

## 05.23.01 СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

### Энергоэффективные конструкции зданий на основе сетчатых оболочек

УДК 69.07

#### Бузало Н.А.

Канд. техн. наук, профессор кафедры «Градостроительство, проектирование зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск);  
e-mail: buzalo\_n@mail.ru

#### Версильов С.О.

Д-р техн. наук, профессор кафедры «Горное дело», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск)

#### Платонова И.Д.

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Градостроительство, проектирование зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск)

#### Царитова Н.Г.

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Градостроительство, проектирование зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск);  
e-mail: ncaritova@yandex.ru

Статья получена: 04.02.2020. Рассмотрена: 10.02.2020. Одобрена: 21.03.2020. Опубликована онлайн: 30.03.2020. ©РИОР

**Аннотация.** Для снижения расхода энергоресурсов в строительной и жилищно-коммунальной отраслях необходимо максимально использовать новые конструктивные решения зданий и сооружений. Разделение функций несущих и ограждающих элементов зданий позволяет применять оптимальные конструк-

тивные схемы с минимальным расходом стали на несущие конструкции и эффективные современные теплоизоляционные материалы для ограждающих конструкций. Сетчатые пространственные системы являются прочными, сейсмостойкими, легковозводимыми, допускают демонтаж, транспортировку, повторный

#### ENERGY-EFFICIENT MESH-BASED BUILDING STRUCTURES

##### Nina Buzalo

Candidate of Technical Sciences, Professor, Department «Urban Planning, Design of Buildings and Structures», Platov South-Russian State Polytechnic University, Novochockassk; e-mail: buzalo\_n@mail.ru

##### Sergey Versilov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department «Mining», Platov South-Russian State Polytechnic University, Novochockassk

##### Irina Platonova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department «Urban Planning, Design of Buildings and Structures», Platov South-Russian State Polytechnic University, Novochockassk

##### Nadezhda Tsaritova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department «Urban Planning, Design of Buildings and Structures», Platov

South-Russian State Polytechnic University, Novochockassk; e-mail: ncaritova@yandex.ru

**Manuscript received:** 04.02.2020. **Revised:** 10.02.2020. **Accepted:** 21.03.2020. **Published online:** 30.03.2020. ©RIOR

**Abstract.** To reduce energy consumption in the construction and housing sectors, it is necessary to make maximum use of new design solutions for buildings and structures. Separation of the functions of the load-bearing and enclosing elements of buildings allows the use of optimal structural schemes with a minimum consumption of steel for load-bearing structures and effective modern thermal insulation materials for building envelopes. Mesh spatial systems are durable, earthquake-resistant, easily assembled, can be dismantled, transported, reassembled without the use of heavy equipment, and can be used in remote and inaccessible places.

**Keywords:** metal mesh structures, energy-efficient building envelopes, three-dimensional model of the frame.

монтаж без использования тяжелой техники, могут применяться в отдаленных и труднодоступных местах.

**Ключевые слова:** металлические сетчатые конструкции, энергоэффективные ограждающие конструкции, трехмерная модель каркаса.

За последние десятилетия сформировались общие тенденции в развитии современной цивилизации — рост потребления энергоресурсов, повышение спроса и цены на энергоресурсы. Учитывая естественную ограниченность мировых запасов топливно-энергетических ресурсов при существующих объемах и темпах роста потребления, очевидной является возможность возникновения их дефицита в обозримом будущем. В связи с постоянным ростом спроса на энергию развитие энергосберегающих технологий во всем мире становится все более актуальным, в том числе и в России. В связи с этим одним из приоритетов является ограничение темпов роста потребления энергетических ресурсов за счет повышения энергоэффективности объектов в строительстве, промышленности, жилищно-коммунальном хозяйстве и на транспорте, внедрения энергосберегающих технологий и материалов.

