

## Расчет тонких упругих оболочек

### **О ВОЗМОЖНОСТЯХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ СООРУЖЕНИЙ В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

С.Н. КРИВОШАПКО, *д-р техн. наук, профессор*  
*Российский университет дружбы народов,*  
*117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*  
*Email: [sn\\_krivoshapko@mail.ru](mailto:sn_krivoshapko@mail.ru)*

*Анализируются возможности расширенного применения большепролетных пространственных структур в современной архитектуре и строительстве жилых, промышленных и общественных зданий. Приводится мнение известных ученых, архитекторов и проектировщиков-строителей. Представлены наиболее известные оболочечные конструкции последних лет.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** архитектура, большепролетные структуры, оболочка, купол.

Следует сразу отметить, что разнообразие мнений по этому вопросу очень широко, начиная от восторженных отзывов и предсказания радужных перспектив для строительства большепролетных конструкций в 50-60-е годы прошлого столетия до отрицания прогрессивной роли этих конструкций в архитектуре в конце 20 века. В настоящее время опять наметилось движение в сторону

увеличения интереса к проектированию большепролетных структур. Интересные факты из истории строительства и проектирования тонкостенных пространственных конструкций и взгляды на будущее оболочек изложены в сообщении [1], где, в частности, отмечается, что «сейчас появляется новая генерация молодых архитекторов и инженеров, которые проявляют интерес к проектированию большепролетных пространственных покрытий [2]. Этот процесс усиливается появлением новых материалов, таких как фибробетон и волокнистые армированные полимерные композиты, которые могут быть использованы в оболочках. Сейчас эти материалы – очень дороги для применения их в оболочках, но со временем это может измениться. Второй причиной возвращения интереса к оболочкам является появление новых форм в архитектуре пространственных конструкций, предлагаемых для внедрения в практику. В 20-м веке реальное применение нашли чуть более 5% существующих форм. Знаменитый архитектор и инженер Э. Торроха говорит: «Лучшим сооружением является то, надежность которого обеспечивается главным образом за счет его формы, а не за счет прочности его материала. Последнее достигается просто, тогда как первое, наоборот, с большим трудом. В этом заключается прелесть поисков и удовлетворение от открытий»». По-видимому, авторы статьи [3] полностью согласны с Э. Торрохой. Однако, полностью полагаться на создание новых форм оболочек не стоит. Известный португальский архитектор Э. Соуто Де Моура говорит: «Я не думаю, что будут появляться какие-то глобально новые формы, просто будут создаваться новые технологии и материалы» [4].

Р.Б. Фуллер так отзывался о своих архитектурных творениях: «Пусть архитекторы заливают об эстетику, заставляющей толпы богачей падать к их ногам. Я предпочту Купол, где стрессы и напряжения уходят прочь» [5].

Известный ученый-механик Н.В. Колкунов в предисловии к своей книге [6] пишет: «Теория оболочек является одним из наиболее актуальных и увлекательных разделов строительной механики. Оболочки и другие тонкостенные пространственные конструкции находят все более широкое применение в различных отраслях техники. Экономическая эффективность такого рода конструкций доказана на практике. Обладая завидной легкостью, тонкостенная пространственная система – оболочка – представляет исключительно прочную конструктивную форму. Особое значение приобретает применение оболочек в строительстве. *Можно с уверенностью сказать, что оболочки становятся одним из наиболее характерных конструктивных решений в мировой строительной практике.* Возможность перекрывать огромные пролеты тонкостенными перекрытиями без промежуточных опор делает оболочки подчас незаменимыми при строительстве специальных сооружений».

По мнению Хайруллина А.А., одного из российских архитекторов, специализирующегося в проектировании тентовых сооружений, «у нас в стране применение тентовых конструкций сдерживалось из-за несоответствия отечественных тентовых материалов высоким требованиям, предъявляемых данным типом сооружений, таких как разнообразие цветовой гаммы, светостойкости, прочности и долговечности». На Белгородском строительном портале «Строительство и архитектура» [outbel.ru] полагают, что «можно предположить, что в текущем десятилетии мягкие оболочки получат значительное распространение, особенно в труднодоступных отдаленных районах страны. Поэтому главными направлениями совершенствования возведения мягких оболочек являются: улучшение эксплуатационных качеств покрытий оболочек, в том числе и увеличение сроков службы до 10...15 лет, повышение степени технологичности оболочек при

транспортировании и монтаже. Существующие ткани, предназначенные для покрытий оболочек, пока не отвечают равнозначно всем основным требованиям, предъявляемым к таким конструкциям: трудновоспламеняемости, работоспособности при низких температурах, биостойкости, высоким гарантийным срокам эксплуатации. В ближайшей перспективе промышленность будет выпускать ткани пленочных покрытий, сочетающие в себе перечисленные качества. Эти покрытия будут выполнены из композиционных материалов на основе высокопрочных синтетических волокон с газосодержащим слоем из резиновой или термопластичной пленки».

