

Рассматриваются биомиметические принципы и параметрические методы, интегрированные в архитектуру с использованием инженерной древесины. Анализ павильонов Metropol Parasol, Pompidou-Metz, Pulp Pavilion, ITECH и Bowooss показывает, как биологические аналоги вдохновляют на создание инновационных форм из дерева. Параметрические инструменты преобразуют биомиметическую логику в эффективные, адаптивные проекты. Цифровое производство повышает универсальность, экологичность и сложность дерева. Исследование устанавливает проверенную таксономию, связывающую теорию и практику, что способствует биомиметической параметрической синергии и междисциплинарным подходам к проектированию, основанным на биологических знаниях.

Ключевые слова: биомимикрия; параметрическое проектирование; искусственная древесина; цифровое производство; устойчивость; вычислительная архитектура; структурные инновации; экологический дизайн; морфологический интеллект.

This article examines the integration of biomimetic principles and parametric methods with engineered timber in architectural design. Analysing Metropol Parasol, Pompidou-Metz, Pulp Pavilion, ITECH, and Bowooss pavilions shows how biological analogues inspire innovative timber forms. Parametric tools mediate biomimetic logic into efficient, responsive designs. Digital fabrication enhances the versatility, sustainability, and complexity of timber. The study establishes a validated taxonomy that links theory and practice, promoting biomimetic-parametric synergy and interdisciplinary, bio-informed design approaches.

Keywords : Biomimicry, Parametric Design, Engineered Timber, Digital Fabrication, Sustainability, Computational Architecture, Structural Innovation, Ecological Design, Morphological Intelligence

Инновационные биомиметические параметрические деревянные конструкции / Innovative biomimetic parametric timber structures

текст

Качана Касулу

Российский университет дружбы народов
им. П. Лумумбы (Москва)

Ольга Воличенко

Российский университет дружбы народов
им. П. Лумумбы (Москва);

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Филипп Абрамян

Российский университет дружбы народов
им. П. Лумумбы (Москва)

Бейсен Кариев

Кыргызско-Российский славянский университет
им. Б. Н. Ельцина
(Кыргызская Республика, Бишкек)

text

Kachana Kasulu

RUDN University (Moscow)

Olga Volichenko

RUDN University (Moscow);
National Research Moscow State University of Civil Engineering

Philipp Abramyan

RUDN University (Moscow)

Beisen Kariev

Kyrgyz-Russian Slavic University named after the First President B. N. Yeltsin
(Kyrgyz Republic, Bishkek)

Введение

Приоритеты в области устойчивого развития в сочетании с технологическими достижениями стимулируют обширные преобразования в современной архитектуре. Массивная древесина находится на переднем крае архитектурной эволюции, поскольку ее возобновляемые свойства, способность поглощать углерод и совместимость с передовыми технологиями производства имеют решающее значение для повышения ее ценности. Растущее использование перекрестно склеенного бруса (CLT), пиломатериалов из слоеного шпона (LVL) и клееного бруса стало широко распространенным явлением и трансформировало архитектурный дизайн в сторону устойчивых методов [1]. С. Леманн и П. Кремер [1] отмечают, что массивная древесина обладает исключительными свойствами, включая снижение выбросов углерода и сокращение времени строительства, при этом обеспечивая превосходную прочность конструкции по сравнению с традиционными строительными материалами, такими как сталь и бетон [1]. В настоящее время в архитектурных рабочих процессах широко используются методы параметрического проектирования, позволяющие архитекторам более эффективно управлять сложными геометрическими формами и выполнять задачи по поиску форм, ориентированные на производительность [2].

Благодаря параметрическому проектированию современная архитектура претерпела трансформацию за счет итеративного вычислительного процесса, позволяющему архитекторам исследовать сложные пространственные конфигурации и одновременно оптимизировать структурные характеристики, позволяющему архитекторам исследовать сложные пространственные конфигурации и одновременно оптимизировать структурные характеристики [3]. П. Шумахер [3] отмечает, что это революционная методология проектирования, которая интегрирует форму и функцию в контекст с помощью вычислительных систем [3]. Это позволяет осуществлять сложные геометрические преобразования, которые приводят к большей адаптивности дизайна и операционной эффективности массивных деревянных конструкций, как показали исследования [4].

С развитием массового производства древесины и параметрического проектирования архитекторы все чаще

прибегают к биомимикрии, которая предлагает устойчивые решения на основе вдохновленных природой моделей для разработки новых методологий проектирования, оптимизированных форм и экосистем [5]. Архитектурное проектирование претерпело значительные изменения благодаря этому подходу, который предлагает инновационные решения сложных структурных и экологических проблем, используя биологические аналоги в качестве моделей устойчивости, адаптивности и эффективности.

Несмотря на растущий интерес к этим инновационным парадигмам и их внедрению, в традиционном проектировании из дерева часто не в полной мере используется структурный и формальный потенциал этого материала по сравнению с его природными аналогами. Современные методы строительства обычно ограничивают использование древесины простыми прямолинейными конструкциями, не признавая ее потенциал для создания сложных, оптимизированных форм, подобных биологическим, и того, как природа использует волокнистые структуры и органические геометрические формы для достижения исключительной структурной эффективности, которая прямо противоположна традиционным методам строительства из древесины [6].

Важной проблемой в современной архитектурной практике является отсутствие интегративных рамок, объединяющих принципы биомиметики, методологии параметрического проектирования и передовые технологии использования древесины в целостные архитектурные решения. Это хорошо разработанные области исследований, однако они не нашли широкого применения в различных типах конструкций [7, 8]. Разделение между дисциплинами создает препятствия, которые мешают полноценному использованию дерева для получения экологических, структурных и эстетических преимуществ, одновременно сдерживая инновационное развитие на основе целостных подходов к проектированию, основанных на природе, в сочетании с вычислительной оптимизацией.

Еще больше усугубляет эту проблему тот факт, что научные дискуссии о синергии между биомимикрией и параметрическими рабочими процессами, применяемыми специально к инженерным деревянным системам, носят ограниченный характер. В существующей литературе

Introduction

Sustainability priorities combined with technological advances catalyse an extensive transformation in contemporary architecture. Mass timber stands at the head of architectural evolution because its renewable properties, carbon sequestration capabilities and compatibility with advanced fabrication technologies are crucial in enhancing its value. The growing use of cross-laminated timber (CLT), laminated veneer lumber (LVL), and glulam has become widespread, transforming architectural design towards more sustainable methods (Lehmann & Kremer, 2023). Lehmann and Kremer (2023) note that mass timber possesses exceptional capabilities, including reducing carbon emissions and construction time, while offering superior structural strength compared to traditional building materials such as steel and concrete. Architectural workflows now commonly incorporate parametric design methods, allowing architects to manage complex geometries and performance-focused form-finding tasks more efficiently (Oxman, 2017).

Through parametric design, contemporary architecture has been transformed through its iterative computational process, enabling architects to explore complex spatial configurations while optimising structural performance (Schumacher, 2016). Schumacher (2016) notes it as a revolutionary design methodology that integrates form and function within context through computational systems. Enabling advanced geometric transformations, which lead to greater design adaptability and operational efficiency in mass timber structures, as shown by Menges and Knippers (2015).

эти области часто исследуются изолированно: биомимикрия рассматривается как концептуальная философия [9], параметризм – как набор вычислительных инструментов [10], а древесина – просто как экологический строительный материал [11]. Эти области редко интегрируются в единые методологии проектирования, несмотря на доказательства, свидетельствующие о том, что такая интеграция может значительно усилить инновации в области проектирования и результаты в области устойчивого развития [12].

Кроме того, существует недостаток документации и критического анализа существующих построенных или прототипных параметрических деревянных конструкций, явно вдохновленных биологическими аналогами. А. Менгес [12] отметил недостаток документации, который требует тщательного исследования для оценки структурной целостности, экологической и архитектурной эффективности инновационных конструкций. В связи с этим недостатком архитектурная дисциплина не имеет полного представления о практическом потенциале и ограничениях биомиметических параметрических деревянных каркасов.

В данной статье оцениваются биомиметические идеи с помощью технологических стратегий для разработки инновационных параметрических деревянных конструкций посредством анализа и синтеза. В частности, в исследовании делается попытка определить биологические модели, имеющие отношение к морфологии деревянных конструкций, и изучить их преобразование в архитектурную форму и функциональность. Путем тщательного изучения вычислительных методов в статье исследуется, как биомиметические концепции реализуются в параметрических проектных средах для создания эффективных, адаптивных и устойчивых деревянных конструкций. В исследовании анализируются технологические достижения, такие как роботизированное производство и цифровое столярное дело, с целью определения их влияния на структурные и экологические характеристики выбранных архитектурных примеров. В этом обширном исследовании изучаются эффективные способы сочетания биомиметических стратегий с параметрическими технологиями в архитектурной практике, а также пред-

As mass timber and parametric design progress, architects increasingly adopt biomimicry, which offers sustainable solutions through nature-inspired design as models to develop new design methodologies, optimised forms and ecosystems (Benyus, 2009). Architectural design has undergone significant transformation through this approach, which delivers innovative solutions to complex structural and ecological problems by utilising biological analogues as models for resilience, adaptability, and efficiency.

