

# РОЛЬ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ОБОЛОЧЕК В ФОРМООБРАЗОВАНИИ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

УДК 725.1:69.074

ББК 38.712:38.5

**К.Н. Душкевич**

*Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия*

## Аннотация

Статья посвящена формообразующей роли пространственных большепролетных конструкций в зданиях и сооружениях общественного назначения. В архитектуре покрытие большого пролета является своеобразным вызовом техническим возможностям человека и физическим законам природы. Со времен строительства Пантеона большепролетные сооружения – событие в архитектуре и науке. Государства и архитектурно-строительные индустрии ведут своеобразное соревнование в преодолении конструкциями больших расстояний, во второй половине XX века эти достижения были около 300 м. Россия имеет гигантский «золотой запас» инженерных и архитектурных шедевров с большими пролетами, уникальными инженерными решениями. Прежде всего, это конструкции В.Г. Шухова, постройки к олимпиаде 1980 года и другие. В последние годы наблюдается ослабление интереса к передовым, уникальным решениям в большепролетных конструкциях. При этом спрос со стороны общественных функций есть, это спортивные, выставочные объекты, транспортные здания и сооружения (аэропорты, транспортно-пересадочные узлы, покрытия над эстакадами, перронами и др.).<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** большепролетные конструкции, металлические конструкции, сетчатая оболочка, общественные здания, классификация конструкций, В.Г. Шухов

## THE ROLE OF THE HIGH-SPAN SHELL FORMS IN ARCHITECTURE OF PUBLIC BUILDINGS

**K. Dushkevich**

*Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia*

## Abstract

The article presents an overview of the importance of high-span shell constructions in form-making of public buildings. In architectural practice, high-span shell constructions are the challenge for the technical possibilities of the human beings and principles of physics and nature. Since the Pantheon was built, constructing high-span shells becomes an engineering event for the architecture. The states and the architecture industries are in permanent competition to cover big distances with this kind of constructions. In the second half of the 20th century the highest span was about app. 300 meters. Russia have got rich, but now almost forgotten experience in high-span designing; let's name just some of them: Shukhov's grid shells and constructions designed for the 1980 Summer Olympics in Moscow. Lately, a trivial structural decision is usually preferred in modern Russian architecture, and the variety of high-span load bearing systems is neglected. Nevertheless, in modern Russia, there is a high demand for sport and exhibition venues, transport buildings (airports, transport hubs, coverings and shells for railway stations, highways, etc.).<sup>2</sup>

<sup>1</sup> **Для цитирования:** Душкевич К.Н. Роль большепролетных оболочек в формообразовании общественных зданий // Architecture and Modern Information Technologies. – 2017. – №4(41). – С. 163-178 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

[http://marhi.ru/AMIT/2017/4kvart17/12\\_duskevich/index.php](http://marhi.ru/AMIT/2017/4kvart17/12_duskevich/index.php)

<sup>2</sup> **For citation:** Dushkevich K. The Role of the High-Span Shell Forms in Architecture of Public Buildings. Architecture and Modern Information Technologies, 2017, no. 4(41), pp. 163-178. Available at:

[http://marhi.ru/eng/AMIT/2017/4kvart17/12\\_duskevich/index.php](http://marhi.ru/eng/AMIT/2017/4kvart17/12_duskevich/index.php)

**Keywords:** high-span constructions, steel constructions, grid-shell structure, public facilities, structure morphology, V.G. Shukhov

Одна из тенденций современной архитектуры – широкое использование большепролетных металлических конструкций. Значительный вклад в их разработку еще 100 лет назад внес Владимир Григорьевич Шухов. Его открытия признаны на мировом уровне, а современные крупные архитекторы (такие, например, как Норманн Фостер, Массимилиано Фуксас, Сигеру Бан, Фрэнк Гери) используют в своем проектировании его архитектурно-инженерные решения. Однако в отечественной практике поиск интересных, оригинальных решений, опирающихся на уникальные разработки Шухова, практически отсутствует [9]. Сегодня его конструктивные концепции, которые он применял впервые в мире в конце XIX– начале XX века, становятся особенно актуальными благодаря своей высокой экономичности, надежности, архитектурной выразительности [5]. Среди открытых Шуховым конструкций наиболее популярным и эффективным с точки зрения расхода материала при перекрытии большого пролета является висячее покрытие, а также сетчатая оболочка двойной кривизны. Перекрытие большого пролета подобными конструкциями оказывает сильный визуальный эффект, так как ничтожно малая толщина такого покрытия не укладывается в сложившееся веками в архитектуре классическое соотношение толщины «балки» к «колонне»; наблюдателю зачастую трудно представить как работает такая конструктивная система, что придает соответствующий крупным общественным зданиям с подобными конструкциями зрелищный эффект.

К настоящему времени опубликовано немало исследований, затрагивающих вопросы работы конструкций на большом пролете [12]. Подобные труды в основном включают в себя описание всех видов большепролетных конструкций – балки, фермы, складки, своды, оболочки с использованием различных материалов – железобетон, клееная древесина, металл.

Основная функция несущих конструкций – восприятие нагрузок. Поскольку их функционирование подчинено законам механики, в основу их классификации может быть заложен принцип работы, т.е. механизм сопротивления внешним нагрузкам. Наряду с видом напряженного состояния несущие системы можно классифицировать по геометрическому признаку на линейные, двумерные (плоские) и пространственные (трехмерные). В линейных системах материал конструкции концентрируется вдоль прямой (балка, колонна), кривой (арка, трос) или ломаной линии (рама). В двумерных несущих системах, таких как складки и оболочки, два измерения (размеры в плане) велики по сравнению с третьим (толщиной). Трехмерные несущие системы имеют все три измерения одного порядка и могут иметь практически любую форму. Они образуются из линейных или плоских элементов, в которых может быть одноосное или двухосное напряженное состояние [8].