Во многих странах большое внимание уделяется возведению энергоэффективных домов, в которых затраты, связанные с потреблением энергии, в среднем на 20–30% меньше, чем в обычных. В 2018 г. в Российской Федерации вступил в действие свод требований, направленных на повышение энергосбережения и в целом энергоэффективности в строительном комплексе страны, что будет способствовать внедрению новых архитектурных решений, современных строительных технологий, энергоэффективных стройматериалов и т.д. Для эффективной реализации требуемых задач по поэтапному снижению объемов тепловой энергии, расходуемой на здания, необходимо четко определить параметры элементов здания, влияющих на эти затраты:

- увеличение термического сопротивления ограждающих конструкций здания (наружных стен, покрытий, перекрытий над неотапливаемыми подвалами) до технически возможного максимального уровня;
  - сведение к минимуму количества и тепловой проводимости, имеющихся в конструкции тепловых мостов;
  - обеспечение необходимой воздухоплотности конструкции здания относительно притока наружного воздуха;
  - повышение до максимального технически возможного уровня термического сопротивления светопрозрачных ограждающих конструкций;
  - создание системы вентиляции для подачи свежего воздуха, удаления отработанного воздуха, распределения тепла в помещении и организация регенерации тепла вентиляционного воздуха.
- Одним из направлений в создании энергосберегающих «домов будущего» с применением энергоэффективных технологий может быть разработка и внедрение строений на основе металлических сетчатых оболочек.
- Конструкции покрытий на основе сетчатых оболочек, изобретенных и запатентованных великим русским инженером В.Г. Шуховым, лежат в основе многих проектов, созданных известными архитекторами.
- В историю строительной техники вошло покрытие здания листопркатного цеха Выксунского металлургического завода, выполненное Шуховым в 1898 г. (рис. 1). Конструкция в виде металлического сетчатого свода двоякой кривизны, опирающегося на трехшарнирные арки, позволила значительно сократить расход металла по сравнению с традиционным стропильным покрытием. Шухов создал классическое сводчатое покрытие из новых по тем временам металлических прокатных элементов [1]. Взаимоперекрещивающиеся стержни (уголки), опираясь на арки-фермы, образовали жесткий каркас, по которому устроена кровля. Для того времени это было качественно новое промышленное здание — высокое, просторное, светлое (фасады здания представляли собой витражи от цоколя до покрытия).
- В течение первой половины XX в. сетчатые оболочки чаще всего применялись в промышленном строительстве. С их помощью перекрывали производственные цехи и выставочные павильоны, где требовалось с минимальными затратами металла перекрыть значительные пролеты. В настоящее время сетчатые конструк-

ции — одно из перспективных направлений в строительном проектировании. Они оправдывают название «конструкции XXI в.». Об этом свидетельствует растущее количество сооружений, выполненных по данной технологии, и интерес заказчиков.



**Рис. 1.** Несущие конструкции листопркатного цеха Выксунского металлургического завода во время монтажа

Сетчатые конструкции имеют неограниченные возможности для создания новых архитектурных форм, их характерная черта — отсутствие массивных несущих элементов. Это возможно благодаря равномерному распределению нагрузок на все стержни каркаса. Растущее количество зданий и сооружений, выполненных с использованием сетчатых покрытий, свидетельствует о перспективности применения таких конструкций, особенно в условиях низких температур, в сейсмоопасных и отдаленных районах.

Производство и контрольная сборка — полный цикл изготовления сетчатых конструкций. Доставка изделия к месту строительства выполняется в разобранном и компактно упакованном виде. На стройплощадке элементы без специальных инструментов быстро монтируются в секции снаружи или внутри здания. Многообразные сетчатые конструкции могут быть использованы при реконструкции фасадов существующих зданий, при возведении стадионов, музеев, отелей, аэропортов, автомобильных парковок и многих других сооружений. Легкость, быстроту возведения и экономичность строительства обеспечивает простота технологии. Кроме того, доступен демонтаж и повторный монтаж конструкций, что особенно актуально для временных и сезонных сооружений.

