

DOI 10.15826/rjct.2025.1.006

УДК 624.042.2:536.24

Ю. И. Гольдберг <sup>1</sup>, И. Н. Мальцева <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: <sup>1</sup> uigoldberg@gmail.com, <sup>2</sup> i.n.maltceva@urfu.ru

## АЭРОДИНАМИКА ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ НА ОПЫТЕ ТРЕХ МИРОВЫХ ГИГАНТОВ

**Аннотация.** Статья посвящена изучению особенностей конструкций и методикам расчета ветровых нагрузок на три известных высотных объекта: Останкинскую телебашню (Москва, Россия), Кантонскую башню (Гуанчжоу, Китай) и Бурдж-Халифу (Дубай, ОАЭ). Рассматривается историческая динамика подходов к строительству высоких зданий, демонстрируется развитие концепции от пассивной защиты к активной адаптации к условиям окружающей среды. Акцент сделан на анализе конструктивных элементов, способствующих снижению ветровых воздействий, включая использование новейших строительных материалов, аэродинамическое формообразование и внедрение систем демпфирования. Исследование выявляет ключевые тенденции современной инженерии высотных построек, показывая необходимость комплексного подхода к обеспечению надежности и комфортности эксплуатации сверхвысоких зданий. В заключение даны рекомендации по внедрению основных критериев для решения вопросов аэродинамики, рассмотрены дальнейшие векторы технологического развития расчета ветровых нагрузок.

**Ключевые слова:** аэродинамика, ветровые нагрузки, строительство, BIM-технологии, Останкинская телебашня, Кантонская башня, Бурдж-Халифа

**Для цитирования:** Гольдберг. Ю. И., Мальцева И. Н. Аэродинамика высотных зданий на опыте трех мировых гигантов // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2025. – Т. 11. – № 1. – 1101006. – DOI 10.15826/rjct.2025.1.006.

*I. I. Goldberg <sup>1</sup>, I. N. Maltseva <sup>2</sup>*

<sup>1,2</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

e-mail: <sup>1</sup> uigoldberg@gmail.com, <sup>2</sup> i.n.maltceva@urfu.ru

## AERODYNAMICS OF HIGH-RISE BUILDINGS AS EXPERIENCED BY THREE GIANTS

**Abstract.** The article is devoted to the study of the design features and methods of calculating wind loads on three well-known high-rise buildings: the Ostankino TV Tower (Moscow, Russia), the Canton Tower (Guangzhou, China), and the Burj Khalifa (Dubai, UAE). The historical dynamics of approaches to the construction of high-rise buildings were examined and the development of the concept from passive protection to active adaptation to environmental conditions were demonstrated. The focus is on the analysis of structural elements that contribute to reducing wind loads, including the use of advanced building materials, aerodynamic shaping, and the implementation of damping systems. The study reveals key trends in modern high-rise engineering, showing the need for a comprehensive approach to ensuring the reliability and comfort of operation of ultra-high buildings. Finally, recommendations are given on the implementation of basic criteria for solving aerodynamics issues, and further vectors of technological

development for calculating the wind loads.

**Key words:** aerodynamics, wind loads, civil engineering, BIM technologies, Ostankino TV Tower, Canton Tower, Burj Khalifa

**For citation:** Goldberg I. I., Maltseva I. N. (2025) Aerodynamics of high-rise buildings as experienced by three giants. Russian Journal of Construction Science and Technology. 11(1). 1101006. (In Russ.) DOI 10.15826/rjct.2025.1.006.

## 1. Введение

В условиях активного развития высотного строительства по всему миру возникают новые методы проектирования строительных конструкций. Особое внимание уделяется вопросам устойчивости и прочности сооружений, поскольку значительное воздействие на них оказывает ветер. Возникающие ветровые нагрузки требуют точного учета и моделирования, для обеспечения надежности и долговечности конструкций на протяжении всего жизненного цикла здания [1, 2].

На величину ветровой нагрузки влияют многочисленные факторы: скорость ветра согласно нормам, ветровой район, местоположение, характер поверхности земли и климатические условия региона. Различные виды ландшафта и особенностей местности приводят к специфическим поправкам, корректирующим значения скорости ветра относительно стандартных условий ровной местности [3].