Бывает, что ошибаются в своих предсказаниях и известные инженеры. Например, Н.В. Никитин был убежден, что стальные ажурные конструкции остались в прошлом [7]. А в свободной энциклопедии «Википедия» в разделе «Сетчатая оболочка (архитектура)» отмечается, что «в XXI веке *сетчатые оболочки стали одним из главных средств формообразования авангардных зданий*, включая небоскрёбы и шедевры стиля "хай-тек". В строительной практике железобетонные несущие оболочки, несколько аварий которых произошли в России в последние годы, постепенно вытесняются сетчатыми несущими оболочками. Стальные сетчатые оболочки зданий и сооружений эксплуатируются в российском климате безаварийно, а сетчатые оболочки В. Г. Шухова не разрушаются без защиты от коррозии 70-100 лет».

Н. Бойко [5] утверждает, что большое значение для имиджа современных городов имеет наличие в нем функционирующих большепролетных сооружений: «Особое место в мировой архитектуре занимают большепролетные сооружения. С давних времен, возведение подобных объектов относится к особому направлению проектирования и строительства. С большепролетными конструктивными системами связана мечта строителей и архитекторов, покорить «пространство...». Может быть, поэтому, *характерным признаком современных городов становятся большепролетные объекты*. Промышленные здания, сооружения транспортной инфраструктуры, торговые, складские и спортивные комплексы – сегодня именно та область применения, где функциональные и эстетические свойства большепролетных конструкций проявляются особенно ярко».

Интересно прислушаться к мнению управляющего департаментом маркетинга холдинга «Металлист - СМК» (Украина) Ю. Тимошенко [5]: «Строительство большепролетных объектов – очень дорогое удовольствие для инвестора. *Металлоемкость каркаса подобных сооружений, в сравнении со стандартными и оптимальными проектами с пролетами 18-26 м превышает в 1,5-2 раза*. Кроме этого фактора на стоимость влияет необходимость проведения дополнительных земляных работ, создание усиленной конструкции фундамента, а также монтажные и другие работы, направленные на создание качественного и безопасного большепролетного объекта.

Если в торговых центрах, складах размещение колонн через каждые 20 м является нормой, то представить опору посреди крытого бассейна, теннисного корта или футбольного зала просто невозможно. Именно поэтому основную нишу большепролетных зданий занимают объекты спортивно-оздоровительного назначения». Таким образом, Ю. Тимошенко поддерживает точку зрения, что возводить большепролетные сооружения нужно, если этого требуют функциональные требования.

Ел. Иноземцева считает, что «возведение большепролетных зальных сооружений - особое направление в архитектуре и строительстве, требующее ис-



Рис. 1. ТРЦ «Молл Россия», Москва

пользования новых технологий, прогрессивных конструкционных материалов и оригинальных технических решений. Промышленные здания, сооружения транспортной инфраструктуры - сегодня именно та область применения, где функциональные и эстетические свойства большепролетных конструкций проявляются особенно ярко» [8].

Так есть ли перспективы для развития строительства большепролетных сооружений? Безусловно, есть, отвечают на этот вопрос специалисты ИСК «Каркас» (Украина). Россия и Украина – страны с развивающейся экономикой и многие потребности в объектах самого различного назначения еще не удовлетворены. У них недостаточно спортивных и производственных комплексов, ангаров для самолетов, выставочных и развлекательных объектов.

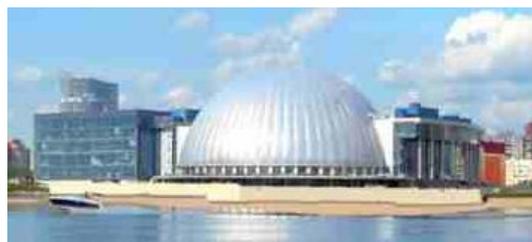


Рис. 2. ТРК «PITERLAND», С.-Петербург, 2012 г.

