ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ В XXI ВЕКЕ

УДК 72.036:69.033.15“20”

К.А. Пшеничникова[1]
[1]*Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия*

Аннотация
Статья посвящена особенностям формирования пневматической архитектуры в XXI веке. В статье определены ключевые преимущества применения пневматических структур с учетом предшествующего опыта их применения, а также факторов повлиявших на их совершенствование и расширение: цифровое параметрическое и информационное BIM-моделирование; киберфизические робототехнические установки; эластичные и многослойные материалы; технология 3D-печати; возможность управления процессом проектирования самим пользователем. Выявление способов создания пневматических структур в XXI веке позволит конструировать динамичные, энергоэффективные и адаптивные самоорганизующиеся здания и сооружения. Исследование позволило определить принципы формирования пневматических конструкций в современной архитектуре. Полученные результаты могут быть полезны архитекторам, дизайнерам и инженерам.[1]

Ключевые слова: пневматические конструкции, BIM-технологии, робототехника, цифровое 3D-моделирование, адаптивность, кинетическая архитектура, биоморфный дизайн

FEATURES OF THE FORMATION OF PNEUMATIC ARCHITECTURE IN THE XXI CENTURY

K. Pshenichnikova[1]
[1]*Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia*

Abstract
The article is devoted to the peculiarities of the formation of pneumatic architecture in the XXI century. The article defines the key advantages of the use of pneumatic structures, taking into account the previous experience of their application, as well as the factors that influenced their improvement and expansion: digital parametric and information BIM-modeling; cyberphysical robotic systems; elastic and multilayer materials; 3D printing technology; the ability to control the design process by the user. Identification of ways to create pneumatic structures in the XXI century will allow to design dynamic, energy-efficient and adaptive self-organizing buildings and structures. The study allowed to determine the principles of formation of pneumatic structures in modern architecture. The results can be useful for architects, designers and engineers.[2]

Keywords: pneumatic structures, BIM technologies, digital 3D modeling, adaptability, robotics, kinetic architecture, biomorphic design

[1] **Для цитирования:** Пшеничникова К.А. Особенности формирования пневматической архитектуры в XXI веке // Architecture and Modern Information Technologies. – 2019. – №2(47). – С. 150-170 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://marhi.ru/AMIT/2019/2kvart19/PDF/10_pshenichnikova.pdf

[2] **For citation:** Pshenichnikova K. Features of the Formation of Pneumatic Architecture in the XXI Century. Architecture and Modern Information Technologies, 2019, no. 2(47), pp. 150-170. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2019/2kvart19/PDF/10_pshenichnikova.pdf

Введение

Первые реализованные образцы надувной архитектуры возникли в 1940-е годы XX века, а именно в 1946 году, когда американский инженер У. Бэрд создал воздухоопорное куполообразное укрытие для ВВС США [6]. Впоследствии, к XXI веку пневматические конструкции прошли сложный путь развития: от сооружений военного назначения до крупномасштабных объектов различной функциональной типологии и формы. Помимо этого, история пневматики связана с бионикой: от анализа надувных оболочек живых организмов к их искусственным аналогам. Будучи универсальными и простыми в интеграции, надувные структуры имеют высокий потенциал устойчивости благодаря использованию современных технологических ресурсов и многофункциональному дизайну. Внедрение новых материалов и робототехнических технологий в сочетании с растущим интересом к биомимикрии, кибернетике, кинетической и адаптивной архитектуре, а также к информационному цифровому моделированию[3], привели к развитию надувных структур. Такой подход к изучению пневматической архитектуры привлек внимание многих современных исследователей: П. Пуане, Э. Бахарлоу, Т. Швинна, А. Менгеса, К. Кролла, П.Х. Хон Ченга, Д.Ю. Шан Чана, А.Н. Фун Чана, Д. Лау, Ф. Мелендеса, М. Ганнона, З. Якобсона-Уивера и В. Тулкериду [12,14,10]. Основываясь на этом целесообразно провести сравнительный анализ способов формирования пневматической архитектуры XX и XXI века с акцентом на выявление эволюции ее особенностей и приемов.

Архитектура и способы формообразования пневматических сооружений в XX веке

Родоначальником исследований по механизмам формообразования пневматических конструкций считается немецкий архитектор Ф. Отто. Его эксперименты с мыльными пузырями демонстрировали «идеальную» пневматическую форму (рис. 1). Наиболее эффективная из них была достигнута с минимальной площадью поверхности: тонкие мыльные пленки, натянутые на стержни и кольца, иллюстрировали идеальное распределение напряжения в структуре [5]. Исследуя возможности формообразования пневматических оболочек, Ф. Отто также опирался на природные аналоги ввиду того, что их материальная составляющая и структура организованы симбиотически и нет различий между структурой, формой и материалом. В связи с этим архитектор сотрудничал с математиками, химиками и биологами, изучая процессы самообразования биологических элементов и создал множество типов пневматических форм, что обеспечило техническую основу для их дальнейшего развития.

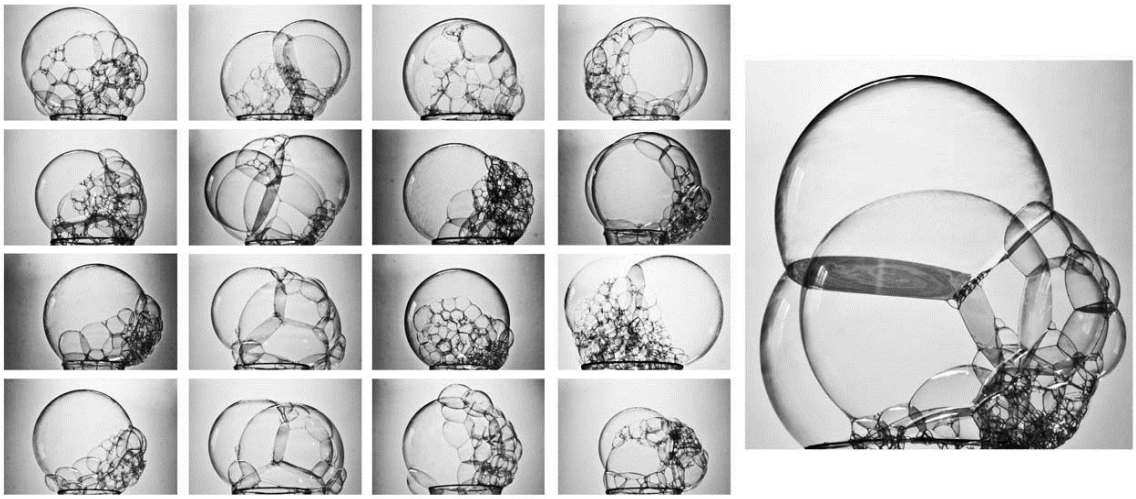


Рис. 1. Формообразующие эксперименты Ф. Отто с мыльными пузырями

[3] BIM-технология (Building Information Modeling, информационное моделирование в строительстве).

Наряду с Ф. Отто принципы бионики в архитектуре применял американский архитектор Р.Б. Фуллер при изучении поверхностного баланса в геодезических куполах. И Ф. Отто, и Р.Б. Фуллер основывались на исследованиях шотландского биолога и математика Д'Арси Томпсона, который в 1917 году выпустил труд «О росте и форме»[4]. Биолог по образованию, он рассматривал природу растущих клеток и полагал, что форма возникает из физических и математических законов, а не ввиду иррациональных хаотичных систем [13]. Основываясь на этой гипотезе Ф. Отто впервые применил теорию минимальной поверхности и принципы биомимикрии к пневматическим конструкциям.

На формирование пневматических конструкций также оказал влияние структурализм, который проявился в архитектуре 1950–1960-х годов и был основан на эстетике конструктивной формы не только со стороны ее технических аспектов, но и принципов формообразования [1]. Конечно, структурализм рассматривал и более традиционные материалы, однако основной признак структурализма — пластическое выявление функциональной структуры здания и поиск тектоники. Это направление оказало влияние на биомимикрические приемы формообразования пневматической архитектуры.

Структуральный подход описывал французский философ, социолог и этнолог К. Леви-Стросс в работе «Структурализм и экология», а также французский философ Ж. Делез. В статье «По каким критериям узнают структурализм?» Ж. Делез выделил следующие критерии структурализма: 1) символическое; 2) локальное или позиционное; 3) дифференциальное и единичное; 4) различающее, различение; 5) серийное; 6) пустая клетка; 7) от субъекта к практике [2]. Ж. Делез ориентировался на процессы, с помощью которых изучаются явления, соотносящиеся с порядками различий напряжения, давления, температуры и интенсивности. Следовательно, рассматривая симбиотические отношения между материалами, формой и структурой, можно проследить различия между этими уровнями, приводящие к возникновению формы. Подобный процесс математического морфогенеза соотносится с исследованиями биолога Д. Томпсона. Таким образом философские концепции структурализма оказали влияние на поиск пневматических форм.

В отношении приемов и средств формообразования пневматических воздухоопорных[5] конструкций в XX веке, детальный анализ и определение провел архитектор Ю.Н. Орса в 1983 году [4]. Они также изложены в книге года В.В. Ермолова «Пневматические строительные конструкции» [3]. Ю.Н. Орса выделяет необходимые элементы и условия формирования пневматической архитектуры: герметизация; замкнутый объем; оболочка, воздух и воздухонагнетающая система (вентилятор и компрессор); плавные линии. Классифицируя приемы и средства формообразования, автор разделил пневматические воздухоопорные конструкции на три группы: оболочки без элементов усиления; оболочки с элементами усиления; оболочки на вынесенном контуре опирания.