Исследование сосредоточено на анализе трех уникальных высотных сооружений: Останкинской телебашне (Москва, Россия), Кантоне (Гуанчжоу, Китай) и Бурдж Халифе (Дубай, Объединённые Арабские Эмираты). Эти объекты представляют собой наиболее репрезентативные случаи для изучения влияния климатических факторов, почвенных условий и типов ветров.

Современные тенденции в строительстве подчеркивают важность разработки инновационных решений для минимизации негативного воздействия ветра на конструкции зданий. Помимо архитектурных форм и конструктивных элементов, устойчивое проектирование

должно учитывать экологические и социальные аспекты жизнедеятельности людей.

Целью исследования является проведение сравнительного анализа конструктивных особенностей трех вышеуказанных высотных сооружений с учетом различий в климатических условиях, свойствах грунта и преобладающих направлениях ветра. Необходимо выявить общие принципы и выработать практические рекомендации для дальнейшего проектирования аналогичных объектов.

Актуальность выбранной темы обусловлена ускоренным ростом вертикального строительства в мегаполисах мира. Такие уникальные строения высотой более 500 м становятся визитной карточкой городов, стимулируя развитие современных технологий и строительной индустрии. Они также формируют имидж города и способствуют экономическому росту регионов.

Таким образом, были сформулированы основные выводы для расчета аэродинамики:

- высокие требования к точности расчетов ветровых нагрузок;
- важность адаптации методик проектирования к местным условиям;
- значение эколого-комфортных аспектов в создании устойчивого дизайна.
- перспективы модернизации существующих подходов и создание рекомендаций для повышения эффективности и безопасности высотных зданий.

## **2. Геологические и климатические факторы, влияющие на проектирование высотных строений**

Проектирование высотных зданий в Москве, Гуанчжоу и Дубае существенно отличается из-за различных природных факторов. Рассмотрим ключевые отличия.

1. Москва расположена в умеренном континентальном климатическом поясе, характеризуется холодной зимой и теплым летом. Климатические условия накладывают ограничения на выбор материалов и технологии строительства, особенно учитывая сильные морозы и снеговые нагрузки. Особенности грунтов (например, наличие глинистых пород и заболоченность отдельных районов) требуют тщательного инженерно-геологического обследования и специальных мер по укреплению фундаментов. В данной местности часто используются традиционные бетонные и стальные каркасные конструкции, активно внедряются энергоэффективные решения и современные фасадные системы. Современные высотные башни отличаются продуманностью инженерных коммуникаций и применением передовых цифровых технологий для управления зданием («умные дома»).

2. Город Гуанчжоу находится в субтропической зоне с влажным муссонным климатом, характеризующимся жарким и дождливым летом, и мягкой зимой. Особые риски связаны с тропическими циклонами и сильными ливнями, что требует повышенной защиты от влаги и ветроустойчивости. Грунт преимущественно песчано-глинистый, часто подверженный эрозии, что предъявляет особые требования к фундаментам и подземным конструкциям. В районах с таким климатом активно используются легкие металлоконструкции и композитные материалы. Применяются разнообразные инновационные технологии для уменьшения веса конструкции и повышения сейсмостойкости. Часто применя-

ются гибридные строительные технологии, объединяющие преимущества бетона и стали.

3. Дубай расположен в пустынной зоне с экстремально высокими температурами и низкой влажностью воздуха. Основной риск для высотных построек – это сильная жара и пылевые бури. Архитектурные решения направлены на обеспечение максимального уровня теплоизоляции и защиту от солнца, использование легких структурных материалов и системы вентиляции, снижающей тепловую нагрузку внутри помещений. Отличается использованием ультрасовременных строительных технологий, включающих активные фасады, солнечные панели и специальные покрытия, защищающие от перегрева. Распространены стеклянные фасады с высоким уровнем солнцезащиты и энергосберегающими характеристиками.

Таким образом, каждая из указанных территорий имеет свою уникальную стратегию проектирования высотных зданий, определяемую природными условиями.

## **3. Анализ конструкций исследуемых объектов**

### **3.1. Особенности архитектуры и строительного материала Останкинской телебашни**

Останкинская телебашня высотой 535 метров является символом столицы России и воплощением современных инженерных решений. Она занимает четвертое место в мире по высоте среди аналогичных сооружений.

