

ОТ ПРИГЛАШЕННОГО РЕДАКТОРА ТЕМАТИЧЕСКОГО НОМЕРА ЖУРНАЛА FROM THE EDITOR-IN-CHIEF OF THE THEMATIC NUMBER OF THE JOURNAL

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561

УДК 624.074.4:69.001.12/18:72.01:691

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Оболочечные структуры и оболочки в начале XXI в.

С.Н. Кривошапко 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ sn_krivoshapko@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 30 августа 2021 г.

Доработана: 12 октября 2021 г.

Принята к публикации: 21 октября 2021 г.

Для цитирования

Кривошапко С.Н. Оболочечные структуры и оболочки в начале XXI в. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 6. С. 553–561. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561>

Аннотация. Общеизвестно, что «золотой век оболочек приходится на 1920–1960-е гг., когда окончание строительства тонкостенной оболочки считалось важным событием в жизни страны, где оболочка возводилась. Каждая построенная оболочка анализировалась в десятках научных работ с точки зрения примененного метода ее расчета, использованного конструктивного материала, стоимости сооружения. Затем интерес к тонкостенным большепролетным оболочкам пошел на спад. В исследовании показывается, что применение оболочечных структур в XXI в. увеличивается в связи с запросами разных отраслей деятельности человека. Доказано, что практически во всех странах мира на разных континентах велось и ведется проектирование и строительство оболочечных структур и оболочек. Изменился только приоритет в применении конструктивных строительных материалов. Если раньше в основном применялся железобетон, то сейчас в приоритете стержневые криволинейные структуры, композитные оболочки и стержневые структуры с заполнением из стеклянных панелей. Продемонстрировано, что как начинающие, так и знаменитые архитекторы и инженеры принимают участие в проектировании рассматриваемых структур и тонкостенных оболочек.

Ключевые слова: архитектурные стили, конструкционные строительные материалы, тонкостенные оболочки, архитектура оболочек, расчет оболочек

Shell structures and shells at the beginning of the 21st century

Sergey N. Krivoshapko 

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

✉ sn_krivoshapko@mail.ru

Article history

Received: August 30, 2021

Revised: October 12, 2021

Accepted: October 21, 2021

Abstract. Researchers know that “golden century of shells” falls on 1920–1960 when the finishing of building of a thin-walled shell became an important event in life of country where this shell was erected. Every built shell was analyzed in tens of scientific works with a point of view of used method of analysis, applied

Кривошапко Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор департамента строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-9385-3699, eLIBRARY SPIN-код: 2021-6966, Scopus Author ID: 6507572305; sn_krivoshapko@mail.ru

Sergey N. Krivoshapko, DSc, Professor of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9385-3699, eLIBRARY SPIN-code: 2021-6966, Scopus Author ID: 6507572305; sn_krivoshapko@mail.ru

© Кривошапко С.Н., 2021

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

For citation

Krivoshapko S.N. Shell structures and shells at the beginning of the 21st century. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(6):553–561. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561>

constructive materials, cost of erection. Later on, an interest to thin-walled shells fell down. On the base of the fulfilled research in a paper, it is shown that application of shell structures is increasing in the 21st century because it was closely connected with needs of different branches of human activity. It is proved, that practically in all countries of the world, design and building of shell structures and shells was carried out. Only priority in application constructive materials changed. In the main, reinforced concrete was used earlier but now bar curvilinear structures, composite shells, and bar structures with the glass filling are in priority. It is shown that young and prominent architects and engineers take part in construction of considered structures and thin-walled shells. All conclusions are confirmed by references containing 38 used original sources.