Despite increasing interest and implementation of these innovative paradigms, conventional timber design frequently underutilises timber's inherent structural and formal potential compared to natural analogues. Current construction methods typically restrict timber to basic rectilinear structural forms, while failing to recognise its potential for complex, biological-like, optimised shapes and how nature utilises fibrous structures and organic geometries to achieve exceptional structural efficiencies that directly oppose traditional timber construction methods (Knippers et al., 2016).

A significant issue within current architectural practice is the lack of integrative frameworks combining biomimetic principles, parametric design methodologies, and advanced timber technologies into cohesive architectural outcomes. These are well-established research fields yet lack widespread integration across different structural types (Prabhakaran et al., 2019; Eversmann et al., 2017). The separation between disciplines creates obstacles that prevent the full utilisation of timber for its ecological, structural, and aesthetic benefits, while constraining innovative development

лагается единый методологический подход для будущих проектов деревянного строительства. Исследование связывает теоретическое обсуждение с практическим анализом, чтобы помочь архитектурным исследователям и практикам в разработке деревянных конструкций, которые демонстрируют структурную выразительность, одновременно будучи экологически безопасными и технологически продвинутыми.

Методы

В исследовании используется качественная интерпретативная методология, которая сочетает в себе исследование дизайна с всесторонним обзором литературы и сравнительным анализом пяти типовых проектов. Качественный подход позволяет нам получить глубокое понимание многогранных взаимосвязей между биомиметическими источниками и параметрическими методами проектирования, применяемыми в инновационных проектах в области инженерной деревообработки. Посредством интерпретативного анализа были исследованы сложные связи между биологическими моделями и их архитектурными интерпретациями, а также оценены структурные возможности наряду с экологическими и формальными возможностями. Исследование объединяет знания из области архитектуры, компьютерного дизайна, материаловедения и биологии для изучения биомиметических параметрических деревянных конструкций через междисциплинарную призму. Это оказывается необходимым для понимания разнообразного воздействия интегрированных стратегий проектирования с использованием междисциплинарных знаний для открытия новых направлений архитектурных инноваций и устойчивого развития.

Сбор данных

В ходе исследования были собраны данные с помощью нескольких взаимосвязанных методов. На начальном этапе исследования был проведен обширный обзор литературы, который охватывал рецензируемые научные статьи и источники по теории биомимикрии, а также руководства по проектированию и основополагающие тексты по параметрическим моделям проектирования вместе с обширными базами данных по передовым технологиям деревянного строительства. Источники включали

from nature-based, holistic design approaches combined with computational optimisation.

Further compounding this issue, scholarly discourse on the synergy between biomimicry and parametric workflows, specifically applied to engineered timber systems, is limited. Existing literature often explores these domains in isolation, either examining biomimicry as a conceptual philosophy (Pawlyn, 2019), parametricism as a computational toolkit (Oxman & Oxman, 2010), or timber merely as an ecological building material (Green, 2012). Rarely are these domains integrated into unified design methodologies, despite evidence suggesting such integration could significantly amplify design innovation and sustainability outcomes (Menges, 2015).

Moreover, there is a lack of sufficient documentation and critical analysis of existing built or prototypical parametric timber structures that are explicitly inspired by biological analogues. Menges (2015) observed a documentation deficiency that necessitates thorough research to assess the structural integrity, ecological effectiveness, and architectural effectiveness of innovative designs. Relative to this deficiency, the architectural discipline lacks a comprehensive understanding of the practical potentials and limitations of biomimetic-parametric timber frameworks.

This article evaluates biomimetic inspirations with technological strategies to develop groundbreaking parametric timber structures through analysis and synthesis.

Specifically, the study aims to identify biological models relevant to timber structural morphology and examine their application in architectural

form and functionality. Through careful examination of computational methods, the article explores how biomimetic concepts are operationalised within parametric design environments to generate efficient, responsive, and resilient timber structures. The research analyses technological advancements, such as robotic fabrication and digital joinery, to determine their effects on the structural and environmental performance of selected architectural case studies. This extensive study examines effective methods for architectural practices to integrate biomimetic strategies with parametric technologies, proposing a unified methodological approach for future timber construction projects. The study bridges theoretical discussions with practical analyses to support architectural researchers and practitioners in developing timber structures that demonstrate structural expression while being environmentally sensitive and technologically advanced.

Methods

Research Design

The study employs a qualitative, interpretive methodology that combines design research with comprehensive literature reviews and comparative analysis of five exemplary projects. The qualitative approach enables us to gain profound insights into the multifaceted relationships between biomimetic sources and parametric design methods applied to engineered timber innovations. Through interpretative analysis investigated complex connections between biological models and their architectural interpretations while assessing structural capabilities alongside ecological and formal possibilities. The research integrates knowledge from architecture, compu-

академические журналы, книги ведущих экспертов в области биомимикрии, таких как Джанин Бенюс, основополагающие работы Патрика Шумахера по параметризму, а также современные исследовательские статьи, подробно описывающие достижения в области инженерных технологий и методов производства древесины.

Кроме того, был проанализирован обширный проектный документооборот, включающий архитектурные чертежи, параметрические модели и вычислительные скрипты, использованные в отдельных тематических исследованиях. Были также проанализированы подробные исследования материалов, файлы по изготовлению и комплексные отчеты об экологических характеристиках, чтобы получить представление о практической реализации и реальных показателях эффективности биомиметических параметрических деревянных конструкций. Интервью с архитекторами, инженерами-строителями и специалистами по изготовлению, участвовавшими в тематических исследованиях, помогли контекстуализировать технические выводы, давшие важные качественные сведения, которые представили ценные точки зрения о проблемах и инновациях, с которыми столкнулись во время реализации проекта.

Критерии отбора для тематических исследований

Выбранные для детального анализа примеры были тщательно отобраны на основе четких критериев, призванных обеспечить актуальность и репрезентативность проектов в рамках исследования. В выбранных зданиях в качестве основного конструктивного элемента использовались такие древесные материалы, как перекрестно склеенный брус (CLT), пиломатериалы из слоеного шпона (LVL) и ламинированные стружечные композиты, чтобы продемонстрировать современные тенденции в области инженерного проектирования деревянных архитектурных конструкций.

В выбранных проектах биомиметические концепции были включены в их дизайн на нескольких уровнях формы, структуры и систем, что продемонстрировало изобретательное использование биологических моделей в архитектурном развитии. В процессе проектирования и строительства каждого проекта широко использо-

вались технологии параметрического моделирования и цифрового производства, которые продемонстрировали передовые вычислительные методы в сочетании с современными производственными возможностями. Выбранные проекты должны были в значительной степени интегрировать принципы устойчивого дизайна с передовыми конструктивными решениями и экологическим сознанием, которые занимают центральное место в современном архитектурном дискурсе. Исследователи использовали стратегический процесс отбора для проведения подробных сравнительных исследований, что позволило получить глубокое понимание потенциала и ограничений интеграции биомиметических концепций с методологиями параметрического проектирования деревянных конструкций.

Аналитическая структура

Аналитическая структура, использованная в данном исследовании, включала три отдельных, но взаимосвязанных подхода к оценке: биомиметическую классификацию, параметрическую оценку и технологическую оценку. Метод биомиметической классификации позволил разделить биологические источники вдохновения проекта на три установленных типа: морфологические аспекты (основанные на форме), функциональные аспекты (связанные с процессами производительности) и экологические аспекты (охватывающие взаимодействия на системном уровне). Метод классификации позволил провести сравнительный анализ, который помог выявить повторяющиеся темы и обнаружить новые области применения.

Параметрическая оценка включала детальное изучение и оценку вычислительных стратегий, используемых при создании и оптимизации проектов. Это включало анализ генеративных алгоритмов, симуляции производительности, такие как структурный, тепловой или экологический анализ, а также методологии рационализации сложных геометрических форм в реализуемые деревянные конструкции. Технологическая оценка касалась критериев выбора материалов, процессов изготовления (ручного, с ЧПУ или роботизированного), методов сборки и полученных показателей экологической эффектив-

tational design, material science, and biology to study biomimetic-parametric timber structures through an interdisciplinary lens. This proves essential in understanding the diverse impacts of integrated design strategies, as it utilises cross-disciplinary insights to discover new directions for architectural innovation and sustainability.

Data Collection

The research collected data by employing multiple interconnected methods. The initial phase of the research involved an extensive literature review, which encompassed peer-reviewed scholarly articles, biomimicry theory resources, design manuals, and foundational texts on parametric design modelling frameworks, as well as extensive databases on advanced timber construction. Sources included academic journals, books by leading experts in biomimicry such as Janine Benyus, seminal works on parametricism by Patrik Schumacher, and contemporary research papers detailing advances in engineered timber technologies and fabrication methods.

Additionally, extensive design documentation was analysed, encompassing architectural drawings, parametric models, and computational scripts utilised in selected case studies. Detailed material studies, fabrication files, and comprehensive environmental performance reports were also reviewed to gain insights into practical implementation and real-world performance metrics of biomimetic-parametric timber structures. Expert interviews of architects, structural engineers, and fabrication specialists who participated in the case studies helped contextualise the technical findings, yielding

essential qualitative insights that presented valuable perspectives on the challenges and innovations encountered during project implementation.