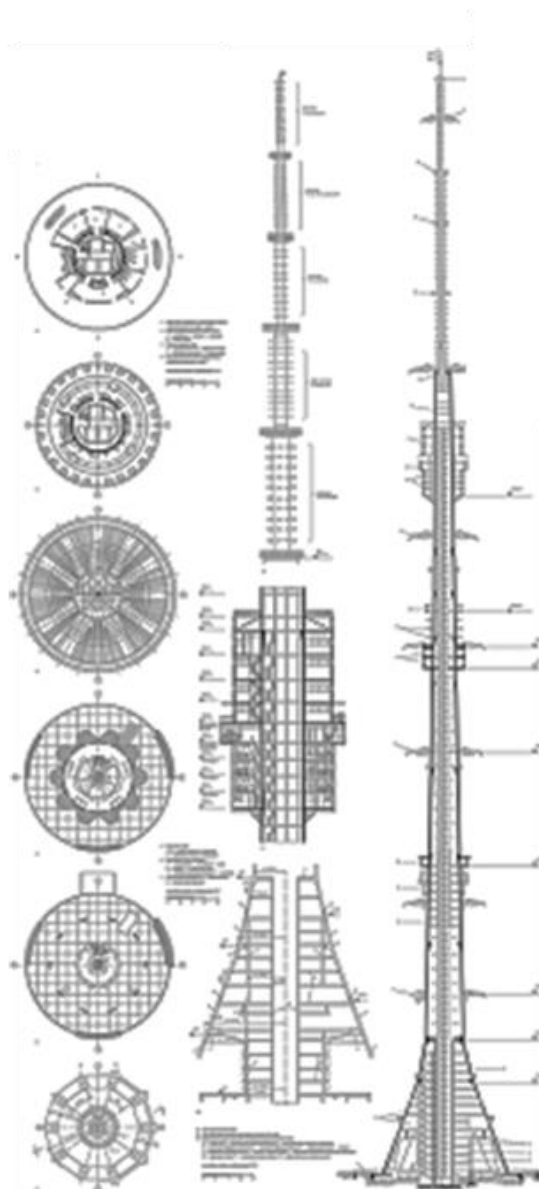
До начала проектирования Останкинской башни, в период до 1963 года, все строения высотой более 500 м возводились исключительно из металлических конструкций. Однако применение металла для столь масштабного проекта оказалось бы экономически нецелесообразным решением, поскольку потребовало бы значительных расходов на регулярное обслуживание. Для решения этой

проблемы инженеры обратились к бетону нового поколения.

Москва расположена в зоне умеренного континентального климата, характеризующегося значительными колебаниями температуры и влажности воздуха. Строительство велось на участке с нестабильным грунтом, что предъявляло дополнительные требования к конструкции фундамента.

Главный инженер Николай Васильевич Никитин предложил инновационное

решение: строительство башни из высокофункционального бетона XXI века до отметки +383,5 м (рис. 1). Разработанный кандидатом технических наук Борисом Давидовичем Тринкером, этот материал обладал уникальными свойствами: высокой прочностью, удобством укладки даже в сложных условиях, отличной стойкостью к низким температурам, огню и воде, а также долговечностью [4]. Такой выбор материала позволил существенно снизить затраты и повысить надежность конструкции.



**Рис. 1.** Конструкция Останкинской телебашни.

Источник: [https://pietrovsky.store/product/ostankinskaya\\_televizionnaya\\_bashnya\\_plakat/](https://pietrovsky.store/product/ostankinskaya_televizionnaya_bashnya_plakat/)

Фундамент башни был специально спроектирован с учетом особенностей грунта и климатических условий региона. С учетом того, что грунт достаточно устойчив, то было решено заложить фундамент на 4,65 м, и по расчетам предполагалось, что он осядет на 3–3,5 см. Отдельно был возведен фундамент ствола и главный фундамент башни, что позволяло распределять на грунт различное давление в случае неравномерной осадки и выдерживать все ветровые нагрузки. Благодаря грамотному проектированию, башня успешно справляется с серьезными испытаниями, такими как сильные ветры и пожары.

Например, в августе 2000 года произошел серьезный пожар на уровне около 460 метров над землей. Несмотря на экстремальные условия, включая высокую температуру пламени порядка 1000 градусов Цельсия, башня сохранила устойчивость и была восстановлена в кратчайшие сроки [5].

