

## СЕТЧАТЫЕ ОБОЛОЧКИ КАК ИНСТРУМЕНТ ИНТЕГРАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО РЕЛЬЕФА В СТРУКТУРУ СОВРЕМЕННОГО МУЗЕЯ

*Поян А.В., Максютова Ж.Т.*

*Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия*

**Ключевые слова:** сетчатая оболочка, решетчатая оболочка, искусственный рельеф, музейное здание, неравномерная нагрузка, снеговая нагрузка, грунтовая кровля, узел соединения, перераспределение усилий.

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности работы сетчатых оболочек в составе музейных зданий с искусственным рельефом при действии неравномерных нагрузок. Выделены три характерных типа неравномерного нагружения: односторонние снеговые отложения на криволинейных поверхностях, градиент грунтовой нагрузки при переменной толщине субстрата и локальные временные нагрузки от движения посетителей по эксплуатируемой кровле. Проведён анализ конструктивных решений на примере реализованных объектов. Показано, что способность сетчатой структуры к перераспределению усилий определяется геометрией сетки и типом узловых соединений. Обосновано преимущество сетчатых оболочек перед сплошными скорлупами и балочными системами по критерию живучести при локальных перегрузках.

## FEATURES OF UNEVEN LOAD PERCEPTION BY GRIDSHELLS IN MUSEUM BUILDINGS WITH ARTIFICIAL RELIEF

*Poyan A.V., Maksyutova Zh.T.*

*State University of Land Management, Moscow, Russia*

**Keywords:** gridshell, artificial relief, museum building, uneven load, snow load, green roof, node connection, force redistribution.

**Abstract.** This article examines the behavior of gridshell structures as part of museum buildings with artificial relief under the action of uneven loads. Three characteristic types of uneven loading are identified: one-sided snow deposits on curved surfaces, a gradient of soil load with variable substrate thickness, and local live loads from visitor movement on the exploited roof. An analysis of structural solutions is carried out using the example of completed projects. It is shown that the ability of a gridshell to redistribute forces is determined by the grid geometry and the type of node connections. The advantage of gridshells over continuous shells and beam systems is substantiated based on the criterion of survivability under local overloads.

**Введение.** Современные музейные здания всё чаще проектируются как искусственный рельеф – «здания-холмы», в которых экспозиционные пространства накрыты озеленённой кровлей либо непосредственно сформированы криволинейной несущей поверхностью, интегрированной в ландшафт. Данная архитектурная концепция предъявляет специфические требования к несущим конструкциям покрытия. С одной стороны, требуется перекрытие значительных безопорных пролётов выставочных залов. С другой стороны, распределение внешних нагрузок на такие покрытия заведомо неравномерно как по площади, так и во времени.

Сетчатая оболочка – пространственная стержневая конструкция одинарной или двойной кривизны – находит применение в музейном строительстве благодаря способности принимать сложные геометрические формы и эффективно перераспределять усилия. Однако особенности восприятия неравномерных нагрузок такими оболочками применительно к музейным зданиям с искусственным рельефом остаются недостаточно систематизированными.

**Цель исследования** заключается в выявлении и структуризации видов неравномерных нагрузок, действующих на сетчатые оболочки музейных зданий с искусственным рельефом, и анализе конструктивных решений, обеспечивающих их восприятие, на примере реализованных объектов.

**Методы исследования.** Материалом для анализа послужили реализованные музейные объекты, в которых сетчатая оболочка либо непосредственно формирует искусственный рельеф, либо служит несущей основой для эксплуатируемой кровли: Музей под открытым небом Уилд и Даунленд (Великобритания, 2002, арх. Edward Cullinan Architects, инж. Buro Happold), Большой двор Британского музея (Великобритания, 2000, арх. Foster and Partners, инж. Buro Happold), Музей фруктов Яманаси (Япония, 1997, арх. Itsuko Hasegawa), Биосфера – Музей окружающей среды (Канада, 1995, арх. Buckminster Fuller), Лувр Абу-Даби (ОАЭ, 2017, арх. Jean Nouvel). Для каждого объекта рассматривались конструктивная схема оболочки, тип узловых соединений и характер внешних нагрузок, обусловленных формой покрытия и его функцией. Сравнительный анализ выполнен по критериям: вид неравномерной нагрузки, механизм её восприятия, наличие специальных конструктивных мероприятий.