Область применения сетчатых конструкций не ограничивается только большепролетными сооружениями [2–4]. Возможно использование

подобных технологий в малоэтажном индивидуальном строительстве. Преимущества таких домов на основе сетчатых куполов во многом основаны на свойствах сферы:

- максимальный внутренний объем при одинаковой с «прямоугольным» строением полезной площади, следовательно, лучшая аэрация и инсоляция помещений;
- минимальная площадь внешней поверхности при одинаковой с «прямоугольным» строением полезной площади, что обуславливает меньшее поглощение звуков снаружи, оптимальную теплоизоляцию (наибольшие потери тепла происходят через наружные углы здания);
- сетчатый купольный дом обладает высокой сейсмостойкостью, так как отсутствуют тяжелые перекрытия и покрытия;
- возможность выдерживать большие снеговые нагрузки (самое рациональное строение для арктических широт);
- аэродинамическая форма купола обеспечивает лучшее по сравнению с другими строениями огибание ветрами: купольные дома устойчивы во время разрушительных ураганов и смерчей;
- симметрия сферы позволяет свободно ориентировать купол при размещении на земельном участке; внутренняя планировка несущих стен может быть свободной; солнечные батареи и модули солнечных коллекторов можно наиболее эффективно ориентировать в пространстве.

Сетчатые купольные индивидуальные дома, кроме этого, полностью соответствуют требованиям минимизации ресурсов и энергозатрат на возведение и эксплуатацию здания, а также принципам биопозитивности:

- использовать только малоэтажную высокоплотную застройку со зданиями не выше деревьев (2–3 этажа);
- на первом этаже размещать мастерские, магазины, кафе, на втором — жилые помещения;
- в качестве покрытия использовать кровлю-газон или размещать гелиоколлекторы, солнечные батареи;
- широко использовать пространственные конструкции покрытий как формы, наиболее близкие к природным формам;

- выбирать форму зданий, наиболее приспособленную для утилизации солнечной и ветровой энергии и энергосбережения (утепленные северные стены с минимумом проемов, теплицы и зимние сады с южной стороны, энергосберегающие окна, двери, стекла, форточки, жалюзи);
- использовать участки городских неудобий, подрабатываемые территории, на которых невозможно разместить многоэтажные здания;
- предусмотреть меры по наиболее полному озеленению горизонтальных и вертикальных поверхностей дома;
- в отделку зданий вносить элементы национального искусства, настенной живописи.

Многие авторы считают, что традиционные национальные жилища как нельзя лучше удовлетворяют принципам биопозитивного строительства [5; 6]. Рассуждая о сетчатых конструкциях, невозможно не вспомнить о традиционных жилищах степных кочевников. Сборно-разборное сооружение (рис. 2), которое возможно в минимальные сроки разобрать, компактно упаковать, перевезти, не прибегая к тяжелым подъемно-транспортным средствам, и вновь собрать на новом месте.

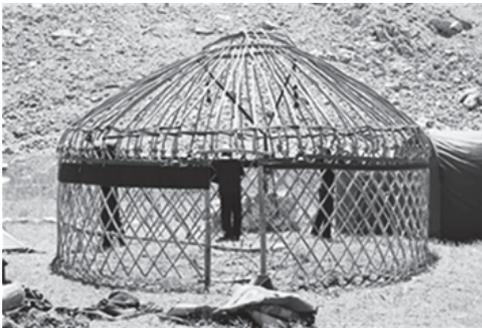


Рис. 2. Юрта — жилище кочевых народов степной части Евразии

Следует отметить, что отечественная строительная индустрия в плане использования материалов для возведения зданий до последнего времени оставалась достаточно консервативной отраслью. Традиционно в жилищном строительстве широко применяются проверенные временем материалы — дерево, кирпич и бетон. Вместе с тем практика развитых в промышленном отношении государств свидетельствует о том, что лидирующие позиции в этом списке постепенно занимают новые эффективные ма-

териалы, в том числе металл. Разработчики новых методов строительства предлагают иной подход к его использованию, и прежде всего при возведении жилых зданий. К таким инновационным способам можно отнести применение металлоконструкций заводского изготовления. Это обусловлено, прежде всего, долговечностью, прочностью, надежностью несущих конструкций и высокими эксплуатационными характеристиками ограждающих конструкций. Впрочем, не последнюю роль играет и эстетический фактор — сегодня возможно создание самых необычных форм здания, фасадов и интерьеров.