Еще одним важным аспектом надежности башни являются расчеты, проведенные вручную и на электронной вычислительной машине «Стрела». Эти расчеты позволили определить оптимальные конструктивные решения, обеспечивающие безопасность эксплуатации даже при сильных ветрах скоростью до 55,5 метров в секунду. Максимально возможное отклонение башни от вертикали составляет всего 12 метров. Телебашня служит ярким примером сочетания новаторских идей и инновационных материалов, демонстрируя высокие стандарты российского инженерного искусства.

### **3.2. Особенности архитектуры и строительного материала Кантонской башни**

Строительство Кантонской башни в Гуанчжоу (604 метра) началось в 2005 году, а в 2011-м она была открыта для посещения. Сегодня эта башня занимает второе место в мире по высоте среди те-

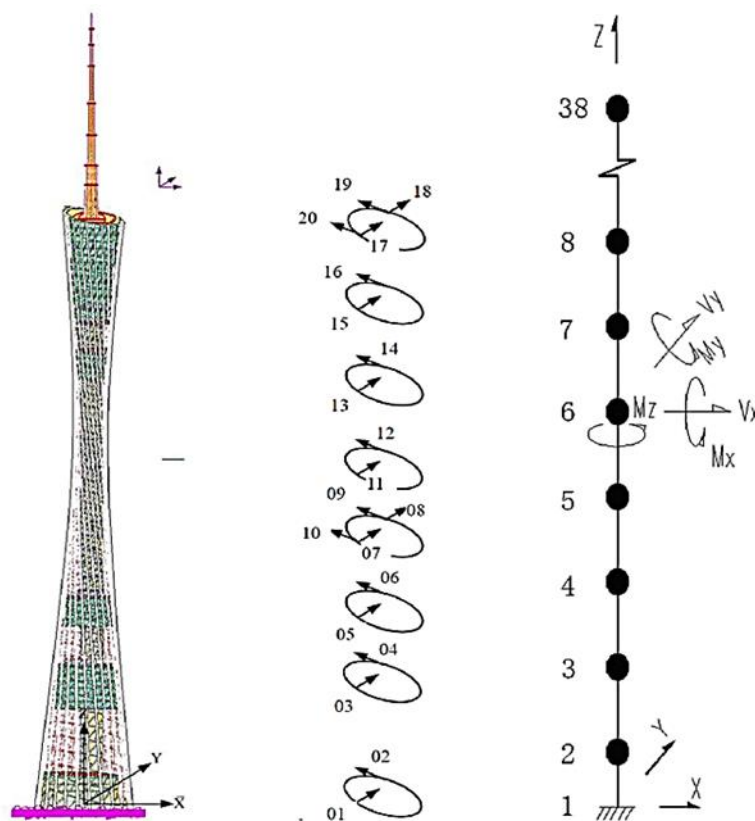
лебашен. Расположенная в районе Хайчжу рядом с Жемчужной рекой, башня построена на участке с характерными особенностями почвенного покрова, вызванными расположением в речной долине. Аллювиальные почвы, характерные для долины Жемчужной реки, обладают неоднородностью физических свойств [6]. Это означает, что в пределах одной строительной площадки могут встречаться различные типы грунтов, что существенно усложняет расчеты прочности и устойчивости конструкций. Основные проблемы, возникающие при строительстве на таких грунтах, включают склонность к ухудшению механических характеристик грунта, а также неравномерность осадок, приводящую к различным нагрузкам на фундамент и несущие элементы здания.

Климатические условия Гуанчжоу, характеризующиеся влажным субтропическим климатом, также оказывают значительное влияние на проектируемые нагрузки на строительные конструкции. Для решения указанных проблем была выбрана особая конструкция башни – спиральная форма. Центральная часть башни представляет собой железобетонный эллипсоидный стержень диаметром 15,6 метров и высотой 18,6 метров, окруженный решеткой из трубобетонных элементов. Эта структура формирует своеобразную «талию» башни, плотность которой возрастает ближе к центральной части и уменьшается у основания и вершины.