Для структурирования нагрузок, напряженных состояний и форм конструкций Хайно Энгель предложил разделить все существующие в строительстве несущие системы на пять видов [11]. К первому отнесены «активные по форме» несущие системы, т.е. криволинейные системы из одноосно напряженных гибких или жестких элементов (арки, ванты и т.п.). Ко второму типу относятся «активные по вектору» несущие системы. В таких системах внешние нагрузки уравниваются внутренними усилиями сжатия и растяжения, возникающими в жестких элементах плоских или пространственных решеток. К третьему типу Х. Энгель относит «активные по сечению» системы (балки, рамы, панели). Элементы таких систем работают преимущественно на изгиб и внешние нагрузки компенсируются нормальными и касательными напряжениями, возникающими в их поперечных сечениях. Наиболее выразительным с точки зрения образуемого пространства типом являются так называемые «активные по поверхности» несущие

системы. К ним относятся складки и оболочки. Характерным признаком таких систем является восприятие внешних нагрузок за счет работы образующих их элементов на сжатие, растяжение и срез и «активной» форме поверхности. К пятому типу отнесены «активные по высоте» несущие системы. В основном это высотные здания и сооружения различных конструктивных схем (каркасные, ствольные и т.д.).

Классификация большепролетных конструкций В. Адамовича, представленная в учебнике «Архитектурное проектирование общественных зданий и сооружений», ограничена их применением исключительно в общественных сооружениях. Эта классификация разделяет большепролетные конструкции по геометрическому принципу [1, с.77]. Несущие системы, в первую очередь, подразделяются на плоскостные и пространственные. К *плоским покрытиям* больших пролетов автор относит фермы, балки, рамные и арочные конструкции. *Пространственные* несущие системы включают в себя складки; цилиндрические, сетчатые, пологие оболочки; купола, гипары, висячие и вантовые покрытия, перекрестно-стрежневые конструкции.

Классификации, подобные рассмотренным, охватывают, как правило, исключительно область несущих систем, практически не принимая во внимание функциональное зонирование сооружения, его архитектурный облик, не затрагивая объемно-пространственного решения сооружения, либо затрагивая в небольшой степени. В виду отсутствия существующих аналогичных классификаций, предлагается сформировать новую – по объемно-пространственному принципу, которая охватывала бы не только технические, структурные аспекты конструкций, но рассматривала конструкции как неотъемлемую часть здания, играющую важное формообразующее значение. В результате проведения анализа развития общественных зданий с большепролетными металлическими несущими системами и обращаясь к опыту проектирования общественных зданий, предлагается включить в классификацию по объемно-пространственному принципу 3 типа:

- *оболочка как покрытие;*
- *оболочка как покрытие части здания;*
- *оболочка как здание.*

В качестве принципа такой классификации предлагается заложить не геометрический принцип, не принцип сопротивления внешним нагрузкам, но формообразование. В зданиях с большепролетными конструкциями именно эти конструкции или оболочка покрытия влияют на формообразование, на то, как здание выглядит внутри и снаружи. Такая классификация видится полезным инструментом именно для архитектора, затрагивая вопросы как проектирования конструкций, так и их формообразующей роли в архитектуре сооружения.

### **Оболочка как покрытие**

Для этого типа свойственно четкое разделение сооружения на фасадную часть и покрытие. Оболочка, как правило, активно участвует в формообразовании, однако визуально отделима от объема здания в отличие от третьего типа (см. ниже), для которого характерно активное вовлечение оболочки как в интерьер, так и в экстерьер сооружения. Такое решение соответствует: спортивным объектам (стадионам, бассейнам, велотрекам); транспортным сооружениям (аэропортам, железнодорожным станциям); выставочным, торговым зданиям с доминирующей, монополярной функцией. Внутренняя функциональная структура этого типа зданий должна предполагать большое безопорное пространство, в этом случае применение оболочки над всем объемом здания оправдано (рис. 1в). Трудно расположить многофункциональную структуру в подобный объем. Конструкция в этом случае несущественно влияет на характер фасада, но играет большую роль в интерьере. Особенно эффектно сочетание с бетонными стенами или, к примеру, с бетонными дисками перекрытий, выходящих на фасад (Олимпийский стадион в Риме, Италия, 1990 г.) [13]). Массивный материал стен подчеркивает невесомость,

легкость конструкции. Здания с оболочками в виде верхнего покрытия имеют преимущество в градостроительном аспекте. Фасадом здания является стена, поэтому он легко может быть масштабирован и вписан в существующую городскую среду (Рис. 1а) [19]. В случае применения оболочки двойной кривизны распорная реакция может быть погашена затяжками в плоскости стены, консольными выступами за пределы фасада. Нагрузки оболочка может передавать на фермы, опорные ребра, которые, в свою очередь, опираются на колонны или пилоны по контуру здания (Рис. 1б) [18].



а)



б)



в)

Рис. 1. Примеры зданий с оболочками, частично участвующими в формообразовании: а) Олимпийский велотрек в Лондоне, Англия, 2011 г.; б) вокзал Ватерлоо в Лондоне, Англия, 1993 г.; в) Восьмая Экспо-выставка цветов в Чанчжоу, Китай, 2001 г.

Постройки В.Г. Шухова для Нижегородской выставки 1896 года являются примерами такой интеграции оболочек в структуру здания. Архитектура того времени едва постигала большепролетные металлические конструкции пока не предлагая органичных решений. Поэтому кирпичные фасады павильона Фабрично-заводского дела XVI Всероссийской художественно-промышленной выставки 1896 года в Нижнем Новгороде выполнены в эклектичной манере конца XIX века. Внутри же – поразительная даже для современного зрителя висячая оболочка. Однако, в решении павильонов Строительного отдела конструктивное решение Шухова стало основой для архитектуры фасада, его уже не удалось замаскировать.

Для спортивных сооружений этого типа свойственно, наличие вокруг здания свободных от селитбы пространств, необходимых для организации и распределения потоков зрителей. Особенность восприятия таких сооружений издавна отражается на размерах фасадных элементов. Эллиптическая (или близкая к эллипсу) форма плана спортивных объектов рассматриваемого типа диктует устройство регулярного фасада и крупных его членений. Такой прием увеличивает внешний масштаб сооружения.

Проблема сомасштабности конструкций человеку в интерьере также является важным аспектом проектирования зданий данного типа. Излишне крупные, перегруженные по вертикали несущие системы воспринимаются как визуально тяжелый элемент интерьера над головой зрителя, что делает некомфортным пребывание внутри здания (как, например, интерьер ледовой арены Шайба в Сочи, Россия, 2013 г.). Большепролетные конструкции могут как подшиваться, так и оставаться открытыми зрителю.