Keywords: architectural styles, constructive building materials, thin-walled shell, shell architecture, shell analysis

Введение

В [1] собраны высказывания наиболее известных архитекторов и инженеров о перспективах использования большепролетных пространственных структур и тонкостенных оболочек в настоящее время и в недалеком будущем. Большинство из них поддерживает мнение, что золотой век оболочек пришелся на 1920–1960-е гг., а затем их использование шло на спад до 2000 г. Интерес к их строительству начал повышаться в связи с запросами на новые формы общественных и промышленных зданий и проявлялся как со стороны хорошо известных архитекторов, так и молодых архитекторов и студентов архитектурных и строительных специальностей [2; 3]. В [4] предпринята попытка выявить критерии оценки выдающихся сооружений и представлена десятка самых выдающихся по мнению авторов оболочечных сооружений начала XXI в.

Цель данного исследования – изучить запрос общества на строительство и проектирование большепролетных оболочечных сооружений в мире в начале XXI в.

Архитектурные стили оболочек и оболочечных структур в начале XXI в.

Наиболее полно 25 архитектурных стилей, их подвидов и течений применительно к оболочкам и оболочечным структурам описаны в [5].



Рис. 1. Здание в стиле промышленной архитектуры, Борралья, Португалия, 2017 г. (URL: <https://www.pinterest.ru/pin/530298924878808497/> (дата обращения: 10.08.2021))



Рис. 2. Здание в стиле архитектурного конструктивизма, Москва (фото С.Н. Кривошапко)

В XXI в. архитекторами были использованы 16 стилей, а именно:

- промышленная архитектура (рис. 1);
- архитектурный конструктивизм (рис. 2);
- деконструктивизм (культурный центр Г. Алиева в Баку, Азербайджан, 2012 г.);
- бионическая архитектура (дом «Яйцо», Москва, 2002 г.);
- органическая архитектура (вилла Shell, Kuruizawa, Япония, 2008 г.);
- экспрессионизм (Художественный музей в Милуоки, Висконсин, США, 2001 г.);
- американский модернизм (терминал № 5 аэропорта имени Дж. Кеннеди, США, 2008 г.);
- хай-тек (сетчатые оболочки; купол центра SONY, Берлин, 2000 г.);
- геометрический хай-тек (ботанический сад «Эдем», Корнуолл, Англия, 2001 г.);

- экологический хай-тек (сооружения экологической деревни Дитикан, Швейцария, 2009 г.);
- архитектура многогранников ([6], рис. 3);
- брутализм [7];
- ноосферная архитектура (рис. 4);
- параметрическая архитектура [8];
- архитектура свободных форм (числовая архитектура) (рис. 5);
- продуктивизм (рис. 6).

В тексте в скобках указан срок окончания строительства структур и оболочек.



Рис. 3. ТРЦ «5 планет», Дмитровское шоссе, Московская область, 2018 г. (фото С.Н. Кривошапко)



Рис. 4. Купольный дом, Московская область (фото С.Н. Кривошапко)



Рис. 5. Здание «Планета КВН», Москва, 2011 г. (фото Е.А. Гринько)



Рис. 6. Арочные павильоны 8×8 м (URL: <https://prime-tent.ru/arched-design.html> (дата обращения: 10.08.2021))

Естественно, каждый указанный стиль применялся не только в отмеченных случаях. Например, такие архитектурные стили, как архитектура свободных форм, параметрическая архитектура, архитектура многогранников и хай-тек использовались намного чаще остальных. Это вызвано бурным развитием численных методов расчета на прочность, появлением компьютерного моделирования, новых конструктивных строительных материалов и типовых компьютерных программ различного назначения [9]. Хотя некоторые архитекторы имеют другое мнение. Так Е.В. Ермоленко считает, что «...постмодернизм, деконструктивизм, параметрическая архитектура перенасытили пространство жизни человека, возник стилевой кризис» [10].

Как показали исследования, архитекторы потеряли интерес к девяти неиспользованным архитектурным стилям и стилевым течениям еще до второй половины XX в. Следовательно, применение всех известных разнообразных современных подходов к проектированию оболочечных структур и оболочек практиковалось и в XXI в.

Конструкционные строительные материалы для оболочек и большепролетных оболочечных структур в начале XXI в.