Для улучшения аэродинамических характеристик кольца расположены под углом 15 градусов, что позволяет ветровым потокам проходить сквозь конструкцию башни и попасть в ветровой коридор между сетчатыми конструкциями (рис. 2), уменьшая нагрузку на нее [7]. Башня способна выдерживать максимальную скорость ветра до 111 метров в секунду благодаря применению современных методов расчета, включая ис-

пользование САД-систем, моделирования методом вычислительной гидродинамики (CFD) и специализированных

программ для анализа ветровых воздействий.



**Рис. 2.** Схема расчета ветровых нагрузок на Кантонскую башню

Источник: [https://www.researchgate.net/figure/The-Canton-Tower-a-Actual-structure-b-full-finite-element-model-c-positions-of\\_fig1\\_262800057?utm\\_medium=organic&utm\\_source=yandexsmartcamera](https://www.researchgate.net/figure/The-Canton-Tower-a-Actual-structure-b-full-finite-element-model-c-positions-of_fig1_262800057?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera)

### 3.3. Особенности архитектуры и строительного материала Кантонской башни

Бурдж-Халифа высотой 828 метров на сегодняшний день остаётся самым высоким сооружением мира. Его строительство осуществлялось в сложных климатических условиях Объединённых Арабских Эмиратов, характеризующихся сухим и горячим тропическим пустынным климатом. Основание здания закреплено на нестабильных осадочных песчаных грунтах, что потребовало инновационных подходов при разработке фундамента. Решение оказалось оригинальным: основание представлено в форме буквы Y, состоящей из 192 свай

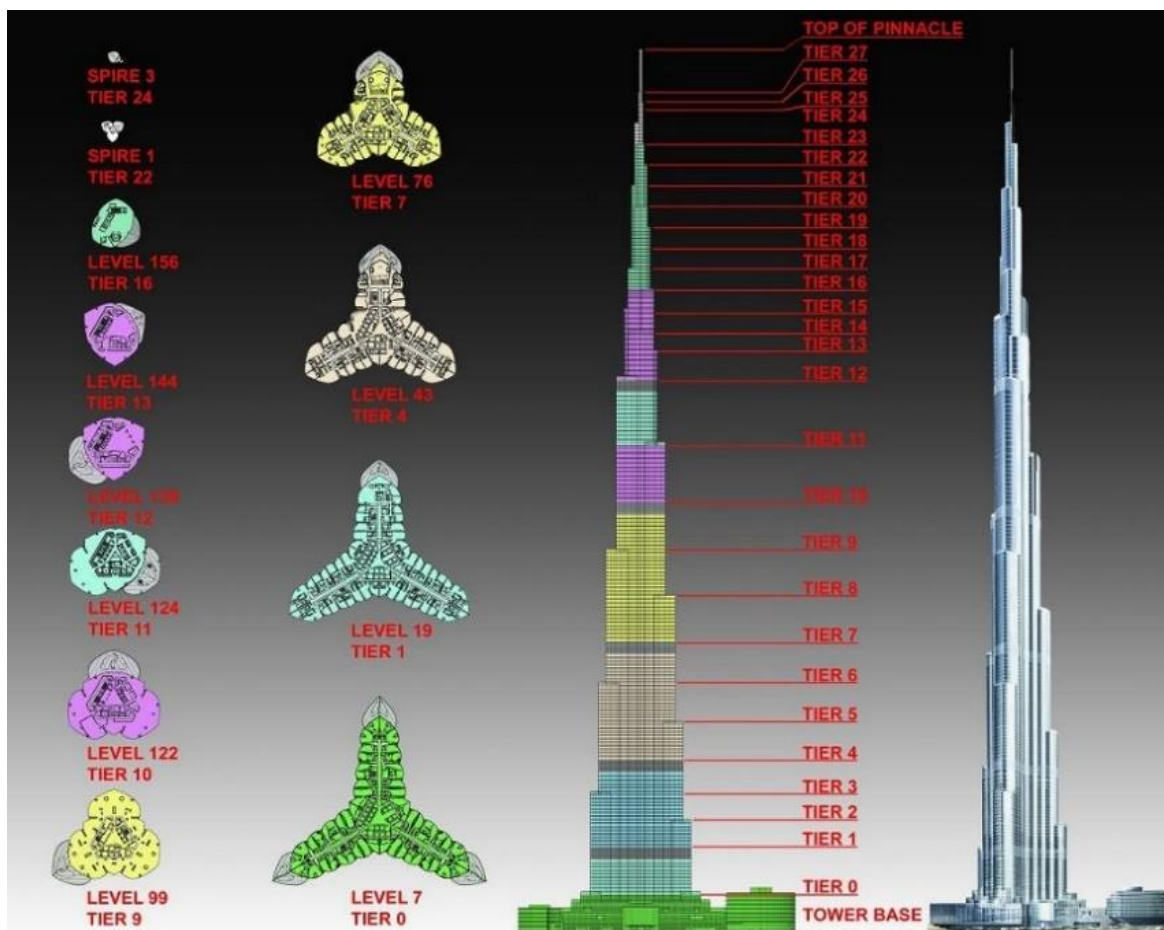
диаметром 1,5 метра и глубиной погружения 50 метров, объединённых мощной железобетонной плитой толщиной четыре метра [8].