Selection Criteria for Case Studies

The case studies chosen for detailed analysis were carefully selected based on clear criteria intended to ensure the relevance and representativeness of the projects within the scope of the research. The selected buildings utilised timber materials, such as Cross-Laminated Timber (CLT), Laminated Veneer Lumber (LVL), and Laminated Strand composites, as their primary structural elements to demonstrate current engineering trends in timber architectural design.

The selected projects incorporated biomimetic concepts into their design at multiple levels, including form, structure, and systems, showcasing inventive uses of biological models in architectural development. The design-to-construction process for each project prominently featured parametric modelling and digital fabrication technologies, which showcased advanced computational methods combined with state-of-the-art fabrication capabilities. The chosen projects had to integrate sustainable design principles and pioneering structural designs, as well as essential ecological awareness, which are central to current architectural discourse. Researchers employed a strategic selection process to conduct detailed comparative studies, yielding deep insights into the potential and limitations of integrating biomimetic concepts with parametric timber design methodologies.

Analytical Framework

The analytical framework employed in this research encompassed three distinct but interconnected evaluative lenses—biomimetic classification,

ности (воплощенный углерод, сокращение отходов, энергоэффективность).

Комплексная многомерная аналитическая структура позволила получить важные выводы, интегрировав результаты различных дисциплин, чтобы сделать убедительные выводы о совместном потенциале биомиметических идей, параметрических методологий и инженерных технологий использования древесины в современной архитектурной практике.

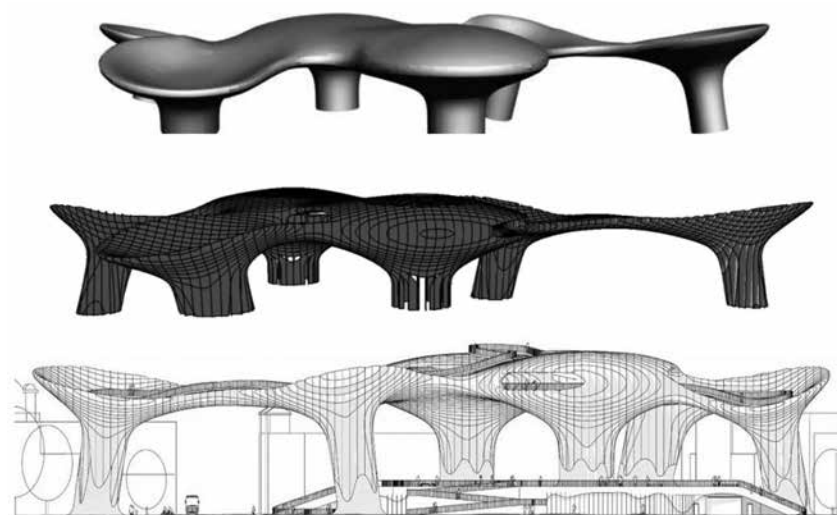
Результаты

Конструкция Метрополь Парасоль (Metropol Parasol) (рис. 1) в Севилье построена по принципу органичного ветвления грибов. Применение вычислительных алгоритмов для определения формы позволило добиться оптимального распределения нагрузки в конструкции и улучшить пространственные ощущения. В строительстве использовался Пиломатериал из слоеного шпона (LVL), что позволило точно воссоздать сложные формы.

Структурная оценка показала, что гибридная несущая стратегия, использующая как элементы оболочки, так и элементы каркаса, обеспечивает максимальную структурную эффективность за счет минимизации потребления материалов без ущерба для пространственного объема. Испытания на пиковую нагрузку продемонстрировали минимальное прогибание посредством анализа деформационного поведения, что подтвердило структурную целостность конструкции.

Оценка экологических характеристик доказала успешную интеграцию пассивного дизайна с помощью деревянной решетчатой конструкции, которая обеспечивала значительное затенение и естественную вентиляцию для улучшения тепловых характеристик деревянной оболочки. Оценка углеродного следа показала значительное снижение воздействия на окружающую среду по сравнению с традиционными стальными или бетонными аналогами.

Цифровое производство и сборка в основном осуществлялись с использованием станков с ЧПУ, что обеспечило эффективное производство с умеренными отходами материалов (~15%). Сложность сборки была решена за счет детальной предварительной сборки, несмотря



на обширные параметрические итерации и циклы обратной связи по результатам моделирования, проведенные с использованием Grasshopper. В пространственном отношении Parasol обеспечил динамичные многоуровневые общественные пространства, выразительную эстетику и продемонстрировал масштабируемость и адаптируемость для интеграции в городскую среду.

Центр Помпиду-Мец (Centre Pompidou-Metz)

(рис. 2) был вдохновлен плетеными гнездами птиц рода Phylloscopus, которые используют переплетение для создания прочных, изолированных укрытий из минимального количества материалов, оптимизируя вес, гибкость и интеграцию с окружающей средой, и впоследствии послужили прототипами для традиционных техник плетения, используемых людьми. Вычислительные алгоритмы переплетения, итеративно тестируемые для структурной и пространственной оптимизации. Клеевые балки выделялись в технологии деревообработки, поскольку обеспечивали высокую прочность конструкции наряду с исключительной гибкостью для сложных изгибов.

В конструкции здания использовалась стратегия решетчатой оболочки, эффективно распределяющая

^ Рис. 1. Деревянная решетчатая конструкция Метрополь Парасоль, напоминающая гриб, состоит из 3400 волнисто расположенных микроламинированных элементов. Метрополь Парасоль объединяет рынок, археологический музей и пешеходные дорожки, с которых открывается панорамный вид / Figure 1 shows the mushroom-like wooden lattice structure of the Metropol Parasol, which comprises 3,400 microlaminated elements that undulate to form a market, an archaeological museum, and elevated walkways offering panoramic views.

parametric assessment, and technological evaluation. The biomimetic classification method sorted project biological inspirations into three established typologies, which included morphological aspects (based on form), functional aspects (related to performance processes), and ecological aspects (encompassing system-level interactions). The classification method enabled comparative analysis, which helped to pinpoint repeated themes and discover new uses.

Parametric assessment involved detailed examination and evaluation of computational strategies employed in design generation and optimisation. This included analysing generative algorithms, performance simulations such as structural, thermal, or environmental analyses, and methodologies for rationalising complex geometries into feasible timber structures. Technological evaluation addressed material selection criteria, fabrication processes (manual, CNC, or robotic), assembly techniques, and the resulting environmental performance metrics (embodied carbon, waste reduction, energy efficiency).

The comprehensive multidimensional analytical framework produced critical insights, allowing for the integration of findings from various disciplines to make firm conclusions about the combined potential of biomimetic inspirations, parametric methodologies, and engineered timber technologies in modern architectural practices.

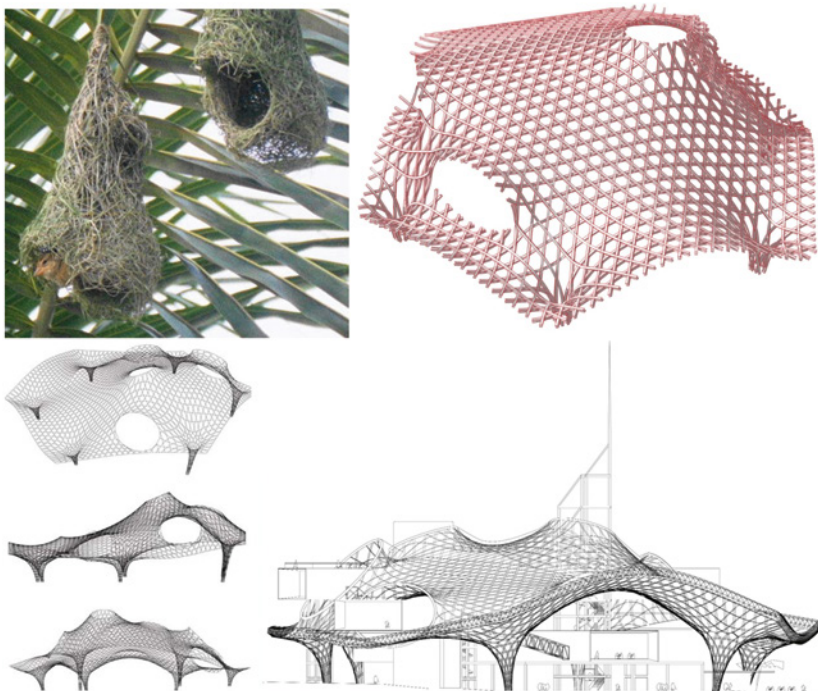
Results

Metropol Parasol

The Metropol Parasol [Figure 1] structure in Seville derives its design logic

в Рис. 2. Тканая шестиугольная деревянная крыша, вдохновленная птичьими гнездами, в которой переплетение гнезд сочетается с инновационной 3–6-угольной решеткой, представляет собой легкую самоусиливающуюся конструкцию, оптимизирующую дневное освещение и тепловые характеристики / Figure 2 shows the woven hexagonal timber roof, inspired by bird nests, such as those of *Phylloscopus*, which merges avian interlacing with innovation in a trihexagonal lattice, creating a lightweight, self-bracing structure that optimises daylight and thermal performance.

