

К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШОГО ПРОЛЕТА

С.А. Рашепкина, канд. техн. наук, доцент

В.Л. Степанова, студент

И.Н. Рязанова, студент

Балаковский инженерно-технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

(Россия, г. Балаково)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-4-2-79-85

Аннотация. Рассматриваются основные типы оболочечных покрытий большепролетных зданий и сооружений: железобетонные, металлические, пневматические и деревянные. Приведены классификационные признаки, достоинства, недостатки и области применения каждого вида конструкции. Выполнен сравнительный анализ технико-экономических показателей. Особое внимание уделено железобетонным оболочкам как наиболее универсальному и долговечному типу, а также современным технологиям их возведения с применением пневматической опалубки. Дан анализ монолитных оболочечных покрытий по стреле подъема и толщине конструкции покрытия.

Ключевые слова: оболочечные конструкции; архитектура; металл; железобетон; дерево; достоинства; недостатки; применение; анализ покрытий.

Оболочечные конструкции покрытия позволяют перекрывать большие пролёты при минимальной толщине конструкции благодаря работе преимущественно на сжатие [1]. Их применение способствует снижению материалоемкости, повышению архитектурной выразительности и созданию уникальных пространственных решений [2]. В современной строительной практике такие конструкции находят применение в спортивных аренах, выставочных павильонах, аэропортах, культурных и культовых сооружениях. Выбор типа оболочечной конструкции определяется величиной пролёта, действующими нагрузками, климатическими условиями, требованиями долговечности и экономическими ограничениями [3]. Оболочечным конструкциям посвящено большое множество работ [1-12], затронутая тема актуальная и интересная и требует дальнейшего изучения.

Цель работы является проведение анализа основных типов оболочечных конструкций покрытия по материалу, способам изготовления, выявить их сильные и слабые стороны, а также установить взаимосвязь диаметра,

стрелы подъема и толщины железобетонной оболочки с ее типом и пролетом.

Типы оболочечных конструкций

Железобетонные оболочки – это тонкостенные пространственные конструкции покрытий зданий, имеющие криволинейную поверхность. Они зачастую совмещают несущие и ограждающие функции [4]. По геометрической форме они подразделяются на цилиндрические своды, купола вращения, гиперболические параболоиды (гипары), коноиды, складчатые конструкции и вантовые системы с жёсткой оболочкой [5].

Монолитные оболочки возводятся с применением индивидуальной или пневматической опалубки. Позволяют реализовать любую криволинейную форму, но требуют высокой квалификации рабочих и тщательного контроля бетонирования (рис. 1, а) [5, 10]. Сборные оболочки компонуются из унифицированных панелей криволинейного очертания. Обеспечивают высокую заводскую готовность и ускоренный монтаж, но ограничивают архитектурную свободу (рис. 1, б) [4, 10].



Рис. 1. Типы железобетонных оболочечных конструкций [10]:
а – монолитные оболочки; б – сборные элементы оболочки

Достоинства:

- высокая несущая способность при толщине оболочки 4-12 см (расход бетона 0,07-0,15 м³/м²);
- долговечность (срок службы более 100 лет) и огнестойкость;
- устойчивость к динамическим нагрузкам, включая сейсмические воздействия (до 9 баллов);
- возможность перекрытия пролётов до 100 м и более без промежуточных опор [5];
- плавность архитектурных форм, позволяющая создавать уникальные здания и сооружения [2].

Недостатки:

- высокая трудоёмкость устройства опалубки и армирования;
- значительные сроки возведения из-за необходимости выдерживания бетона для набора прочности;
- ограниченная транспортная способность (в основном монолитное исполнение);
- повышенные требования к проектному контролю геометрии оболочки.

Области применения. Спортивные арены, выставочные павильоны, крытые рынки, аэровокзалы, культовые сооружения, объекты с уникальной архитектурой [2].

Металлические оболочки. Металлические оболочки – это пространственные конструкции покрытий, выполненные из стали или алюминия. Они воспринимают нагрузки за счёт геометрической формы и пространственной жёсткости [6]. По конструктивной схеме их разделяют на листовые (мембранные), ребристые и сетчатые (стержневые) купола [3].

Листовые (мембранные) оболочки выполняются из тонкого стального или алюминиевого листа, усиленного рёбрами жёсткости. Обеспечивают гладкую наружную поверхность (рис. 2, а) [6, 10]. Сетчатые купола состоят из стальных стержней, образующих геодезическую или другую сетку. Обладают минимальным расходом металла (25-60 кг/м²) [3, 9] (рис. 2, б). Алюминиевые оболочки имеют меньшую массу и не требуют антикоррозионной защиты, однако их стоимость выше стальных аналогов (рис. 2, в) [6, 10].