Не менее важным преимуществом, выгодно отличающим их от традиционных деревянных, кирпичных или железобетонных строений, является простота и удобство обслуживания и ремонта. Такие дома обладают свойствами экологичности и пожаробезопасности благодаря сочетанию испытанных качеств традиционных строительных и самых современных отделочных материалов, высокое качество которых подтверждено соответствующими сертификатами.

Сегодня можно с уверенностью утверждать, что металл в жилищном строительстве становится не менее востребованным материалом, чем дерево, кирпич и железобетон. Практика показывает, что эксплуатационные характеристики домов из металлоконструкций абсолютно не уступают аналогичным параметрам зданий из традиционных материалов, а по ряду показателей даже превосходят их.

На сегодняшний день нами созданы и запатентованы принципиально новые конструкции стальных каркасных модулей [7–9]. Основу каркаса таких зданий образует конструкция из металлических уголков. В отличие от применяющихся в настоящее время металлических каркасов, состоящих из множества элементов, предлагаемые конструкции состоят из минимально возможного количества типоразмеров стержней. Причем сама форма каркаса оптимизирована с учетом следующих факторов:

- максимальная прочность каркаса и устойчивость к сейсмическому воздействию;
- минимально возможное количество типоразмеров стержней каркаса;
- простая конструкция фундамента (столбчатые, свайные фундаменты или винтовые сваи)

в зависимости от грунтовых условий площадки строительства), так как нагрузка на фундамент намного меньше, чем в зданиях с массивным каркасом;

- максимально возможный внутренний объем при минимальной площади наружных стен;
- оптимальный раскрой стандартных 12-метровых плетей металлического проката;
- применение эффективных теплоизоляционных материалов для навесных стен и покрытия, ремонтпригодность стенового ограждения.

Каркасный модуль (рис. 3) выполнен из стальных прокатных профилей. Основу каркаса образует сетчатая конструкция из металлических прокатных уголков  $100 \times 7$  мм и швеллеров № 20, стальной профильной трубы  $150 \times 4$  мм, соединяемых между собой непосредственно на площадке строительства болтами М18 (класса прочности 5.8).

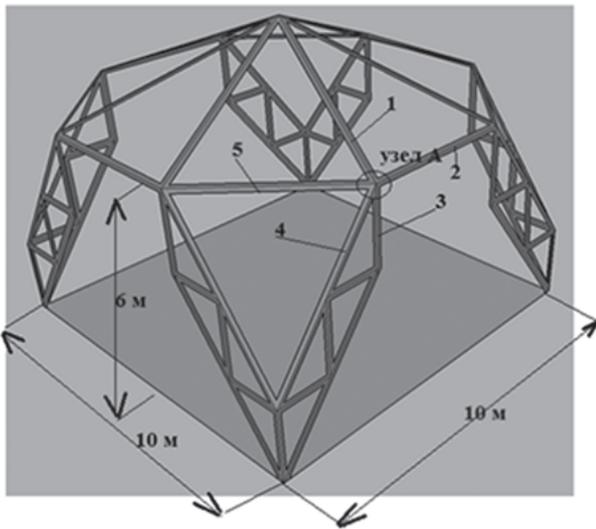


Рис. 3. Каркасный модуль индивидуального жилого дома

Особо следует отметить минимальные трудозатраты при монтаже каркасного модуля. Все элементы каркаса заводского изготовления собираются на площадке строительства на болтах и поднимаются в проектное положение с однократным привлечением грузоподъемной техники. Узел соединения решетчатых стоек с ребром купола (узел А на рис. 3) выполнен с возможностью поворота стоек для упрощения монтажа. Конструкция узла показана на рис. 4.