Для оболочек без элементов усиления определены следующие приемы формообразования: изменение раскроя поверхности и изменение рисунка плана (рис. 2а). Оболочкам с элементами усиления свойственны канаты, оттяжки, диафрагмы и приемы: изменение частоты расположения, изменение схемы расположения, изменение длины (величины) (рис. 2б). Пневматические оболочки на вынесенном контуре опирания формируются следующими средствами: стойки, рамы, стенки, насыпи, рельеф местности; а также пространственные конструкции здания и сооружения. Основными приемами являются пространственное развитие опорного контура в третье измерение с построением «независимого» от формы оболочки опорного контура и пересечение с другой плоскостью (рис. 2в). Помимо этого, Ю.Н. Орса разработал схему расположения канатов на поверхности оболочек (рис. 2г) [3].

[4] Д'Арси Томпсон. О росте и форме [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://archsovet.msk.ru/recomend/books/darsi-tompson-otnositel-no-rosta-i-formy

[5] Пневматические конструкции разделяют на воздухоопорные, включая пневмолинзы и пневмоподушки, и воздухонесомые.

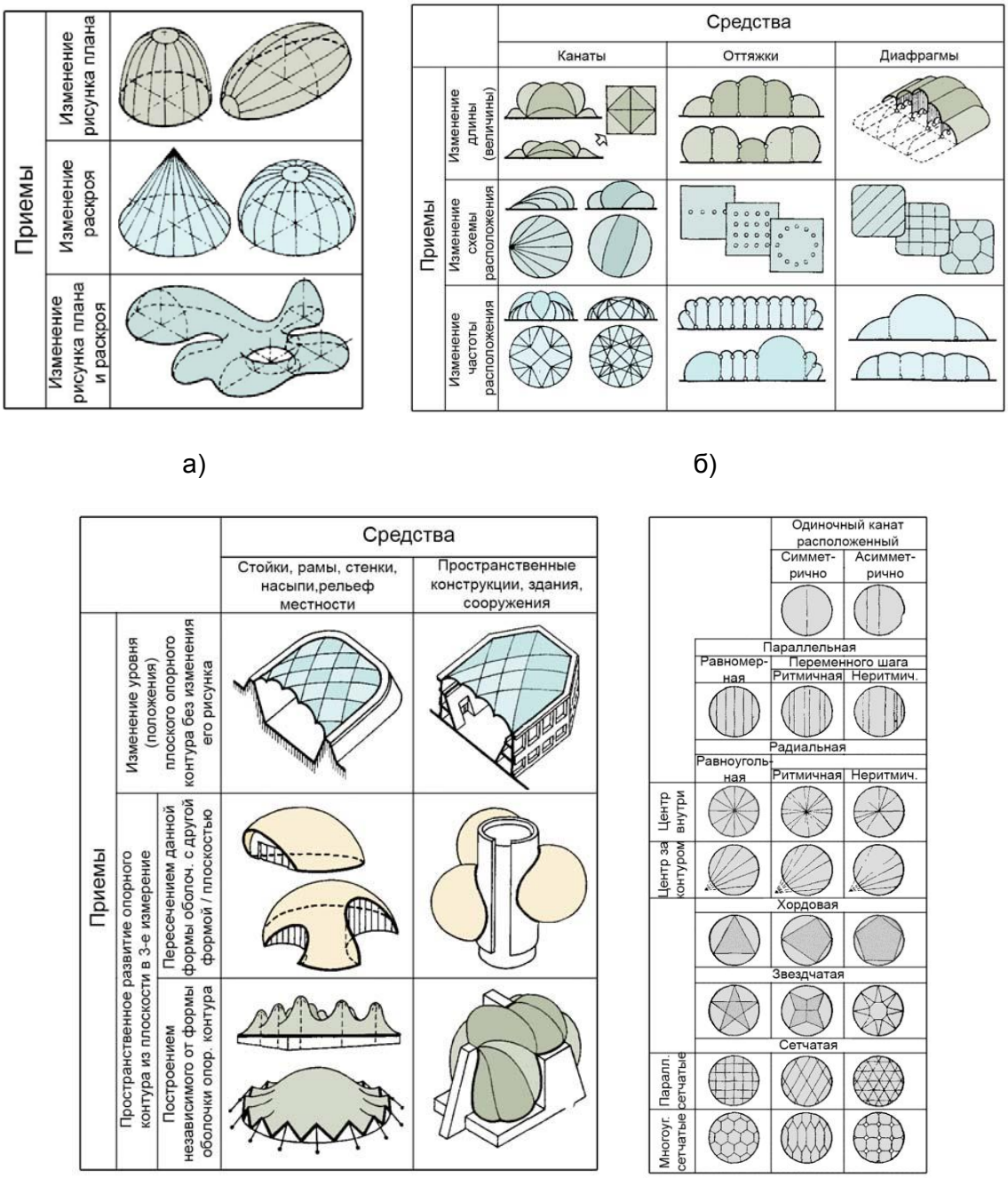


Рис. 2. Пневматические воздухоопорные конструкции: а) приемы формообразования пневматических воздухоопорных оболочек без элементов усиления; б) приемы и средства формообразования оболочек с элементами усиления; в) приемы и средства формообразования оболочек на вынесенном контуре опирания; г) схема расположения канатов по поверхности оболочек (по [3] в авторской интерпретации)

По части материалов, которые применялись в XX веке, следует отметить, что массовое производство пластика началось в 1960-е годы в США. Со временем натуральные тканевые волокна были заменены полимерными. В 1960–1970 годы применяли преимущественно полиэфирные материалы, покрытые поливинилхлоридом (PVH) или нейлоном [3], но наиболее перспективным материалом стал ETFE (этилен

тетрафторэтилен). Американский патент на это вещество был получен фирмой DuPont[6]. Полимер ETFE – результат исследовательской программы DuPont по разработке материала для промышленного оборудования, устойчивого к трению и истиранию, а также невосприимчивого к ультрафиолетовой радиации и эффективный при экстремально высоких и низких температурах. В 1970 году DuPont запустили производство проводов и кабелей ETFE, которые нашли широкое применение в нефтяной, автомобильной, аэрокосмической и ядерной промышленности, а, впоследствии, и в пневматике [11]. Архитектурное использование пленок ETFE впервые было реализовано компанией «Vector Foiltec» созданной в 1981 году в Германии. Фирма разработала технологию облицовки пневматическими подушками ETFE[7]. И если в XX веке синтетические полимерные материалы не отличались долговечностью, многослойностью и высокими теплоизоляционными свойствами, то к XXI веку специалисты представили качественные решения в этой области, примеры которых рассмотрены далее.

Указанные выше концепции, приемы и средства формообразования пневматических конструкций XX века актуальны и сегодня. Однако классификации надувных структур и способы их формирования в XXI веке значительно расширились благодаря достижениям в области материалов, технологий и программ информационного и параметрического моделирования. Учитывая это можно выявить и систематизировать основные особенности формирования пневматических конструкций в современной архитектуре.

Формирование пневматической архитектуры в XXI веке

Опираясь на концепции XX века в части формирования архитектурных объектов на основе пневматических конструкций, исследователи и инженеры произвели прорыв в области материалов и технологий изготовления надувных конструкций. Современные методы автоматизированного проектирования пневматических структур базируются на цифровом параметрическом и информационном BIM-моделировании, а также применении киберфизических робототехнических установок и 3D-печати, что позволяет создавать более сложные формы пневматических сооружений и упрощать процесс их возведения.

Сегодня усовершенствованные приложения, помимо 3D-моделирования, могут составлять пакеты документов по тематикам, основываясь на конструкторских и технологических сведениях об объекте. Такие программы и плагины, как Revit Autodesk, Maya Autodesk, CAD и CAM системы, Grasshopper, Karamba-3D, а также Rhinoceros 3D – стали неотъемлемой частью развития пневматики. Изучение способов проектирования и возведения надувных сооружений в XXI веке позволило выявить современные приемы их формирования при помощи новых материалов, технологий и программ.

Адаптивность пневматического фасада

Адаптивная динамическая архитектура представляется актуальной для многих исследователей и архитекторов. В частности, Н.А. Сапрыкина в книге «Основы динамического формообразования в архитектуре» [8] выделяет статическую (непредусмотренную) и динамическую (предусмотрена на всех стадиях существования архитектурного объекта) адаптации архитектурных объектов. Динамическая адаптация, в свою очередь, включает ациклические (необратимые) и циклические (обратимые) процессы, последний подразумевает трансформацию и мобильность. Пневматические структуры благодаря вышеуказанным технологическим достижениям могут иметь

[6] Американская химическая компания. Является одной из крупнейших в мире, основана в 1802 году в США, Уилмингтон, Делавэр.

[7] History of Vector Foiltec [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.vector-foiltec.com/about-us/ele-tropenparadiess/

различную динамическую адаптацию. Пример – динамическая адаптация фасада, которая возможна при применении пневмоподушек «air cushion» из материала ETFE.