В разное время для строительства оболочек применялись каменные материалы, кирпичи из обожженной глины, древесина, клееная древесина, металлы, железобетон, пластмассы, композиционный материал, стеклопластики, стекло, тентовые ткани и др. В разные исторические эпохи архитекторы и инженеры отдавали предпочтение разным конструкционным материалам.

В XXI в. при строительстве оболочек и пространственных большепролетных структур использовались клеевая древесина [11] (рис. 7), сталь стержневая [12], стальные тросы, стальная мембрана (крытый каток 200×120 м в Коломне, 2009 г.), алюминий (алюминиевые купола-покрытия – Wastewater Treatment Plant, Халтон, Онтарио, Канада), титановые панели (Большой народный театр, Китай, 2007 г.), пластмассы, строительное силикатное стекло (рис. 8), стеклопластики (купол Владимирского храма, п. Индустрия, Московская область, 2020 г.), тенты (шатровый купол центра SONY, Берлин, 2000 г.), ванты [13], в меньшей степени железобетон (резиденция архитектора Котаро Иде системы «Умный дом», бионическая архитектура, Япония, 2008 г.) и армоцемент (коттедж «Дом-улитка», бионическая архитектура, Мехико, Мексика, 2006 г.).

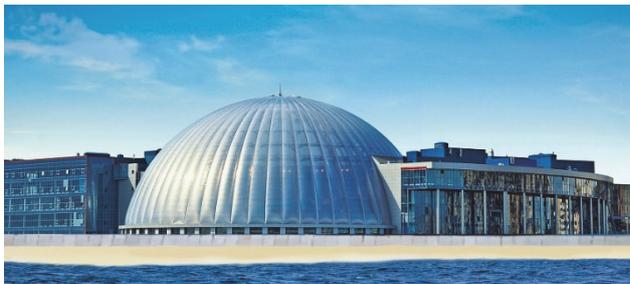


Рис. 7. Самый большой деревянный купол в мире высотой 43 м и диаметром 90 м, ТРЦ Peterland, Санкт-Петербург, 2012 г. (URL: <https://www.malls.ru/rus/malls/83604.shtml> (дата обращения: 15.08.2022))



Рис. 8. Фондовая оранжерея ФГБУ науки ГБС РАН имени Н.В. Цицина, Москва, 2015 г. (фото С.Н. Кривошапко)

Очевидно, что все известные конструкционные строительные материалы нашли применение при строительстве рассматриваемых структур и оболочек. Однако по частоте применения произошло перераспределение мест, например железобетон уступил место практически всем остальным конструкционным материалам. Железобетонные оболочки используются больше в малогабаритном строительстве, то есть для строительства жилых объектов, кафе, небольших офисов, навесов и т. п., для возведения покрытий промышленных сооружений или в сооружениях, где этого требуют технологические процессы. Железобетонные оболочки больших пролетов практически не строятся. Толстостенные железобетонные оболочки, в основном сферической и цилиндрической форм, находят применение при строительстве объектов гражданской обороны.

Страны мира, в которых построены оболочечные структуры и оболочки в начале XXI в.

Рассмотрим некоторые страны, сгруппированные по континентам.