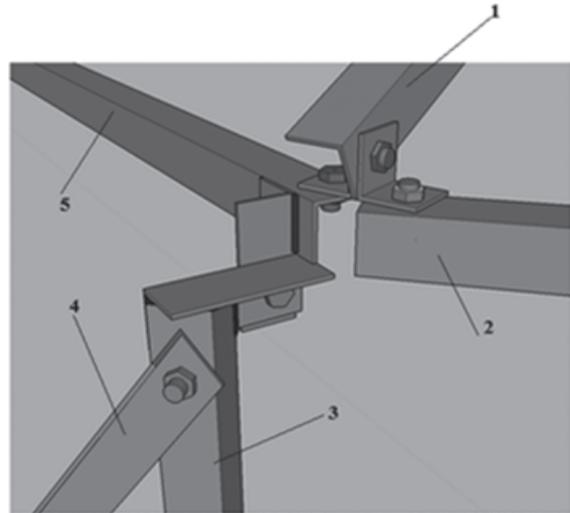


Рис. 4. Узел соединения элементов каркасного модуля (узел А)

Предлагаемые модули могут быть использованы в качестве выставочных павильонов, магазинов, кафе с высотой помещения до 6 м, а при устройстве перекрытия — жилых коттеджей с общей площадью до  $170\text{--}200$  м<sup>2</sup> и высотой помещений до 3 м.

Массовое строительство сетчатых куполов стало возможным с появлением систем автоматизированного проектирования, позволяющих выполнить расчет и конструирование трехмерной модели сооружения. Для создания модели каркаса был использован программный комплекс *SCAD Office* (рис. 5). В результате расчета получены значения перемещений узлов конструкции от воздействия собственного веса несущих и ограждающих элементов, ветровой, снеговой нагрузок, а также сейсмического воздействия [10], определены значения расчетных внутренних усилий, подобраны сечения элементов каркаса.

Технологические возможности проектирования, применения новых материалов и конструкций, использования новых методов монтажа многократно расширились за последние годы, в том числе за счет использования метода послойного создания физических объектов по цифровой 3D-модели. При изготовлении стержневых элементов конструкции, соединительных узлов, раскройке ограждающих материалов необходима высокая точность, что доступно с использованием современного высокоточного оборудования [11].

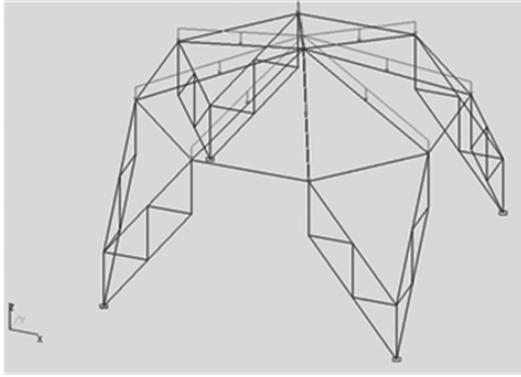


Рис. 5. Трехмерная модель каркасного модуля, выполненная в ППП SCAD

Высокие аэродинамические и конструктивные свойства, повышенная сейсмостойкость, скорость и простота монтажа, возможность доставки в отдаленные районы всех составляющих элементов в компактно упакованном виде с защитой от внешних воздействий, возможность демонтажа и переноса сооружения на новое место, возможность реконструкции либо с восстановлением тех же самых эксплуатационных функций, либо с приданием зданию новых функций, малая нагрузка на основание позволяют применять подобные конструкции с большей эффективностью.