**Результаты и обсуждение.** Анализ объектов позволил выделить три характерных типа неравномерного нагружения сетчатых оболочек в музейных зданиях с искусственным рельефом (табл. 1).

Особенности перераспределения усилий. Принципиальное отличие сетчатой оболочки от сплошной бетонной скорлупы заключается в дискретном характере её структуры. Жёсткость системы регулируется не только сечением стержней, но и геометрией сетки, а также податливостью узлов. В оболочках двоякой кривизны (седловидная форма Weald & Downland Gridshell) неравномерная снеговая нагрузка вызывает одновременно изгиб стержней и значительные мембранные усилия. Благодаря пространственной работе сетки пиковые напряжения от локального нагружения одного участка передаются на соседние зоны, что сглаживает эпюру моментов и снижает риск прогрессирующего обрушения [1, 2].

Роль узловых соединений. В объектах с шарнирными или податливыми узлами (Музей Уилд и Даунленд – болтовые соединения дубовых реек с ограниченной жёсткостью) неравномерные деформации основания или температурные перепады не приводят к появлению критических дополнительных напряжений в стержнях.

Табл. 1. Характерные неравномерные нагрузки и конструктивные решения по их восприятию

| Вид нагрузки           | Причина возникновения                              | Характер неравномерности                                     | Конструктивное решение                                                                                                                                                               | Пример сооружения                       |
|------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Снеговая               | Криволинейная поверхность, разновысотные участки   | Односторонние отложения, снеговые мешки у перепадов рельефа  | Математически заданная поверхность с сингулярностью кривизны в углах; релаксация сетки на поверхности, формирующая мембранный характер работы оболочки при однородном размере ячейки | Большой двор Британского музея          |
| Грунтовая (постоянная) | Переменная толщина субстрата на озеленённой кровле | Градиент нагрузки от вершины «холма» к основанию             | Шарнирные узлы, компенсирующие неравномерные деформации без роста напряжений                                                                                                         | Weald and Downland Gridshell (частично) |
| Временная полезная     | Движение посетителей по эксплуатируемой кровле     | Локальные пиковые нагрузки на смотровых площадках и дорожках | Мелкая ячейка сетки либо разделение путей восприятия нагрузки                                                                                                                        | Музей фруктов Яманаси                   |

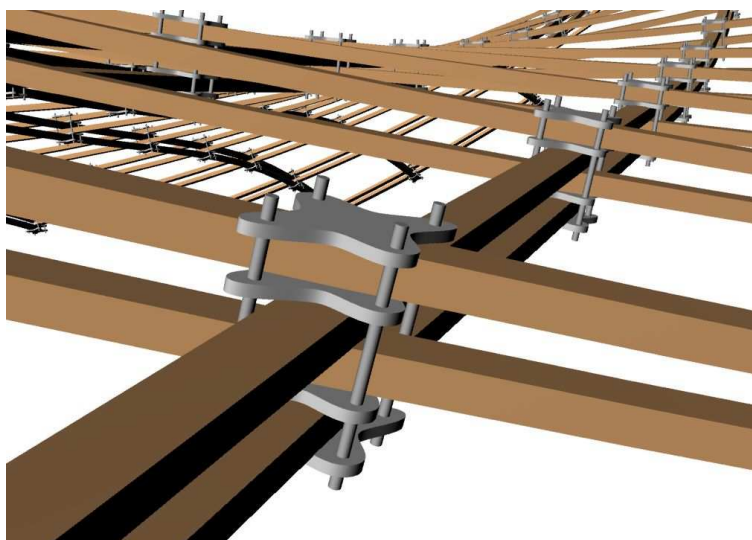


Рис. 1. Узел соединения деревянных реек в оболочке Музея под открытым небом Уилд и Даунленд. (опубликовано на <https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/double-layer-gridshell>)

В Большом дворе Британского музея применены жёсткие узлы стальной сетки, что потребовало точного расчёта снеговых мешков на стадии проекта и устройства системы компенсационных швов в остеклении [3].

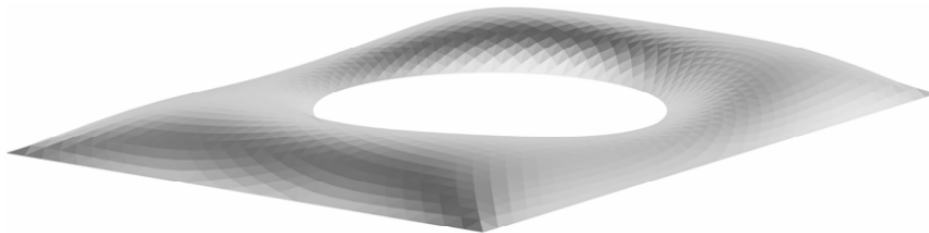


Рис.2. Решение стальной сетчатой оболочки Большого двора Британского музея.