нагрузки по бесшовной деревянной сети, которая следовала криволинейным траекториям, напоминающим переплетения волокон гнезда, с использованием шестиугольной плетеной решетки для охвата обширных площадей. Оценки индекса структурной эффективности показали результативное использование материалов, что было подтверждено анализом деформационного поведения, продемонстрировавшим минимальное смещение при воздействии динамических нагрузок. Благодаря пассивной солнечной защите и продуманному расположению проемов здание улучшило свои тепловые характеристики за счет оптимизации естественной вентиляции, подобно адаптивной вентиляции в птичьих гнездах. Деревянная конструкция значительно снизила выбросы углерода, подчеркнув экологические преимущества.



from the organic branching growth patterns of mushrooms. The application of computational algorithms for form-finding achieved optimal load distribution in structures while improving spatial experiences. The construction utilised laminated veneer lumber (LVL), enabling the precise creation of complex shapes.

The structural assessment demonstrated that a hybrid load-bearing strategy using both shell and frame elements achieved maximum structural efficiency by minimising material consumption without compromising spatial volume. Peak occupancy testing demonstrated minimal deflection through deformation behaviour analysis, which confirmed the design's structural integrity.

The environmental performance evaluations demonstrated the successful integration of passive design through the wooden lattice structure, which provided substantial shading and natural ventilation, thereby improving the thermal performance of the timber envelope. Embodied carbon assessments highlighted significantly reduced environmental impacts compared to conventional steel or concrete equivalents.

Digital fabrication and assembly primarily involved the use of CNC machinery, resulting in efficient production with moderate material waste (~15%). Assembly complexity was managed through detailed prefabrication, despite the extensive parametric iterations and simulation feedback cycles conducted using Grasshopper. Spatially, the Parasol provided dynamic, multi-level public spaces, an expressive aesthetic, and demonstrated scalability and adaptability for urban integration.

Сочетание методов изготовления и технологии ЧПУ обеспечило точные и быстрые производственные циклы при сохранении уровня отходов менее 10%. Технологии предварительной сборки оптимизировали сложность монтажа, что привело к упрощению процессов строительства на месте. CATIA и Grasshopper выполнили итерации проектирования и структурные симуляции, которые сгенерировали продуктивные циклы обратной связи, связывающие процессы проектирования с показателями производительности. Архитектурный дизайн конструкции создает уютное выставочное пространство с визуальной плавностью и адаптивностью, служа в качестве масштабируемой модели для будущих крупных проектов из дерева.

Целлюлозный павильон (Pulp Pavilion) (рис. 3) вдохновлен бумажной целлюлозой и сооружениями насекомых, такими как осиные гнезда. Его концепция сосредоточена на легких и прочных ячеистых формах, присущих естественным целлюлозным структурам. Использование генеративных алгоритмов и методов поиска форм позволило оптимизировать структурную эффективность, распределение материалов и эстетические качества. В деревянных конструкциях инновационно использованы композитные материалы на основе целлюлозы, что позволило выйти за рамки традиционных решений.

Павильон управлял распределением нагрузки по ячеистой схеме благодаря своей легкой оболочке, что позволило достичь очень высокого показателя структурной эффективности. Нагрузочные испытания продемонстрировали превосходное соотношение жесткости и веса, подтвердив целостность конструкции с помощью плагина Karamba-3D для структурного анализа, что позволило провести несколько итераций проектирования для достижения оптимальной производительности. Пассивные стратегии были органично интегрированы в конструкцию здания благодаря его проницаемости, улучшившей воздухообмен и охлаждение для повышения теплового комфорта. Анализ углеродного следа показал, что выбросы углерода были минимальными, что свидетельствовало о существенных экологических преимуществах с точки зрения устойчивости и эффективности использования ресурсов.

Centre Pompidou-Metz

The Centre Pompidou-Metz [Figure 2] was inspired by the woven nests of birds, such as those of the genus *Phylloscopus*, which use interlacing to create resilient, insulated shelters from minimal materials, optimising for weight, flexibility, and environmental integration. These techniques later served as prototypes for human traditional weaving techniques. Computational interlacing algorithms, iteratively tested for structural and spatial optimisation. Glulam beams stood out in timber technology because they provided powerful structural strength along with exceptional flexibility for complex curves.

The structure's design utilised a grid-shell strategy, efficiently spreading loads throughout a seamless timber network that followed curvilinear paths reminiscent of nest fibre entanglements, employing a hexagonal woven lattice to span vast areas. The structural efficiency index evaluations showed practical material usage, which was verified by deformation behaviour analyses demonstrating minimal displacement when subjected to dynamic loads. Through passive solar shading and deliberate aperture placement, the building improved its thermal performance by optimising natural ventilation, akin to the adaptive ventilation in bird nests. Its timber construction substantially reduced embodied carbon emissions, emphasising ecological benefits.

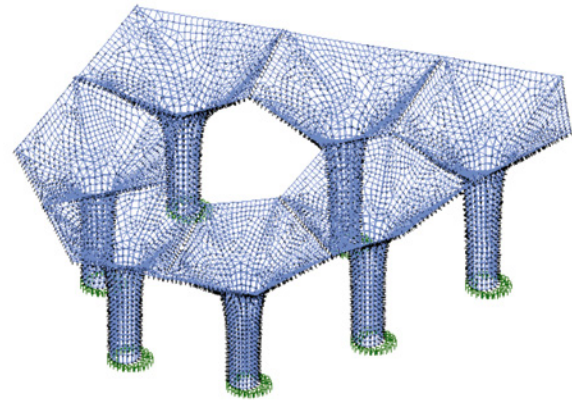
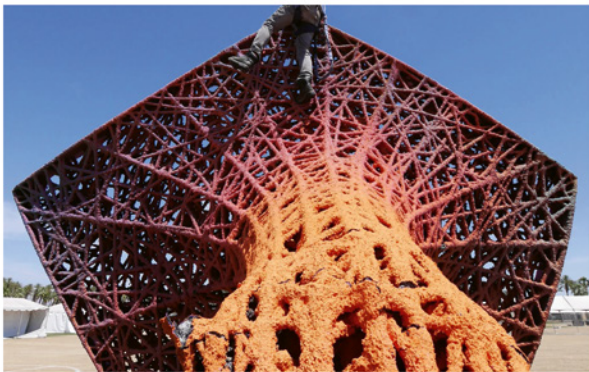
The combination of fabrication methods and CNC technology ensured precise and efficient production cycles, with less than 10% waste generation. Prefabrication techniques optimised assembly complexity, leading to

the simplification of on-site construction processes. CATIA and Grasshopper facilitated design iterations and structural simulations, generating productive feedback cycles that connected design processes with performance metrics. The structure's architectural design creates a welcoming exhibition space with visual fluidity and adaptability, serving as a scalable model for future extensive timber projects.

Pulp Pavilion

The Pulp Pavilion [Figure 3] draws inspiration from paper pulp and insect-built structures, such as wasp nests. Its concept focuses on lightweight and durable cellular forms inherent to natural pulp structures. Incorporation of generative algorithms and form-finding techniques optimised structural efficiency, material distribution, and aesthetic qualities. Timber technology here innovatively utilised cellulose-based timber composites, pushing conventional boundaries.

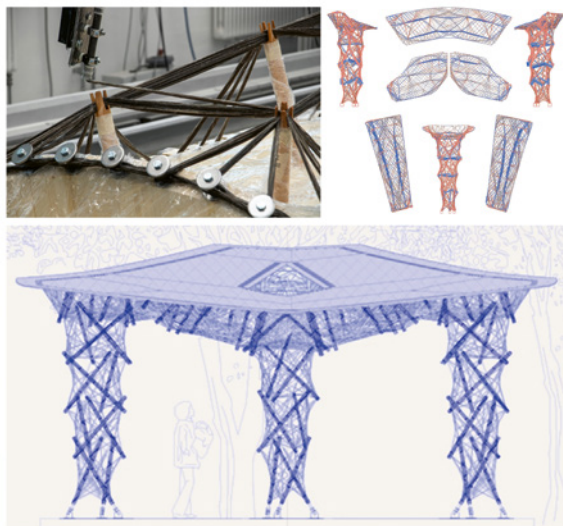
The pavilion managed load distribution across a cellular pattern through its lightweight shell strategy, achieving a highly favourable structural efficiency index. Load tests demonstrated outstanding stiffness-to-weight ratios, verifying the structure's integrity using the Karamba3D structural analysis plugin, which enabled multiple design iterations to achieve optimal performance. Passive strategies, integrated seamlessly into the building structure through its permeability, improved airflow and cooling, resulting in enhanced thermal comfort. The analysis of embodied carbon revealed that the carbon footprint was minimal, indicating substantial environmental benefits in terms of sustainability and resource efficiency.



Цифровое производство и сборка включали роботизированное распыление и фрезерованные на ЧПУ формы, что значительно сократило время изготовления и позволило достичь процента отходов материала на уровне всего 5%. Сложность сборки была сведена к минимуму благодаря высокой степени предварительной сборки ячеистых модулей.