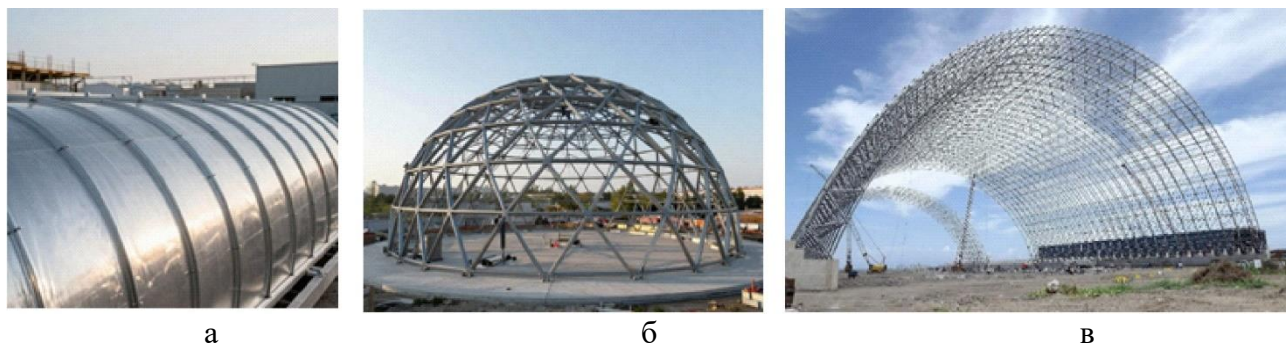


Рис. 2. Металлические оболочечные покрытия:
а – листовые оболочки [10], б – сетчатые купола [9]; в – алюминиевые оболочки [10]

Достоинства:

- малый вес по сравнению с железобетонными оболочками;
- высокая заводская готовность и точность изготовления элементов;
- быстрый монтаж с применением индустриальных методов;
- возможность создания сложных геометрических форм, включая большепролетные купола (пролёты до 200 м);
- ремонтпригодность и возможность демонтажа.

Недостатки:

- подверженность коррозии (для стальных конструкций требуется периодическая защита);
- высокая стоимость высоколегированных сталей и алюминия;

- потеря устойчивости при локальных повреждениях;
- необходимость устройства эффективной теплоизоляции и пароизоляции.

Области применения. Большепролетные спортивные сооружения, ангары, торгово-развлекательные центры, планетарии, крытые стадионы [3].

Пневматические и текстильные оболочки. Пневматическими называют мягкие оболочки, несущая способность которых обеспечивается избыточным давлением воздуха внутри (рис. 3). Различают пневмоопорные (давление во всем объеме) и пневмокаркасные (нагнетание в несущие элементы). Текстильные мембраны могут работать без постоянного давления при предварительном натяжении, но требуют мощного опорного контура [8, 10].



Рис. 3. Пневмооболочки [10]: а – пневмоопорные оболочки; б – пневмокаркасные оболочки; в – текстильные мембраны

Пневмоопорные оболочки наиболее экономичны, перекрывают пролёты до 50-80 м. Форма поддерживается небольшим избыточным давлением (0,3-0,5 кПа). Пневмокаркасные оболочки состоят из надувных арок или балок, которые работают как несущий каркас, обтянутый плёнкой или тканью. Текстильные мембраны – предварительно напряжены, не требуют постоянного давления, но нуждаются в мощном опорном контуре.

Достоинства:

- минимальная масса (0,5-2 кг/м²);
- быстровозводимость (монтаж за несколько дней);
- низкая стоимость по сравнению с капитальными конструкциями;
- возможность создания временных, сезонных или мобильных сооружений;

- высокая светопропускаемость (при использовании прозрачных материалов).

Недостатки:

- ограниченный срок службы (10-20 лет);
- низкая огнестойкость (требуется специальная пропитка);
- уязвимость к механическим повреждениям и проколам;
- зависимость от энергоснабжения для поддержания давления;
- сложность эксплуатации в районах с сильными ветрами и снеговыми нагрузками.

Области применения. Временные павильоны, складские ангары, спортивные залы сезонного использования, выставочные пространства, крытые теннисные корты [3].

Деревянные оболочки

Деревянные оболочки изготавливаются из цельной или клеёной древесины хвойных по-

род [2]. Наиболее распространены сетчатые купола из гнуклеённых брусьев, ребристо-кольцевые оболочки и клеёные своды [7, 10].