Можно рассмотреть прием формирования пневматической архитектуры на реализованном примере многофункционального офисного здания Media-ICT, 2010 года, архитектора Э. Руис-Гели (бюро «Cloud 9»), Барселона, Испания (рис. 3). Энергоэффективное офисное здание с пневматическим фасадом выиграло конкурс «World Building of the Year» в 2011 году на Всемирном фестивале архитектуры WAF, представляя симбиоз современных технологий и экологичности. В воздухоопорные подушки треугольной формы встроены датчики освещённости, которые расширяют или сжимают камеры в зависимости от интенсивности инсоляции. За счет этого регулируется микроклимат и освещение в помещениях. В этом здании применено четыре вида подушек: 1) трехслойные подушки с пневматическим затенением от солнца, позволяющие регулировать коэффициент пропускания солнечного света до 65% или 45%; 2) двухслойные подушки с наружным слоем с нанесением серебристых элементов и внутренним слоем из зеленой тонированной фольги ETFE (светопропускание 55%); 3) внешний слой прозрачный, а внутренний слой – зеленая пленка ETFE (светопропускание 65%); 4) двухслойные подушки с внешним прозрачным слоем и внутренним слоем с серебристым покрытием (светопропускание 50%) [13].

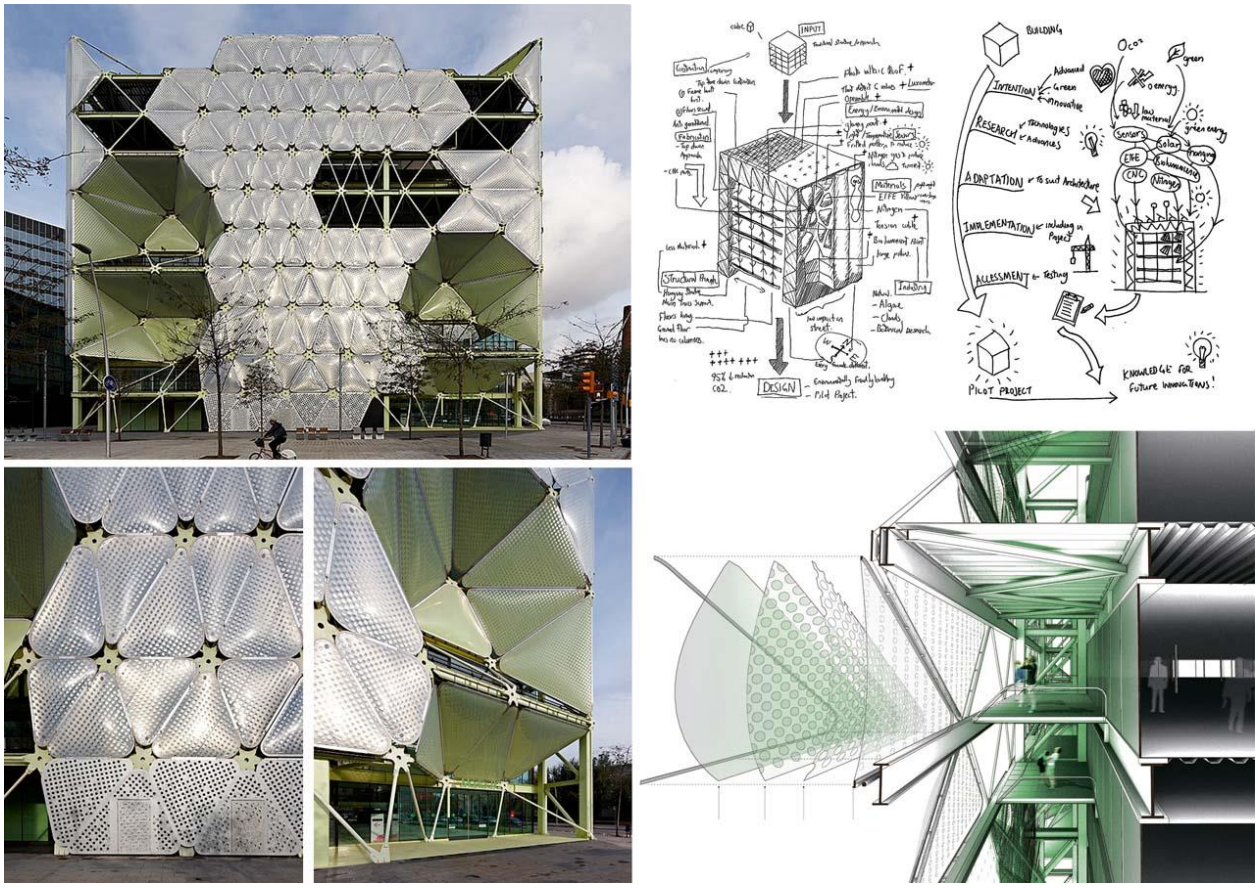


Рис. 3. Энергоэффективное многофункциональное офисное здание Media-ICT, архитектор Э. Руис-Гели (бюро «Cloud 9»), Барселона, Испания, 2010 г.

Адаптивный фасад может функционировать по нескольким сценариям. 1 – система без тумана: воздушный компрессор работает бесперебойно и панели заполнены только воздухом; 2 – введение тумана при помощи азота, который поступает из цилиндров в машину для производства тумана (MDG); 3 - стабильный туман, когда воздушный компрессор выключен; 4 - противотуманная защита – воздушный компрессор непрерывно работает для подачи воздуха с азотом. Каждая подушка управляется отдельным

датчиком, поэтому они могут работать независимо друг от друга и оснащены системой управления освещением. Всем объектом управляет не пользователь, а само здание с 500 датчиками, которое адаптируется к различным условиям. Так, на первом этаже датчики движения регулируют потребление энергии в зависимости от количества людей, движущихся по вестибюлю, а датчики фасада экономят энергию, предотвращая ее перепотребление. Каждый датчик имеет люксметр, который измеряет освещение; пиранометр, измеряющий плотность потока солнечного излучения и инклинометр, регулирующий наклон слоев подушки относительно горизонтальной плоскости. Таким образом адаптивный пневматический фасад является коммуникативной структурой, отвечающей современным экологическим требованиям.

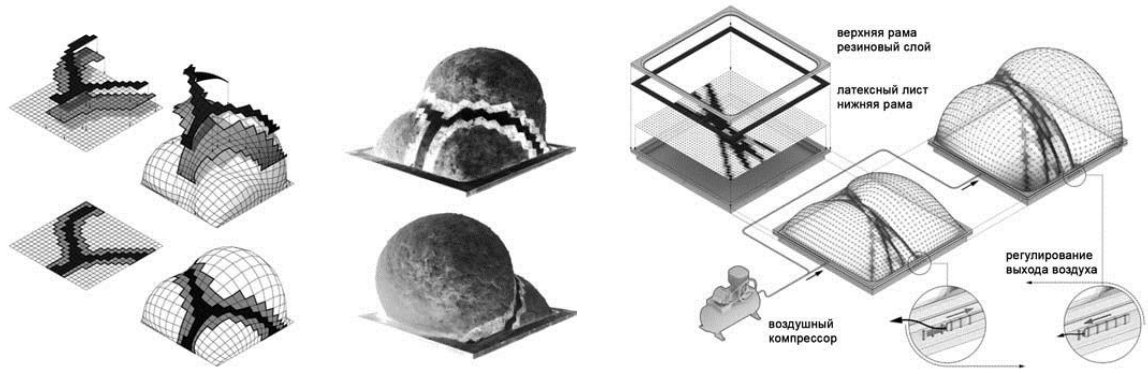
Управление формой

Способ формирования пневматической архитектуры при помощи управления формой основывается на цифровом информационном моделировании и использовании киберфизической робототехники. Его основная цель – уменьшение сложности проектирования и изготовления надувных конструкций различной формы. Отмеченные ранее приемы и средства формообразования пневматических структур XX-го века предполагали трудоемкий процесс создания идеальных диафрагм и швов ввиду отсутствия цифровых установок. Сегодня можно проводить эксперименты по управлению заданной пользователем формой на всех этапах проектирования благодаря применению пользовательского интерфейса вышеупомянутого плагина Grasshopper для Rhinoceros 3D, который объединяет моделирование и генерацию роботизированных траекторий, где отсканированные данные поступают от датчика Kinect, а структурный анализ выполняется настройкой Grasshopper Karamba 3D.

Примером управления формой служит интересный проект группы архитекторов П. Пуане, Э. Бахарлоу, Т. Швинна и А. Менгеса[8] из Института вычислительного проектирования (ICD) при Штутгартском Университете, Германия. Исследователи направили усилия на преобразование сложного процесса проектирования в интегрированный, который одновременно разворачивается в физической и цифровой среде. Гибкий синтетический материал приводится в действие накачиванием и модулируется с помощью цифровых процессов. Это необходимо ввиду того, что форма надувной конструкции должна быть разделена на развертывающиеся полоски, чтобы избежать появления складок, и каждая деталь должна быть обработана уникально [12]. Ранее этот процесс был скорее эмпирический, поэтому целью архитекторов являлось создание самонесущей конструкции, которая модулируется интерактивными внешними ограничениями. В исследовании приводится сравнение между цифровым моделированием и физическими экспериментами с формой (рис. 4а). В эксперименте применяется установка с воздушным компрессором с регулируемой подачей воздуха и 6-осевой промышленный робот, при помощи которого углеродные волокна автоматически размещаются сверху растяжимой оболочки (рис. 4б-в). В результате архитектором удалось создать полноценный прототип пневматического сооружения (рис. 4д). Развивая возможность управления формой, архитекторы предполагают дальнейшее расширение киберфизической установки с использованием дронов в процессе генерации формы (рис. 4г).