Европа. *Российская Федерация* (самый большой в России стеклянный купол в Нагатинской пойме над центральным атриумом, Москва, 2020 г.), *Испания* (рис. 9), *Германия* (Филологическая библиотека, Берлин, 2005 г. [14]), *Швейцария* (деревянный ЦЕРН-глобус науки и инноваций, Женева, 2007 г.), *Чехия* (Национальная библиотека Чехии, числовая архитектура, Прага, 2011 г.), *Португалия* (рис. 10), *Беларусь* (вантовая двухъярусная система покрытия МКСК «Минск-арена», 2010 г.), *Англия* (стадион «Уэмбли» с раздвижной крышей и решетчатой аркой диаметром 7 м и высотой 133 м, Лондон, 2007 г.), *Бельгия* (Liege Guillemin's TGV Station, Льеж, 2009 г.), *Ирландия* (антенна из нержавеющей стали высотой 121,2 м, Дублин, 2003 г., рис. 11), *Австрия* (крыша протестантской церкви из изогнутых стальных пластин толщиной 8 мм, Хейнбург, 2011 г.), *Франция* (культурный центр «Город вина», Бордо, 2016 г.), *Дания* (аквариум «Голубая планета» с фасадом, облицованным алюминиевыми плитами, Копенгаген, 2013 г.), *Венгрия* (стеклянный многофункциональный комплекс Central European Time (CET), встроенный между двумя складскими зданиями, Будапешт, 2022 г.), *Хорватия* (мечеть города Риека, 2013 г., арх. Д. Джамония, Д. Влахович, Б. Вучинович), *Турция* (мечеть Шакирин с куполом диаметром 39,6 м, Стамбул, 2009 г.).

Северная и Центральная Америка. *США* (Транспортный узел Нью-Йорка, арх. С. Калатрава, 2014 г.), *Пуэрто-Рико* (зонтичная оболочка [15], арх. Х.Р. Марханд, рис. 12), *Канада* (Канадский музей прав человека, Манитоба, 2014 г., арх. А. Предок), *Мексика* (покрытие атриума из предварительно напряженного железобетона Института передовых технологий, Мехико, архитектурная группа Л.Г. Ланда, 2005 г. [16]), *Ямайка* (экодеревня из монолитных куполов, the Source Farm ecovillage, 2005 г.).

Южная Америка. Обширная информация о современной архитектуре Латинской Америки приведена в книге Л. Финотти [17].

Бразилия (театр, Рио-де-Жанейро, арх. О. Нимейри, 2007 г.), **Чили** (храм бахаитов Южной Америки в форме девяти лепестков из мраморных плит, Сантьяго, проект Hariri Pontarini Architects (Канада), международная премия Королевского архитектурного института Канады, 2016 г.), **Уругвай** (покрытие международного аэропорта Карраско длиной 350 м и шириной 80 м, Монтевидео, 2009 г.).

Азия. **Китай** (комплекс Большого народного театра из стекла и титана, 212×144×46 м, 2007 г.), **Бахрейн** (музей современного искусства на узкой полосе залива Бахрейн, Мухаррак, арх. З. Хадид, 2012 г.), **ОАЭ** (82 белоснежных купола мечети шейха Зайда, самая большая мечеть в мире, 2007 г.); **Индия** (Global Pagoda, Мумбаи, самый большой каменный купол в мире, построенный без опорных столбов, высотой 29 м, 2009 г. [4]), **Грузия** (покрытие над пешеходным мостом Мира через р. Куру, Тбилиси, 2010 г.), **Азербайджан** (культурный центр Г. Алиева в Баку, 2012 г.), **Сингапур** (стадион SportsHub с раздвижной крышей, попал в Книгу рекордов Гиннеса, 2014 г.), **Абу-Даби** (стальная крыша над тематическим парком Ferrari World, 2010 г.), **Иордания** (Ayala Golf Academy and Clubhouse, волнистая форма покрытия в форме песчаных дюн из торкрет-бетона, Акаба, 2018 г.), **Южная Корея** (магазин Dior в форме вертикального бутона цветка, 2015 г.), **Таджикистан** (рис. 13), **Израиль** (Ashdod Performing Arts Center, Ашдод, 2012 г., арх. Х. Дотан), **Ливан** (мечеть Амир Шакиб Арслан, Мухтара, 2016 г.), **Катар** (Education City Mosque, на Всемирном фестивале архитектуры в 2015 г. признано лучшим религиозным сооружением, Доха, 2015 г.), **Пакистан** (градирни 6-й АЭС, Карачи, спроектирована China National Nuclear Corporation, 2021 г.).