Органичная форма павильона обеспечила мощный визуальный эффект во всех пространствах и продемонстрировала возможности масштабирования, оставаясь при этом адаптируемой к различным архитектурным сценариям.

Исследовательский павильон ITECH (ITECH Research Pavilion) (рис. 4) вдохновлен естественным ростом и волокнистыми системами, в частности сосудистыми системами растений и анатомией древесины; имитируется их способность оптимизировать прочность вдоль линий напряжения с минимальным количеством материала, уделяется особое внимание легкой, высокооптимизированной структурной оболочке с натуральными волокнами. Это включало в себя вычислительное мо-



< Рис. 3. Восстановленная бумажная масса, распыленная на решетку из sisal-левой веревки, образует жесткую биоразлагаемую оболочку, которая интегрируется с естественными процессами разложения / Figure 3 shows reclaimed paper pulp sprayed onto a sisal twine lattice, forming a rigid, biodegradable shell which integrates with natural decay processes.

< Рис. 4. Исследовательский павильон ITECH-2024. Гибридная конструкция на биологической основе, вдохновленная структурной эффективностью имитации роботизированной бесконечной обмотки жука, объединяет дерево и композиты из льна / Figure 4 shows the ITECH Research Pavilion 2024, which employs a bio-based hybrid design inspired by the structural efficiency of mimicking the beetle's robotic coreless winding, integrating timber and flax-fibre composites.

Digital Fabrication and assembly entailed robotic spraying and CNC-milled moulds, dramatically reducing fabrication time and achieving material waste percentages as low as 5%. Assembly complexity was minimised due to the highly prefabricated cellular modules.

The pavilion's organic form provided a powerful visual impact across spaces and demonstrated scalability features while remaining adaptable to different architectural scenarios.

ITECH Research Pavilion

The ITECH Research Pavilion [Figure 4] is inspired by natural growth and fibrous systems, particularly vascular tissue systems in plants and wood anatomy, emulating their ability to optimise strength along stress lines with minimal material, focusing on a lightweight, highly optimised structural shell with natural fibres. This encompassed computational agent-based modelling and iterative form-finding algorithms to achieve structural efficiency, strategically integrated with natural fibres' tensile abilities and versatility. The timber technology employed thin-ply wound timber strips manufactured through robotic winding processes.

The pavilion's shell structure demonstrated exceptional load-bearing capabilities, producing an outstanding structural efficiency index. Testing revealed minimal structure deformation, validating its dependable performance and strength through multiple loading scenarios. The pavilion design incorporated passive elements by using timber strips to optimise shading, airflow, and thermal insulation, thereby improving environmental performance and reducing embodied carbon emissions.

The digital fabrication process utilised advanced robotic lamination methods to achieve exceptional precision while speeding up production and reducing material waste to less than 7%. Prefabrication methods and precise robotic alignment helped reduce the complexity of moderate assembly. Grasshopper and its Kangaroo plugin enabled structural optimisation through iterations alongside simulation feedback, which led to thorough computational exploration. The pavilion features a geometric design with distinctive architectural spaces that are adaptable to various structural scales and requirements.

Bowooss Pavilion

The Bowooss Pavilion architectural forms mirrored the branching frame structural patterns of trees and plant vascular systems. The employed growth algorithms and branching simulations, optimised structural form and material distribution. Timber technology featured steam-bent lamellae combined with precision robotic carving.

The structural system achieved high structural efficiency through optimised material placement and load distribution paths. The structural deformation evaluation demonstrated the pavilion's ability to adapt while maintaining minimal movement when subjected to loads. The utilisation of passive design strategies led to substantial improvements in environmental performance by optimising natural ventilation and daylighting, which delivered effective thermal regulation. Embodied carbon calculations revealed strong environmental performance, thanks to minimal material usage and sustainable sourcing practices.

делирование на основе агентов и итеративные алгоритмы поиска формы для достижения структурной эффективности, стратегически интегрированные с растяжимыми свойствами и универсальностью натуральных волокон. В технологии деревообработки использовались тонкослойные намотанные деревянные полоски, изготовленные с помощью роботизированных процессов намотки.

Конструкция павильона продемонстрировала исключительную несущую способность, обеспечив высокий показатель структурной эффективности. Испытания показали минимальную деформацию конструкции, подтвердив ее надежность и прочность в различных сценариях нагрузки. В конструкции павильона были использованы пассивные элементы в виде деревянных планок, которые оптимизируют затенение, воздухообмен и теплоизоляцию, улучшая экологические характеристики и сокращая выбросы углерода.

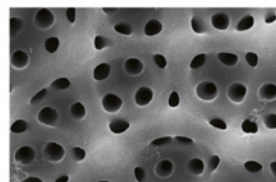
В процессе цифрового производства использовались передовые методы роботизированного ламинирования, что позволило достичь исключительной точности, ускорить производство и сократить отходы материалов до менее 7%. Методы предварительной сборки и точное роботизированное выравнивание помогли снизить сложность сборки. Grasshopper и его плагин Kangaroo позволили оптимизировать конструкцию путем итераций и обратной связи с симуляцией, что привело к тщательному вычислительному исследованию. Павильон отличается геометрическим дизайном с характерными архитектурными пространствами, адаптируемыми к различным масштабам и требованиям конструкции.

Архитектурные формы **павильона Бовус (Bowooss Pavilion)** (рис. 5) отражают ветвистую структуру деревьев и сосудистую систему растений. Используемые алгоритмы роста и моделирование ветвления позволили оптимизировать форму конструкции и распределение материалов. В технологии изготовления использовались паровые гнутые ламели в сочетании с прецизионной роботизированной резкой.

Конструктивная система достигла высокой структурной эффективности за счет оптимизированного размещения материалов и распределения нагрузки. Оценка структурной деформации продемонстрировала способ-

ность павильона адаптироваться, сохраняя минимальное движение при воздействии нагрузок. Использование пассивных стратегий проектирования привело к существенному улучшению экологических показателей за счет оптимизации естественной вентиляции и дневного освещения, что обеспечило эффективную терморегуляцию. Расчеты углеродного следа показали высокие экологические показатели благодаря минимальному использованию материалов и устойчивому снабжению.

Широко применялась цифровая интеграция производства, включая роботизированную резку и изгибание паром, что значительно сократило время изготовления и позволило снизить отходы материалов примерно на 8 процентов. Высокий уровень предварительной сборки позволил сохранить управляемость сложным процессом монтажа, что сумело обеспечить быструю и точную установку сборки на участке строительства. Процесс проектирования включал в себя повторяющиеся циклы параметрических испытаний, структурные симуляции и модели на основе роста с использованием Karamba-3D



> Рис. 5. Павильон Бовус. Ветвистые узоры вдохновлены кронами деревьев и сосудистыми системами растений, отражающими самоподобные фрактальные модели роста деревьев. Биомиметическая эффективность сочетается с архитектурной элегантностью / Figure 5 shows the Bowooss Pavilion integrating branching patterns inspired by tree canopies and plant vascular systems that reflect self-similar fractal growth patterns in trees, blending biomimetic efficiency with architectural elegance.

Digital fabrication integration was extensive, involving robotic carving and steam bending, which significantly reduced fabrication duration and achieved material waste percentages of approximately 8%. High prefabrication levels enabled assembly complexity to remain manageable, facilitating quick and precise installation during on-site assembly. The design process entailed repeated parametric testing cycles, structural simulations, and growth-based models using Karamba3D for complete structural analysis. Spatially, the pavilion delivered immersive architectural experiences characterised by organic aesthetics, excellent scalability, and potential adaptability for broader architectural applications.

Discussion

The exploration of innovative biomimetic parametric timber structures, presented through the selected case studies–Metropol Parasol, Centre Pompidou-Metz, Pulp Pavilion, ITECH Research Pavilion, and Bowooss Pavilion –provides comprehensive insights into how biomimetic inspirations, parametric tools, and engineered timber technology converge to produce architecturally innovative and ecologically responsive structures. Each project, informed by distinct biological analogues, showcases the capacity of biomimicry to drive structural and formal innovations, going beyond mere aesthetic imitation.

Biomimetic Principles as Drivers of Structural and Formal Innovation

Nature’s inherent morphological intelligence, evident in branching patterns, cellular compositions, and shells, provides a rich resource for performative

structural logic. The Bowooss Pavilion serves as a prime example of branching structures which utilise natural growth patterns to optimise material placement and load distribution while articulating space effectively, enabling dynamic responses to environmental stresses and structural demands. Similarly, cellular structures observed in the Pulp Pavilion illustrate nature’s efficiency in creating lightweight, resilient forms through material minimisation and strategic cellular arrangements. Timber morphologies derive their foundation from natural principles, which help architects develop strategies to optimise material use while improving structural resilience and creating dynamic forms to engage users on an experiential level.

Architectural design incorporates material minimisation and stress distribution alongside dynamic form generation because biomimetic inspiration extends beyond just aesthetic considerations. The Metropol Parasol, inspired by the patterns of fungal growth, harnesses nature’s structural economy to create a robust yet materially efficient hybrid shell and frame system. The Centre Pompidou-Metz similarly integrates principles of weaving, translating natural structural logic into optimised grid-shell timber systems that minimise material consumption while maximising spatial efficiency.