Что касается внешнего облика, здание обладает уникальной формой, представленной тремя объемами, расположенными вокруг центра жесткости гексагонального сечения (рис. 3). Эта уникальная конфигурация помогает равномерно распределять нагрузку и минимизировать влияние сильных ветровых нагрузок, характерных для региона. Архитекторам пришлось учитывать сильные ветровые потоки пустыни, отличающиеся огромной силой. Поэтому перед строительством было проведено около

сорока комплексных испытаний масштабной модели здания в аэродинамических трубах. В ходе экспериментов было решено повернуть итоговый план на 60 градусов, что резко сократило силы в аэродинамической трубе. Теплый воздух поднимается в верхнюю часть здания, а холодный опускается в низшую часть, что негативно влияет на фундаментную плиту. Для устранения эффекта дымовой трубы были организованы специальные системы вентиляции [9].

В верхней части здания установлена активная масса-демпфер массой 700 тонн, позволяющая снизить колебания

при сильном ветре, достигающем скорости до 80 метров в секунду. Конструкция допускает максимальный прогиб всего на два метра, начинающийся с высоты 163 этажа вверх. Расчеты, как и в Кантонской башне, были выполнены с применением современных средств компьютерного проектирования (CAD) и вычислительной гидрогазодинамики (CFD), специализированного программного обеспечения для ветрового анализа. Уникальные инженерные и архитектурные решения обеспечили безопасность и надежность самого высокого небоскреба планеты.



**Рис. 3.** Конструктивная особенность небоскреба Бурдж-Халифа.

Источник: [https://archi.ru/projects/world/677/bashnya-burdzh-halifa?utm\\_medium=organic&utm\\_source=yandexsmartcamera](https://archi.ru/projects/world/677/bashnya-burdzh-halifa?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera)

#### **4. Применение аэродинамических форм и инновационных технологий**

Рассматривая конструктивные особенности Останкинской телебашни,

Кантонской башни и Бурдж-Халифа, проведём сравнительный анализ методов снижения ветровой нагрузки. Объекты были возведены в разные эпохи и

при различных геологических условиях, что позволяет проследить эволюцию инженерных решений – от традиционных расчётов вручную до внедрения современных компьютерных симуляций и амортизационных технологий.

#### **4.1. Конструктивные системы высотных зданий на ветровые воздействия**

Одним из ключевых направлений оптимизации формы высотного здания является учет влияния ветрового потока. Основные приемы включают: применение обтекаемых форм, скругление углов, сужение здания к верхней части, организация проемов, закручивание структуры, устройство аутригерных этажей [10, 11].

Основные принципы формирования ветроустойчивой формы Останкинской башни сводятся к следующему: использование преднапряжённого бетона; решётчатое основание и жесткая связь с фундаментом. Эти элементы обеспечивают устойчивость к сильным ветровым нагрузкам благодаря повышенной плотности материала и жесткой конструкции.

Гиперболоидная форма стального каркаса Кантонской башни эффективно распределяет ветер, значительно уменьшая парусность. Сетчатая конструкция обладает высоким аэродинамическим коэффициентом прозрачности, способствуя рассеиванию воздушных потоков.

Форма здания Бурдж Халифа напоминает цветок с закруглёнными углами и сужением к вершине. Габариты каждого этажа различны, что препятствует образованию когерентных вихрей и устраняет резонансные колебания.