Рис. 9. Дворец искусства королевы Софии, комплекс «Город искусства и науки», Валенсия, Испания, 2005 г. (фото С.Л. Шамбиной)



Рис. 10. Круизный терминал в порту Лейшоеш, Португалия, арх. Л.П. Силва, 2015 г. (URL: <https://www.pinterest.ru/pin/272608583674986563/> (дата обращения: 10.08.2019))



Рис. 11. Основание антенны, Дублин, Ирландия, арх. Я. Ричи (фото С.Н. Кривошапко)



Рис. 12. Ресторан при отеле La Concha Hotel, Сан Хуан, Пуэрто-Рико, арх. Х.Р. Марханд, 2009 г. (URL: <http://www.architecturaldigest.com/homes/hotels/2009> (дата обращения: 10.08.2019))

Австралия и Океания. **Австралия** (торговый центр, Мельбурн, арх. А.Р. Макдугал, 2005 г.).

Африка. **Алжир** (купол Величайшей мечети высотой 50 м, третьей по величине на планете, Алжир, 2020 г.), **ЮАР** (часовня Бошбес в форме железобетонной зонтичной оболочки, Кейптаун, 2016 г.), **Руанда** (три павильона на первом стадионе в Африке для игры в крикет (Rwanda Cricket Stadium), Кигали, 2017 г.),

Нигерия (традиционные конические здания, 2014 г. [18]), *Эфиопия* (комплекс небоскреба и купола штаба Африканского союза, Аддис-Абеба, 2012 г.), *Южный Судан* (международный аэропорт в Джубе, спроектированный и построенный компанией из Китая (China Communications Construction Company), 2018 г.), *Камерун* (Мусгум-толек – отдельно стоящий глиняный купол с утолщенными в основании стенами, рис. 14).

Каждая большепролетная структура или оболочка необычной формы является инновационным и уникальным сооружением. Многие страны гордятся своими знаковыми большепролетными структурами и оболочками, построенными в XXI в. С целью показать ареал распространения рассматриваемых структур и оболочек выше перечислены отдельные страны с указанием только одной из нескольких хорошо известных структур каждой страны.



Рис. 13. Чайхана в форме дыни, Гиссар, Таджикистан, 2015 г. (URL: comunicom.ru (дата обращения: 10.08.2021))



Рис. 14. Глиняный жилой купол, север Камеруна (URL: fishki.net (дата обращения: 10.08.2021))

Очевидно, что в 2000–2021 гг. строительство оболочечных структур и оболочек велось во всех странах мира. Наличие хорошо зарекомендовавших себя аналитических и численных методов расчета различных структур, широкое распространение типовых компьютерных программ, ознакомление архитекторов и инженеров с накопленным опытом возведения стержневых оболочечных структур и оболочек способствовало их расширенному применению в жилых, промышленных и общественных зданиях.

Численные и аналитические методы, применяемые для расчета большепролетных структур на прочность и устойчивость

Несмотря на замедление темпов использования оболочечных структур и оболочек в реальных сооружениях во второй половине XX в. исследовательские работы по совершенствованию их расчетов на прочность, устойчивость и динамику, по геометрическому моделированию структур для поиска оптимальных форм никогда не прекращались [19].

Особенно активно оболочки сложной геометрии изучаются в Российском университете дружбы народов. Начало исследованиям положил первый заведующий кафедрой строительной механики и сопротивления материалов доктор технических наук, профессор В.Г. Рекач [20]. Им была создана научная школа «Геометрия и прочность оболочек неканонической формы», которая функционирует и сейчас.

Все существующие методы расчета рассматриваемых структур и оболочек основываются на результатах исследований, проведенных в XX в. [21–23]. В то время для расчета оболочек были предложены численные (МКЭ [24], ВРМ [25], метод конечных разностей, метод глобальных элементов [26], метод граничных элементов [27] и их разновидности [28]), полуаналитические (асимптотический метод малого параметра [29]) и аналитические (безмоментная теория [22; 30], простой краевой эффект [22]) методы.

В настоящее время с помощью численных методов можно решить практически любую задачу из области строительной механики оболочек. Но В.В. Новожилов, много сделавший для развития аналитических методов расчета тонких оболочек, считает, что происходит подмена «фундаментальной дисциплины – теории оболочек – одним из разделов прикладной математики. Эта достойная сожаления тенденция является побочным эффектом интенсивного внедрения универсальных численных методов» [22]. По-видимому, аналитические и численные методы расчета оболочек имеют одинаковое право на существование и должны взаимно дополнять друг друга.

Сейчас методы расчета уточняются [31; 32], добавляется учет дополнительных факторов [33] и вводится компьютерное моделирование [34]. Некоторые полезные сведения из истории развития теории

оболочек приведены в [19; 22; 35; 36]. Причем в статье известного американского ученого Дж.Г. Симмондса [36] представлены все известные на тот момент методы расчета тонких оболочек.

Если в XX в. изучали в основном физико-механические свойства новых конструкционных материалов [37], то в XXI в. началось их активное внедрение в практику и, следовательно, возникла потребность в уточненных методах расчета конструкций из этих материалов [38].

Знаменитые архитекторы, создавшие проекты наиболее известных пространственных структур в XXI в.

Е.В. Подгорнов (ТРЦ Piterland, Россия, 2012 г., рис. 7).

Я. Гельмут (центр SONY – один из символов Берлина, Германия, 2000 г.).

С. Калатрава (Дворец искусства королевы Софии и планетарий комплекса «Город искусства и науки», Валенсия, Испания, 2005 г., рис. 9).

Н. Фостер (центр музыкального образования, концертов и конференций Sage Gateshead (рис. 15), выполненный из стекла и нержавеющей стали, Великобритания, 2004 г. [4]).

П. Андре (Большой народный театр, Китай, 2007 г.; Осацкий морской музей, Япония, 2000 г.).

З. Хадид (культурный центр Г. Алиева в Баку, Азербайджан, 2012 г.).

Ф.О. Геру (Marques De Riscal Hotel, Эльсьего, 2006 г. [14]).

И.М. Пей (Немецкий исторический музей, Берлин, 2001 г. [14]).

Х. Накамура (футуристическая свадебная часовня в виде двух спиральных лестниц со стальным каркасом, обшитом деревянными панелями, Ономити, Япония, 2013 г.).

О. Нимейри (Национальный музей имени Онестину Гимарайнша, Бразилия, 2006 г., рис. 16).



Рис. 15. Концертный зал Sage Gateshead, Великобритания, 2004 г.
(URL: hmong.ru (дата обращения: 10.08.2021))



Рис. 16. Национальный музей имени Онестину Гимарайнша, Бразилия, 2006 г.
(URL: tourweek.ru (дата обращения: 10.08.2021))

С. Фудзимото (Дом венгерской музыки в Будапеште с отверстиями в покрытии для деревьев, образцовая экология по стандартам BREEAM, 2021 г.).

Н. Халили («Экокупол» из глины и соломы, экологически чистое жилье для Африки).

В. Крамаренко (стеклянный купол зала Победы Белорусского государственного музея истории Великой Отечественной войны, Беларусь, 2014 г.).

Ш. Видечник («Борисов-Арена» – стадион-змея, Беларусь, 2014 г.).

С. Велес (бамбуковая архитектура оболочечных структур, Колумбия).

Заключение

Проведенный анализ позволил сделать вывод, что в начале XXI в. закончился спад интереса к оболочечным структурам и тонкостенным оболочкам. Этому способствовало появление новых конструкционных материалов, расширение перечня аналитических, точечных, сплайновых и каркасных поверхностей, пригодных к применению в качестве срединных поверхностей оболочек, создание более точных методов расчета и на их основе типовых компьютерных вычислительных комплексов, а главное – возникновение повышенного запроса на создание рассматриваемых структур. Чтобы убедиться в этом, можно проанализировать павильоны всемирной выставки «Объединяя умы, создавая будущее» Экспо-2020 в Дубае (ОАЭ). Оболочки и оболочечные структуры были выбраны многими странами-участниками для формирования внешних обводов их павильонов. Например, павильоны Австрии (ансамбль конусов

разной высоты из глины и песка), Беларуси (архитектура многогранников), Италии (числовая архитектура для покрытия), Азербайджана (крыша с воздушной подушкой для снижения температуры в стиле архитектурного хай-тека), Ирака (геометрический хай-тек), России (сооружение из переплетенных труб в стиле архитектуры свободных форм), ОАЭ (бионическая архитектура, арх. С. Калатрава) и многие другие, а также тематические павильоны «Мобильность» (трилистник в стиле хай-тека, арх. Foster + Partners), «Устойчивое развитие» (экологический хай-тек, Grimshaw Architects) и интерактивная инсталляция «Пространственный лес» из стилизованных бетонных «деревьев» разной высоты, отпечатанных на 3D-принтере (арх. MEAN, архитектурный стиль – продуктивизм) показывают устойчивый интерес общества к проектированию оболочечных структур в начале XXI в.

Список литературы

1. *Кривошапко С.Н.* О возможностях оболочечных сооружений в современной архитектуре и строительстве // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2013. № 1. С. 51–56.
2. *Кривошапко С.Н.* Шаг в III тысячелетие: архитектура оболочек и прочностной расчет тонкостенных строительных и машиностроительных конструкций сложной формы // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2001. № 8–9. С. 2–5.
3. *Мамиева И.А.* О подготовке специалистов по архитектуре, геометрии и расчету большепролетных пространственных структур и оболочек // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 5 (67). С. 114–118.
4. *Кривошапко С.Н., Мамиева И.А.* Выдающиеся пространственные сооружения последних 20 лет // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2012. № 12. С. 8–14.
5. *Кривошапко С.Н., Алборова Л.А., Мамиева И.А.* Оболочечные структуры: генезис, материалы и подвиды. Ч. 1. Подвиды и направления // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 3. С. 125–134. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-3-125-134>
6. *Кривошапко С.Н.* Многогранники и квазимногогранники в архитектуре гражданских и промышленных сооружений // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 4 (90). С. 48–64 <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-90-4-48-64>
7. *Вуков О., Губкина И.* Soviet modernism. Brutalism. Post-modernism buildings and structures in Ukraine 1955–1991. DOM Publishers, 2019. 250 p.
8. *Мамиева И.А.* Аналитические поверхности для параметрической архитектуры в современных зданиях и сооружениях // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 1. С. 150–165.
9. *Рынкoвskaya M.I., Elberdov T., Sert E., Öchsner A.* Study of modern software capabilities for complex shell analysis // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020. Vol. 16. No. 1. Pp. 45–53. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-1-45-53>
10. *Ермоленко Е.В.* Формы и построения в архитектуре советского авангарда и их интерпретация в современной зарубежной практике // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 1. С. 39–48. <https://doi.org/10.22337/2077-2020-1-39-48>
11. *Кривошапко С.Н., Пятикрестовский К.П.* Из истории строительства деревянных оболочек и их возможности в настоящем и будущем // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2014. № 1. С. 3–18.
12. *Кривошапко С.Н.* Стержневые, сетчатые структуры и цельнометаллические оболочки зданий второй половины XX века – начала XXI века // *Архитектура и строительство России*. 2014. № 12 (204). С. 10–17.
13. *Кривошапко С.Н.* Вантовые структуры // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2016. № 1. С. 9–22.
14. *Krasić S.* Geometrijske površi u arhitekturi. Niš: Galaksija, 2012. 238 с.
15. *Кривошапко С.Н., Мамиева И.А.* Зонтичные поверхности и поверхности зонтичного типа в архитектуре // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 7 (1). С. 27–31.
16. *Дианова-Клокова И.В., Метаньев Д.А., Хрусталева А.А.* Латинская Америка XXI века. Инновационное развитие // *Academia. Архитектура и строительство*. 2017. № 1. С. 47–59.
17. *Finotti L.* A collection of Latin American modern architecture. Lara Müller Publishers, 2016. 166 p.
18. *Oluwagbemiga P.A., Modi S.Z.* Development of traditional architecture in Nigeria: a case study of Hausa house form // *International Journal of African Society Cultures and Traditions*. 2014. Vol. 1. No. 1. Pp. 61–74.
19. *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.
20. *Рекач В.Г.* Основная библиография по строительной механике. М.: УДН, 1968. 302 с.
21. *Гольденвейзер А.Л.* Теория упругих тонких оболочек. М.: ГТТИ, 1953. 544 с.
22. *Новожилков В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И.* Линейная теория тонких оболочек. Л.: Политехника, 1991. 656 с.