Role of Parametric Tools in Translating Biology to Architecture

Parametric design tools provide essential functionality for converting complex biological models into practical architectural forms. Architects utilise computational algorithms to simulate and analyse biomimetic principles, which enable the optimisation of design processes to meet struc-

для полного структурного анализа. В пространственном отношении павильон обеспечил иммерсивные архитектурные впечатления, характеризующиеся органичной эстетикой, отличной масштабируемостью и потенциальной адаптируемостью для более широких архитектурных применений.

Обсуждение

Исследование инновационных биомиметических параметрических деревянных конструкций, представленных в выбранных примерах – Metropol Parasol, Centre Pompidou-Metz, Pulp Pavilion, ITECH Research Pavilion и Bowooss Pavilion, дает всестороннее представление о том, как биомиметические идеи, параметрические инструменты и технологии инженерной деревообработки сливаются воедино, создавая архитектурно инновационные и экологически адаптивные конструкции. Каждый проект, основанный на отдельных биологических аналогах, демонстрирует способность биомимикрии стимулировать структурные и формальные инновации, выходящие за рамки простого эстетического подражания.

Биомиметические принципы как движущая сила структурных и формальных инноваций. Присущая природе морфологическая интеллигентность, проявляющаяся в ветвящихся структурах, клеточных композициях и раковинах, является богатым источником для перформативной структурной логики. Павильон Бовус служит ярким примером ветвящихся структур, в которых используются естественные модели роста для оптимизации размещения материалов и распределения нагрузки при одновременном эффективном разделении пространства, что позволяет динамично реагировать на воздействия окружающей среды и структурные требования. Аналогичным образом, клеточные структуры, наблюдаемые в павильоне Pulp, иллюстрируют эффективность природы в создании легких, упругих форм за счет минимизации материалов и стратегического расположения клеток. Морфология древесины основана на природных принципах, которые помогают архитекторам разрабатывать стратегии оптимизации использования материалов, одновременно улучшая структурную упругость и создавая

Таблица
Сравнительный анализ соответствующих биомиметических структур древесины

Критерий	Зонтик Метрополь	Центр Помпиду-Мец	Целлюлозный павильон	Исследовательский павильон ITECH	Павильон Bowooss
Биомиметический тип	Морфологический	Морфологический	Функциональная	Структурный/технологический подход	Структурный/технологический подход
Параметрический метод	Вычислительныйпоиск формы	Алгоритмы плетения	Генеративные клеточные алгоритмы	Агентное моделирование	Алгоритмы роста
Лесозаготовительная система	LVL	Клееный брус	Композиты на основе целлюлозы	Тонкослойные деревянные планки	Ламели, изогнутые паром
Столярная система	Блокирующие соединения с ЧПУ	Сборные соединения с ЧПУ	Клеевое соединение	Роботизированное ламинирование	Роботизированные резбовые соединения
Результат деятельности	Высокая конструктивная эффективность	Оптимальная материальная эффективность	Высокое соотношение жесткости к весу	Исключительная несущая способность	Адаптируемая структурная целостность
Структурная система	Гибридная оболочка и каркас	Решетчатая оболочка	Легкая оболочка	Структура оболочки	Ветвящаяся рама
Экологическая интеграция	Пассивное затенение, вентиляция	Естественная вентиляция, затенение	Улучшенный воздушный поток	Затенение, теплоизоляция	Естественное освещение, вентиляция
Материальная эффективность	Умеренный (~85 %)	Высокий (~90 %)	Очень высокий (~95 %)	Высокий (~93 %)	Высокий (~92 %)
Масштаб проекта	Городская структура	Масштабный музей	Сооружение в масштабе павильона	Масштаб павильона	Масштаб павильона
Биофильное качество	Высокий	Средний	Высокий	Высокий	Высокий
Пользовательский опыт	Динамичное, интерактивное общественное пространство	Привлекательные выставочные пространства	Захватывающий и визуально поразительный	Выразительный, захватывающий	Органичный, захватывающий

tural, environmental, and spatial needs. The iterative nature of parametric workflows provides architects with the necessary flexibility and precision to handle the irregular, organic geometries inherent in biomimetic inspirations, as evidenced by projects such as the ITECH Research Pavilion and the Pulp Pavilion. Architects can optimise their designs more effectively through computational tools that establish iterative feedback loops linking form creation with structural performance analysis and material limitations.

Grasshopper, with its Karamba3D plugin, delivers precise control, allowing for the accurate handling of complex shapes necessary for biomimetic timber construction methods. This enables the adjustment of structural performance, along with environmental and spatial adaptability, thereby bridging theoretical biomimetic concepts with practical architectural implementations.

Engineered Timber as an Ideal Medium for Biomimetic Parametricism
Laminated veneer lumber (LVL), glulam, and cross-laminated timber (CLT), alongside advanced cellulose-based composites, function as perfect materials for implementing biomimetic design geometries. Combining versatility and structural strength to enable the implementation of freeform shapes and intricate structural designs, as seen in projects like Centre Pompidou-Metz and Metropol Parasol. The anisotropic nature of timber matches biological structural strategies that follow directional principles, which optimise load distribution for enhanced structural efficiency.

The sustainable qualities of timber and its carbon-sequestering capabilities strongly resonate with the ecological principles that drive biomimicry.

динамичные формы, которые привлекают пользователей на уровне опыта.

Архитектурный дизайн включает в себя минимизацию использования материалов и распределение нагрузок наряду с динамическим формированием форм, поскольку биомиметическое вдохновение выходит за рамки чисто эстетических соображений. Метрополь Парасоль, вдохновленный моделями роста грибов, использует структурную экономичность природы для создания прочной, но эффективной с точки зрения использования материалов гибридной системы оболочки и каркаса. Центр Помпиду-Мец аналогичным образом интегрирует принципы плетения, переводя естественную структурную логику в оптимизированные деревянные системы с решетчатой оболочкой, которые минимизируют потребление материалов и максимально повышают эффективность использования пространства.

Роль параметрических инструментов в переносе биологии в архитектуру. Инструменты параметрического проектирования предоставляют необходимую функциональность для преобразования сложных биологических моделей в практические архитектурные формы. Архитекторы используют вычислительные алгоритмы для моделирования и анализа биомиметических принципов, что позволяет оптимизировать процессы проектирования с учетом структурных, экологических и пространственных потребностей. Итеративный характер параметрических рабочих процессов предоставляет архитекторам необходимую гибкость и точность для работы с нерегулярными органическими геометриями, присущими биомиметическим вдохновениям, о чем свидетельствуют такие проекты, как Исследовательский павильон ITECH и Целлюлозный павильон. Архитекторы могут более эффективно оптимизировать свои проекты с помощью вычислительных инструментов, которые создают итеративные циклы обратной связи, связывающие создание форм с анализом структурных характеристик и ограничениями материалов.

Grasshopper с плагином Karamba-3D обеспечивает точное управление, которое позволяет аккуратно обрабатывать сложные формы, необходимые для биомиметических методов строительства из дерева, позволяя регулировать структурные характеристики наряду с экологической

Renewable sourcing and enhanced lifecycle performance further align with sustainability agendas, reinforcing the viability of biomimetic parametric timber design.

Technological and Architectural Implications

Technologically, integrating robotic and CNC-based fabrication methods emerges as integral to realising complex timber geometries informed by biomimetic and parametric design strategies. The ITECH Research Pavilion and Bowooss Pavilion demonstrate the application of digital fabrication technologies, such as robotic lamination and precision carving, which enable rapid production of complex timber structures with improved precision and minimal waste, significantly streamlining construction processes and ensuring the cost-effective and precise implementation of innovative designs.

Assembly strategies are similarly advanced through the use of modular, interlocking, and digitally prefabricated timber elements, as demonstrated in the Metropol Parasol and Centre Pompidou-Metz. These methods reduce construction complexity while shortening project timelines and minimising waste, resulting in significant economic and environmental benefits. Biomimetic-parametric timber structures merge structural engineering with architectural sculpture to create new aesthetic paradigms which feature expressive, organic shapes and spatial fluidity. The combination of structural logic and organic design aids architectural discussions by developing innovative approaches that integrate functional performance with aesthetic and experiential quality.

и пространственной адаптируемостью, соединяя теоретические биомиметические концепции с практической архитектурной реализацией.

Искусственная древесина как идеальная среда для биомиметического параметризма. Пиломатериалы из слоеного шпона (LVL), клееная древесина и перекрестно склеенный брус (CLT), наряду с передовыми композитными материалами на основе целлюлозы, являются идеальными материалами для реализации биомиметических геометрических конструкций. Они сочетают в себе универсальность и прочность конструкции, что позволяет создавать формы свободной формы и сложные конструкции, как, например, в проектах Centre Pompidou-Metz и Metropol Parasol. Анизотропная природа древесины соответствует биологическим структурным стратегиям, которые следуют принципам направленности, оптимизирующим распределение нагрузки для повышения структурной эффективности.