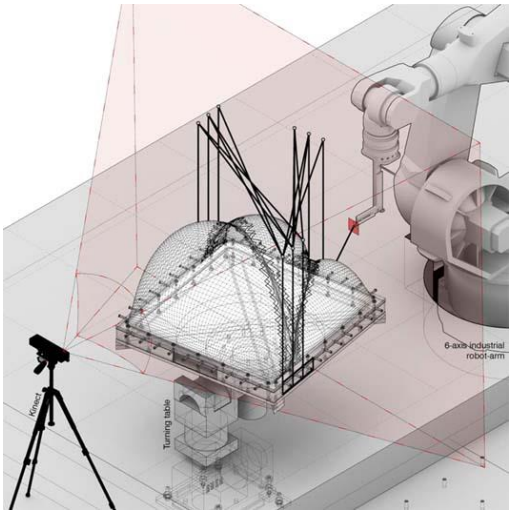
Роль пользователя в этом процессе состоит в направлении действий робота при изготовлении конструкции, чтобы достичь замыслов проекта, продиктованных архитектором. Решение, принятое машиной на основе внешнего сигнала, поступающего от отсканированных данных, может противоречить ожиданиям пользователя. Следовательно, разработчик может вмешиваться в процесс создания формы и перезаписать следующий сгенерированный путь волокна. Такой способ формирования пневматических структур путем управления формой на стадии проектирования и возведения представляет большой интерес для современных архитекторов и инженеров.

[8] Achim Menges [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.achimmenges.net/?p=4866

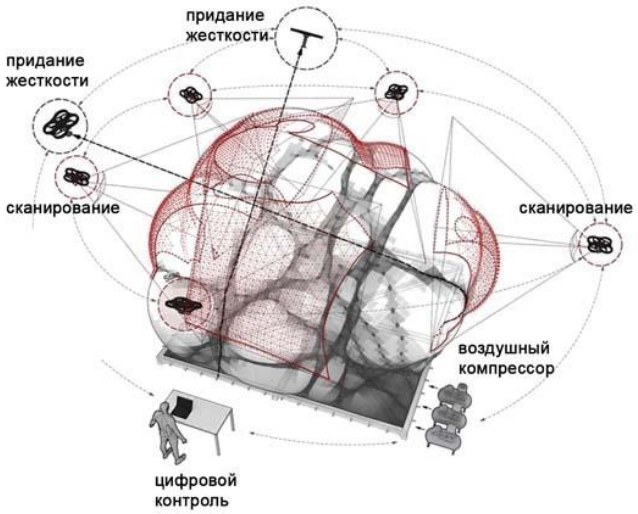


а)

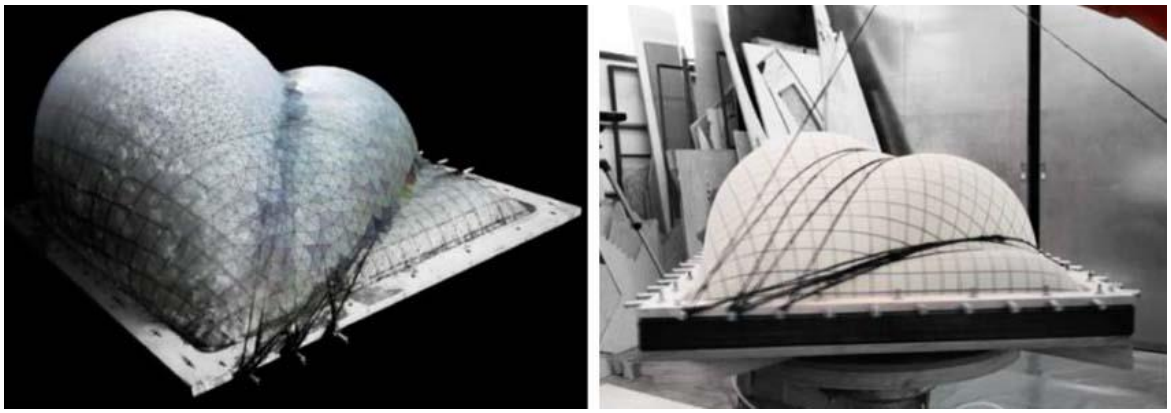
б)



в)



г)



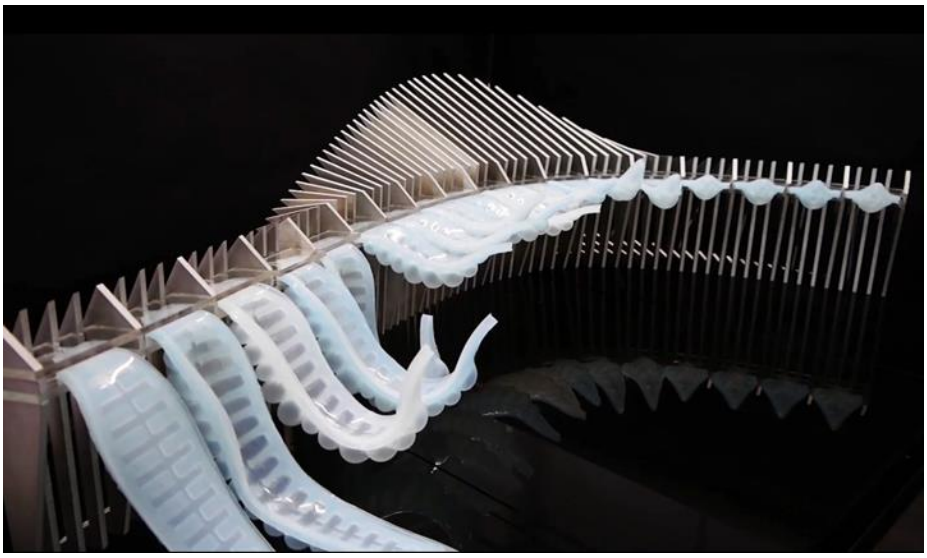
д)

Рис. 4. Проектная работа архитекторов П. Пуане, Э. Бахарлоу, Т. Швинна и А. Менгеса: а) Сравнение цифрового моделирования и физических экспериментов с формой; б) физическая установка для небольших экспериментов с воздушным компрессором; в) 6-осевой промышленный робот; г) расширение киберфизической установки, с использованием дронов; д) прототип адаптивного пневматического сооружения (по [12] в авторской интерпретации)

Кинетическое проектирование и эксплуатация

В последние десятилетия современные требования к проектированию и растущая потребность в экономической устойчивости повысили интерес к архитектуре с изменяемой конфигурацией. Существует много примеров интерактивной и адаптивной архитектуры, в которых конфигурация может подстраиваться к требованиям пользователей или изменениям погоды и климата. Чтобы следовать этой концепции необходимо применять гибкие, легкие и перерабатываемые материалы, какими являются новейшие пневматические оболочки «soft-pneumatic». Современный принцип кинетической пневматики основывается на области мягкой робототехники и формируется как новый рубеж кинетического проектирования. Основываясь на традиционном проектном мышлении о динамичности, предлагаются новые экспериментальные подходы к построению мягкой адаптивной архитектуры. Сочетание мягких и жестких архитектурных элементов создает новую платформу для кинетической адаптивной архитектуры, которая позволяет пространству взаимодействовать с потребностями людей и адаптироваться к условиям окружающей среды.

Примером пневматических кинетических структур может служить целый ряд проектов. Например, проект «Soft Pneumatic Pavilion», выполненный Ф. Манджон и Б. Чжан в 2014 году демонстрирует уникальный «живой» павильон[9]. Проект основан на применении силиконовых пневматических мышц «air muscles» из эластомеров[10]. В работе применена электроэнцефалография (ЭЭГ), а введение мягкой робототехники заменяет механические принципы в интерактивной архитектуре через биологическую парадигму. ЭЭГ позволяет распознавать функционирование человеческого мозга так, что структура начинает двигаться, реагируя на мысли человека (видео 1). Этот эксперимент имеет уникальный потенциал кинетической пневматики в современной адаптивной «умной» архитектуре и в архитектуре будущего.



Видео 1. «Soft Pneumatic Pavilion», Ф. Манджон и Б. Чжан. 2014 год

Другой пример – здание художественного и выставочного центра «The Shed» архитектурного бюро «Diller Scofido + Renfro», 2019 года, Нью-Йорк, США[11] (рис. 5). Уникальность сооружения в том, что стационарная конструкция объекта имеет обычную стальную раму с прозрачными пролетами длиной 30,5 м и заключена в стеклянную стену.

[9] Furl: Soft Pneumatic Pavilion [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.interactivearchitecture.org/lab-projects/furl-soft-pneumatic-pavilion

[10] Полимеры, которые обладают высокоэластичными свойствами и высокой вязкостью.