Для общественных зданий данной типологии характерно применение висячих покрытий, пространственных несущих систем, образованных плоскостными несущими конструкциями (аэропорт Стансед в Лондоне, Англия, 1991 г.) [14]. Висячие покрытия являются наиболее экономичным вариантом с точки зрения расхода материала. Однако, они, в силу своей конструктивной особенности, усиливают в интерьере ощущение тяжести конструкций над головой. Для исключения в интерьере негативного эффекта от провисания конструкции архитекторы предусматривают в покрытии световые фонари, которые не только обеспечивают дополнительное освещение в светлое время суток, но и визуально облегчают интерьерное пространство. Седловидные висячие покрытия также активно влияют на объем здания и позволяют создать динамичный фасад (Олимпийский велотрек в Лондоне). В этом случае на первое место встает вопрос опирания на фундамент опорного железобетонного или металлического контура. Погашение распора может осуществляться самим опорным контуром (Олимпийский велотрек в Крылатском в Москве, Россия, 1979 г.) [6, с.24]).

В случае двухпоясных несущих систем, применение которых в современной архитектуре не так широко, как и однопоясных, потолок подшивается со стороны внутреннего пространства сооружения, что позволяет сделать его ровным и частично исключить негативный визуальный эффект провисания конструкций в интерьере. В этом случае конструкции не доступны взгляду зрителя (Олимпийский стадион на Проспекте мира в Москве, Россия, 1980 г.). Устройство световых проемов в покрытии также характерно и для этого типа большепролетной несущей конструкции.

В некоторых примерах архитектуры висячее покрытие устраивается в форме «шатра» (торгово-развлекательный центр Хан Шатыр в Астане, Казахстан, 2010 г.). Основным несущим элементом в данном случае являются стальные тросы, непосредственно к которым крепится покрытие. Покрытие может быть выполнено в светопрозрачном исполнении – полимерные пленки, стекло, пластик [16]. При устройстве подобного «шатра» оболочка-покрытие одновременно выполняет функцию фасада – все здание воспринимается единым объемом.

В данной типологии, помимо висячих покрытий, применяются сложные пространственные системы, образованные рамами, фермами, арками. Использование такого типа несущей

системы позволяет свободно работать с планом сооружения (в отличие от висячих покрытий), интерьерным пространством. К примеру, в здании Восьмой Экспо-выставки цветов в Чанчжоу (Китай, 2011 г.) [17] оболочка выполнена на основе металлических сетчатых конструкций, покрытых оболочкой из фторопласта, и практически не взаимодействует с расположенными под ней выставочными залами – она выглядит и работает как независимый элемент (рис. 1в). Более того, оболочка выходит за границы плана, образуя разноразмерные навесы по периметру здания, обеспечивающие защиту от прямых солнечных лучей внутренней экспозиции.

### **Оболочка как покрытие части здания**

Характерная черта общественных зданий такого типа – встраивание оболочки-покрытия в другую несущую систему. В этом случае существует два принципиальных конструктивных решения такого встраивания, при которых большое внимание уделяется узлу контакта двух несущих систем – опирание оболочки на часть здания или на собственные опоры. В первом случае оболочка, как правило, максимально лаконично присоединяется к существующему зданию, акцент на узле контакта не делается. Во втором – оболочка подчеркнута визуально отделяется от здания, в которое она встраивается, а иногда даже возвышается над ним. В любом случае оболочки практически не участвуют в процессе формирования фасада и работают преимущественно на внутреннее восприятие зрителем (рис. 2б).

Использование в предложенной нами типологии сетчатых конструкций максимально оправдано. Во-первых, не возникает провисания конструкций в интерьер, во-вторых – сетчатая оболочка, с точки зрения экономичности, представляется наиболее эффективным решением. Такая оболочка дает возможность гибко работать с планом и позволяет вписаться практически в любое окружение (рис. 2а).

В подобных случаях достаточно большим потенциалом обладает перекрестно-стрелевая конструкция, собранная из однотипных элементов. Конструктивная схема таких систем позволяет устроить вертикальные несущие элементы также из стержней и достаточно гибко работать с их расположением. Такие конструкции, благодаря однотипности составляющих их элементов, просты в производстве и монтаже. Однако, несмотря на это преимущество, перекрестно-стрелевая конструкция, состоящая из мелких модулей, может восприниматься как нагромождение элементов.

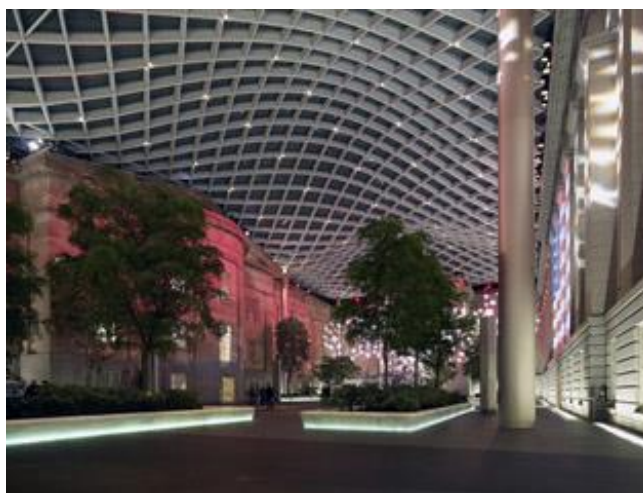
Итак, если говорить о функциональном зонировании таких зданий, можно сделать следующий вывод: в частях здания с каркасным или стеновым несущим остовом располагаются аудитории, кабинеты, научные отделы (в зависимости от функционального назначения здания), в большепролетном пространстве под оболочкой – общественные зоны (экспозиции, аудитории, выставки), как, например, в Смитсоновском музее в Вашингтоне (2007 г.). Аналогичное решение может найти применение и в объектах торговли – основная общественная зона располагается в пространстве, перекрытом большепролетной конструкций, торговые точки располагаются по периметру здания (торговый центр My Ziel во Франкфурт-на-Майне, Германия, 2009 г.) [15]. Применение таких решений также целесообразно в аэропортах, где крайне много функций располагается в пределах одного сооружения – и крупных общественных, и более мелких вспомогательных. Так как для этого типа свойственно включение большепролетной металлической конструкции в другую несущую систему, такое решение применяется в условиях тесной городской или исторической застройки, где необходимо включить создаваемое покрытие в уже существующую несущую систему, историческую застройку. В этом случае меняется масштаб сооружения и используемого покрытия. Элементы покрытия становятся более сомасштабны человеку, чем в крупном зрелищном сооружении, что также связано с уменьшением пролета (рис. 2в).