(опубликовано на

[https://people.bath.ac.uk/ps281/research/publications/burru\\_preprint.pdf](https://people.bath.ac.uk/ps281/research/publications/burru_preprint.pdf))

Адаптация к локальным нагрузкам. В Музее фруктов Яманаси лёгкие стальные оболочки трёх павильонов имеют часто расположенные стержни, образующие мелкую ячейку. Такая структура позволяет воспринимать временные сосредоточенные нагрузки от посетителей без устройства дополнительных прогонов [4]. В Биосфере геодезический купол имеет относительно крупную ячейку, поэтому смотровые платформы опираются на самостоятельный каркас, не нагружая стержни оболочки локально [5]. В Лувре Абу-Даби многослойная сетчатая структура купола диаметром 180 м перераспределяет неравномерные ветровые и температурные нагрузки между восемью слоями, а неравномерность снеговой нагрузки для данного климатического региона не является определяющей [6].

Преимущества перед альтернативными системами. По сравнению с монолитными бетонными скорлупами сетчатая оболочка демонстрирует большую живучесть при локальных перегрузках: выход из строя одного или нескольких стержней не ведёт к немедленному обрушению всей системы. В сравнении с балочными или рамными каркасами сетка выигрывает за счёт отсутствия промежуточных опор в экспозиционных залах и возможности плавно следовать криволинейному рельефу без резких перепадов жёсткости, являющихся концентраторами напряжений.

**Выводы.** Сетчатые оболочки музейных зданий с искусственным рельефом подвержены трём основным видам неравномерных нагрузок: снеговой, грунтовой и временной полезной. Для каждого вида характерен собственный механизм неравномерности и соответствующий конструктивный ответ. Перераспределение неравномерных усилий в сетчатой оболочке обеспечивается двумя факторами: пространственной геометрией сетки, включающей в работу мембранные усилия, и типом узловых соединений, регулирующих жёсткость системы.

Анализ реализованных объектов показывает, что выбор шарнирных узлов целесообразен при преобладании грунтовых нагрузок с переменным градиентом; жёсткие узлы оправданы при доминировании снеговых нагрузок на криволинейных поверхностях; мелкая ячейка сетки либо разделение путей

восприятия нагрузок эффективны при значительной временной полезной нагрузке. При проектировании сетчатых оболочек музейных зданий с искусственным рельефом рекомендуется предусматривать локальное усиление сетки в зонах прогнозируемых снеговых мешков и применять адаптивные узлы для компенсации неравномерных осадок грунтового слоя.

### **Список литературы / References**

1. Harris R., Romer J., Kelly O. Design and construction of the Weald and Downland Gridshell // The Structural Engineer. 2003, vol. 81, no. 17, pp. 27-33.
2. Happold B., Liddell I. Timber gridshells: design methods and application // Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures. 2001, vol. 42, no. 136, pp. 93-102.
3. Barnes M., Dickson M. Widespan roof structures. – London: Thomas Telford, 2000. – 278 p.
4. Hasegawa I. Architecture as Another Nature: Yamanashi Fruit Museum // JA: The Japan Architect. 1998, no. 31, pp. 42-49.
5. Fuller R.B. Geodesic Dome. US Patent 2,682,235. – 1954.
6. Nouvel J. Louvre Abu Dhabi: Construction and Structure. – Abu Dhabi: TDIC, 2017. – 210 p.
7. Williams C.J.K., Shepherd P. Definition of the geometry of the British Museum Great Court roof. Part I: Definition of geometry as built; Part II: Exploration of alternative scheme using subdivision surfaces. – Bath: University of Bath, Department of Architecture and Civil Engineering. – 6 p.

|                                                                           |                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Поян Анна Вячеславовна</b> – старший преподаватель кафедры архитектуры | <b>Poyan Anna Vyacheslavovna</b> – senior lecturer Department of architecture |
| <b>Максютова Жасмин Тимуровна</b> – магистрант                            | <b>Maksyutova Zhasmine Timurovna</b> – master's student                       |
| jasmine.maksyutova@mail.ru                                                |                                                                               |

*Received 28.04.2026*