Устойчивые качества древесины и ее способность поглощать углерод в полной мере соответствуют экологическим принципам, лежащим в основе биомимикрии. Возобновляемые источники сырья и улучшенные характеристики жизненного цикла еще больше соответствуют программам устойчивого развития и укрепляют жизнеспособность биомиметического параметрического проектирования из древесины.

Технологические и архитектурные последствия.

С технологической точки зрения, интеграция роботизированных и ЧПУ-методов производства становится неотъемлемой частью реализации сложных деревянных конструкций, основанных на биомиметических и параметрических стратегиях проектирования. Исследовательский павильон ITECH и павильон Бовус демонстрируют применение цифровых технологий производства, таких как роботизированное ламинирование и прецизионная резка, которые позволяют быстро изготавливать сложные деревянные конструкции с повышенной точностью и минимальным количеством отходов, что значительно оптимизирует процессы строительства и обеспечивает экономичную и точную реализацию инновационных проектов.

Table 1 shows a comparative analysis of the respective biomimetic timber structures

Criteria	Metropol Parasol	Centre Pompidou-Metz	Pulp Pavilion	ITECH Research Pavilion	Bowooss Pavilion
Biomimetic Type	Morphological	Morphological			
*	Functional	Structural/Process-based			
*	Structural/Process-based				
Parametric Technique	Computational form-finding	Weaving algorithms	Generative cellular algorithms	Agent-based modeling	Growth algorithms
Timber System	LVL	Glulam	Cellulose-based composites	Thin-ply timber strips	Steam-bent lamellae
Joinery System	Interlocking CNC joints	CNC prefabricated joints	Adhesive bonding	Robotic lamination	Robotic carving joints
Performance Outcome	High structural efficiency	Optimal material efficiency	High stiffness-to-weight ratio	Exceptional load-bearing efficiency	Adaptable structural integrity
Structural System	Hybrid shell and frame	Grid-shell	Lightweight shell	Shell structure	Branching frame
Environmental Integration	Passive shading, ventilation	Natural ventilation, shading	Enhanced airflow	Shading, thermal insulation	Natural lighting, ventilation
Material Efficiency	Moderate (~85%)	High (~90%)	Very High (~95%)	High (~93%)	High (~92%)
Project Scale	Urban structure	Large-scale museum	Pavilion-scale structure	Pavilion-scale	Pavilion-scale
Biophilic Quality	High	Medium	High	High	High
User Experience	Dynamic, interactive public space	Engaging exhibition spaces	Immersive and visually striking	Expressive, immersive	Organic, immersive

Стратегии сборки также усовершенствованы за счет модульных, взаимосвязанных и цифровых сборных деревянных элементов, как показано в Метрополь Парасоль и Центр Помпиду-Мец. Эти методы снижают сложность строительства, сокращают сроки реализации проектов и уменьшают количество отходов, что приводит к значительным экономическим и экологическим преимуществам. Биомиметические параметрические деревянные конструкции объединяют инженерное строительство с архитектурной скульптурой, создавая новые эстетические парадигмы, которые отличаются выразительными, органичными формами и пространственной плавностью. Сочетание структурной логики и органичного дизайна способствует архитектурным дискуссиям, развивая инновационные подходы, которые объединяют функциональные характеристики с эстетическим и эмпирическим качеством.

Ограничения и критические размышления. Биомиметические параметрические деревянные конструкции обладают существенными преимуществами, но при этом сталкиваются со значительными ограничениями и проблемами. Главными из них являются сложность и связанные с ней затраты на передовые технологии цифрового производства, которые в настоящее время ограничивают их широкое применение в основной архитектурной практике. Огромные инвестиции в специализированное оборудование и экспертные знания для роботизированного производства и высокоточных технологий ЧПУ ограничивают их использование в дорогостоящих проектах или экспериментальных приложениях.

Процесс преобразования биологических моделей в архитектурные проекты требует тщательного анализа, чтобы избежать как чрезмерного упрощения сложных систем, так и несоответствующего применения. Как показывает опыт некоторых биомиметических приложений, поверхностное использование биологических форм без глубокого структурного или экологического обоснования может привести к получению в основном декоративных результатов, а не действительно функциональных. Обеспечение надежной интеграции биологических принципов в архитектурные структуры требует междис-

циплинарного сотрудничества и тщательной проверки с помощью моделирования и эмпирических испытаний.

Еще одним серьезным ограничением является зарождающееся состояние интеграции экологических данных во многие параметрические биомиметические рабочие процессы. Архитектурная практика продолжает развивать системы обратной связи с окружающей средой в режиме реального времени, в то время как комплексное энергетическое моделирование и оценка жизненного цикла остаются развивающимися областями, которые указывают на необходимость передовых вычислительных инструментов и методологий проектирования. Для решения этих задач нам необходимо продвигаться в направлении интегрированных биоинспирированных рабочих процессов, которые демонстрируют истинную экологическую эффективность и устойчивость, а не просто производят биоморфную эстетику.

Значимость и новизна. В исследовании представлена проверенная таксономия типологий биомиметической древесины, основанная на эмпирических примерах, которая объединяет теорию архитектурного проектирования и методы цифрового производства. Исследование устанавливает четкую классификацию морфологических, структурных/формальных, функциональных и процессуальных элементов, что дает архитекторам систематическую основу для реализации принципов биомиметики. Исследование демонстрирует, как инженерная древесина является экологически чистым материалом, который позволяет создавать сложные биомиметические конструкции и новые архитектурные формы.

Сочетание параметрических техник с принципами биомиметики вызывает широкую дискуссию о методах устойчивого строительства из древесины. Это исследование расширяет архитектурные знания, демонстрируя, как параметризм может взаимодействовать с биомиметикой и технологиями инженерной древесины для создания устойчивых, эффективных и инновационных архитектурных решений. Этот синтез имеет глубокие последствия, которые позволяют архитекторам искать пути экологической и структурной оптимизации, побуждая их исследовать более широкие междисциплинарные методы проектирования и строительства.

Limitations and Critical Reflections

Biomimetic parametric timber structures exhibit substantial benefits yet face considerable limitations and challenges. Foremost among these is the complexity and associated costs of advanced digital fabrication technologies, which currently limit widespread adoption within mainstream architectural practice. Considerable investments in specialised equipment and expertise for robotic fabrication and high-precision CNC technologies limit their use in expensive projects or experimental applications.

The process of converting biological models into architectural designs demands meticulous analysis to prevent both oversimplifying complex systems and making unsuitable applications. As observed in some biomimetic applications, superficial adoption of biological forms without deep structural or ecological rationale can lead to primarily decorative outcomes rather than genuinely performative. Ensuring robust integration of biological principles into architectural frameworks demands interdisciplinary collaboration and meticulous validation through simulation and empirical testing.

Another critical limitation is the nascent state of environmental data integration within many parametric-biomimetic workflows. Architectural practice continues to develop real-time environmental feedback systems. At the same time, comprehensive energy modelling and lifecycle assessments remain emerging fields that indicate the need for advanced computational tools and design methodologies. We need to advance toward integrated bio-inspired workflows that demonstrate actual ecological performance and

resilience, rather than merely producing biomorphic aesthetics, to address these challenges.

Significance and Novelty

The study presents a validated taxonomy of biomimetic timber typologies, derived from empirical case studies, that unifies architectural design theory and digital fabrication methods. The research establishes distinct classifications of morphological, structural/formal, functional, and process-based elements, which provides architects with a systematic framework for implementing biomimetic principles. The study demonstrates how engineered timber serves as an environmentally friendly material that enables the creation of complex biomimetic structures and new architectural expressions.

The combination of parametric techniques with biomimetic principles creates broader discussions about sustainable timber construction methods. This study enhances architectural knowledge by demonstrating how parametricism can be combined with biomimicry and engineered timber technologies to create sustainable, performative, and innovative architectural outcomes. This synthesis presents profound implications that enable architects to pursue ecological and structural optimisation pathways, prompting them to investigate broader interdisciplinary design and construction methods.

The investigation of contemporary biomimetic parametric timber structures reveals important possibilities and obstacles within contemporary architectural design that necessitate ongoing research and innovation to harness this design approach fully.

Исследование современных биомиметических параметрических деревянных конструкций выявляет важные возможности и препятствия в современном архитектурном проектировании, которые требуют постоянных исследований и инноваций для полного использования этого подхода к проектированию.

Вывод

Это исследование подчеркивает биомиметические принципы как чрезвычайно ценный и научно обоснованный источник архитектурных инноваций. Систематическое изучение отдельных примеров показывает, как решения, вдохновленные природой, существенно влияют на структурные и формальные инновации. Практика биомимикрии выходит за рамки эстетического копирования природных форм, поскольку она включает в себя эффективное использование материалов и оптимальное распределение нагрузки в сочетании с динамичным планированием пространства, что позволяет имитировать биологическую устойчивость и адаптивность в процессе архитектурного проектирования.