В случаях музеев и выставочных пространств из-за плотности окружающей городской среды оболочки практически не воспринимаются зрителем снаружи, но воспринимаются

из интерьера. Это соответствующим образом сказывается на элементах конструкций, которые становятся визуально максимально легкими. Однако для этого типа зданий исключительно из интерьера оболочка воспринимается не всегда. Наглядным примером является торговый центр «My Ziel» во Франкфурт-на-Майне. В данном случае оболочка, преимущественно работающая на интерьер, выходит на фасад, что делает ее активным элементом экстерьера. Таким образом создается возможность проявлять градостроительные возможности оболочки по-разному реагируя на городские условия. Фактически, конструкция становится скульптурой, каждый элемент которой детально прорабатывается. В подобных случаях покрытие выполняется в светопрозрачном исполнении, что подчеркивает «невесомость» оболочки (перекрытие внутреннего двора Музея истории Гамбурга (Германия, 1989 г.). В некоторых случаях историческое окружение вообще не затрагивается, конструктивно не взаимодействует с оболочками (перекрытие двора в Британском музее, Лондон, Англия, 1994-2000 гг.)



а)



б)



в)

Рис. 2. Примеры зданий с оболочками, фрагментарно участвующими в формообразовании: а) станция Кингс Кросс в Лондоне, Англия, 2013 г.; б) Смитсоновский музей американского искусства в Вашингтоне, США, 2007 г.; в) здание DZ-банка в Берлине, Германия, 2000 г.

## Оболочка как здание (как основной формообразующий элемент сооружения)

Для этого типа общественных зданий, в отличие от первого типа, которому также свойственна высокая степень участия оболочки, характерна доминирующая роль оболочки в формообразовании сооружения. Такая оболочка фактически заключает в себя все здание и формирует его внешний вид и интерьер. Принципиальным вопросом для данного типа становится выбор несущей системы покрытия-оболочки. В этом случае наиболее оправданным оказывается применение пространственных несущих сетчатых систем-оболочек, формирующих покрытие двоякой или нерегулярной кривизны, как подтверждают рассмотренные ниже примеры из современной зарубежной архитектуры.

В эту категорию входят общественные сооружения с различным функциональным назначением – транспортные, спортивные объекты, музеи. Этим объектам свойственны такие черты, как зрелищность сооружения, производимый на зрителя эффект. Общественные сооружения такого типа – здания массового назначения, и располагаются они не в затесненной городской застройке, а в пригородах или крупных, свободных от селитьбы территориях внутри города (на площадях). Такие постройки подчиняют окружение, фактически становятся его центром благодаря крупному масштабу. Соблюдение этого условия необходимо для исключения перегруженности транспортной инфраструктуры – потоки зрителей или пассажиров должны рассеиваться на большой площади вокруг сооружения. Таким образом, для рассматриваемого типа свойственно наличие вокруг сооружения свободного участка, площади, системы площадей – зритель, направляющийся к такому зданию, видит его издали (рис. 3а). Именно это обстоятельство соответствующим образом влияет на процесс проектирования фасада – фасадные элементы увеличиваются в масштабе чтобы предоставить зрителю возможность восприятия здания издали. Тем не менее, на фасаде присутствуют более мелкие, сомасштабные человеку элементы, так как по мере приближения зрителя к зданию у него возникает необходимость соотнесения себя с постройкой.

Что касается интерьера, то, как правило, большепролетные конструкции покрытия изнутри остаются открытыми, что оправдано не только с точки зрения экономии (подшивать потолки на такой площади крайне дорого), но и эстетики. В этой типологии на первое место встают вопросы размещения внутренних функций и их расположения относительно использованных конструкций. В общественных зданиях такой типологии функции (как основные, так и вспомогательные) располагаются внутри оболочки-покрытия, которая становится и фасадом и кровлей одновременно (рис. 3б). Если говорить о транспортных объектах, то для них характерно линейное расположение функций, как, к примеру, в аэропорту Шеньчжэня (Китай, 2013 г.). Это здание в плане представляет собой две пересекающиеся крест-на-крест огромные «трубы» с многочисленными расположенными в свободном порядке световыми проемами. Поперечное сечение этих «труб» близко к эллипсу, внутри которого в несколько (от трех до пяти) уровней располагаются основные и вспомогательные функциональные зоны. Так, движение пассажиров организовано по верхним уровням с высокими потолками, точнее – потолками-стенами. Так пассажиры испытывают полное ощущение того, что они движутся внутри «трубы». Большое внимание в данном случае уделяется выразительности конструкций как в интерьере, так и в экстерьере, поскольку конструкции являются и внутренним и внешним каркасом сооружения (рис. 3в). В случае выставочной функции основная экспозиция может занимать все внутреннее пространство сооружения – как по горизонтали, так и по вертикали, то есть расположение функций становится террасным по вертикали (Музей мореплавания в Осаке (Япония, 2010 г.); многоуровневая оранжерея в Сингапуре, 2012 г.).

Большепролетные металлические конструкции дают широкую палитру выбора объемно-пространственных решений для общественных зданий и сооружений. Зарубежная архитектурная практика, хотя бы на примере вышеупомянутых зданий, показала, что большепролетные несущие системы обладают потенциалом к дальнейшему развитию. Однако, если говорить про современную отечественную архитектуру общественных



зданий и сооружений, можно увидеть лишь несколько таких построек за последние 25 лет – Ледовый дворец в Крылатском (2004 г.), ледовый дворец в Коломне (2006 г.), ледовый дворец в Ангарске (2007 г.) и футбольный стадион в Краснодаре (2016 г.), спроектированный немецким архитектурно-конструкторским бюро «SPB».



а)



б)



в)

Рис. 3. Примеры зданий с высокой степенью участия оболочки в формообразовании: а) спортивный стадион в г. Оита, Япония, 2001 г.; б) оранжереи с контролем климата в Сингапуре, 2012 г.; в) ТПУ в г. Анагейм, США, 2014 г.

Стоит отметить, что использование отечественного опыта проектирования большепролетных металлических оболочек, помимо опыта современной зарубежной архитектуры, обладает большим потенциалом. Отечественная архитектура располагает огромным и важнейшим наследием инженера В.Г. Шухова, на принципах которого фактически строится вся современная архитектура большепролетных металлических конструкций. Сетчатую оболочку, как и объем гиперболоида вращения, отличают пространственная жесткость и визуальная легкость (рис. 4а), висячее покрытие позволяет перекрыть большой пролет с минимальными затратами конструкционных материалов.

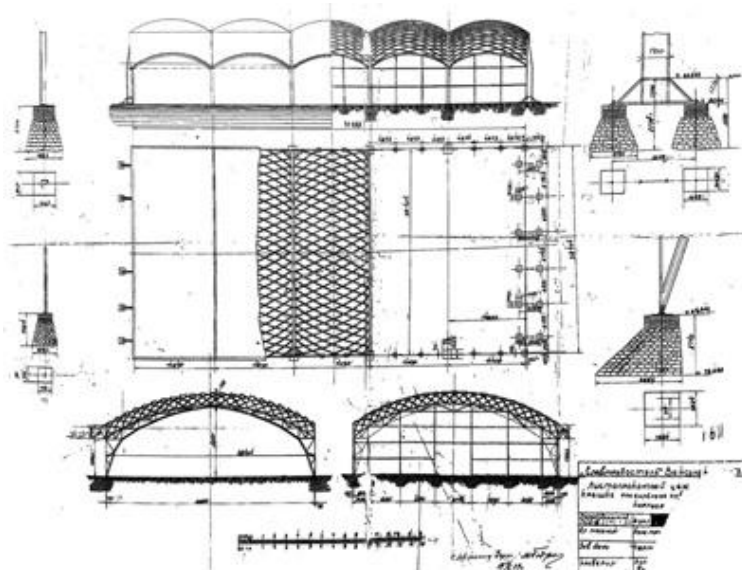
Каждая из заводских конструкций системы Шухова решала определенные задачи. Конструкция гиперболоида стала водонапорной башней, способной нести огромные по весу резервуары с водой, притом собиралась из прямолинейных элементов. Более того, сетчатая конструкция испытывала минимальные ветровые нагрузки. Оболочка двоякой кривизны цеха металлургического завода в г. Выксе (1898 г., Нижегородская обл.) безупречно перекрыла пролет в 38 м, сделав возможным установку листопркатного оборудования (рис. 4б). Однако, пространственная сетчатая оболочка появилась не просто так. Развивая свою конструктивную схему арочных сетчатых покрытий, которые являются системами одинарной кривизны, Шухов решил «изогнуть» линию продольных опор перекрестных арок. Такое «вспарушивание» опорной линии задало системе вторую кривизну и придало ей дополнительную пространственную жесткость не нарушая конструктивных преимуществ, характерных для цилиндрических сетчатых покрытий. В

конструкции листопркатного цеха опорами для оболочки стали верхние пояса сквозных трехшарнирных арок. Нижний пояс арок также имеет криволинейное очертание и, таким образом, не только экстерьер, но и интерьер цеха отличают плавные криволинейные очертания (рис. 4в). Выбранное Шуховым объемно-пространственное и конструктивное решение максимально эффективно использует особенности «вспарушенного» цилиндра, так как перекрестные арки включаются в пространственную работу системы, и любая направленная нагрузка встречает сетку из арок, равномерно воспринимающую эту нагрузку. Оболочка двоякой кривизны стала следствием развития свода-оболочки и сохранила все преимущества, свойственные системам с большим количеством однотипных элементов. Перекрестное расположение арок делает ненужным устройство связей жесткости и в то же время позволяет уменьшить сечение арок, так как каждая из них, будучи расположенной в оболочке-сетке, работает эффективно. Таким образом, Шухову впервые в мире удалось создать сетчатую оболочку двоякой кривизны с прямоугольным планом, скомпонованную из однотипных элементов, что существенно облегчило монтаж несущей системы. Сетчатая оболочка обеспечила экономию металла практически на 40% в сравнении с классической стоечно-балочной системой и не требовала устройства сплошных лесов [7, с.107].



а)

б)



в)

Рис. 4. Постройки В.Г. Шухова на территории Выксунского металлургического комбината: а) водонапорная башня; б) листопркатный цех с оболочкой двоякой кривизны; в) чертеж конструкций листопркатного цеха

Оболочки системы Шухова, помимо своей экономичности и эффективного использования металла, оказались эффектными с точки зрения архитектурного формообразования, что, видимо, определило их применение в качестве выставочных павильонов XVI Всероссийской художественно-промышленной выставки 1896 года. Самым выдающимся изобретением, на многие десятилетия опередившим свою эпоху (и потому оставшимся не замеченным и не оцененным современниками), стало перекрытие павильона Строительного и инженерного отделов (круглое в плане здание), выполненное в виде «вогнутой внутрь чаши диаметром 25 м из тонкого листового железа, края которой прикреплены к верхнему кольцу» [10, с.5].

Вместо обычных для конца XX века ферм и прогонов павильон был покрыт легкой сеткой, поддерживающей листовое железо кровли, с вырезами для световых фонарей (рис. 5а,5в). Сетка, образованная двумя перекрещивающимися системами металлических стержней, скомпонована так, что вписывается в поверхность, близкую к поверхности однополостного гиперboloида вращения. Основная вертикальная несущая система павильона была решена в виде двух концентрических цилиндров разного диаметра. Внутренний цилиндр с большей высотой образован 16-ю решетчатыми колоннами квадратного сечения, которые поддерживают купол с подвесным потолком. Опорное кольцо этого купола располагается на пространственных капителях колонн и связывает их сверху. Пространственная устойчивость внутреннего цилиндра обеспечивается крестовыми связями, расположенными ниже капителей между каждой парой смежных колонн. При этом связи жесткости, которые являются необходимым элементом каркасного несущего остова, не нарушают общего впечатления легкости конструкций. Таким образом в центре круглого павильона создан внутренний каркас, к которому подвешивается легкая пространственная металлическая сетка, которая с другого своего конца опускается к верхней жесткой кольцевой связи обвязки второго, внешнего цилиндра, образованного колоннами меньшей высоты. Обвязка воспринимает горизонтальные усилия от висячего покрытия. Внешний диаметр павильона – 68 м, высота наружных стен (внешнего цилиндра) – 6,4 м, высота колонн внутреннего цилиндра – 15 м [7, с.85]. Благодаря четкой схеме подвесного покрытия с большим числом одинаковых элементов и простым узловым элементам, навешивание профилей, образующих металлическую несущую сетку между внутренним и внешним цилиндрами, потребовало всего около 10 дней.

Аналогично, при помощи висячего покрытия были покрыты два прямоугольных здания Строительного и инженерного отделов и эллиптическое в плане здание Фабрично-заводского отдела. В отличие от конструкции круглого здания, в павильонах Строительного и инженерного отделов вместо нескольких расположенных правильным многоугольником центральных колонн установлен один ряд колонн – по продольной оси зданий (рис. 5б). Сверху эти колонны соединены продольной сквозной фермой. Крайние колонны ряда притянуты к углам зданий наклонными тягами, идущими по линиям пересечения торцевых и продольных поверхностей покрытия. Благодаря такой схеме затяжек колонны центрального ряда работают только на восприятие вертикальной нагрузки. Кровли в этих павильонах выступают за контур наружных стен и образуют навес, который поддерживается наклонными сжатыми колоннами-подкосами. Эти колонны упираются под углом в фундамент наружных стен и передают на него распор от висячего покрытия.

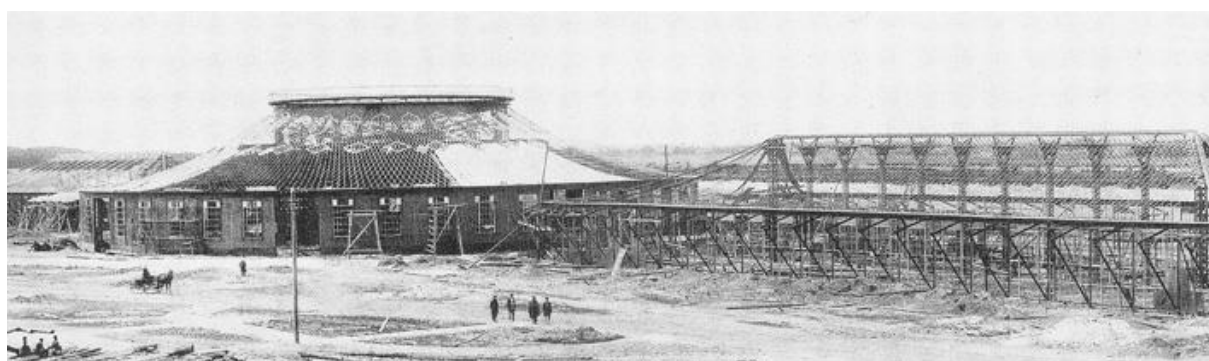
Также висячее покрытие было применено Шуховым в конструкции павильона Фабрично-заводского отдела (рис. 6б). Здесь внутренних опор еще меньше, чем в рассмотренных выше павильонах – две. Две сетчатые пространственные колонны квадратного сечения, расположены в середине здания, сверху они соединялись висячей пространственной конструкцией, составленной из двух ферм. Именно к этим фермам подвешивался верхний край висячей оболочки.



а)



б)



в)

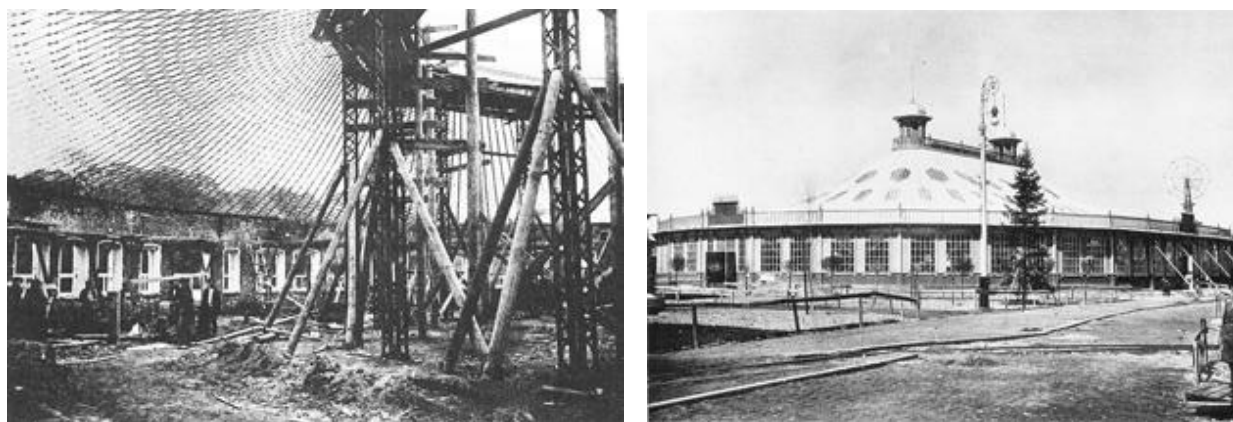
Рис. 5. Возведение павильонов Строительного и инженерного отделов на Нижегородской выставке 1896 г.: а) круглое в плане здание (фото от 21 июня 1895 г.); б) интерьер одного из прямоугольных зданий (фото от 3 февраля 1896 г.); в) строительство круглого и прямоугольных павильонов (фото от 15 июня 1895 г.)

Выставочные павильоны, несомненно, стали архитектурным открытием Нижегородской выставки, однако самой первой постройкой, в которой Шухов в 1894 году применил висячее покрытие, был сборочный цех Московского котельного завода (позднее – 3-д «Парострой», рис. 6а). Конструкция цеха очень похожа на павильон Строительного и инженерного отделов – два концентрических цилиндра разного диаметра и различной высоты, соединенные покрытием [7, с.98]. Внутренний цилиндр так же образован опорным контуром и сетчатыми колоннами, на которые он опирается. Главным отличием цеха от павильона является внешний опорный контур. В цехе Шухов применил кирпичную стену с регулярно расположенными окнами, в павильоне – колонны, что показывает желание автора адаптировать висячую оболочку под выставочную функцию, впустить в интерьер больше света, подчеркнуть легкость покрытия.