[11] The Shed, New York, NY [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://dsrny.com/project/the-shed

Подвижная пневматическая оболочка, тем временем, содержит открытую стальную диагональную раму, обтянутую полупрозрачными подушками, изготовленными из пластика ETFE.

В структуру интегрировано всё оборудование – электричество, освещение, театральная установка и воздуховоды, что создает «открытую инфраструктуру». Оболочка, чья основная сталь весит 2400 тонн, может перемещаться по системе козлового крана. Реечный привод перемещает корпус вперед и назад на тележках высотой 1,8 м или колесах, которые движутся гусеницами, что делает объект перформативным (видео 2).

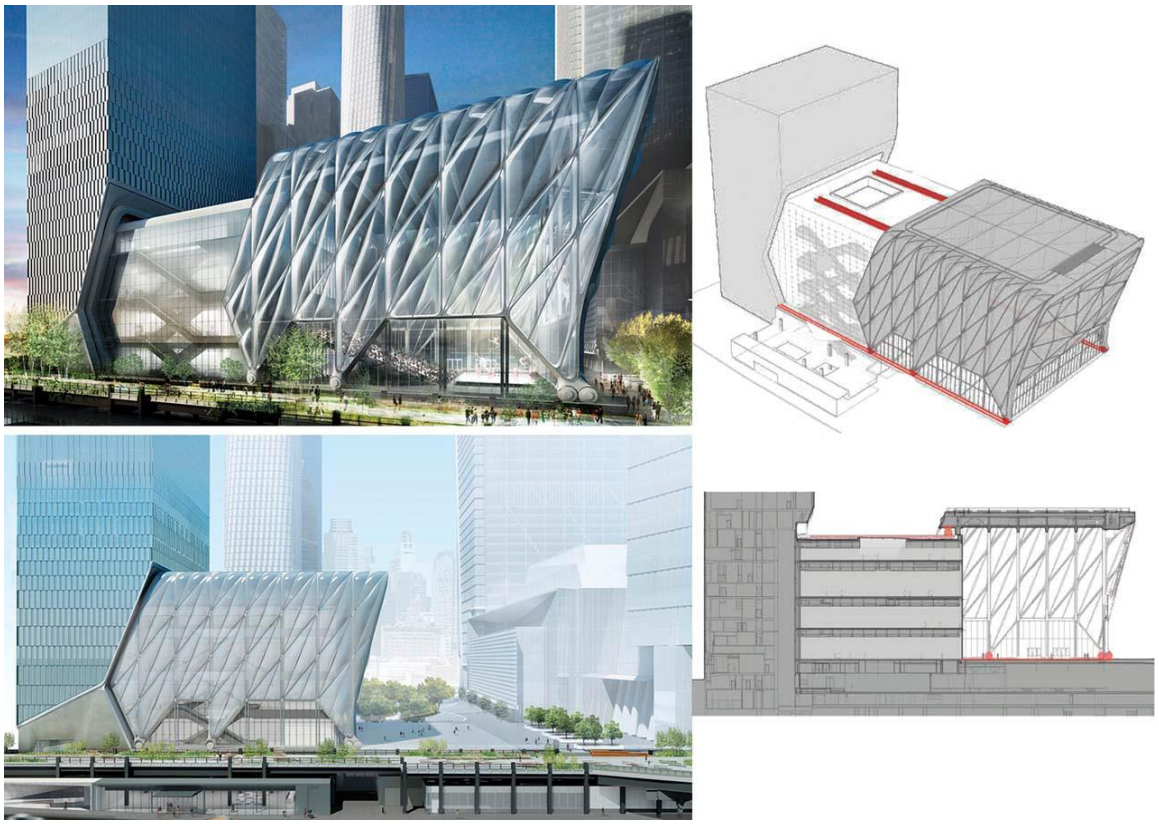
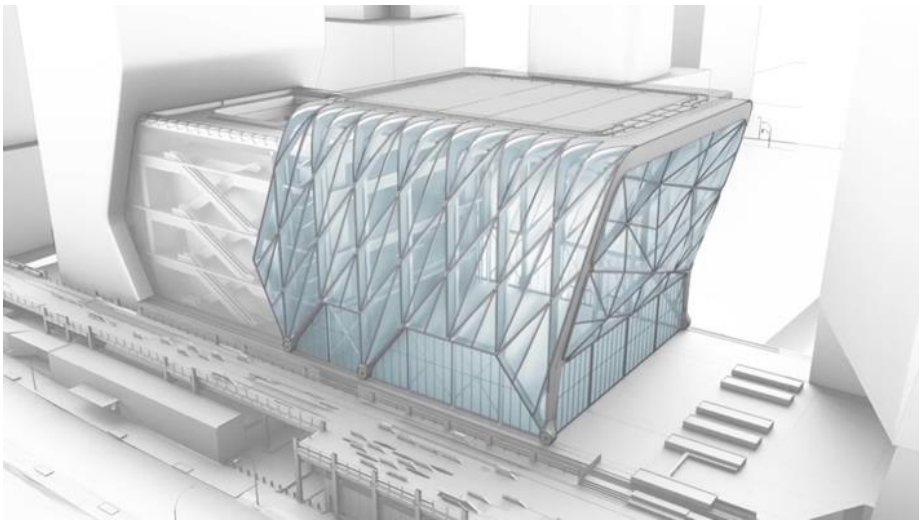


Рис. 5. Кинетический выставочный центр «The Shed» архитектурное бюро Diller Scofido + Renfro, Нью-Йорк, США, 2019 год

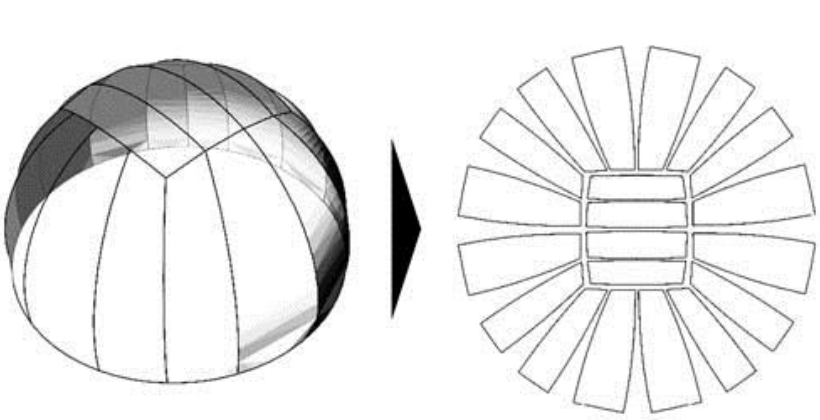


Видео 2. Кинетический выставочный центр «The Shed» архитектурное бюро Diller Scofido + Renfro, Нью-Йорк, США, 2019 год

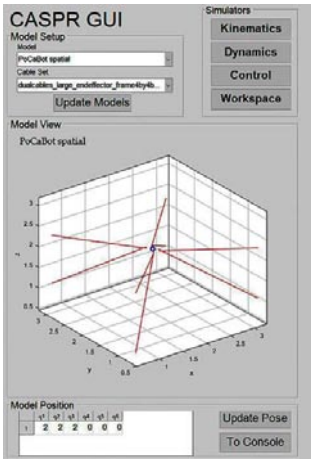
Быстровозводимость пневматических структур

Принцип быстровозводимости является одним из важнейших для пневматических конструкций, это – одно из их основных преимуществ. Он основан на альтернативном методе интеграции робототехники на месте возведения. Сегодня вместо предварительной сборки за пределами площадки с помощью приложений для промышленных роботов предполагается использование на месте подвесных легких роботов с кабельным управлением. Такое экспериментальное исследование способа быстровозводимости пневматических сооружений провела группа специалистов в составе К. Кролла, П.Х. Хон Ченга, Д.Ю. Шан Чана и др. (рис. 6а-д) [14].

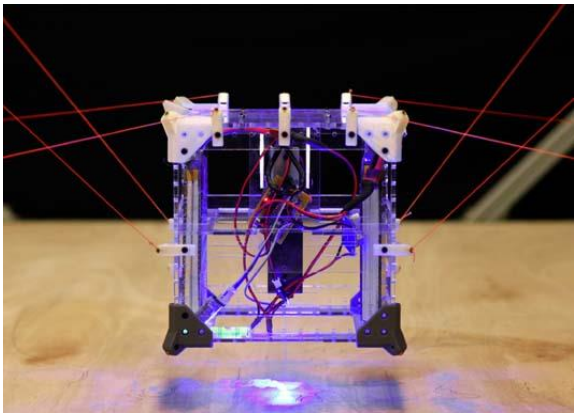
Разработанное робототехническое доказательство концепции быстровозводимости формирует основу для дальнейшего изучения ее возможностей, которые объединяют область архитектурного проектирования и реализацию с механическим автоматизированным процессом. Переносная лазерная резка предлагает точную и доступную технику производства при помощи CDPR – нового типа параллельных механизмов, в которых вместо традиционных жестких связей используются кабели. Преимущества роботов с кабельным приводом включают в себя качественное соотношение полезной нагрузки и веса робота, максимальные рабочие пространства и простоту перенастройки системы. Обычно при резке применяются традиционные параллельные роботы с лебедочным управлением, который невозможно транспортировать. Исходя из этого, исследователи применили в эксперименте портативную кабельную роботизированную систему «PoCaBot» собственной разработки, которая обладает достаточной грузоподъемностью, скоростью и силой для предлагаемого применения.