«Сложившаяся ситуация в этом сегменте недвижимости в обязательном порядке потребует строительства не только большепролетных, но и уникальных зданий и сооружений не только своим пролетом, а еще и конструктивными решениями, применяемыми материалами и инновационными технологиями» [5].



Рис. 3. Купол Большого национального театра оперы, Пекин, Китай, 2007 г.

Эти слова могут подтвердить большепролетные сооружения, воздвигнутые в последние годы (рис. 1-3). Но не только большепролетные пространственные конструкции оболочечного типа, поражающие воображение своими размерами, нашли применение в последние годы.

Часто архитекторы для самовыражения проектируют небольшие, но запоминающиеся сооружения оболочечного типа. Интересные коттеджи и жилые помещения в форме куполов предложены архитектором В. Гребневым (рис. 4). В стиле архитектурной бионики ак-



Рис. 4. Купол В. Гребнева

тивно работают мексиканский архитектор Х. Синосиан (рис. 5), российский архитектор Б. Левинзон (рис. 6) и др.

В последнее время опубликовано большое количество обзорных работ российских и зарубежных авторов, посвященных вопросам гео-



Рис. 5. Мексиканский вариант дома-улитки (коттедж), арх. Хавьер Синосиан, 2007 г.

метрии, прочности и применению оболочек, очерченных по поверхностям различных классов, например [9-13], что также характеризует возросший интерес к обсуждаемой проблеме.

Помимо указанных работ [9, 10, 13], где обсуждаются вопросы использования торсовых, циклических оболочек и оболочек в форме эллипсоидов вращения, имеются обзорные работы, где описываются оболочки со срединной поверхностью в форме линейчатых поверхностей отрицательной гауссовой кривизны, в форме однополостного гиперболоида вращения, параболоида вращения [11], некруговых цилиндрических оболочек [14] и др.

Оболочки, очерченные по каноническим или неканоническим поверхностям могут быть элементами ландшафтной городской (рис. 7) или парковой архитектуры (рис. 8).

Учитывая нарастающую потребность в молодых специалистах, как проектировщиков, так и научных сотрудников, в области проектирования и расчета большепролетных пространственных структур и оболочек приказом ректора Российского университета дружбы народов № 653 от 9.07.2012 на инженерном факультете РУДН на кафедре Прочности материалов и конструкций была открыта авторская магистерская программа «Архитектура, геометрия и расчет большепролетных пространственных структур» в рамках направления «Строительство». Планируется, что лекции, практические занятия и семинары будут проводить ведущие ученые и специалисты Москвы, имеющие опыт научной и практической работы.

#### Л и т е р а т у р а

1. *Bradshaw R., Campbell D., Gargari M., Mirmiran A., and Tripeny P.* Special structures. Past, present, and future// *Journal of Structural Engineering*. – June 2002. – P. 691-701.

2. *Kourkoutas Vas.* Parametric Form Finding in Contemporary Architecture. – A master's thesis submitted for the degree of "MS". – Vienna, June 2007 (Continuing Education Center, Austria). – 82 p.



Рис. 8. Циклическая оболочка с образующей окружностью переменного радиуса и направляющей кривой синусоидального вида, Дмитров Московской области, 2012 г.

3. *Hiroshi Ohmori, Kenji Yamamoto.* Shape optimization of shell and spatial structure for specified stress distribution// *Memoirs of the School of Engineering*. – Nagoya Univ., 1998. – Vol. 50. – No 1. – P. 1-32.

4. *Де Моура Э.С.* В архитектуре нет романтики// *Metro*. – 2012. – № 93. – С.4.

5. *Бойко Н.* Архитектура пространства // Интернет-журнал «Строительство и реконструкция». – 2009. – № 7.



Рис. 6. «Дом - дельфин», Санкт-Петербург, 2003



Рис. 7. Сферическая оболочка около метро «Отрадная», Москва, 2012 г.

6. Колкунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек. – М., 1963. – 277 с.
7. Воздвиженский Дм. Башня Никитина// Вокруг света. – 2001. – № 2.
8. Иноземцева Ел. Большепролетные зальные сооружения в архитектуре и строительстве// Строительство и недвижимость (интернет).
9. Glaeser Georg, Gruber Franz. Developable surfaces in contemporary architecture// Journal of Mathematics and the Arts. – Vol.1, Iss. 1. – March 2007. – P.59-71.
10. Krivoshapko S.N. Research on general and axisymmetric ellipsoidal shells used as domes, pressure vessels, and tanks// AMR. – 2007. – Vol. 60. – P. 336-355.
11. Гринько Е.А. Обзорные работы по геометрии, прочности, устойчивости, динамике и применению оболочек со срединными поверхностями различных классов// Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2012. – № 2. – С. 15-21.
12. Krsiĉ Sonja. Geometrijske površi u arhitekturi. – Građevinsko- arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu. – Štampa Galaksija, Niš, 2012 – 238 с.
13. Hyeng Christian A. Bock, Yamb E.B. Application of cyclic shells in architecture, machine design, and bionics// International Journal of Modern Engineering Researches. – 2012. – Vol. 2. – Iss. 3. – P. 799-806.
14. Soldatos K.P. Mechanics of cylindrical shells with non-circular cross-section: A survey// Applied Mechanics Reviews. – Vol. 52 (8), Aug. 1999. – P. 237-274.

#### References

1. Bradshaw R., Campbell D., Gargari M., Mirmiran A., and Tripeny P. Special structures. Past, present, and future// Journal of Structural Engineering. – June 2002. – P. 691-701.
2. Kourkoutas Vas. Parametric Form Finding in Contemporary Architecture. – A master's thesis submitted for the degree of "MS". – Vienna, June 2007 (Continuing Education Center, Austria). – 82 p.
3. Hiroshi Ohmori, Kenji Yamamoto. Shape optimization of shell and spatial structure for specified stress distribution// Memoirs of the School of Engineering. – Nagoya Univ., 1998. – Vol. 50. – No 1. – P. 1-32.
4. D' Moura E.S. V architecture net romantiki// Metro. – September 2012. - № 93. – P. 4.
5. Boyko N. Arhitektura prostranstva// Internet-J. "Stroitelstvo i rekonstruktsiya". – 2009. - № 7.
6. Kolkunov N.V. Osnovi rascheta uprugih obolochek. – Moscow, 1963. – 277 p.
7. Воздвиженский Дм. Башня Никитина// Вокруг света. – 2001. – № 2.
8. Inozemtseva El. Bolsheprolyotnie zalnie sooruzheniya v architecture i stroitelstve// Stroitelstvo i nedvizhimost (Internet).
9. Glaeser Georg, Gruber Franz. Developable surfaces in contemporary architecture// Journal of Mathematics and the Arts. – Vol.1, Iss. 1. – March 2007. – P.59-71.
10. Krivoshapko S.N. Research on general and axisymmetric ellipsoidal shells used as domes, pressure vessels, and tanks// Applied Mechanics Reviews. – 2007. – Vol. 60. – P. 336-355.
11. Grinko E.A. Obzornie raboti po geometrii, prochnosti, ustoychivosti, dinamike i primeneniyu obolochek so sredinnimi poverhnostyami razlichnih klassov// Montazhn. i spetsialn. raboti v stroitelstve. – 2012. – № 2. – С. 15-21.
12. Krsiĉ Sonja. Geometrijske površi u arhitekturi. – Građevinsko- arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu. – Štampa Galaksija, Niš, 2012 – 238 с.
13. Hyeng Christian A. Bock, Yamb E.B. Application of cyclic shells in architecture, machine design, and bionics// Int. Journal of Modern Engineering Research. – 2012. – Vol. 2. – Iss. 3. – P. 799-806.
14. Soldatos K.P. Mechanics of cylindrical shells with non-circular cross-section: A survey// Applied Mechanics Reviews. – Vol. 52 (8), Aug. 1999. – P. 237-274.

### ON OPPORTUNITY OF SHELL STRUCTURES IN MODERN ARCHITECTURE AND BUILDING

S.N. Krivoshapko

*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow*

The opportunity of wide application of large-span space structures in modern architecture and building of civil, industrial, and public buildings is analyzed. The opinions of well-known scientists, architects, and designers are given. The most interesting shell structures of last years are presented.

KEY WORDS: architecture, large-span structures, shell, dome, architectural bionics.