2. Использование пневматических конструкций в качестве опалубок	17
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОПАЛУБОК	45
2.1. Общие сведения и положения из теории поверхностей	45
2.2. Напряженно-деформированное состояние мягких оболочек	50
2.3. Теоретическое обоснование параметров деформированного состояния пневмокаркасного опалубочного модуля	59
2.4. Проектирование пневматической опалубки	65
2.4.1. Материалы для пневматических опалубочных систем	65
2.4.2. Соединения в конструкции опалубки	69
2.4.3. Примеры раскроя элементов пневмоопалубок пространственных конструкций	76
3. ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОПАЛУБОК	104
3.1. Классификация пневмоопалубок и методов возведения монолитных конструкций с их помощью	104
3.2. Возведение монолитных сводчатых конструкций на пневмоопалубке воздухоопорного типа	107
3.3. Организационно-технологические решения комплексного процесса возведения сводчатых монолитных конструкций на пневмоопалубке воздухоопорного типа	115
3.4. Возведение линейно-протяжённых сооружений в блочно-в блочно-передвижной пневмоопалубке	120
3.5. Организационно-технологическая структура комплексного процесса возведения линейно-протяжённых сооружений на пневмоопалубке	125
3.6. Особенности возведения монолитных конструкций с использованием пневмоопалубки в зимних условиях	130
3.7. Особенности использования опалубочных пневмосистем в условиях ветровых воздействий	137
3.8. Мероприятия по обеспечению безаварийной эксплуатации пневмоопалубок в период строительства	140

4. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И УКЛАДКИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПНЕВМООПАЛУБКЕ	142
4.1. Торкретная техника для нанесения бетонных смесей	142
4.2. Особенности проектирования и нанесения смесей на «податливые поверхности»	167
Заключение	174
Библиографический список	174

Учебное издание

А.Н. ВАСИЛЕНКО

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВОЗВЕ
ДЕНИЕ МОНОЛИТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ОПАЛУБКИ**

Учебное пособие

Редактор Акритова Е.В.

Подписано в печать 14, 05.2010. Формат 60×84 1/16. Уч.-изд. л. 11,2.
Усл.-печ. л.11,3. Бумага писчая. Тираж 210 экз. Заказ № .

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии Воронежского государственного
архитектурно-строительного университета
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября