

С.Н. КРИВОШАПКО¹¹ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», г. Москва**СТЕРЖНЕВЫЕ И СЕТЧАТЫЕ ОБОЛОЧЕЧНЫЕ СТРУКТУРЫ В XXI-м ВЕКЕ**

***Аннотация.** Основой для создания структурных конструкций является структурно организованное пространство. В статье приводится классификация структурных конструкций по типу геометрических систем, лежащих в их основе и по назначению стержневых оболочечных систем. Кратко описывается история возникновения структурных конструкций, начало которой было положено возведением Эйфелевой башни в Париже в 1889 году или ещё раньше, когда началось изготовление в промышленном масштабе прокатных профилей в 1867 году. На конкретных примерах показывается, что сетчатые оболочечные структуры в последние годы применяют чаще, чем железобетонные тонкостенные оболочки. Особое внимание в статье уделяется стержневым, сетчатым и сетчато-стержневым оболочечным структурам, построенным за последние 25 лет. Показывается, что стержневые и сетчатые оболочечные структуры построены за это время почти во всех странах, за исключением единичных регионов мира. Дается краткая информация по прочностному расчету стержневых и сетчатых оболочечных структур, их геометрии и материалу. В настоящее время идут интенсивные исследования этих структур в разных направлениях. Основные направления исследований направлены на уточнение методов прочностного расчета, на формирование оптимальных ячеек и поиск новых материалов стержней.*

***Ключевые слова:** стержневая пространственная структура, сетчатая пространственная структура, ребристо-кольцевой купол, сетчатый металлический купол; типы стержневых структур, классификация стержневых оболочечных структур*

S.N. KRIVOSHAPKO¹¹«The Peoples' Friendship University of Russia», Moscow**GRID AND RETICULATED SHELL STRUCTURES IN THE 21ST CENTURY**

***Abstract.** Structurally organized space is the base for creation of structural design. In a paper, classification of structural erections on geometrical systems, lying in their base, and on purpose of grid shell systems. The history of the appearance of structural erections, the beginning of which was put by the erection of the Eiffel tower in Paris in 1889, is described briefly. Maybe it was earlier, when manufacturing of rolled products began in industrial scale in 1867. It is shown on concrete examples that net shell structures are used at the last years more often than reinforces concrete thin-walled shells. Special attention is given to grid, net, and net-and grid shell structures that were erected at the last 25 years. It is shown that at this time, grid and net shell structures were erected almost in all country except for single regions of the World. Brief information is presented on stress analysis of grid and net shell structures, their geometry, and materials. Now, intensive research of these structures in different directions are carried out. The main directions of research are directed at more accurate definition to the methods of strength analysis, to formation of optimal meshes, and to discovery of grid materials and covering materials.*

***Key words:** space grid structure, net space structure, curvilinear structural system, rib-and-ring dome, net metal dome, types of grid structures, classification of grid shell structures.*

Введение

Очевидно, что в XXI веке интерес к проектированию и строительству зданий и сооружений криволинейных форм (рис. 1а), большепролетных тонких оболочек (рис. 1б), сетчатых и стержневых оболочечных структур (рис. 1в) значительно увеличился. Некоторые архитекторы выделяют начало XXI-го века в отдельный третий этап развития архитектуры, расчета на прочность и применения криволинейных оболочечных структур [1]

© Кривошапко С.Н., 2025

Изучая виды оболочечных структур и оболочек, можно заметить, что в рассматриваемый период времени были возведены все девять типов пространственных криволинейных структур и оболочек [2]. Однако, в отличие от «золотого века» оболочек (1920–1965 гг.), когда предпочтение отдавалось тонким железобетонным оболочкам [3], в XXI-м веке проектировались и строились, в основном, сетчатые и стержневые оболочечные



Рисунок 1 – Сооружения и здания криволинейных форм, построенные в начале XXI-го века
 а) Коммерческий банк Маврикия, 2010 г.; б) «Купольный дом XXI-го века из пенопласта объединения «BASKEY»; в) Спортивно – оздоровительный центр «Динамо», Москва, июль 2006 г.

структуры. Это стало заметным явлением уже в 2014 году [4]. Только подземные тоннели, трубопроводы и специальные сооружения (рис. 2) продолжали строить из железобетона или применялись чугунные тубинги. Использование пространственно-стержневых конструкций неканонической формы не является суперновой технологией. Их применение имеет полувековую историю. Применение сетчатых цилиндрических сводов началось с 1896 г. Чуть позже появились сетчатые сферические металлические и деревянные купола. Совершенствование и широкое внедрение ЭВМ дало новый толчок строительству и проектированию стержневых оболочечных конструкций.



Рисунок 2 – Гидротехнический водовод

Однако ни все архитекторы поддерживают тренд в архитектуре по расширенному применению в строительстве криволинейных форм. Так И.А. Бондаренко [5] считает, «что нельзя скатываться к популизму. Необходимо во всём соблюдать чувство меры. Слишком поощряется индивидуализм и гипертрофированная «прорывная» – творческая креативность. ... Это приводит к тому, что за профессиональное достижение может выдаваться нечто несостоятельное, за архитектурную новацию – бессмысленное дизайнерское оригинальничание». Е.В. Ермоленко [6] из МАРХИ (Москва) отмечает: «...постмодернизм, деконструктивизм, параметрическая архитектура перенасытили пространство жизни человека, возник стилевой кризис».

Аварии, произошедшие со стержневыми объектами в последнее время, не прибавили популярности большепролетным оболочечным сооружениям [7, 8].

Но есть архитекторы, которые поддерживают расширенное применение криволинейных структур, считая это шагом вперед в строительстве промышленных и общественных зданий [9, 10]. Производство пространственных конструкций является достаточно трудоемким, требующим профессионального подхода, грамотного проектирования и тщательного монтажа.

Метод

1. Виды стержневых и сетчатых оболочечных структур

Сетчатая оболочка – несущая строительная конструкция, очерченная по выбранной поверхности, и состоящая из коротких жестких прямых стержней, соединенных в однотипных узлах. Используются *сетчатые оболочки-покрытия*, *сетчатые оболочки-башины* и сложные

сетчатые оболочки, имеющие форму неаналитических поверхностей. С помощью сетчатых оболочек, содержащих большое число ячеек, перекрывают большие площади. Характерная черта сетчатых оболочек – отсутствие несущих конструкций в виде колонн, балок, перекрытий. Рассчитывают сетчатые оболочки с помощью уравнений теории оболочек. Сетчатые оболочки чаще применяют в промышленном строительстве для перекрытия 30–40-метровых пролетов. Для покрытия (обшивки) сетчатых купольных конструкций применяют мембранные материалы, стальные листовые материалы, вырезанные в виде треугольников или остекление.

Стержневые пространственные структуры — это геометрически неизменяемые стержневые системы, состоящие из закономерно расположенных коротких прямых стержней, образующих трехмерную конструкцию. *Стержневые оболочечные структуры* имеют форму криволинейных поверхностей. Рассчитывают стержневые оболочечные структуры по формулам строительной механики стержневых систем. Известны стержневые структуры, выполненные из стали, алюминия, бамбука, дерева и композитов.

Структурами или структурными конструкциями называют пространственные стержневые системы, образованные стержнями, соединяющимися в узлах и расположенными в пространстве в строгом геометрическом порядке. Структурные конструкции – это регулярные множества отдельных геометрически неизменяемых ячеек в виде правильных многогранников.

Первая стержневая пространственная мачтовая структура была возведена в Париже Г. Эйфелем в 1889 году для Всемирной выставки. В.Г Шухов первый запроектировал и построил стержневую конструкцию в форме однополостного гиперboloида вращения. Патент на «Ажурную башню» был ему выдан в январе 1896 г. Первенство в строительстве стальных сетчатых конструкций принадлежит С. Катлеру (S. Cutler), построившему стальные сетчатые оболочки газгольдеров в 1888 г. Сетчатая конструкция свода запатентована П.Л. Нерви и осуществлена им в двух агарах Орвието в 1936 г. Ал. Гр. Белл получил несколько патентов на пространственные стержневые структуры и построил в Канаде первую стальную трубчатую структуру (наблюдательная вышка) в 1907 г.

Классификация структурных стержневых конструкций производилась по типу геометрических систем, лежащих в их основе, по типу типовой или авторской конструктивной системы, по типу узловых элементов, по характеру работы структур, по материалу стержней, по их поперечным сечениям. К.Н. Душкевич [11] предлагает упрощенную классификацию стержневых оболочечных структур по объемно-пространственному типу, содержащую три типа общественных зданий: оболочка как покрытие, оболочка как покрытие части здания и оболочка как здание. Он полагает, что такая классификация будет полезна для архитекторов, затрагивая вопросы как проектирования конструкций, так и их формообразования.

Далее будут рассмотрены только две классификации стержневых оболочечных структур. Некоторые сведения о видах стержневых и сетчатых оболочечных структур с большим числом иллюстраций приведены в статье [4]. Дополним сведения, содержащиеся в этой статье новыми материалами, а результат оформим в описание двух групп сооружений. Первая группа содержит классификацию стержневых оболочечных структур по конструктивно-геометрическим признакам, а вторая – по назначению стержневых оболочечных структур.

1.1. Классификация стержневых оболочечных структур по конструктивно-геометрическим признакам

1.1.1. Двумерные (однослойные) стержневые структуры:

- структуры с линейной срединной поверхностью (рис. 3) [12],
- структуры, полученные путем аппроксимации аналитических поверхностей с $K \neq 0$ (рис. 4а),

- структуры из блоков одного типоразмера (паркетированные структуры) (рис. 4б),
- стержневые структуры произвольной формы (рис. 4в).

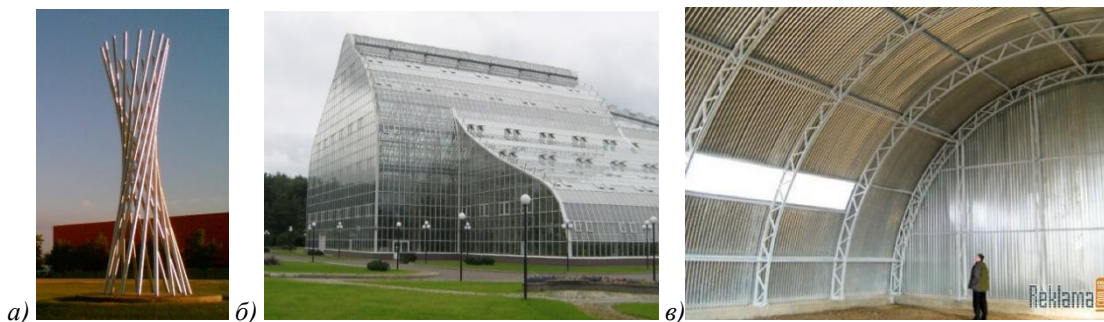


Рисунок 3 – Однослойные стержневые структуры с линейной срединной поверхностью
а) памятный символ Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми, США



Рисунок 4 – Однослойные стержневые структуры
а) «Балтийская жемчужина», <http://www.cih.ru/j2/395.html>; б) вокзал в Лиссабоне, Португалия;
в) мост через реку Куру, Тбилиси, Грузия.

1.1.2. Трехмерные (пространственные) стержневые структуры

Помимо рассмотренных выше двумерных стержневых структур, очерченных по заданным поверхностям, намного шире применяются трехмерные пространственные стержневые структуры в виде оболочек, многогранников, пластин. Эти пространственно-стержневые структуры с легкостью перекрывают большие пролеты и площади при незначительном весе.

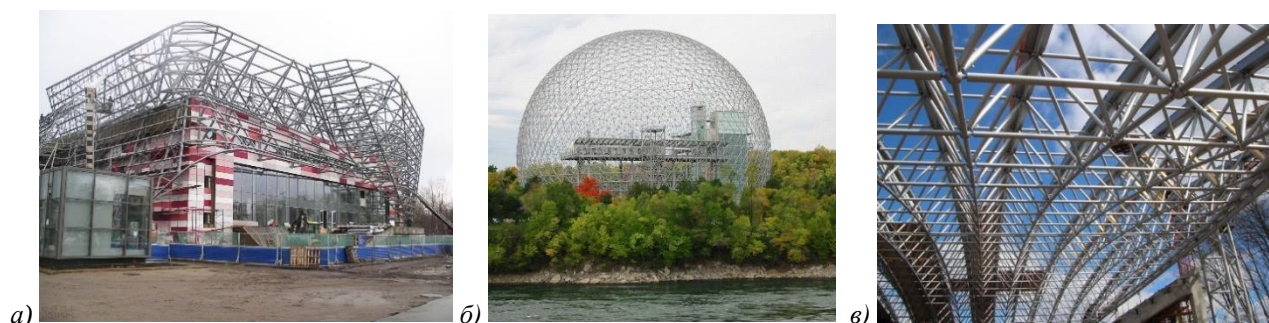


Рисунок 5 – Трехмерные (пространственные) стержневые структуры
а) несущий металлический каркас при реконструкции кинотеатра «Гавана» под Московский молодежный центр «Планета КВН», Москва, 2013 г., Atrium Studio [coolhouses.ru]; б) «Биосфера» Фуллера; в) структурные конструкции системы «БрГТУ».

К трехмерным пространственным стержневым структурам относятся:

- криволинейные структурные системы из прямых стержней (рис. 5а),
- стержневые оболочечные трехмерные структуры из перекрещивающихся ферм из металлических труб или прокатных профилей, обтянутые архитектурным текстилем,

- трехслойная криволинейная структура, верхние и нижние слои которой выполняются из листового металла, а внутренний слой представляет собой стержневое заполнение (покрытие театра оперы и балета, Севастополь, деконструктивизм, концепция формы утверждена 7.12.2018),
- регулярные пространственные стержневые системы Р.Б. Фуллера (геодезические купола) (рис. 5б),
- именные пространственные стержневые системы К. Ваксмана (ФРГ) Ст. Дю-Шато (Франция), системы «Триодетик» (Канада), структурные конструкции системы «БрГТУ» (Белоруссия) (рис. 5в) и др. [13].

1.1.3. Металлические уникальные большепролетные сооружения с пролетами более 60 м



Рисунок 6 – Металлический уникальный большепролетный свод, ОАО «ГИПРОНИИАВИАПРОМ»

ЦНИИСК им. Кучеренко предложил выделить в отдельную группу металлические уникальные большепролетные сооружения, к которым следует относить объекты, имеющие пролеты более 60 м при принципиально новых конструктивных решениях (рис. 6), требующих разработки специальных методов расчета, экспериментального исследования и т. п., а также объекты пролетом более 100 м при конструктивных решениях, успешно опробованных в практике проектирования, строительства и эксплуатации.

1.1.4. Ребристые, ребристо-кольцевые и сетчатые металлические купола

Ребристые, ребристо-кольцевые и сетчатые металлические купола можно с некоторым допуском отнести к стержневым и сетчатым структурам [14]. Ребристо-кольцевые купола являются наиболее рациональной конструктивной формой [15]. У сетчатых куполов каркас образует пространственную стержневую систему с треугольными ячейками. Сетчатые оболочки эффективны для строительства в районах с сейсмичностью до 9 баллов [14].

Металлические каркасы большинства типов куполов не полностью подходят под определение стержневых или сетчатых оболочечных структур, так как последние, согласно определению, должны состоять из коротких прямых стержней, объединенных в жесткую плоскую или пространственную структуру. В некоторых статьях стержневые купола включают как подгруппу в группу «1.1.2. Трехмерные (пространственные) стержневые структуры».

1.1.5. Стержневые структуры на основе принципов бионического формообразования

Природообразные формы стержневых структур, в частности, ветвящиеся конструктивные системы часто используются в странах Юго-Восточной Азии и Японии. Несколько конкретных примеров будут рассмотрены в разделе 2.

1.2. Классификация стержневых оболочечных структур по назначению

Стержневые пространственные конструкции стали сооружаться в самом конце XIX века и тогда же возникла потребность в их классификации по назначению. Некоторые проектировщики отмечают, что до настоящего времени не устоялась терминология, определяющая группы стержневых систем по назначению, поэтому предложенная ниже

классификация является одним из вариантов разделения оболочечных стержневых структур по назначению:

- несущие стержневые оболочечные структуры (описание 21 проекта с применением металлических сетчатых оболочковых структур, реализованных в 2002–2017 годах, приводится в статье [16] с 95 наименованиями использованной литературы),
- стержневые структуры как декоративное оформление к основному сооружению (рис. 7а, б),
- стержневые объекты малой архитектуры (рис. 7в),
- вспомогательные стержневые структуры как часть основного сооружения, рис. 7г (несколько примеров зданий криволинейной формы, содержащих фрагменты стержневых оболочек, фрагментарно участвующих в формообразовании основного сооружения, построенных в 2000–2013 годах, приведены в статье [11],
- стержневые мачты, вышки, опоры ЛЭП.

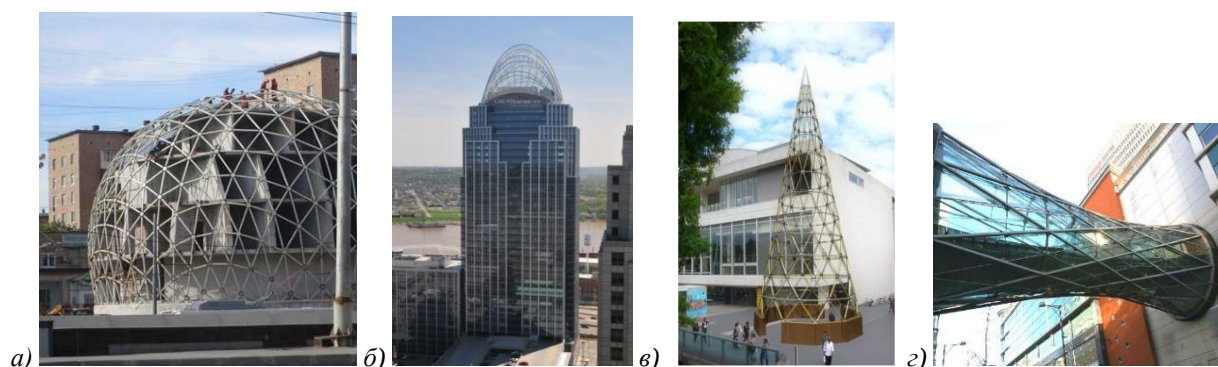


Рисунок 7 – Классификация стержневых структур по назначению

а) главный диспетчерский пункт, Ленинградское шоссе, Москва; б) здание в 41 этаж в г. Цинциннати, США, 2011 год, увенчано стальной короной из 51 арки [4]; в) 22-х метровая коническая стержневая структура [www.designboom.com]; г) пешеходный переход, Манчестер, Англия [triptonkosti.ru], 1999 г.

1.3. Правила проектирования металлических пространственных покрытий

В Российской Федерации существуют правила проектирования металлических пространственных покрытий [17], утвержденные Минстроем России, в которых, в частности, отмечается следующее.

Пространственные стержневые конструкции из коротких прямых металлических стержней подразделяются на три основные группы: стержневые плиты, цилиндрические оболочки и сетчатые оболочки двойной кривизны, в том числе купола. Стержневые элементы следует изготавливать из открытых прокатных или замкнутых профилей.

Цилиндрические оболочки следует использовать в однослойных покрытиях пролетом до 30 м, в двухслойных – до 80 м.

Расчеты на прочность выполнять методом конечных элементов.

Однослойный купол следует выполнять из прокатных или сварных профилей двутаврового сечения. Двухслойный купол проектировать в виде ферм с параллельными поясами из круглых или прямоугольных труб.

2. Стержневые и сетчатые оболочечные структуры XXI-го века

Как сказано ранее в предлагаемой статье в работе [4] дано описание большого числа стержневых, сетчатых, сетчато-стержневых оболочечных структур, построенных в первое десятилетие XXI-го века. Эти структуры не будут дублироваться повторно, а будут рассмотрены только не указанные в статье [4].



Рисунок 8 – Простейшие стержневые структуры из одиночных стержней (Москва)

Обзор стержневых оболочечных структур, начнем с наиболее простых структур, совпадающих по форме с алгебраическими поверхностями второго порядка. Например, на рис. 8 представлены стержневые структуры, совпадающие по форме с однополостным гиперboloидом вращения (рис. 8а, 2014 г.), сферической поверхностью (рис. 8б), конусом (рис. 8в)

Следующими арочно-стержневыми структурами по сложности возведения будем считать структуры из арок, накрываемые водонепроницаемым тканевым материалом (рис. 9а), пленкой (рис. 9б) или пластмассовыми тонкими полупрозрачными (рис. 9в) или прозрачными листами.



Рисунок 9 – Арочно-стержневые структуры из систем арок (а, в - Московская обл. и б – Азербайджан [vipsport.az])

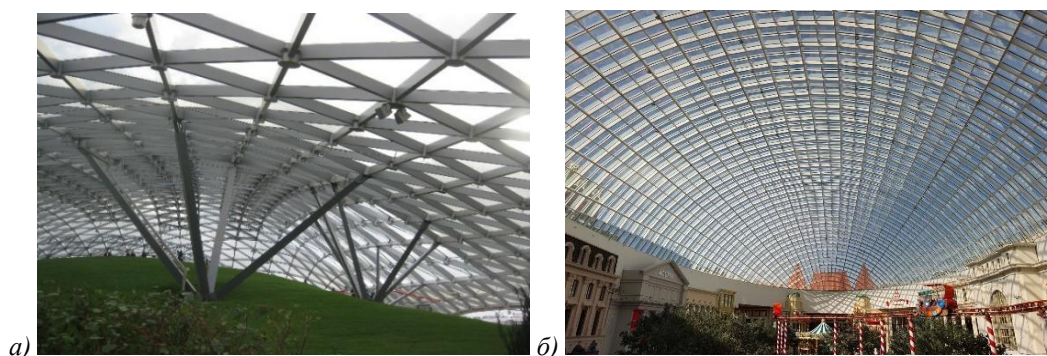


Рисунок 10 – Однослойная стержневая структура произвольной формы (а) и сетчатая структура покрытия (б) в Москве

а) «Стеклянная кора», Зарядье, 2014–2017 гг.; б) парк «Остров мечты», 2016–2020 гг.

В Москве наиболее известными однослойными стержневыми или сетчатыми оболочечными структурами являются «Стеклянная кора», Зарядье, Москва (рис. 10а) и самый большой в Европе стеклянный купол в парке «Остров мечты», Москва (рис. 10б). Несколько сетчатых и стержневых оболочечных структур, возведенных в Москве и в Московской области, представлены на рис. 3б; 5а; 7а; 8, 9а, в. В Москве, как и во всех экономически развитых странах, остекление оболочек получает широкое применение.



Рисунок 11 – Несущая ребристо-кольцевая стержневая структура (а) и трехслойная криволинейная структура с внутренним стержневым заполнением (б, в), Москва

а) ребристо-кольцевая стержневая структура спортивно – оздоровительного центра «Динамо»; б) стержневой каркас ледового Дворца "Синяя птица", в) законченная трехслойная криволинейная структура с внутренним стержневым заполнением ледового Дворца "Синяя птица", 2014 г.

Такое покрытие наиболее привлекательно с архитектурной и эстетической точек зрения, однако использование стекла в качестве ограждающей конструкции всегда приводит к удорожанию и увеличению металлоемкости вследствие уменьшения допусков перемещений элементов конструкции и осадки.

Спортивно – оздоровительный центр «Динамо», Москва, строительство которого закончено в июле 2006 г., содержит оси несущих 32-х ребер-полуарок на сферической поверхности с радиусом 53,8 м. Ребра-полуарки «жестко» присоединены к нижнему кольцу диаметром 72 м и верхнему кольцу диаметром 8,6 м (рис. 1в и рис. 11а). На рис. 11б,в показан ледовый Дворец "Синяя птица" в процессе строительства (рис. 11б) и в законченном виде (рис. 11в).

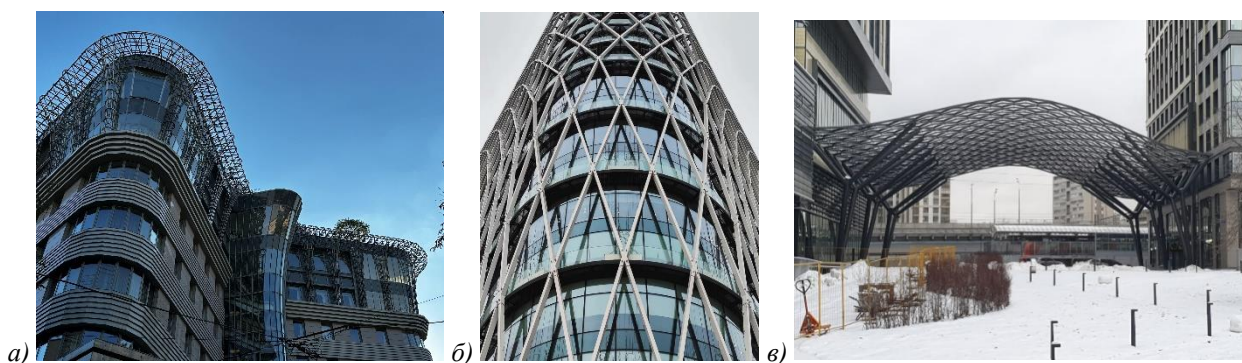


Рисунок 12 – Декоративное оформление стержневыми конструкциями зданий в г. Москве

а) стержневая структура как декоративное оформление карниза жилого дома; б) декоративное оформление наружных стен бизнес-центра «Земельный» металлическими балками, покрашенными в белый цвет, арх. Ю. Борисов, 2020 г. [prorus.ru]; в) вспомогательная стержневая структура с линейной срединной поверхностью.

В Москве используются еще два типа стержневых структур (рис. 12).

Ряд представленных выше стержневых и сетчатых оболочечных структур, возведённых в Москве, подтверждают широкое использование всех видов рассматриваемых пространственных стержневых конструкций в архитектуре города. Представленные примеры применения стержневых и сетчатых структур только в одной Москве противоречат выводам

статьи [16], что сетчатые оболочки не так часто проектируются российскими специалистами из-за сложности моделирования конструкций в расчётных комплексах.

Проиллюстрируем возможности стержневых и сетчатых оболочечных структур в реализации градостроительных проблем других стран.

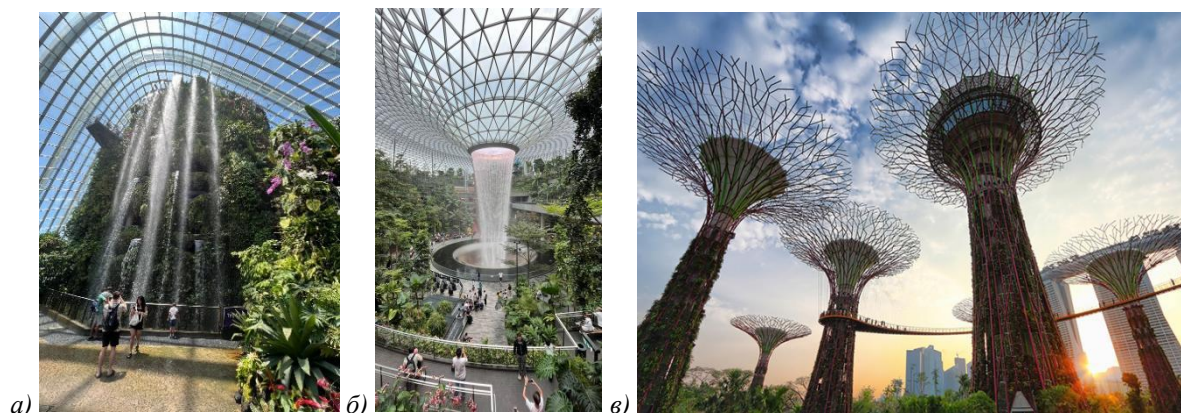


Рисунок 13 – Уникальные сетчатые оболочки Сингапура

а) одно из сооружений паркового комплекса «Gardens by the Bay»; б) комплекс Jewel с «интерьерным» водопадом в аэропорту Чанги (Changi), 2019; в) ландшафтный парк «Сады в бухте»: «Супердеревья» из алюминиевых стержней (декоративные ветви), железобетонных оболочек и стальной сетки (см. раздел

На рис. 13 представлены уникальные сетчатые оболочки, возведенные в Сингапуре. Кроме этих примеров можно указать на сетчатые оболочки ТРЦ ION Orchard, на стержневое оформление моста «Хеликс» (2010 г.), на стержневую структуру покрытия станции Экро (2001 г.), обшитую сверху титановыми плитами [<https://novate.ru/blogs/250315/30574/>].

Хорошо известны и часто приводятся в качестве иллюстрации архитектуры свободных форм покрытие из стали и стекла двух отдельно стоящих зданий гостиницы Yas Marina в Абу-Даби, ОАЭ, наглядно подтверждающих преимущество стальных конструкций перед железобетонными при определенных архитектурных решениях пространственных композиций [19], гигантский комплекс Большого Народного театра (China National Grand Theatre) из титана и стекла, ставший символом Китая, спроектированный известным



Рисунок 14 – Три типа стержневых сооружений

а) Aspire Tower, Доха, 2007 г., [structurae.net]; б) кафе Nocenco, Вьетнам, 2018 г., «Бамбуковая архитектура», [in.pinterest.com] (см. раздел 1.1.5); в) трехслойная криволинейная структура с внутренним стержневым заполнением, Национальный стадион Сингапура, 2014, [pinterest.com].

французским архитектором Полем Андрё (Paul Andreu), 2002-2007 гг. [20], Aspire Tower (рис. 14а) – самое высокое сооружение в Дохе, Катар, высотой 300 м из стальной сетки, 2007 г. В последние десятилетия арабская архитектура изменилась и стала современнее и инновационнее. Это оказало влияние на современную арабскую архитектуру, которая находится в процессе трансформации и переосмысления.

С определенными допущениями можно считать несущие конструкции из бамбука кафе Nосенсо, Вьетнам, стержневыми структурами (рис. 14б), выполненными по канонам «Архитектурной бионики».

Уникальное крупнейшее купольное сооружение в мире, имеющее выдвижную трехслойную крышу, построено в Сингапуре в 2014 г. (рис. 14в).

Несколько стержневых оболочечных структур, известных во всём мире, построено в Китае. Комплекс Большого Народного театра отмечался ранее. Укажем еще на спортивный центр для проведения универсиады в г. Shenzhen, который хорошо вписался в окружающий ландшафт. Центр запроектирован в виде стальной призматической оболочки на основе многогранников с треугольными сторонами (рис. 15а). Стержневые многогранники располагаются по периметру центра. Центр был запроектирован German studio GMP Architekten.

На основании проведенного анализа в монографии [21] делается вывод, что в Казахстане, купольные формы за столетия существования в практике архитектуры и строительства зарекомендовали себя как наиболее соответствующие природно-климатическим условиям. Устойчивые к сейсмическим колебаниям, ветрам, перекрывающие большие пролеты, стержневые купола должны получить новое рождение (рис. 15б).

Современная архитектура Индонезии предусматривает широкое использование деревянных стержневых структур с линейной срединной поверхностью (рис. 15в).



Рисунок 15 – Стержневые структуры в странах Азии

а) фрагмент спортивного центра для проведения студенческой универсиады, Shenzhen, Китай, 2011 г., фото Ch. Gahl; б) возведение жилого дома-купола с деревянным стержневым каркасом, Казахстан [21]; в) одна из шести уникальных вилл, планируемых для строительства на о. Бали, арх. Kengo Kuma, древесина и стекло, из фрагментов гипара.

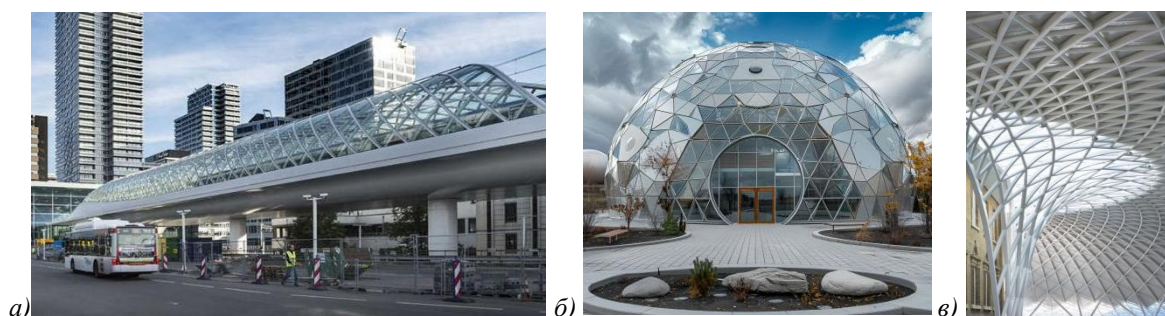


Рисунок 16 – Сетчатые и стержневые оболочечные структуры в Европе

а) подъезд к новой железнодорожной станции, Гаага, Нидерланды, 2016 г. [pinterest.com.au]; б) геодезический купол [21]; в) King's Cross Station, Лондон, 2017 г. (запроектировано John MacAslan)

Покрытие над железнодорожной станцией в Гааге выполнено в виде двухслойной пространственной стержневой конструкции из стержней прямоугольного поперечного сечения, организованных в два независимых слоя и жестко связанных между собой. Стеклопанельная обшивка покрывает структуру снаружи (рис. 16а). Станция запроектирована архитектурным бюро ZJA Zwartz & Jansma Architects, The Netherlands. Более подробно это сооружение описывается в статье [22].

Металлоконструкции куполов больших до 125 м пролетов, созданных в последнее время, выполнены, как правило, однослойными сетчатыми или в виде неких пространственных структурированных конструкциях. Например, типовые металлоконструкции элементов куполов, выпускаемые заводами США (Temcor) и Европы (Mero), изготовлены по сетчатой или структурной схеме. Лишь один купол спортцентра “Динамо”, построенный в 2006 г. в Москве выполнен с массивными двутавровыми арками, кольцами и связями (рис. 11а). На рис. 14в представлен трехслойный купол, а на рис. 16б показан один из сетчатых куполов, описанный в статье [23]. Но в однослойных оболочках существует проблема устойчивости. Для больших пролетов уже необходима некая пространственная структурированная конструкция. Очень интересно после реконструкции выглядит стержневая однослойная структура рядом с вокзалом King Cross Station в Лондоне (рис. 16в)

Опубликовано много работ по архитектуре сетчатых и стержневых оболочечных структур в Европе. Перечислить эти публикации или дать иллюстрации основных стержневых сооружений Европы, построенных в XXI веке, в одной статье невозможно. Ограничимся упоминанием только еще одной статьи [24], где приводится большая библиография из 47 наименований по теме и описывается стержневая пространственная конструкция the Ephemeral Cathedral of Créteil в Париже (2013 г.), Центр Помпиду шестиугольной формы в г. Мец (Metz), Франция, с пролетом 50 м (2010 г.), деревянная стержневая оболочка с 626 болтовыми соединениями в Толедо, Испания, (Toledo Gridshell in Naples, 2012), покрытие железнодорожной станции Кэнери-Уорф в Лондоне (Canary Wharf Cross-rail, 2014) и др.

Приведенные примеры показывают, что в Европе сетчатые и стержневые оболочечные структуры пользуются большой популярностью. В статье [25] авторы утверждают, что количество стержневых оболочечных конструкций как в Европе, так и во всем мире, за последние 50 лет значительно увеличилось. Они приводят описания и иллюстрации большого числа криволинейных стержневых структур из дерева, в том числе пологую волнообразную стержневую оболочку с размерами 90 × 20 м из дуба на входе в парк «Savil Garden», Windsor, построенную в 2005 году под руководством архитектора Glenn Howells. Волнообразная оболочка хорошо вписалась в окружающий ландшафт. Деревянная структура покрыта фанерой. Вес стержневой структуры из дерева – 30 т, что намного меньше железобетонного варианта.

В Северной Америке сетчатые и стержневые оболочечные структуры встречаются часто. Это можно продемонстрировать на примере стержневой структуры декоративного



Рисунок 17 – Сетчатые и стержневые оболочечные структуры в США

а) Флорида, музей С. Дали, бюро «ХОК», 2010, [ru.pinterest.com]; б) библиотека Чикагского университета, Чикаго, 2011 г., фото: architizer.com; в) Флоридский политехнический университет, 2014 г., Лейкленд, арх. С. Калаправа [aykutozdemir.com.tr]

оформления к основному сооружению музея С. Дали, спроектированное архитектурным бюро «ХОК» по канонам «Нелинейной архитектуры», Флорида, 2010 (рис. 17а), или купола библиотеки Чикагского университета в виде сетки из стальных трубок, спроектированного Х. Яном совместно с инженером В. Зобеком, 2011 г. (рис. 17б), или наружного сетчатого

оформлением Флоридского политехнического университета (рис. 17в), 2014 г., Лейкленд, США, или на примере сферического здания Science World в Ванкувере, Канада (2007 г.).

На Африканском континенте стержневые и сетчатые оболочечные структуры в XXI веке практически не строились. Можно найти 3–4 купола и представлен проект нового здания Парламента, Уагадугу, Буркина-Фасо, арх. Дьебедо Франсис Кере, в форме сетчатой оболочки.

ТЦ Chadstone Shopping Center двойной кривизны свободной формы из стали и стекла, состоящий из 2645 прямоугольных панелей, можно привести в качестве примера сетчато-стержневой оболочечной структуры, построенной в 2016 году в Австралии в Мельбурне.

Проведенный в статье [26] обзор научных и инновационных объектов, построенных в XXI веке в странах Латинской Америки, не выявил зданий инновационного назначения ввиду сжатого финансирования строительства, поэтому архитектурные схемы построек – менее честолюбивые по своим масштабам и более специализированные. И как следствие, сетчатые и стержневые оболочечные структуры не вошли в основные тенденции формирования инновационных зданий и комплексов.

В последнее время архитекторы наравне со сферическими (рис. 18а), пирамидальными, сводчатыми зенитными светопрозрачными фонарями над отверстиями в покрытиях зданий стали использовать пологие сетчатые оболочки в форме эллипсоидов вращения над эллиптическими отверстиями (рис. 18б) и составные сетчатые оболочки (рис. 18в)

В статье [27] приводятся модели стальных стержневых структур, обертывающие минимальные поверхности на круглых (рис. 19а) и прямоугольных (рис. 19б) планах с



Рисунок 18 – Сетчатые однослойные оболочки в качестве светопрозрачных зенитных фонарей
а) сферический зенитный фонарь [victoriafoto.ru]; б) зенитный фонарь над эллиптическим отверстием;
в) зенитный фонарь над прямоугольным планом с закруглениями на торцах

опорами в нескольких точках. Задача аппроксимации минимальных поверхностей возникла в связи с появлением архитектуры минимальных поверхностей.

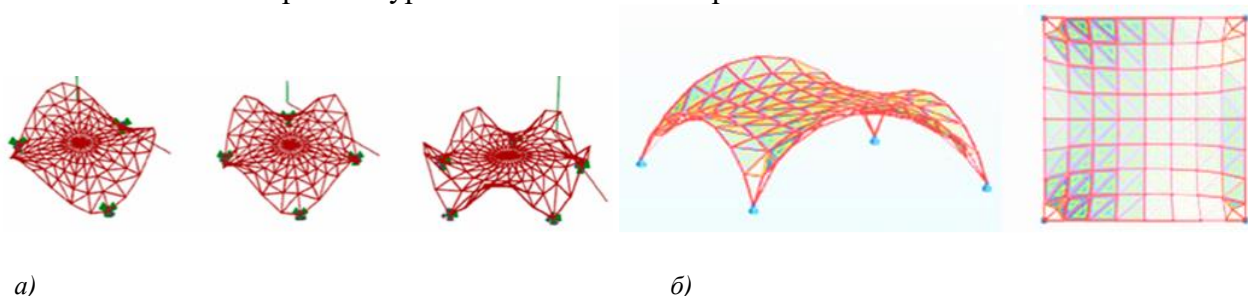


Рисунок 19 – Замена минимальных поверхностей однослойными стержневыми структурами [27]
а) стержневая структура на круглом плане; б) стержневая структура на квадратном плане

3. Краткая информация по расчету стержневых и сетчатых оболочечных структур, их геометрии и материалу

Август Фепплер первым предложил методику расчета пространственных стержневых систем в 1880 г., которую Г. Эйфель использовал при проектировании своей башни в 1888 г.

Классические стержневые структуры по характеру своей работы являются многократно статически неопределимыми пространственными конструкциями. Благодаря статической неопределимости структуры способны перераспределять внутренние усилия, т. е. в случае выхода из строя одного или нескольких элементов их продольные внутренние силы перераспределяются между смежными элементами. Избыточность элементов в структуре обеспечивает её живучесть. Исследования сетчатых пространственных систем ведутся, в основном, в двух принципиально различных направлениях. Первое направление основано на использовании дискретной расчётной модели (метод сил, перемещений, смешанный метод и др.), но в случае высокой степени статической неопределимости реальной системы возникают трудности в вычислительном процессе. Трудности численной реализации существенно возрастают с увеличением количества узлов и стержней сетчатых систем. Второе направление основано на замене дискретной системы эквивалентной континуальной расчётной моделью. При расчёте стержневых оболочек грани конструкций заменяются сплошными пластинами эквивалентной толщины при работе на сдвиг, осевое растяжение и сжатие. Расчёт сетчатых оболочек выполняют на ЭВМ по специально разработанным программам. Появление новых систем автоматизированного проектирования (САПР) позволило выйти за пределы простейших конфигураций сетчатых оболочек. Архитекторы и инженеры-строители стали придавать объектам разнообразные формы, в том числе аналитически не задаваемые.

В настоящее время расчет стержневых оболочечных структур ведется с привлечением разнообразных методик, предложенных во второй половине XX века. Классическая теория оболочек не всегда являлась достаточно полной и требовала ряда уточнений. Исследования сетчатых и стержневых оболочечных структур ведутся в разных направлениях. Расчеты на устойчивость однослойных пространственных стержневых систем должны включать решения трех типов задач: потеря устойчивости отдельного стержня, местная потеря устойчивости структуры и общая потеря устойчивости всей структуры. Перечислим основные направления исследований по прочностному расчету стержневых структур, геометрии ячеек и используемому материалу стержней.

Основная функция несущих стержневых систем – восприятие внешних нагрузок. Х. Энгель [28] в основу классификации стержневых структур предложил заложить механизм сопротивления внешним нагрузкам. По его мнению, все существующие в строительстве несущие системы можно разделить на пять видов.

В диссертации [29] предложена методика расчета сетчатых гипаров и однополостных гиперболоидов вращения в геометрически нелинейной постановке с использованием вариационно-разностного метода и метода продолжения решения по параметру.

В работе [30] дается вывод аналитических формул для расчета покрытия свода, расчлененного на плоские арки-полоски с расчетной шириной равной повторяющемуся шагу элементов свода.

Для расчёта сложных статически неопределимых систем типа сетчатых и подкреплённых оболочек вращения с учётом поперечного сдвига могут использоваться методы, основанные на применении тригонометрических рядов [31].

Одним из наиболее эффективных современных методов численного решения инженерных задач с применением ЭВМ является метод конечных элементов. МКЭ в перемещениях занимает лидирующее положение в строительной механике оболочек и будет основным аппаратом дискретизации рассчитываемых объектов. Причем МКЭ используется как для создания поверхностей [32], для разбиения конечно-элементной сетки [27] (рис. 19), для прочностного расчета сетчатых и стержневых оболочечных структур при действии

статической нагрузки [33] так и для определения собственных частот колебаний структуры [34].

Изучается влияние конструкции узловых сопряжений на усилия в элементах металлического каркаса ребристо-кольцевого купола [35].

Выбор сетки разбиения выбранной поверхности на свойства получаемой сетчатой оболочечной структуры также является важной темой современных исследований [36].

В последние два десятилетия поступает всё больше предложений по замене стальных стержней на деревянные [37] и композитные стержни, что упрощает узлы соединений и удешевляет стоимость стержневой структуры (рис. 15б, в).

Приобретённый опыт проектирования и строительства деревянных несущих стержневых оболочечных структур позволил выделить два основных подхода при расчете этих оболочек [25]. При первом подходе большое влияние на точность расчетов оказывает совпадение геометрических размеров двумерной физической модели из прямоугольных идентичных ячеек и реальной структуры. Второй подход базируется на конечно-элементном методе расчета и учитывает механические свойства материалов, тип соединений, точное расположение внешней нагрузки, трехмерную физическую модель.