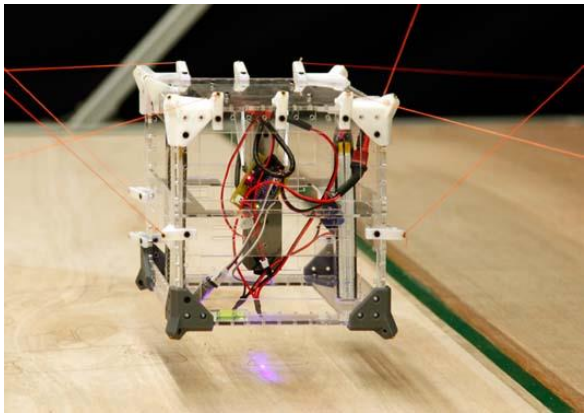
а)



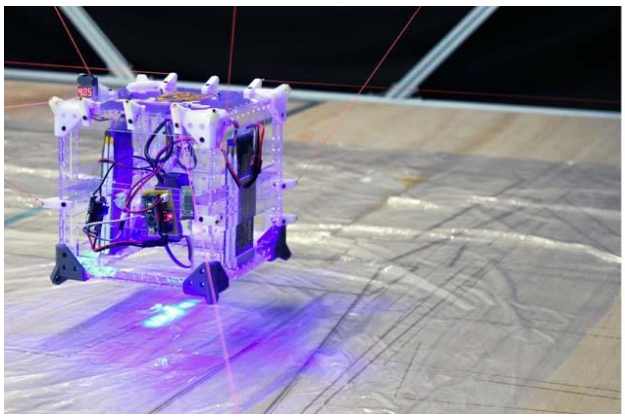
б)



в)



г)



д)

Рис. 6. Робототехническое проектирование и возведение: а) полусферический дизайн и разработанные плоские полосы для резки; б) программный интерфейс CASPR; в) кабельный лазерный концевой эффектор, режущий надувные компоненты; г) конечный эффектор с установленным лазерным блоком; д) лазерная резка в действии и конечный прототип (по [14])

Описанный исследовательский проект демонстрирует потенциал установки роботизированного производства в рабочей среде на месте и расширение ряда возможных типов сооружений, которые могут быть возведены на месте. Комбинация пользовательских и роботизированных возможностей на месте позволяет переосмыслить широкий спектр методов и систем строительства, что приводит к увеличению разнообразия и возможностей пневматической архитектуры.

Трансформативность пневматических объектов

Трансформативность – один из наиболее актуальных приемов в современной архитектуре. В контексте многокультурного общества роль архитекторов состоит в направлении усилий по созданию устойчивой среды и устойчивого развития. С этой точки зрения, эпоха глобализации позволила переосмыслить определенные концепции с точки зрения связи между «изменениями» и «трансформацией». Изменяемая пневматическая архитектура сегодня представлена *кинетической, световой* и *авторской технологической трансформацией*.

Кинетическая трансформативность состоит в возможности создания адаптивных компактных зданий в городских условиях. За счет трансформации объемов занимаемая площадь сокращается, а функциональность здания увеличивается. Примерами кинетической трансформации пневматических структур могут служить вышеописанные проекты «Soft Pneumatic Pavilion» и «The Shed» (видео 1, рис. 5, видео 2).

Световая трансформация состоит в применении современных систем интерактивного освещения пневматических подушек, что позволяет зданию, изменятся в зависимости от условий и заданных параметров освещения. Наглядно иллюстрирует этот метод стадион «Allianz Arena» архитекторов Херцог и де Мерон[12], построенный в 2005 году в Мюнхене (рис. 7а). На стадионе «ФК Бавария Мюнхен» установлен светодиодный фасад с цифровым управлением Philips ActiveSite[13], способный воспроизводить 16 миллионов цветов и в то же время экономить до 60% энергии. Фасад выполнен из пневматических

[12] Herzog & de Meuron Architekten, Жак Херцог (Jacques Herzog) и Пьер де Мерон (Pierre de Meuron).
[13] Kicking off the season with play of light [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.lighting.philips.com/main/cases/cases/arena-and-stadiums/allianz-arena

подушек ETFE, в которых люминесцентные лампы заменены цифровой системой, включающей светодиодное освещение: 300 тысяч светильников на площади 26 тыс. кв. м. Используемые светодиоды экономят электроэнергию и создают уникальную эстетическую составляющую. Также интересен объект «Khan Shatyr Entertainment Center» архитекторов «Foster and Partners», который был построен в 2006 году в Астане, Казахстан, где LED-подсветка также изменяется под управлением пользователя (рис. 7б).

Авторская трансформативность пневматического сооружения состоит в технологической, интерактивной и других видов трансформации согласно сценарию автора. Объемно-пространственной трансформации характерна нелинейность архитектурных форм (реконструкция и модернизация), включая трансформацию ограждающих конструкций и объемов бионических и параметрических структур [7]. Примером объемно-пространственной технологической трансформации пневматического объекта служит спортивная арена «Singapore Sports Hub» бюро «Arup», 2014 года, Сингапур (рис. 7в). Раздвижная крыша площадью 20 тыс. кв. м. опирается на фиксированную купольную конструкцию с пролетом в 310 метров и покрыта многослойными подушками ETFE. Она включает в себя матрицу светодиодных светильников, что делает арену одним из крупнейших светодиодных экранов в мире[14].

а)

[14] In Progress: Singapore Sports Hub / Arup Pavilion [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.archdaily.com/280547/in-progress-singapore-sports-hub-arup?ad_medium=gallery

б)

в)

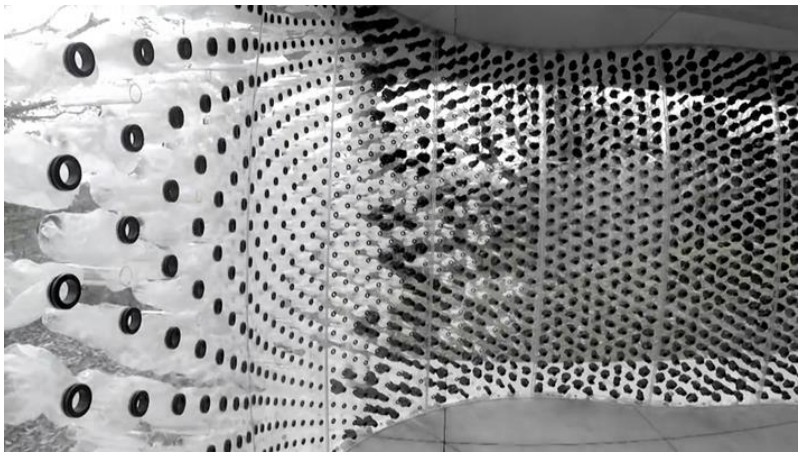
Рис. 7. Трансформатируемые пневматические объекты а) стадион «Allianz Arena», архитекторов Херцог и де Мерон, Мюнхен, Германия, 2005 г.; б) «Khan Shatyr Entertainment Center», архитекторы «Foster and Partners», Астана, Казахстан, 2006 г.; в) Спортивная арена «Singapore Sports Hub», бюро «Arup», Сингапур, 2014 г.

Биоморфность

Биоморфизм основан на принципах построения живого организма или его подобии. Архитектура биоморфного дизайна относится представлена визуально бионическими формами: не прямыми и радикальными, а природными и гармоничными [9]. Принцип биоморфии схож с вышеуказанными биомимикрическими способами формообразования пневматики в XX веке Ф. Отто и Р.Б. Фуллера, однако, если в биомимикрии происходит воссоздание органической формы, то биоморфии свойственна имитация как формы, так и динамики, движений природного объекта. Это стало возможным благодаря параметрическому BIM-моделированию, 3D-печати и гибким материалам-эластомерам. Чувствительные устройства позволяют оболочкам адаптироваться к конкретным условиям окружающей среды или взаимодействовать с человеком, что создает основу интерактивных и адаптивных структур. Цифровое моделирование и аналоговые технологии изготовления позволяют создавать эластичные компоненты. Элементы могут быть разработаны как полукруглые, так и полуцилиндрические, геометрия может повторять гибкие органические движения, а модели, используемые для 3D-печати деталей, покрывают разделительным средством и отливают из эластомеров [10].

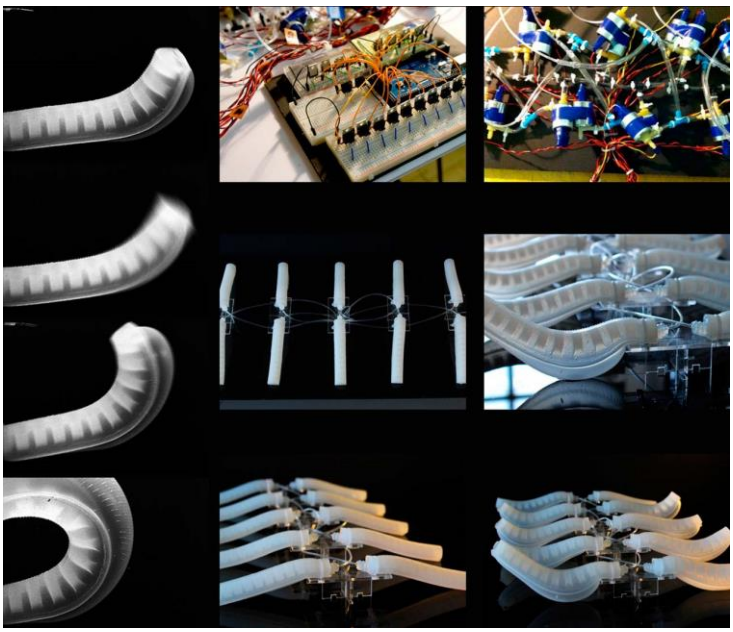
В качестве примера биоморфных пневматических структур можно привести работу Ф. Мелендеса, М. Ганнона, З. Якобсона-Уивера и В. Тулкериду из Университета Карнеги-Меллон [10]. Ими разработан проект биоморфных пневматических элементов на основе цифровых и аналоговых технологий изготовления и массового производства эластичных элементов, форма которых была создана 3D-моделированием и отлита из силикона при помощи распечатанных на 3D-принтере основ (рис. 8а).

Проект Т. Беккера «Breathing Skins» также основан на концепции биоморфии. Технология базируется на пневматических оболочках, которые регулируют проницаемость для управления необходимым потоком света и тепла между внутренней и внешней структурами. В дополнение к этому, изменяющийся вид фасадов обеспечивает взаимодействие между внешней природной средой и внутренним жилым пространством[15] (рис. 8б). Фасады функционируют за счет увеличения или уменьшения размера отверстий по всей поверхности и имитируют кожные поры, которые «дышат». Каждый квадратный метр фасада из дышащих надувных элементов имеет 140 воздушных каналов, которые Т. Беккер описывает как «пневматические мышцы». Это – принцип «отзывчивой архитектуры», где постоянно меняющиеся надувные компоненты обеспечивают определенное количество воздуха, света и видимости в соответствии с предпочтениями пользователя (видео 3).

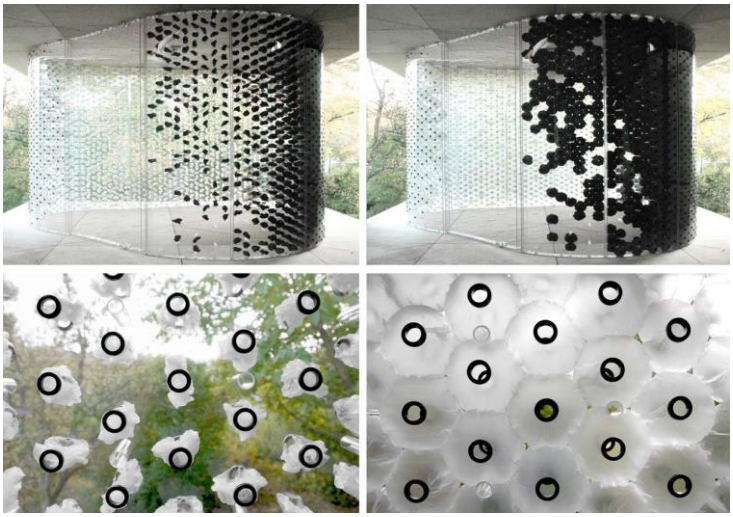


Видео 3. Проект Т. Беккера «Breathing Skins»

[15] Let Your Building "Breathe" With This Pneumatic Façade Technology [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL https://www.archdaily.com/789230/let-your-building-to-breathe-with-this-pneumatic-facade-technology



а)



б)

Рис. 8. Биоморфные пневматические элементы: а) процесс изготовления (по [10] в авторской интерпретации); б) Проект Т. Беккера «Breathing Skins»

Принцип биоморфии отличается от проектных задач пневматической архитектуры XX века. Это – новый способ объединения современных технологий пневматики как средства симбиоза окружающей среды с архитектурой, он позволит создать архитектурное пространство, которое приспосабливается к нюансам среды, расширяя представления об экологически ориентированной пневматической архитектуре.

Морфогенетичность

Морфогенетический дизайн или цифровой морфогенез – это способ архитектурного формообразования при помощи вычислительной техники. Он представляет собой группу методов на основе вычислительных процессов по адаптации формы, имитирующей природный морфогенез и самоорганизацию. Принцип морфогенетического дизайна состоит в потенциале конструирования формы путем создания перформативных моделей, которые эволюционируют среди популяций и последующих поколений,

сохраняя при этом структурные возможности и геометрические характеристики. Применение цифрового морфогенеза к пневматическим конструкциям определяется геометрией схем резки и гибкостью[16].

Пример этого метода – проект А. Менгеса (Профессор цифрового дизайна в Европейской аспирантуре / EGS) «MDE 02 AA Strawberry Bar», 2003 года. Пневматическая структура в эксперименте состояла из двух трапециевидных поверхностей, выровненных по опорной точке плоскости соединительными швами. Элементы представляют собой трехмерную форму, определяемую различной длиной поверхностей по отношению к определяющим точкам. В эксперименте использовался цифровой поиск в специальном программном обеспечении для мембранного инжиниринга с дополнительным моделированием физических испытаний для его оценки (рис. 9).

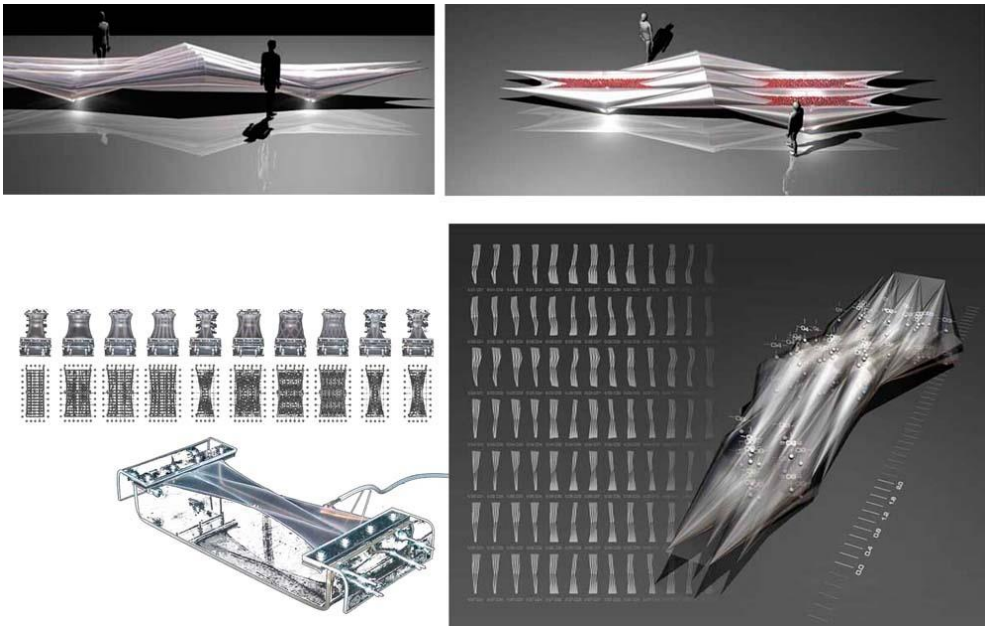


Рис. 9. Проект «MDE 02 AA Strawberry Bar», А. Менгес, 2003 г.

Заключение

Таким образом, в ходе проведенного исследования было выявлены следующие особенности формирования пневматической архитектуры в XXI веке:
– *адаптивность пневматического фасада* – здания становятся коммуникативными структурами, отвечающими современным требованиям энергоэффективности;
– *управление формой* (на основе цифрового информационного моделирования и киберфизической робототехники) – формирование пневматических структур происходит путем управления формой на всех стадиях проектирования;
– *кинетическое проектирование и эксплуатация* позволяют создавать изменяемые и реагирующие на внешние и внутренние воздействия надувные структуры;
– *быстровозводимость пневматических структур* (альтернативный метод интеграции робототехники на месте возведения) демонстрирует потенциал установки роботизированного производства в рабочей среде;
– *трансформативность пневматических объектов* (кинетическая, световая и авторская) дает архитекторам возможность проектировать адаптивную и интерактивную пневматическую архитектуру;

[16] MDE 02 AA Strawberry Bar [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.achimmenges.net/?p=4434

– *биоморфность* предполагает пространство, которое приспосабливается к нюансам среды;
– *морфогенетичность* открывает возможности к созданию самоорганизующихся структур.

Сопоставление способов создания пневматических объектов в XX и XXI веках показало значительный прогресс в части возможностей формообразования и возведения. Новейшие технологии цифрового BIM-моделирования, 3D-печати, киберфизической робототехники и эластичных материалов, а также адаптивность, динамичность и изменяемость современных пневматических структур позволяет отнести их к *дигитальной* (цифровой) архитектуре.

Дигитальная пневматическая архитектура основана на применении компьютерного моделирования, программирования и визуализации для создания объектов и обращается к сложным упорядоченным системам на основе естественной среды: биоморфия, морфогенез, биомимикрия. Из анализа опыта формирования архитектурных объектов на основе пневматических конструкций можно сделать вывод о значительном потенциале внедрения инновационных методов в архитектурное проектирование. Помимо этого, современная пневматика – это путь к устойчивой архитектуре, которая минимизирует воздействие человека на окружающую среду. С функциональной точки зрения в ее объекты и компоненты могут быть встроены еще более сложные варианты поведения и адаптации, в связи с чем архитекторы, дизайнеры и инженеры все активнее будут участвовать в процессах проектирования пневматики, внося свой вклад в идеи и концепции, помогая формировать новый подход к пневматической архитектуре.