Сетчатые купола собираются из гнуклеённых брусьев, соединённых в узлах металлическими зубчатыми пластинами или болтами (рис. 4, а). Ребристо-кольцевые оболоч-

ки представляют систему рёбер и колец, образующих жёсткий каркас, который затем обшивается фанерой или плитами (рис. 4, б). Клеёные своды могут быть как кругового очертания, так и стрельчатыми, пролётом до 60 м (рис. 4, в).

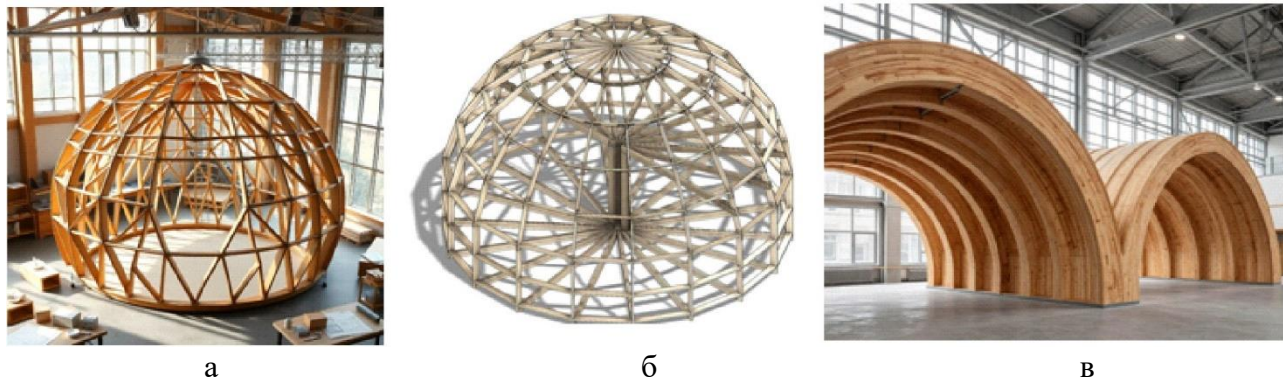


Рис. 4. Деревянные конструкции [10]: а – сетчатые купола; б – ребристо-кольцевые оболочки; в – клеёные своды

Достоинства:

- экологичность и эстетичность;
- низкая теплопроводность (коэффициент теплопроводности $0,1-0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$);
- небольшой вес, позволяющий использовать облегчённые фундаменты;
- возможность сборки из элементов заводской готовности;
- создание комфортного микроклимата в помещении.

Недостатки:

- горючесть (требуется огнебиозащита);
- подверженность биоповреждениям (грибок, насекомые);
- ограниченная огнестойкость;
- зависимость прочности от влажностного режима;
- необходимость регулярной защитной обработки и контроля состояния.

Области применения. Общественные здания (детские сады, школы), спортивные сооружения, крытые катки, церкви. Особое применение оболочечные конструкции нашли

в выставочных павильонах, объектах туристической инфраструктуры.

Перспективные оболочечные сооружения

Железобетонные оболочки лидируют среди всех типов благодаря лучшему сочетанию несущей способности, долговечности и огнестойкости [4, 5]. Особый интерес представляют оболочки двойной кривизны – гиперболические параболоиды (гипары). Их поверхность образуется движением прямой линии, что упрощает опалубку и армирование [5].

Современная технология возведения монолитных оболочек активно использует пневматическую опалубку, позволяющую отказаться от сложных лесов, снизить трудоемкость и сократить сроки строительства. Бетонирование выполняется торкретированием или послойным нанесением. Одним из ярких примеров эффективности железобетонных тонкостенных оболочек является покрытие Даниловского рынка (рис. 5).



Рис. 5. Даниловский рынок, г. Москва [12]

Купол имеет форму 14-лепестковой конструкции диаметром 72 м. Лепестки выполнены из сборных железобетонных плит ромбовидной формы – их толщина местами достигает всего 4 см. Такое решение обеспечивает равномерное распределение нагрузок и высокую устойчивость. В центре купола устроен светоаэрационный фонарь диаметром около 15 м для естественного освещения и вентиляции. Сооружение эксплуатируется уже более четырех десятилетий и находится в хорошем

техническом состоянии, что подтверждает надежность и долговечность [12].

Результаты исследований

На основе изучения литературных источников по различным типам оболочечных конструкций [1; 4; 6-8] и их анализа авторами была составлена таблица 1, в которой представлены основные показатели, характеризующие покрытие или в целом большепролетное сооружение.