Это были первые висячие оболочки-мембраны – конструкция, в XX, а теперь уже и в XXI веке считающаяся одним из наиболее прогрессивных типов покрытий большепролетных сооружений. Налицо огромный потенциал использования таких конструкций для общественных зданий, интерьер которых требует свободной планировки или сплошного открытого пространства.

Большепролетные металлические конструкции Шухова, изобретенные еще в XIX веке, до сих пор остаются востребованными, как то показывает зарубежная практика (см. примеры современной архитектуры выше), и могут стать основой для развития современной архитектуры в России. Понятно, что несущие системы Шухова, в их первоначальном

виде, не смогут полностью удовлетворить современные потребности архитектуры, однако принципы их построения остаются актуальными. Используя современные технологии проектирования и строительства, становится возможным активнее работать с формообразованием и находить новое функциональное назначение для некогда заводских конструкций Шухова.



а)

б)

Рис. 6. Висячие оболочки Шухова в выставочной и заводской архитектуре: а) строительство сборочного цеха завода Парострой в Москве, 1984 г.; б) павильон Фабрично-заводского отдела Нижегородской выставки 1896 г.

## Выводы

Большепролетные металлические конструкции, построенные на инженерных идеях В.Г. Шухова, такие как висячее покрытие и сетчатая оболочка, стали основой для развития современных большепролетных конструкций из металла.

В зависимости от степени участия конструкции внешней оболочки в формообразовании зданий были выделены три типа зданий. Предлагаемая классификация рассматривает общественные здания и сооружения с новой стороны благодаря тому, что в качестве ее основного принципа были выбраны такие аспекты, как формообразование, объемно-пространственное решение, функциональное зонирование. Классификация по объемно-пространственному принципу может оказаться полезным инструментом как для практикующих архитекторов, формируя общее представление об архитектурных возможностях конструкций, так и для студентов профильных ВУЗов, способствуя формированию более ясного представления о работе конструкций и их формообразующих возможностях в объеме здания.

## Источники иллюстраций

Рис. 1а. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.detail-online.com/article/london-2012-velodrome-16431>

Рис. 1б. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sbeq.co.uk/work/partnerships/>

Рис. 1в. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://inhabitat.com/2014-china-flower-expo-pavilions-resemble-giant-floating-flower-petals/>

Рис. 2а. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://now-here-this.timeout.com/2012/03/14/the-new-kings-cross-station-may-the-concourse-be-with-you/>

Рис. 2б. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.e-architect.co.uk/america/smithsonian-institute>

Рис. 2в. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.hansfeyerabend.com/pages/00\\_2008/ATB\\_singles/ATB\\_2008\\_pic\\_18.html](http://www.hansfeyerabend.com/pages/00_2008/ATB_singles/ATB_2008_pic_18.html)

Рис. 3а. (в авторской интерпретации). - [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://arka.su/ru/encyclopedia/kisho-kurokawa/>

Рис. 3б. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.archdaily.com/324309/cooled-conservatories-at-gardens-by-the-bay-wilkinson-eyre-architects>

Рис. 3в. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hok.com/design/type/aviation-transportation/anaheim-regional-transit-center-artic/>

Рис. 4а. фото автора;

Рис. 4б. фото автора;

Рис. 4в. по [3, с.157] в авторской интерпретации;

Рис. 5а. по [3, с.40] в авторской интерпретации;

Рис. 5б. по [3, с.46] в авторской интерпретации;

Рис. 5в. по [3, с.39] в авторской интерпретации;

Рис. 6а. [7, с.99];

Рис. 6б. по [3, с.44] в авторской интерпретации.

## Литература

1. Адамович В.В. Архитектурное проектирование общественных зданий и сооружений / В.В. Адамович, Б.Г. Бархин, В.А. Варезкин и др. – издание второе, дополненное и переработанное. – М.: Стройиздат, 1984. – 543 с.
2. Виноградова Т. Нижегородские открытия. Код Шухова / Т. Виноградова, С. Авдеев. – Нижний Новгород: Покровка 7, 2013. – 144 с.
3. Шухов В.Г.: нижегородские проекты. Территория уникальных объектов : книга-альбом / С.В. Зеленова, Т.П. Виноградова, Д.И. Коротаева, Г.Н. Ометова. – Нижний Новгород: Литера, 2015. – 224 с.
4. Грефе Р. В.Г. Шухов, 1853-1939. Искусство конструкции / Р. Грефе, О. Перчи, Ф. Шухов и др.; под ред. Р. Грефе, М. М. Гаппоева, О. Перчи; пер. с нем. Л. М. Глотова, М. М. Гаппоева. – М.: Мир, 1994. – 192 с.
5. Душкевич, К.Н. Металлические конструкции В.Г. Шухова как потенциал формообразования современной архитектуры // Architecture and Modern Information Technologies. – 2016. – №2(35) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.marhi.ru/AMIT/2016/2kvart16/index.php>
6. Дыховичный Ю.А. Большепролетные конструкции сооружений «Олимпиады-80» в Москве : (конструкторский поиск, исследования, проектирование, возведение) / Ю.А. Дыховичный. – М.: Стройиздат, 1982. – 277 с.
7. Ковельман Г.М. Творчество почетного академика инженера Владимира Григорьевича Шухова / Г. М. Ковельман. – М.: Госстройиздат, 1961. – 363 с.
8. Мардер А.П. Металл в архитектуре / А.П. Мардер. – М.: Стройиздат, 1980. – 232 с.
9. Сулова О.Ю. Выдержат ли конструкции В.Г. Шухова новейший вид нагрузок? / О.Ю. Сулова, К.Н. Душкевич // Архитектура и строительство России. – М., 2011. – № 4 (апрель).
10. Шухов В.Г. Избранные труды : Строительная механика / В. Г. Шухов; Под ред. акад. А. Ю. Ишлинского ; АН СССР, Институт истории, естествознания и техники, Комиссия по увековечению памяти почетного академика В. Г. Шухова. – М.: Наука, 1977. – 192 с.
11. Энгель Х. Несущие системы : учебное издание / Хайно Энгель. – М.: АСТ Астрель, 2007. – 344 с.