Инструменты параметрического проектирования стали важными посредниками, которые соединили биологическую логику с практической архитектурной реализацией посредством моделирования и оптимизации стратегий, вдохновленных биологией. Они обеспечивают критически важные итеративные циклы обратной связи, предлагая точность, адаптивность и строгость, необходимые для управления сложными органическими геометриями, присущими биомиметическим подходам к проектированию. Гибкость и вычислительные мощности имеют решающее значение для преобразования биологических аналогов в пригодные для строительства, структурно прочные и экологически адаптивные деревянные конструкции.

Искусственная древесина, в частности, изготовленная с помощью цифровых технологий, продемонстрировала значительную прочность и экологичность как идеальный материал. Обладая анизотропными свойствами, которые обеспечивают структурную устойчивость и способность к улавливанию углерода, она хорошо соответствует принципам биомиметического дизайна, позволяя создавать

точные геометрические формы с учетом экологических факторов. Использование робототехнических и ЧПУ-технологий производства позволило создать эффективный процесс строительства, который минимизировал количество отходов и улучшил структурные характеристики, продемонстрировав потенциал древесины для сложных архитектурных проектов.

Благодаря тематическим исследованиям и сравнительным анализам обе основные гипотезы получили подтверждение, что свидетельствует о том, что объединение логики биомиметического проектирования с параметрическим проектированием значительно улучшает архитектурные, структурные и экологические аспекты деревянных конструкций. Результаты исследований и тщательные оценки показали, что такие интегративные подходы выходят за рамки эстетической ценности и приводят к количественным улучшениям в области эффективности, устойчивого проектирования и качества пространства.

Исследование создает основу, связывающую биомиметические принципы с вычислительным проектированием и технологиями инженерной деревообработки, обеспечивая необходимую базу для анализа и внедрения, что позволяет лучше понять, как эти дисциплины интегрируются в единое целое. Практическое применение этого подхода может побудить архитекторов применять методологии, основанные на биологических знаниях, и инновационные материалы, которые превращают традиционное деревянное строительство в устойчивые, выразительные архитектурные достижения.

Будущие исследования должны быть направлены на изучение современных деревянных конструкций, которые воспроизводят биологические явления, такие как тропизм и фототропизм. Сочетание искусственного интеллекта с алгоритмами машинного обучения открывает ряд возможностей для совершенствования биомиметических форм за счет более точного прогнозирования характеристик и адаптивных возможностей. Развитие деревянных конструкций за счет повышения их устойчивости и инноваций требует более тесного междисциплинарного сотрудничества между архитектурой, биологией,

Conclusion

This research highlights biomimetic principles as a profoundly valuable and scientifically robust source for architectural innovation. Through the systematic examination of selected case studies, underscoring how nature-inspired solutions significantly inform structural and formal innovation. The practice of biomimicry extends beyond the aesthetic duplication of natural forms by fundamentally incorporating material efficiency and optimal load distribution, along with dynamic space planning, which emulates biological resilience and adaptability into the architectural design process.

Parametric design tools became essential mediators that bridged biological logic with practical architectural implementation through simulation and optimising bio-inspired strategies. Providing critical iterative feedback loops, offering precision, adaptability, and rigour necessary for managing complex organic geometries inherent to biomimetic design approaches. The flexibility and computational capacity are critical in translating biological analogues into buildable, structurally sound, and environmentally responsive timber structures.

Engineered timber, particularly through digital fabrication, demonstrated substantial robustness and sustainability as an ideal material medium. Possessing anisotropic properties that support structural resilience and carbon sequestration capabilities aligns well with biomimetic design principles, enabling precise geometries that consider ecological factors. Implementing robotic and CNC-based fabrication techniques created an efficient construc-

tion process, which minimised waste and improved structural performance, demonstrating timber's potential for complex architectural designs.

Through case studies and comparative analyses, both central hypotheses received validation, demonstrating that merging biomimetic design logic with parametric design significantly improves the architectural, structural, and ecological aspects of timber structures. Research evidence and thorough assessments showed that such integrative approaches go beyond aesthetic value to produce quantifiable advancements in efficiency, sustainable design, and spatial quality.

The research establishes a framework that links biomimetic principles to computational design and engineered timber technologies, providing essential groundwork that supports analysis and implementation, thereby enhancing the understanding of how these disciplines integrate cohesively. The practical application of this approach can lead architects to adopt bio-inspired methodologies and material innovation that transform conventional timber construction into sustainable, expressive architectural achievements.

Future research should explore advanced timber systems that replicate biological behaviour, such as tropism and phototropism. The combination of artificial intelligence with machine learning algorithms creates several possibilities for enhancing biomimetic forms by enabling better performance prediction and adaptive capabilities. The advancement of timber design through resilience enhancement and innovation requires increased interdisciplinary cooperation between architecture, biology, robotics, and material science to produce innovative solutions.

робототехникой и материаловедением для создания инновационных решений.

Литература

1. Lehmann, S., & Kremer, P. D. (2023). Filling the Knowledge Gaps in Mass Timber Construction: Where are the Missing Pieces, What are the Research Needs? Vol. 6.
2. Oxman, R. (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, 52, 4–39. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001>
3. Schumacher, P. (2016). Parametricism 2. 0: Gearing up to impact the global built environment. *Architectural Design*, 86(2), 8–17. <https://doi.org/10.1002/ad.2018>
4. Menges, A., & Knippers, J. (2015). Fibrous tectonics. *Architectural Design*, 85(5), 40–47. <https://doi.org/10.1002/ad.1952>
5. Benyus, J. M. (2009). *Biomimicry: Innovation inspired by nature* (Nachdr.). Perennial.
6. Knippers, J., Nickel, K. G., & Speck, T. (Eds.). (2016). *Biomimetic research for architecture and building construction* (Vol. 8). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46374-2>
7. Durai Prabhakaran, R. T., Spear, M. J., Curling, S., Wootton-Beard, P., Jones, P., Donnison, I., & Ormondroyd, G. A. (2019). Plants and architecture: The role of biology and biomimetics in materials development for buildings. *Intelligent Buildings International*, 11(3–4), 178–211. <https://doi.org/10.1080/17508975.2019.1669134>
8. Eversmann, P., Gramazio, F., & Kohler, M. (2017). Robotic prefabrication of timber structures: Towards automated large-scale spatial assembly. *Construction Robotics*, 1(1), 49–60. <https://doi.org/10.1007/s41693-017-0006-2>
9. Pawlyn, M. (2019). *Biomimicry in architecture* (2nd ed.). RIBA Publishing. <https://doi.org/10.4324/9780429346774>
10. Oxman, R., & Oxman, R. (2010). New structuralism: Design, engineering and architectural technologies. *Architectural Design*, 80(4), 14–23. <https://doi.org/10.1002/ad.1101>
11. Green, M. (2012). The case for tall wood buildings. Canadian Wood Council. <https://cwc.ca/wp-content/uploads/2020/06/Second-Edition-The-Case-for-Tall-Wood-Buildings.pdf>
12. Menges, A. (2015). The new cyber-physical making in architecture: Computational construction. *Architectural Design*, 85(5), 28–33. <https://doi.org/10.1002/ad.1950>

References

- Benyus, J. M. (2009). *Biomimicry: Innovation inspired by nature* (Nachdr.). Perennial.
- Durai Prabhakaran, R. T., Spear, M. J., Curling, S., Wootton-Beard, P., Jones, P., Donnison, I., & Ormondroyd, G. A. (2019). Plants and architecture: The role of biology and biomimetics in materials development for buildings. *Intelligent Buildings International*, 11(3–4), 178–211. <https://doi.org/10.1080/17508975.2019.1669134>
- Eversmann, P., Gramazio, F., & Kohler, M. (2017). Robotic prefabrication of timber structures: Towards automated large-scale spatial assembly. *Construction Robotics*, 1(1), 49–60. <https://doi.org/10.1007/s41693-017-0006-2>
- Green, M. (2012). *The case for tall wood buildings*. Canadian Wood Council. <https://cwc.ca/wp-content/uploads/2020/06/Second-Edition-The-Case-for-Tall-Wood-Buildings.pdf>
- Knippers, J., Nickel, K. G., & Speck, T. (Eds.). (2016). *Biomimetic research for architecture and building construction* (Vol. 8). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46374-2>
- Lehmann, S., & Kremer, P. D. (2023). *Filling the Knowledge Gaps in Mass Timber Construction: Where are the Missing Pieces, What are the Research Needs?* (Vol. 6).
- Menges, A. (2015). The new cyber-physical making in architecture: Computational construction. *Architectural Design*, 85(5), 28–33. <https://doi.org/10.1002/ad.1950>
- Menges, A., & Knippers, J. (2015). Fibrous tectonics. *Architectural Design*, 85(5), 40–47. <https://doi.org/10.1002/ad.1952>
- Oxman, R. (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, 52, 4–39. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001>
- Oxman, R., & Oxman, R. (2010). New structuralism: Design, engineering and architectural technologies. *Architectural Design*, 80(4), 14–23. <https://doi.org/10.1002/ad.1101>
- Pawlyn, M. (2019). *Biomimicry in architecture* (2nd ed.). RIBA Publishing. <https://doi.org/10.4324/9780429346774>
- Schumacher, P. (2016). Parametricism 2. 0: Gearing up to impact the global built environment. *Architectural Design*, 86(2), 8–17. <https://doi.org/10.1002/ad.2018>