Таблица 1. Техничко-экономические показатели оболочечных конструкций

Тип оболочки	Типичная толщина/сечение	Типовой пролет, м	Расход материала (ориентировочно)	Приведенная стоимость, руб./м ² (приблизительно)
Железобетонная (сборная, из панелей КЖС)	6-12 см	20-100	Бетон: 0,07-0,15 м ³ /м ² Сталь: 8-15 кг/м ²	4500-7000
Металлическая (цилиндрические оболочки, сетчатые, ребристые купола)	Элементы решетки 50-150 мм	30-200	Сталь: 25-60 кг/м ²	6000-12000
Пневматическая	Ткань 0,5-2 мм	10-80	Синтетическая ткань: 0,5-2 кг/м ²	1500-3000
Деревянная (сетчатые и ребристые купола, цилиндрические оболочки)	8-20 см	15-60	Древесина: 0,05-0,1 м ³ /м ² Сталь: 1,7-5 кг/м ²	4000-8000

Анализ таблицы выявил:

- самая дешевые оболочки пневматические; но долговечность у них невысокая;
- деревянные оболочки по расходу материалов имеют низкие показатели, но пролеты у них ограничены;
- наибольшая стоимость у стальных конструкций; но пролеты очень большие достигающие 200 м;
- огромными пролетами (до 100 м) можно перекрывать железобетонной оболочечной конструкцией.

В таблице 2 представлены данные по железобетонным монолитным оболочкам в виде куполов различного конструктивного типа, возведенных в различных странах мира [11]. На рисунке 6 приводятся гистограммы, анализирующие стрелу подъема и толщину монолитной купольной оболочки. Здесь обозначено: 1 – сферический монолитный тип; 2 – эллипсоидный монолитный тип; 3 – сферический сборный тип купола.

Таблица 2. Толщина оболочек некоторых железобетонных монолитных куполов [11]

Наименование здания	Диаметр в м	Стрела подъёма в м	Толщина оболочки в см	Примечание
Вставочный зал в Матсуяме (Япония)	50	6,7	12	Сферический монолитный
Выставочный зал в Калифорнии (США)	60	11	10	Сферический монолитный
Зал в Альбукерке, штат Нью-Мехико (США)	66,8	7,1	12,5	Сферический монолитный (толщина оболочки у опор 22 см)
Оперный театр в Новосибирске (Россия)	60	18,6	8	Сферический монолитный
Спортивный зал в Салониках (Греция)	75	9	10	Эллипсоидный монолитный
Бассейн в Ленинграде (Россия)	76	17	10	Эллипсоидный монолитный (толщина оболочки у опор 36 см, у верхнего кольца до 15 см)
Выставочный зал в Белграде (Югославия)	94	12,84	8	Сферический сборный

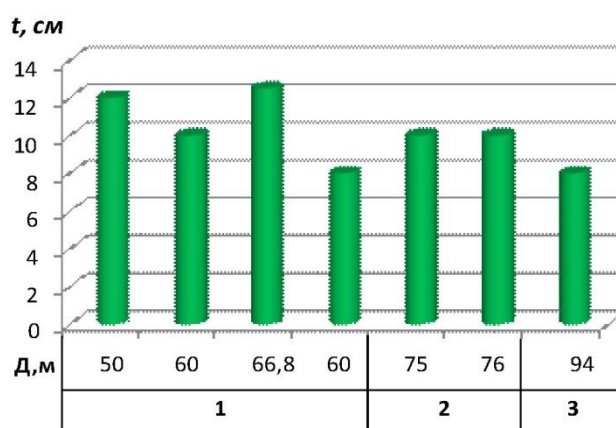
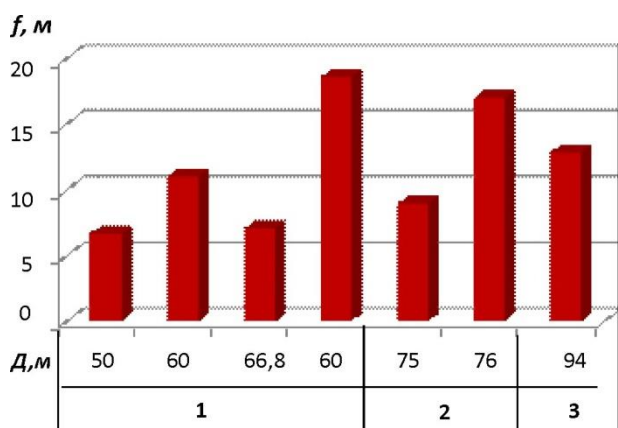