12. Душкевич К.Н. Наследие В.Г. Шухова и новаторство в современных конструкциях общественных зданий: Научный доклад об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации). – М., 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://marhi.ru/aspirantura/ND/ND\\_Dushkevich\\_K.pdf](http://marhi.ru/aspirantura/ND/ND_Dushkevich_K.pdf)
13. Angelo Spampinato. Stadio Olimpico di Roma // The world Stadiums [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.worldstadiums.com/stadium\\_menu/architecture/stadium\\_design/roma\\_olimpico.shtml](http://www.worldstadiums.com/stadium_menu/architecture/stadium_design/roma_olimpico.shtml)
14. Eleanor Knowles. Stansted Airport, Main Terminal // Engineering timelines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=235>
15. Irina Vinnitskaya. MyZeil Shopping Mall / Studio Fuksas // ArchDaily [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.archdaily.com/243128/myzeil-shopping-mall-studio-fuksas>
16. Khan Shatyr Entertainment Centre // Foster + Partners [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fosterandpartners.com/projects/khan-shatyr-entertainment-centre/>
17. Nicole Jewel. 2014 China Flower Expo Pavilions Resemble Giant Floating Flower Petals inhabitat [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://inhabitat.com/2014-china-flower-expo-pavilions-resemble-giant-floating-flower-petals/>
18. Nigel Dale. Waterloo International Terminal // Engineering timelines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=243>
19. Peter Popp, Olga Lopez Sans. London 2012 - Velodrome // Detail-online [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.detail-online.com/article/london-2012-velodrome-16431>

## References

1. Adamovich V.V. *Arhitekturnoe proektirovanie obschestvennih zdaniy* [Public buildings designing]. Moscow, 1984, 543 p.
2. Vinogradova T. *Nizegorodskie otkritiya. Kod Shuhova* [Niznij Novgorod' inventions. Shukhov code]. Niznij Novgorod, 2013, 144 p.
3. Zelenova S.V., Vinogradova T.P., Korotaeva D.I., Ometova G.N. *V.G. Shukhov Nizegorodskie proekti. Territoriya unikal'nih ob'ektov* [V.G. Shukhov: Niznij Novgorod' projects. The territory of unique projects]. Niznij Novgorod, 2015, 224 p.
4. Grefe R. *V.G. Shuhov, 1853-1939. Iskusstvo konstrukcii* [V.G. Shukhov, 1853-1939. The art of structure]. Moscow, 1994, 192 p.
5. Dushkevich K.N. Steel constructions of V.G. Shukhov as a potential for the form-making of modern architecture. *Architecture and Modern Information Technologies*, 2016, №2(35). Available at: <http://www.marhi.ru/AMIT/2016/2kvart16/index.php>
6. Dihovichnyj Y. A. *Bolsheproletnie konstrukcii sooruzenyj «Olympiady-80» v Moskve* [High-span constructions in architecture of Moscow Olympic games 1980]. Moscow, 1982, 277 p.
7. Kovelman G.M. *Tvorchestvo pochetnogo akademika Vladimira Grigor'evichs Shukhova* [Creative works of honorable academician Vladimir Shukhov]. Moscow, 1961, 363 p.

8. Marder A.P. *Metall v arhitekture* [Iron and steel in architecture]. Moscow, 1980, 232 p.
9. Suslova O.U., Dushkevich K.N. *Viderzat li konstrukcii V.G. Shukhova noveishij vid nagruzok?* [Will the constructions of V.G. Shukhov sustain the newest kind of load? Magazine: «Architecture and construction in Russia»]. Moscow, 2011, no. 4(April).
10. Shuhov V.G. *Izbranniye trudi: Stroitel'naya mehanika* [Selectas: structural mechanics]. Moscow, 1977, 192 p.
11. Engel' H. *Nesuschie sistemi: uchebnoe izdanie* [Load-bearing structures]. Moscow, 2007, 344 p.
12. Dushkevich K.N. *Nasledie V.G. Shukhova i novatorstvo v sovremennih konstrukciyah obschestvennyh zdaniy* [Engeneering heritage of V.G. Shukhov and innovation in modern constructions of public buildings. Scientific report on the main results of the prepared scientific thesis (dissertation)]. Moscow, 2016. Available at: [http://marhi.ru/aspirantura/ND/ND\\_Dushkevich\\_K.pdf](http://marhi.ru/aspirantura/ND/ND_Dushkevich_K.pdf)
13. Angelo Spampinato. Stadio Olimpico di Roma - The world Stadiums. Available at: [http://www.worldstadiums.com/stadium\\_menu/architecture/stadium\\_design/roma\\_olimpico.shtml](http://www.worldstadiums.com/stadium_menu/architecture/stadium_design/roma_olimpico.shtml)
14. Eleanor Knowles. Stansted Airport, Main Terminal - Engineering timelines. Available at: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=235>
15. Irina Vinnitskaya. MyZeil Shopping Mall / Studio Fuksas - ArchDaily. Available at: <http://www.archdaily.com/243128/myzeil-shopping-mall-studio-fuksas>
16. Khan Shatyr Entertainment Centre - Foster + Partners. Available at: <http://www.fosterandpartners.com/projects/khan-shatyr-entertainment-centre/>
17. Nicole Jewel. 2014 China Flower Expo Pavilions Resemble Giant Floating Flower Petals - inhabitat. Available at: <http://inhabitat.com/2014-china-flower-expo-pavilions-resemble-giant-floating-flower-petals/>
18. Nigel Dale. Waterloo International Terminal - Engineering timelines. Available at: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=243>
19. Peter Popp, Olga Lopez Sans. London 2012 – Velodrome - Detail-online. Available at: <http://www.detail-online.com/article/london-2012-velodrome-16431>

## ОБ АВТОРЕ

### **Душкевич Константин Никитич**

Аспирант, кафедра «Архитектура общественных зданий», Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия  
e-mail: [arhitektorkd@gmail.com](mailto:arhitektorkd@gmail.com)

## ABOUT THE AUTHOR

### **Konstantin Dushkevich**

Postgraduate Student of Department «Architecture of Public Buildings», Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia  
e-mail: [arhitektorkd@gmail.com](mailto:arhitektorkd@gmail.com)