Некоторые предлагают разделять сетчатые оболочки по геометрическому признаку на вогнутые, вогнуто-выпуклые и выпуклые [38], аргументируя это предложение многими иллюстрациями. Но что это даёт для будущих архитектурных проектов не указывается. Классификация общественных зданий на три типа, предложенная Душкевич К.Н. [11], по объемно-пространственному принципу может стать полезным инструментом как для практикующих архитекторов, формируя общее представление об архитектурных возможностях стержневых конструкций, так и для студентов профильных ВУЗов, способствуя формированию более ясного представления о работе конструкций и их формообразующих возможностях в объеме здания.

Благодаря совокупности несущих, аэродинамических, конструктивных свойств, скорости и простоте сборки, компактности доставки, сферические геодезические купола будут с успехом применяться в суровых климатических условиях Крайнего Севера. Преимущества сетчатых конструкций перед обычными: «мобильность и скорость сборки; конструкцию можно разобрать и собрать повторно; стержневые элементы умещаются в компактную упаковку; узловые и стержневые элементы имеют стандартные габариты, а инструкция по сборке понятна и проста, работа по сборке не требует специализированных навыков» [39].

4. Материал покрытий и заполнения ячеек сетчатых и стержневых оболочечных структур

Основные материалы покрытия структур уже упоминались в статье ранее при описании самих структур. Стеклоянное покрытие наиболее привлекательно с архитектурной и эстетической точек зрения. На рис. 20 показан фрагмент наружного остекления покрытия «Стеклоянная кора», Москва, а на рис. 10а представлен вид изнутри на однослойную стержневую структуру в целом, заполненную более чем 2400 стеклопакетами треугольной формы индивидуальных размеров. На рис. 10б дан пример сетчатой структуры со стеклоянным покрытием. Другие варианты стеклоянного покрытия представлены на рис. 3б.

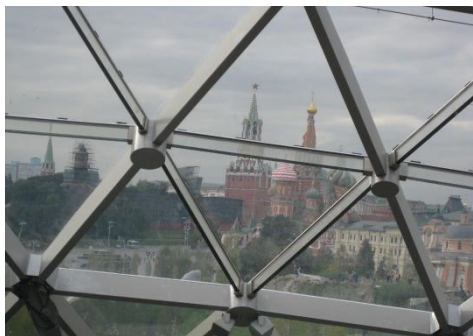


Рисунок 20 – «Стеклоянная кора» (узловые сопряжения), Зарядье, Москва

Три интересные сетчато-стержневые однослойные оболочки со стеклоянным покрытием подробно описываются в статье [40]. Одна оболочка, включающая в свою структуру вертикальные деревянные элементы, горизонтальные стальные трубы и диагональные стальные тросы построена для Peek and Cloppenburg

Cologne. Другое сетчатое сооружение со стеклянной крышей сложной геометрии (Frankfurthochvier) заменено конечно-элементной сеткой. Третья сетчатая оболочка в виде волн на поверхности водоёма взята за основу торгового центра в London-White City площадью 17000 м².

Полусветопрозрачные пластмассовые листы больших размеров архитекторы выбрали для покрытия арочно-стержневой структуры, показанной на рис. 9в.

Для покрытия небольших стержневых структур павильонов дешевле применить тенты, прорезиненный брезент или другой водонепроницаемый тканевый материал (рис. 9а), или пленку (рис. 9б).

У большепролетных трехслойных структур со стержневым заполнением верхние и нижние слои представляют собой тонкие стальные листы (рис. 14в). В некоторых случаях применяли титановые панели (Большой Народный театр, Китай). Сейчас толщина трехмерных стержневых структур достигает нескольких метров.

Хорошо себя зарекомендовали стержневые структуры из древесины, пропитанной антисептиками и антипиренами (рис. 15б) или из клееной древесины, которая появилась после 1965 года. Материал для деревянных покрытий – то же дерево в виде треугольных плоских плит или фанерных листов [25].

В условиях сурового российского климата возможно использование утепленных мембран для покрытия купольных сооружений [39]. Помимо мембран для покрытия геодезических куполов могут быть использованы стальные листовые материалы, сэндвичи и т. д., вырезанные в виде треугольников. Они крепятся между собой болтовыми и клепальными соединениями.

В качестве покрытия сетчатой конструкции возможны тканые или полимерные структуры, стеклопакеты, оргстекло (рис. 4а), непрозрачная сэндвич-панель, поликарбонат (рис. 16б).

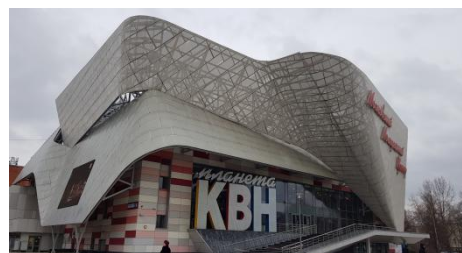


Рисунок 21 – Московский молодежный центр «Планета КВН», Москва

Ленты из перфорированных алюминиевых листов с отверстиями были использованы архитекторами архитектурного бюро «Атриум» для покрытия стержневой фасадной конструкции Московского молодежного центра «Планета КВН» (рис. 5а). Строение обернуто двумя полотнищами, через которые просвечивает стержневой каркас (рис. 21). Сначала предполагалось исполнить гибкие полотнища из архитектурной ткани. Архитектурный текстиль был использован во многих постройках летней лондонской олимпиады. Из прочного, гибкого и легкого текстиля делают натяжные купола, козырьки, выставочные павильоны. Из архитектурной ткани сделаны фасады павильона Германии на всемирной выставке ЭКСПО-2010 в Шанхае (EXPO 2010 Shanghai Deutscher Pabilion "balancity") [41].

Результаты и обсуждение

Достоинства структурных конструкций заключается в архитектурной выразительности, многообразии пространственных форм, повышенной жесткости, в удобстве транспортировки, скорости сборки и монтажа, унификации прямых прокатных стержней и узлов. Поэтому они стали конкурентными в современных условиях. Достоинства этих структур оценили архитекторы большинства стран мира. И только в отдельных странах нет материально-технической и научно-вычислительной базы для проектирования и строительства большепролетных стержневых структур, очерченных по аналитическим поверхностям и поверхностям свободных форм, задаваемых численно. Знаменитые архитекторы, работающие в стиле «хай-тек», такие как Норманн Фостер, Николас Гримшоу, Сантьяго Калатрава, Филипп Самэн, Ричард Роджерс, Франк О. Гери, Заха Хадид и многие другие, в своих шедеврах часто использовали конструкции, созданные с использованием

сетчатых и стержневых пространственных оболочек. Некоторые архитекторы и инженеры-строители убеждены, что эти оболочечные структуры – сооружения будущего.

Достоинства стержневых пространственных структур и заинтересованность стран в их изучении и внедрении наглядно подтвердилось в многообразии пространственных стержневых конструкций, положенных в основу решений построенных павильонов большого числа стран на всемирной выставке ЭКСПО – 2020 в Дубае, ОАЭ. Несущие стержневые пространственные структуры павильонов выбрали Азербайджан, Монако, Ангола, Австралия, Южная Корея, США, Филиппины, Испания, Словения, Сингапур, Ирак и многие другие. Стержневое декоративное оформление основных павильонов использовали архитекторы Бельгии, ОАЭ, Малайзии, Швеции, Омана и другие.

Довольно много работ по сетчатым и стержневым оболочечным структурам, вошедших в список использованной литературы, написаны молодыми специалистами, например аспирантами, которые включили эти исследования в свои кандидатские диссертации. Есть статьи, подготовленные студентами строительных и архитектурных вузов. Эти публикации подтверждают большую популярность сетчатых и стержневых оболочечных структур и среди молодёжи.

Заключение

1. Высокая конкурентоспособность – структурные конструкции обладают архитектурной выразительностью, жесткостью, удобством монтажа и транспортировки, что делает их востребованными в современном строительстве.
2. Глобальное применение – ведущие архитекторы мира (Н. Фостер, З. Хадид, С. Калатрава и др.) активно используют стержневые и сетчатые оболочки, а их широкое применение на ЭКСПО-2020 подтверждает международный интерес к этим технологиям.
3. Ограниченное внедрение – в некоторых странах развитие таких конструкций сдерживается из-за нехватки научно-технической базы для проектирования сложных большепролетных структур.
4. Перспективность и популярность – стержневые и сетчатые конструкции считаются технологиями будущего, что подтверждается активным изучением их молодыми специалистами в диссертациях и научных работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сысоева Е.В. Научные подходы к расчету и проектированию большепролетных конструкций // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 2 (101). С. 131–141. DOI: [10.2222/1997-0935.2017.2.131-141].
2. Гринько Е.А. Типы пространственных криволинейных структур и оболочек строительного назначения // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 4. С. 128–141. DOI: [10.54734/20722958_2024_4_128].
3. Krivoshapko S.N., Christian A. Bock Hyeng, Mamieva I.A. Chronology of erection of the earliest reinforced concrete shells // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. 2014. Vol. 18. Iss. 2. Pp. 95–108. ISSN: 2076-734X, 2076-7366.
4. 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. ISSN: 0235-7259.
5. Бондаренко И.А. Об уместности и умеренности архитектурных новаций // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 1. С. 13–18.
6. 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.
7. Кривошапко С.Н. Виды аварий и разрушений пространственных структур и оболочек // Строительство и реконструкция. 2015. № 1(57). С. 22–32. ISSN: 2073-7416.
8. Аварии зданий и сооружений на территории Российской Федерации в 2003 году / Общероссийский фонд «Центр качества строительства». М., 2004.
9. Коротич А.В. Инновационные решения архитектурных оболочек: альтернатива традиционному строительству // Академический Вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 4. С. 70–75.
10. Rodzyah Mohd Yunus. The influence of curvilinear architectural forms on environment behaviour // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2012. Vol. 49. Pp. 341–349.
11. Душкевич К.Н. Роль большепролетных оболочек в формообразовании общественных зданий // Architecture and Modern Information Technologies. 2017. № 4(41). С. 163–178.

12. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Стержневые системы в форме однополостного гиперboloида вращения // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2011. № 11. С. 19–23.
13. Кривошапко С.Н., Галишников В.В. Архитектурно-строительные конструкции: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2024. 558 с.
14. Леденев В.В., Худяков А.В. Оболочечные конструкции в строительстве. Теория, проектирование, конструкции, примеры расчета: учебное пособие. Тамбов: ТГТУ, 2016. 272 с.
15. Лебедь Е.В. Компьютерное исследование работы каркасов большепролетных металлических куполов при различных способах монтажа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 4. С. 261–272.
16. Семашкина Д.О., Назмеева Т.В. Диагонально-сетчатые оболочки в качестве несущих систем зданий // Alfabuild. 2019. № 2(9). С. 40–61.
17. СП 494.13258000.2020 «Конструкции покрытий пространственных металлических. Правила проектирования». М.: Минстрой России, 2020. 115 с.
18. Александров С.Е. Проблемы проектирования зданий и сооружений с применением сетчатых оболочек // Современные научные исследования и инновации. 2018. № 12.
19. Schober Hans, Justiz Stefan, Tamai Hiroki. Speed and grace // Civil Engineering. 2011. February. Pp. 54–59.
20. Ло Ян. К истории создания национального центра исполнительных искусств // Вестник музыкальной науки. 2024. Т. 12. № 3. С. 207–215.
21. Рябкова М.П., Генрих Р.А. Совершенствование работы купольных конструкций в условиях Центрального Казахстана: монография. Караганда: Санат, 2020. 90 с.
22. Helbig Thorsten, Kamp Florian, Schieber Roman, Oppe Matthias, Torsing Rob, Kieft Ralph. Double-layer curved steel-structure with bent glazing. New Departure Station Erasmusline, The Hague (NL) // Challenging Glass. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass Bos, Louter, Belis (Eds.), Ghent University, June 2016. 14 p.
23. Giuroiu Anton. Geodesic Dome: Architecture, history, sustainability, materials, and typical prices // Architecture lab Magazine. 07.06.2024.
24. Takva Çağatay, Takva Yenal. Tessellation configurations transforming from art to structural design of gridshell structures // Research & Reviews in Architecture, Planning and Design. December 2022. Pp. 1–18.
25. Tang Gabriel, Chilton John, Beccarelli Paolo. Progressive development of timber gridshell design, analysis and construction // Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013. 23–27.09.2013, Wroclaw, Poland. Pp. 1–6.
26. Дианова-Клокова И.В., Метаньев Д.А., Хрусталева А.А. Латинская Америка XXI века. Инновационное развитие и архитектура // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 1. С. 47–59.
27. Dzwierzynska J., Labuda I. Modeling of curvilinear steel rod structures based on minimal surfaces // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 22. 17 p.
28. Engel Heino. Tragsysteme. Stuttgart: Verlag Gerd Hatje, 1997. 344 p.
29. Петренко Ф.И. Расчет сетчатых оболочек отрицательной гауссовой кривизны с учетом геометрической и физической нелинейности: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17. М.: МГСУ, 2017.
30. Казакова И.С. Пространственные металлические конструкции покрытий зданий: учебное пособие. Вологда: ВоГУ, 2017. 127 с.
31. Лоза Л.В. Расчет сетчатых и подкрепленных оболочек вращения с учетом поперечного сдвига: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17. Волгоград: ВГАСА, 2000. 210 с.
32. Naboni Roberto. Form-finding to fabrication of super-thin anisotropic gridshell // SIGraDi 2016. XX Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics. 09–11.11.2016, Buenos Aires, Argentina. Pp. 418–425.
33. Avelino Ricardo M., Baverel Olivier. Structural analysis of gridshells designed from singularities // Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017. 25–28.09.2017, Hamburg, Germany. Pp. 1–10.
34. Shen Yuhang, Lin Li, Tang Pengxiao, Xu Tianli. Impact dynamic response of spherical net shells: finite element-based computational analysis investigating the influence of dynamic constitutive models // Buildings. 2023. Vol. 13. Iss. 7. 28 p.
35. Лебедь Е.В. Влияние узловых сопряжений на усилия в элементах металлического каркаса ребристо-кольцевого купола с учетом уменьшения количества поддерживающих его колонн // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. № 2.
36. Pathade Sanket G., Nikhar Milind R., Kalmegh Vaibhav A. A review paper on behavior of gridshell structure // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2022. Vol. 09. Iss. 04. Pp. 1042–1044.
37. Tang Gabriel, Chilton John, Beccarelli Paolo. Progressive Development of Timber Gridshell Design, Analysis and Construction // Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013. 23–27.09.2013, Wroclaw, Poland. 6 p.
38. Зефинова А.Д., Хабидуллаулы Еркебулан, Быстрова Д.В., Миронова Е.А. Практика применения сетчатых оболочек в архитектуре // Научный журнал. 2019. №5 (39).
39. Парфёнов Егор, Коновалов Евгений. Сетчатые оболочки – конструкции XXI века // Инженерная защита. 2015. № 4(9). С. 98–105.
40. Knippers Jan, Helbig Thorsten. Recent developments in the design of glazed grid shells // International Journal of Space Structures. 2009. Vol. 24. № 2. Pp. 111–126.

41. Halbfas Ansgar, vom Hagen Yolanda, Siefke Jan. The German Pavilion. Planning, Construction, Usage and Recycling – Germany at the World Exposition 2010 in Shanghai, China. Liaoning: LST Publishing House, 2010. 192 p.