### Литература

1. Шухов В.Г. Избранные труды. Т. 1 «Строительная механика» [Текст] / В.Г. Шухов / под ред. А.Ю. Ишлинского. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1977. — 192 с.
2. Рюле Г. Пространственные покрытия (конструкции и методы возведения). Т. 2 «Металл, пластмассы, керамика, дерево» [Текст] / Г. Рюле. — М.: Стройиздат, 1974.
3. Таиров В.Д. Сетчатые пространственные конструкции [Текст] / В.Д. Таиров. — Киев: Будівельник, 1966. — 74 с.
4. Forster B., Mollaert M. European Design Guide for Tensile Surface Structures. TensiNet. Brussel, 2004. 332 p.
5. Geiger Engineers. Long span roof projects, selected projects. Geiger associates, № 4, 1994.
6. Motro R. Tensegrity. Structural systems for the future. Kogan Page Science. 2003.
7. Версилов С.О. Каркасный модуль здания [Текст] / С.О. Версилов, В.Н. Игнатов, А.А. Короткий. Патент России № 2604613. Опубликовано 10.12.2016. Бюл. № 34.
8. Версилов С.О. Модуль здания [Текст] / С.О. Версилов, В.Н. Игнатов, А.А. Короткий. Патент России № 178555. Опубликовано 09.04.2018. Бюл. № 10
9. Шарнирный узел пространственной стержневой конструкции регулярной структуры [Текст]: пат. 2586351 Рос. Федерация: МПК E04B 1/58 / Н.Г. Царитова, Н.А. Бузало; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова — № 2015100939/03; заявл. 12.01.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 16.
10. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия [Текст]. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*
11. Тумасов А.А. Трансформируемые пространственные стержневые конструкции покрытий [Текст] / А.А. Тумасов, Н.Г. Царитова // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 2-3. — С. 190–194.

### References

1. Shuhov V.G. Izbrannyye Trudy. «Stroitel'naya mekhanika» [Structural Mechanics]. Akademiya nauk SSSR Publ., Moscow, 1977, V. 1, 192 p.
2. Ryule G. Prostranstvennyye pokrytiya (konstrukcii i metody vozvedeniya). Tom II. Metall, plastmassy, keramika, derevo [Spatial coatings (constructions and construction methods). Volume II Metal, plastics, ceramics, wood]. Moscow: Strojizdat Publ., 1974.
3. Tairov V.D. Setchatyye prostranstvennyye konstrukcii [Mesh spatial structures]. Kiev: Budivel'nik Publ., 1966. 74 p.
4. Forster B., Mollaert M. European Design Guide for Tensile Surface Structures. TensiNet. Brussel: 2004. 332 p.
5. Geiger Engineers. Long span roof projects, selected projects. Geiger associates, № 4, 1994.
6. R. Motro. Tensegrity. Structural systems for the future. Kogan Page Science. 2003
7. Versilov S.O., Ignatov V.N., Korotkij A.A. Karkasnyy modul' zdaniya. Patent Rossii № 2604613. Opublikovano 10.12.2016. Byul. № 34 [Wireframe building module. Patent of Russia No. 2604613. Published on December 10, 2016. Bull. Number 34].
8. Versilov S.O., Ignatov V.N., Korotkij A.A. Karkasnyy modul' zdaniya. Patent Rossii № 178555. Opublikovano 09.04.2018. Byul. № 10 [Wireframe building module. Patent of Russia No. 178555. Published on April 9, 2018. Bull. № 10].
9. Sharnirnyy uzel prostranstvennoy stержnevoj konstrukcii regul'yarnoj struktury: pat. 2586351 Ros. Federaciya: MPK E04B 1/58 [The hinge node of the spatial rod structure of a regular structure: US Pat. 2586351 Ros. Federation: IPC E04B 1/58]. FGBOU VPO Yuzhno-Rossiiskij gosudarstvennyy politekhnicheskij universitet (NPI) imeni M.I. Platova — № 2015100939/03; zavavl. 12.01.15; opubl. 10.06.16, Bul. № 16 [FGBOU VPO South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platova].
10. SP 20.13330.2011 Nagruzki i vozdejstviya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.01.07-85\* [SP 20.13330.2011 Load and impact. Updated edition of SNiP 2.01.07-85\*].
11. Tumasov A.A., Caritova N.G. Transformiruemye prostranstvennyye stержnevye konstrukcii pokrytij [Transformable spatial core structures of coatings]. Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research Journal]. 2016, I. 2–3, pp. 190–194.