Источники иллюстраций

Рис. 1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://wewanttolearn.wordpress.com/2012/11/14/plateaus-laws-soap-bubbles-grasshopper/port-1_d4-035/ (дата обращения: 21.02.19)
Рис. 3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.peterbennetts.com/project/view/project/media-tic-building-barcelona https://i.pinimg.com/originals/d0/23/f2/d023f20fdd6e70d955351f4444406d02.jpg https://nocloudinthesky.files.wordpress.com/2014/02/cliff-tan-media-ict2.jpg (дата обращения: 11.03.19)
Рис. 5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.architecturalrecord.com/articles/11925-continuing-education-kinetic-buildings (дата обращения: 12.03.19)
Рис. 7(а-в). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://e1.am.phnx.pics/phnx/archidea/35/87/83/358783/e8fb487de248f83c40494779a825a496-quality_80Xresize_crop_1Xallow_enlarge_0Xw_780Xh_478.jpg (дата обращения: 21.02.19) https://airroof.ru/images/content/Allianz-Arena/Allianz-Arena-4.jpg (дата обращения: 21.02.19) http://omyworld.ru/wp-content/uploads/2012/12/Allianz-Arena-9.jpg (дата обращения: 21.02.19)
http://s2.travelask.ru/system/images/files/000/089/679/original/arena.jpg?1486424373 (дата обращения: 21.02.19)
https://www.amusingplanet.com/2012/11/khan-shatyrthe-worlds-tallest-tent-in.html (дата обращения: 21.02.19)
https://www.archdaily.com/280547/in-progress-singapore-sports-hub-arup/cam_05_c-singapore-sports-hub_oaker-2 (дата обращения: 21.02.19)
Рис. 8(б). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.archdaily.com/789230/let-your-building-to-breathe-with-this-pneumatic-facade-technology/575ace9be58ece553b000001-let-your-building-to-breathe-with-this-pneumatic-facade-technology-image (дата обращения: 12.03.19)
Рис. 9. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.achimmenges.net/?p=4434

Источники видео

Видео 1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.interactivearchitecture.org/lab-projects/furl-soft-pneumatic-pavilion (дата обращения: 11.03.19).
Видео 2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dsrny.com/project/the-shed (дата обращения: 12.03.19).
Видео 3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.archdaily.com/789230/let-your-building-to-breathe-with-this-pneumatic-facade-technology (дата обращения: 11.03.19).

Литература

1. Андреева О.А. Памятник архитектуры – объект современной эпохи: учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 117 с.

2. Делез Ж. Марсель Пруст и знаки / Перев. с франц. Е.Г. Соколова. - СПб.: Алетейя, лаборатория метафизических исследований при философском факультете, 1999. - 189 с.

3. Ермолов В.В. Пневматические строительные конструкции / В.В. Ермолов, У.У. Бэрд, Э. Бубнер. - М.: Стройиздат, 1983. - 439 с.

4. Орса Ю.Н. Особенности архитектурной композиции пневматических сооружений: дис. канд. архитектуры: 18.00.02 / Орса Юлий Николаевич. - М., 1983. - 152с.

5. Отто Ф. Пневматические строительные конструкции. Конструирование и расчет сооружений из тросов, сеток и мембран / перевод с немецкого А.А. Гогешвили / Ф. Отто, Р. Тростель. - М.: Стройиздат, 1967. - 319 с.

6. Пшеничникова К.А. Предпосылки формирования пневматических конструкций в современной архитектуре // Architecture and Modern Information Technologies. – 2018. – №3(44). – С. 183-200 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://marhi.ru/AMIT/2018/3kvart18/10_pshenichnikova/index.php

7. Рогожина Т.Г. Адаптивная архитектура // НАУКА – ОБРАЗОВАНИЕ – ПРОИЗВОДСТВО: Опыт и перспективы развития: сборник материалов XIV Международной научно-технической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Е. Г. Зудова (8–9 февраля 2018 г.): в 2-х т. - Т. 2: Автоматизация, мехатроника и IT. Гуманитарные науки. Строительство и архитектура. - Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2018. - С. 258-264.

8. Сапрыкина Н.А. Основы динамического формообразования в архитектуре: учеб. для вузов. – М.: Архитектура-С, 2005. – 312 с.

9. Aulia Fikriarini M. & M. Ishomuddin / Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) 78:5 (2016) 97–202. - 7 s.

10. Melendez F., Gannon M., Jacobson-Weaver Z., Toulkeridou V. Adaptive pneumatic frameworks / TEMPORAL AGENCY ACADIA / DESIGN AGENCY. - 2014. - S. 427-434. – 8 s.

11. LeCuyer A. ETFE Technology and Design / Graphic design: Esther Mildenberger. - Berlin: Birkhauser Verlag AG, 2008. - 160 s.

12. Poinet P., Baharlou E., Schwinn T., Menges A. Adaptive Pneumatic Shell Structures: Feedback-driven robotic stiffening of inflated extensible membranes and further rigidification for architectural applications / CITA - Centre for Information Technology and Architecture / ICD - Institute for Computational Design / ICD - Institute for Computational Design. eCAADe 34. - 549-558. -10 s.

13. Pasquale D.P. Form follows structure: Biomimetic emergent models of architectural production / Louisiana Tech University / OFFSITE - Philadelphia - 302. - 5 s.

14. Fukuda T., Huang W., Janssen P., Crolla K., Alhadidi S. (eds.), Learning, Adapting and Prototyping, Proceedings of the 23rd International [Text]. / Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2018. - Volume 1. – S. 9-18.

References

1. Andreeva O.A. *Pamyatnik arhitektury – obekt sovremennoj ehpohi: uchebnoe posobie* [The monument of architecture - the object of the modern era]. Ul'yanovsk, UlGTU, 2012, 117 p.

2. Delez Zh. *Marsel' Prust i znaki* [Proust and signs]. St. Petersburg, 1999, 189 p.

3. Ermolov V.V. *Pnevmaticheskie stroitel'nye konstrukcii* [Pneumatic building structures]. Moscow, Strojizdat, 1983, 439 p.

4. Orsa Yu.N. *Osobennosti arhitekturnoj kompozicii pnevmaticheskih sooruzhenij* [Features of the architectural composition of pneumatic structures (Cand. Dis)]. Moscow, 1983, 152 p.

5. Otto F. *Pnevmaticheskie stroitel'nye konstrukcii. Konstruirovanie i raschet sooruzhenij iz trosov, setok i membrane* [Pneumatic building structures. Design and calculation of structures from cables, grids and membranes]. Moscow, Strojizdat, 1967, 319 p.

6. Pshenichnikova K.A. Prerequisites for the formation of pneumatic structures in modern architecture. Architecture and Modern Information Technologies, 2018, no. 3(44), pp. 183-200 Available at: http://marhi.ru/AMIT/2018/3kvart18/10_pshenichnikova/index.php

7. Rogozhina T.G. Adaptivnaya arhitektura [Adaptive Architecture. SCIENCE - EDUCATION - PRODUCTION: Experience and prospects of development: a collection of materials of the XIV International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Nizhnij Tagil, 2018, pp. 258-264.

8. Saprykina N.A. *Osnovy dinamicheskogo formoobrazovaniya v arhitekture* [Basics of dynamic shaping in architecture. Textbook for high schools]. Moscow, Arhitektura-S, 2005, 312 p.

9. Aulia Fikriarini M. & M. Ishomuddin. Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) 78:5 (2016) 97–202, 7 p.

10. Melendez F., Gannon M., Jacobson-Weaver Z., Toulkeridou V. Adaptive pneumatic frameworks. TEMPORAL AGENCY ACADIA / DESIGN AGENCY, 2014, 427-434, 8 p.

11. LeCuyer A. ETFE Technology and Design. Graphic design: Esther Mildenberger. Berlin, Birkhauser Verlag AG, 2008, 160 p.

12. Poinet P., Baharlou E., Schwinn T., Menges A. Adaptive Pneumatic Shell Structures: Feedback-driven robotic stiffening of inflated extensible membranes and further rigidification for architectural applications. CITA - Centre for Information Technology and Architecture. ICD - Institute for Computational Design. ICD - Institute for Computational Design. eCAADe 34 -549-558,10 p.

13. Pasquale D.P. Form follows structure: Biomimetic emergent models of architectural production. Louisiana Tech University. OFFSITE - Philadelphia – 302, 5 p.

14. Fukuda T., Huang W., Janssen P., Crolla K., Alhadidi S. (eds.), Learning, Adapting and Prototyping, Proceedings of the 23rd International. Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2018. Volume 1, 9-18.

ОБ АВТОРЕ

Пшеничникова Кристина Андреевна
Аспирант кафедры «Основы архитектурного проектирования», Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия
e-mail: k.pshenichnikova@markhi.ru

ABOUT THE AUTHOR

Pshenichnikova Kristina
Postgraduate Student, Chair «Foundations of Architectural Design», Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia
e-mail: k.pshenichnikova@markhi.ru