REFERENCES

1. Sysoyeva Ye.V. Nauchnyye podkhody k raschetu i proyektirovaniyu bolsheproletnykh konstruktсий [Scientific approaches to the calculation and design of long-span structures]. *Vestnik MGSU*. 2017. Vol. 12. No. 2 (101). Pp. 131–141. DOI: 10.2222/1997-0935.2017.2.131-141. (rus).
2. Grinko Ye.A. Tipy prostranstvennykh krivolineynykh struktur i obolochek stroitel'nogo naznacheniya [Types of spatial curvilinear structures and shells for construction purposes]. *Regionalnaya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2024. No. 4. Pp. 128–141. DOI: 10.54734/20722958_2024_4_128. (rus).
3. Krivoshapko S.N., Christian A. Bock Hyeng, Mamieva I.A. Chronology of erection of the earliest reinforced concrete shells. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 2014. Vol. 18. Iss. 2. Pp. 95–108. ISSN: 2076-734X.
4. Krivoshapko S.N. Sterzhnevyye, setchatye struktury i tselnometallicheskiye obolochki zdaniy vtoroy poloviny XX veka – nachala XXI veka [Rod, grid structures, and all-metal shells of buildings from the second half of the 20th to the early 21st century]. *Arkitektura i stroitel'stvo Rossii*. 2014. No. 12 (204). Pp. 10–17. ISSN: 0235-7259. (rus).
5. Bondarenko I.A. Ob umestnosti i umerennosti arkhitekturnykh novatsiy [On the appropriateness and moderation of architectural innovations]. *Academia. Arkitektura i stroitel'stvo*. 2020. No. 1. Pp. 13–18. (rus).
6. Yermolenko Ye.V. Formy i postroyeniya v arkhitekture sovetskogo avangarda i ikh interpretatsiya v sovremennoy zarubezhnoy praktike [Forms and constructions in Soviet avant-garde architecture and their interpretation in modern foreign practice]. *Academia. Arkitektura i stroitel'stvo*. 2020. No. 1. Pp. 39–48. DOI: 10.22337/2077-9038-2020-1-39-48. (rus).
7. Krivoshapko S.N. Vidy avari'y i razrusheni'y prostranstvennykh struktur i obolochek [Types of accidents and failures of spatial structures and shells]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2015. No. 1(57). Pp. 22–32. ISSN: 2073-7416. (rus).
8. Avanii zdaniy i sooruzheniy na territorii Rossiyskoy Federatsii v 2003 godu [Accidents of buildings and structures in the Russian Federation in 2003]. Obshcherossiyskiy fond «Tsentr kachestva stroitel'stva». Moscow, 2004. URL: stroyinf.ru. (rus).
9. Korotich A.V. Innovatsionnyye resheniya arkhitekturnykh obolochek: alternativa traditsionnomu stroitel'stvu [Innovative solutions for architectural shells: an alternative to traditional construction]. *Akademicheskii Vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2015. No. 4. Pp. 70–75. eLIBRARY ID: 25105252. (rus).
10. Rodzyah Mohd Yunus. The influence of curvilinear architectural forms on environment behaviour. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 49. Pp. 341–349. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.07.032.
11. Dushkevich K.N. Rol bolsheproletnykh obolochek v formoobrazovanii obshchestvennykh zdaniy [The role of long-span shells in the shaping of public buildings]. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2017. No. 4(41). Pp. 163–178. (rus).
12. Krivoshapko S.N., Mamieva I.A. Sterzhnevyye sistemy v forme odnopolostnogo giperboloida vrashcheniya [Rod systems in the form of a single-sheet hyperboloid of revolution]. *Montazhnyye i spetsialnyye raboty v stroitel'stve*. 2011. No. 11. Pp. 19–23. (rus).
13. Krivoshapko S.N., Galishnikova V.V. *Arkhiturno-stroitel'nyye konstruktсии: uchebnik dlya vuzov* [Architectural and construction structures: textbook for universities]. 2nd ed. Moscow: Yurait, 2024. 558 p. ISBN: 978-5-534-18958-2. (rus).
14. Ledenev V.V., Khudyakov A.V. *Obolochechnyye konstruktсии v stroitel'stve. Teoriya, proyektirovaniye, konstruktсии, primerye rascheta* [Shell structures in construction: theory, design, examples of calculation]. Tambov: TGTU, 2016. 272 p. ISBN: 978-5-8265-1647-8. (rus).
15. Lebed Ye.V. Kompyuternoye issledovaniye raboty karkasov bolsheproletnykh metallicheskiy kupolov pri razlichnykh sposobakh montazha [Computer study of the behavior of long-span metal dome frames under different installation methods]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий i sooruzheniy*. 2018. Vol. 14. No. 4. Pp. 261–272. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-261-272. (rus).
16. Semashkina D.O., Nazmeeva T.V. Diagonalno-setchatye obolochki v kachestve nesushchikh sistem zdaniy [Diagonal grid shells as load-bearing systems for buildings]. *Alfabuild*. 2019. No. 2(9). Pp. 40–61. EDN: FBZHTE. (rus).
17. SP 494.13258000.2020 «Konstruktсии pokrytiy prostranstvennykh metallicheskiy. Pravila proyektirovaniya» [Design rules for spatial metal roof structures]. Moscow: Minstroy Rossii, 2020. 115 p. (rus).
18. Aleksandrov S.Ye. Problemy proyektirovaniya zdaniy i sooruzheniy s primeneniyyem setchatykh obolochek [Design challenges for buildings and structures using grid shells]. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii*. 2018. No. 12.. (rus).
19. Schober Hans, Justiz Stefan, Tamai Hiroki. Speed and grace. *Civil Engineering*. 2011. February. Pp. 54–59. DOI: 10.1061/cieag.0000339.
20. Lo Yan. K istorii sozdaniya natsionalnogo tsentra ispolnitelskiy iskusstv [On the history of the creation of the National Center for Performing Arts]. *Vestnik muzykal'noy nauki*. 2024. Vol. 12. No. 3. Pp. 207–215. DOI: 10.24412/2308-1031-2024-3-207-215. (rus).
21. Ryabkova M.P., Genrikh R.A. *Sovershenstvovaniye raboty kupolnykh konstruktсий v usloviyakh Tsentral'nogo Kazakhstana: monografiya* [Improvement of dome structures in the conditions of Central Kazakhstan: monograph]. Karaganda: Sanat, 2020. 90 p. ISBN: 978-9965-38-454-7. (rus).

22. Helbig Thorsten, Kamp Florian, Schieber Roman, Oppe Matthias, Torsing Rob, Kieft Ralph. Double-layer curved steel-structure with bent glazing. New Departure Station Erasmusline, The Hague (NL). *Challenging Glass. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*. Ghent University, June 2016. 14 p.
23. Giuroiu Anton. Geodesic Dome: Architecture, history, sustainability, materials, and typical prices. *Architecture lab Magazine*. 07.06.2024.
24. Takva Çağatay, Takva Yenal. Tessellation configurations transforming from art to structural design of gridshell structures. *Research & Reviews in Architecture, Planning and Design*. December 2022. Pp. 1–18. ISBN: 978-625-430-561-0.
25. Tang Gabriel, Chilton John, Beccarelli Paolo. Progressive development of timber gridshell design, analysis and construction. *Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013*. 23–27.09.2013, Wrocław, Poland. Pp. 1–6.
26. Dianova-Klokov I.V., Metaniev D.A., Khrustalev A.A. Latinskaya Amerika XXI veka. Innovatsionnoye razvitiye i arkhitektura [Latin America of the XXI century. Innovative development and architecture]. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2017. No. 1. Pp. 47–59. ISSN: 2077-9038. (rus).
27. Dzwierzynska J., Labuda I. Modeling of curvilinear steel rod structures based on minimal surfaces. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 22. 17 p. DOI: 10.3390/ma14226826.
28. Engel Heino. *Tragsysteme*. Stuttgart: Verlag Gerd Hatje, 1997. 344 p. ISBN: 3-7757-0706-9.
29. Petrenko F.I. Raschet setchatykh obolochek otritsatelnoy gaussovoy krivizny s uchetom geometricheskoy i fizicheskoy nelineynosti [Calculation of grid shells with negative Gaussian curvature considering geometric and physical nonlinearity]. Diss. kand. tekhn. nauk. Moscow: MGSU, 2017. (rus).
30. Kazakova I.S. *Prostranstvennyye metallicheskiye konstruksii pokrytiy zdaniy: uchebnoye posobiye* [Spatial metal roof structures of buildings: textbook]. Vologda: VoGU, 2017. 127 p. ISBN: 978-5-87851-763-8. (rus).
31. Loza L.V. Raschet setchatykh i podkreplennykh obolochek vrashcheniya s uchetom poperechnogo sdviga [Calculation of grid and reinforced shells of revolution considering transverse shear]. Diss. kand. tekhn. nauk. Volgograd: VGASA, 2000. 210 p. (rus).
32. Naboni Roberto. Form-finding to fabrication of super-thin anisotropic gridshell. *SIGraDi 2016. XX Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics*. 09–11.11.2016, Buenos Aires, Argentina. Pp. 418–425. DOI: 10.5151/despro-sigradi2016-807.
33. Avelino Ricardo M., Baverel Olivier. Structural analysis of gridshells designed from singularities. *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017*. 25–28.09.2017, Hamburg, Germany. Pp. 1–10.
34. Shen Yuhang, Lin Li, Tang Pengxiao, Xu Tianli. Impact dynamic response of spherical net shells: finite element-based computational analysis investigating the influence of dynamic constitutive models. *Buildings*. 2023. Vol. 13. Iss. 7. 28 p. DOI: 10.3390/buildings13071849.
35. Lebed Ye.V. Vliyaniye uzlovykh sopryazheniy na usiliya v elementakh metallicheskogo karkasa rebristo-koltsevoogo kupola s uchetom umensheniya kolichstva podderzhivayushchikh yego kolonn [The influence of nodal joints on stresses in elements of a ribbed-ring dome metal frame with a reduced number of supporting columns]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2025. No. 2. (rus).
36. Pathade Sanket G., Nikhar Milind R., Kalmegh Vaibhav A. A review paper on behavior of gridshell structure. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2022. Vol. 09. Iss. 04. Pp. 1042–1044. ISSN: 2395-0072.
37. Tang Gabriel, Chilton John, Beccarelli Paolo. Progressive Development of Timber Gridshell Design, Analysis and Construction. *Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013*. 23–27.09.2013, Wrocław, Poland. 6 p. URL: <https://shura.shu.ac.uk/23434/>.
38. Zefirova A.D., Khabidullauly Erkezhan, Bystrova D.V., Mironova E.A. Praktika primeneniya setchatykh obolochek v arkhitekture [Practice of grid shells application in architecture]. *Nauchnyy zhurnal*. 2019. No.5 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/praktika-primeneniya-setchatykh-obolochek-v-arkhitekture>. (rus).
39. Parfenov Egor, Konovalov Evgeny. Setchatye obolochki – konstruksii XXI veka [Grid shells – structures of the XXI century]. *Inzhenernaya zashchita*. 2015. No. 4(9). Pp. 98–105. EDN: UIPQRN. (rus).
40. Knippers Jan, Helbig Thorsten. Recent developments in the design of glazed grid shells. *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 24. No. 2. Pp. 111–126. DOI: 10.1260/026635109789043205.
41. Halbfas Ansgar, vom Hagen Yolanda, Siefke Jan. *The German Pavilion. Planning, Construction, Usage and Recycling – Germany at the World Exposition 2010 in Shanghai, China*. Liaoning: LST Publishing House, 2010. 192 p.

Информация об авторе

Кривошапко Сергей Николаевич

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», г. Москва, Россия Доктор технических наук, профессор.
Профессор-консультант
E-mail: sn_krivoshapko@mail.ru

Information about author

Krivoshapko Sergey Nikolaevich

The Engineering Academy of the Peoples' Friendship University, Moscow, Russia, Doctor of Tech. Sc., Professor.
E-mail: sn_krivoshapko@mail.ru