Рис. 6. К анализу железобетонного купола: а – зависимость «Диаметр – стрела подъёма»; б – зависимость «Диаметр – толщина»

Анализ таблицы 2 и номограмм (рис. 6) выявил:

- самая большая стрела подъёма у купола диаметром 60 м возведенного в г. Новосибирске; она практически составляет одну треть диаметра ($f/l=1/3$), что позволило уменьшить распор и принять толщину оболочки минимальной – 8 см;

- эллипсоидные монолитные купола, имеющие практически одинаковые диаметры, имеют одинаковые толщины -10 см; но в куполе, возведенном в Ленинграде, стрела подъёма почти в два раза больше, чем в Салониках, что дает заметный запас прочности оболочке и создает необычную оригинальность и красоту эллипсоидной в плане конструкции покрытия;

- перспективное решение выполнено в сборном куполе огромного диаметра (94 м), где принята толщина оболочки всего 8 см;

при этом стрела подъёма составляет около 13 м ($f/l=1/7$).

Заключение. Рассмотренные конструкции покрытия позволяют перекрывать большие пролёты, способствуют снижению материалоемкости, имеют высокую архитектурную выразительность для создания уникальных красивейших сооружений. Они нашли широкое применение в гражданских и промышленных зданиях и сооружениях. Металлические оболочечные конструкции предпочтительны там, где важны легкость, заводская готовность и скорость монтажа, а пневматические и текстильные оболочки – самые экономичные и быстровозводимые. Деревянные сооружения являются экологичными, эстетичными, красивыми, обладают низкой теплопроводностью, а железобетонные оболочечные конструкции – наилучший выбор для зданий с длительным сроком эксплуатации благодаря высокой не-

сущей способности и возможности перекрывать пролеты до 100 м.

В работе выявлено, что наиболее перспективными являются оболочечные железобетонные конструкции большого диаметра как монолитном, так и сборном исполнении. По-

лученные результаты рекомендуется использовать при проектировании покрытий общественных, спортивных и выставочных зданий с большепролетными пространственными конструкциями.

Библиографический список

1. Колчунов В.И. Пространственные конструкции покрытий / В.И. Колчунов, Б.П. Пятикрестовский, Н.В. Ключева. – М.: АСВ, 2008. – 351 с.
2. Перехоженцев А.Г. Архитектурно-конструктивное проектирование большепролётных зданий. – Волгоград: ВолгГТУ, 2018. – 168 с.
3. Кривошапко С.Н. Архитектурно-строительные конструкции / С.Н. Кривошапко, В.В. Галишникова. – М.: Юрайт, 2022. – 476 с.
4. Соколов Б.С. Железобетонные тонкостенные покрытия / Б.С. Соколов, А.Л. Яншин. – М.: Наука, 1986. – 229 с.
5. Попов Н.Н. Расчёт конструкций на динамические и специальные нагрузки / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев. – М.: Высшая школа, 1992. – 317 с.
6. Металлические конструкции: учебник для вузов / Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С. и др. – М.: Академия, 2007. – 680 с.
7. Нормативные показатели расхода материалов (НПРМ). Сборник 10. Деревянные конструкции. – М.: Госстрой, 1991.
8. Ермолов В.В. Пневматические строительные конструкции. – М.: Стройиздат, 1985. – 192 с.
9. Металлические оболочки. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://fullerdome.com/portfolio/proektsoloslovo?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera.
10. Несущие сооружения. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://socio-24.ru/nesuschie-sooruzheniya>.
11. Липницкий М.Е. Купола. Расчёт и проектирование. – Л.: Стройиздат, 1973. – 130 с.
12. Даниловский рынок. История. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://typical-moscow.ru/istoriya-danilovskogo-rynka/>.

DESIGNING LONG-SPAN SHELL STRUCTURES

S.A. Rashchepkina, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

V.L. Stepanova, *Student*

I.N. Ryazanova, *Student*

Balakovo Institute of Engineering and Technology of the National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
(Russia, Balakovo)

Abstract. *The main types of shell coatings of large-span buildings and structures are considered: reinforced concrete, metal, pneumatic and wooden. Classification features, advantages, disadvantages and areas of application of each type of structure are given. Comparative analysis of technical and economic indicators was performed. Particular attention is paid to reinforced concrete shells as the most versatile and durable type, as well as modern technologies for their construction using pneumatic formwork. Analysis of monolithic shell coatings by lifting boom and thickness of coating structure is given.*

Keywords: *shell structures; architecture; metal; reinforced concrete; wood; advantages; disadvantages; application; coating analysis.*