23. Флюгге В. Статика и динамика оболочек. М.: Стройиздат, 1961. 306 с.
24. *Chapelle D., Bathe K.J.* Fundamental considerations for the finite element analysis of shell structures // *Computers & Structures*. 1998. Vol. 66. Issue 1. Pp. 19–36. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(97\)00078-3](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(97)00078-3)
25. Абовский Н.П., Андреев Н.П., Деруга А.П. Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек. М.: Наука, 1978. 288 с.
26. Иванов В.Н. Вариационно-разностный метод и метод глобальных элементов в расчете сопряжений отсечков оболочек // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений: межвуз. сб. научных трудов*. М.: Изд-во АСВ, 2003. Вып. 12. С. 34–41.
27. Boundary element methods // *Proc. of the 8th Int. Conf. on BEM, Como, 1986* / ed. by C.A. Brebbia. Berlin: Springer; 1986.
28. *Schnobrich W.C.* Different methods of numerical analysis of shells // *Lect. Notes Eng.* 1987. Vol. 26. Pp. 1–17.
29. *Andrianov I.V., Awrejcewicz J.* Asymptotic approaches in the theory of shells: long history and new trends // *Acta Universitatis. Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics*. 2006. Vol. 5. No. 1. Pp. 99–116.
30. *Truesdell C.* On Sokolovsky's "Momentless Shells" // *Transactions of the American Mathematical Society*. 1947. Vol. 61. No. 1. Pp. 128–133. <https://doi.org/10.2307/1990293>
31. Зверяев Е.М. Конструктивная теория тонких упругих оболочек // *Препринты ИПМ имени М.В. Келдыша*. 2016. № 33. 25 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2016-33>
32. *Klochkov Yu.V., Nikolaev A.P., Kiselyova T.A.* To the question on continuous parameterization of spatial figures having an ellipse in a section // *Russian Mathematics*. 2017. Vol. 61. No. 9. Pp. 27–31.
33. *Gruttman, F., Wagner, W.* An advanced shell model for the analysis of geometrical and material nonlinear shells // *Comput. Mech.* 2020. Vol. 66. Pp.1353–1376. <https://doi.org/10.1007/s00466-020-01905-2>
34. Тупикова Е.М. Выбор оптимальной оболочки покрытия на квадратном плане в виде поверхности переноса // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15. № 5. С. 367–373.
35. Кривошапко С.Н. Обзор современного состояния теории оболочек сложной геометрии и оболочек в форме аналитически неопределимых поверхностей // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 1998. № 5. С. 24–28.
36. *Simmonds J.G.* Recent advances in shell theory// *Advances in Engineering Science: 13th Annual Meeting of the Society of Engineering Science*. Washington; 2001. Pp. 617–626.
37. Братухин А.Г., Сироткин О.С., Сабодаш П.Ф., Егоров В.Н. Материалы будущего и их удивительные свойства. М.: Машиностроение, 1995. 126 с.
38. *Qatu M., Asadi E., Wang W.* Review of recent literature on static analyses of composite shells: 2000–2010 // *Open Journal of Composite Materials*. 2012. Vol. 2 No. 3. Pp. 61–86. <https://doi.org/10.4236/ojcm.2012.23009>