#### **4.2. Эволюция парадигмы: от сопротивления к управлению**

Исторически Останкинская башня воплощала традиционную парадигму сопротивления ветру. Ее железобетонный конический ствол и система предварительного напряжения предназначены

для того, чтобы максимально эффективно «принять удар» и противостоять изгибающему моменту. Однако современные проекты, такие как Кантонская башня и Бурдж Халифа, демонстрируют принципиально иной подход. Кантонская башня и Бурдж-Халифа реализуют парадигму управления. Их аэродинамические формы не столько сопротивляются ветру, сколько перенаправляют и разрушают его энергичные вихри, тем самым снижая саму возбуждающую силу. Переход от физической силы к интеллектуальной стратегии стал ключевым фактором прогресса.

#### **4.3. Применение систем демпфирования**

Современные высотные здания оснащаются различными системами демпфирования, которые помогают снизить динамическое влияние ветра [12]. Бурдж Халифа оснащена настроенным массовым демпфером весом 800 тонн, расположенным на высоте 158-го этажа. Демпфер уменьшает амплитуду колебаний до приемлемых значений.

Кантонская башня оборудована двумя жидкостными демпферами на вертолетной площадке и двумя массовыми демпферами внутри мачты.

В структуре Останкинской телебашни на уровнях 63 и 337 метров установлены маятниковые гасители колебаний.

От простых пассивных решений (маятники) до сложных гибридных систем (TMD + TLD) эволюционировали методы борьбы с колебаниями, обеспечивая комфорт и надежность конструкций.

#### **4.4. Комплексность подходов**

Развитие технологий привело к появлению комплексного подхода в проектировании высотных сооружений. Современные объекты в более новых объектах (Кантонская башня и Бурдж-Халифа) сочетают аэродинамически опти-

мизированные каркасы и высокоэффективные системы демпфирования. Останкинская телебашня демонстрирует, что прагматичный подход тоже показывает эффективные показатели, однако она имеет самый большой коэффициент отклонения от вертикальной оси.

Анализируя исторические и современные практики, можно сделать вывод, что снижение ветровых нагрузок требует переосмысления распределения статической нагрузки на структурное ядро. Такой подход повышает прочность и экономичность проекта.

Таблица 1 иллюстрирует эволюцию методов снижения ветровых нагрузок на конструкции высотных зданий: от простого увеличения жесткости массивной

конструкции к сложному аэродинамическому формообразованию. Изначально усилия сосредоточивались исключительно на увеличении прочности массивных элементов, теперь же приоритет отдаётся интеллектуальным методикам проектирования. Современные стратегии решают комплексную задачу: обеспечение устойчивости, долговечности и комфорта при одновременной оптимизации материалоёмкости.

Таким образом, мы отмечаем, что современные строители перешли от простого укрепления зданий к интеграции их в существующие природные условия таким образом, чтобы минимизировать воздействие ветра ещё на стадии проектирования.

Таблица 1

**Сравнительная таблица методов, примененных на анализируемых объектах**

| Метод \ Объект                 | Останкинская телебашня (540 м)                  | Кантонская башня (600 м)       | Бурдж-Халифа (828 м)                      |
|--------------------------------|---|--------------------------------|---|
| Конструктивный                 | Жесткий ж/б ствол с предварительным напряжением | Стальной гиперболоидный каркас | Жесткое ядро и наружная стальная дифрагма |
| Формообразующий                | Каноническая форма, решетчатое основание        | Сложная скрученная форма       | Ступенчатое сужение «трехлучевой» формы   |
| Применение гасителей колебаний | Маятниковые гасители                            | Гибридная система TMD и TLD    | Настроенный массовый демпфер TMD          |

#### 4. Вывод

Исследование эволюции методов расчёта и защиты высотных сооружений от ветровой нагрузки показывает появление нового подхода – проактивного интеллектуального проектирования. Изучение исторических примеров, таких как Останкинская телебашня, Кантонская башня и небоскрёб Бурдж-Халифа, иллюстрирует эволюционный путь от пассивной устойчивости конструкции за счёт её жёсткости к активной оптимизации аэродинамических свойств.

Современная практика основана на трёх важнейших компонентах:

1. Аэродинамическое формообразование – проектирование геометрии здания для разрушения устойчивых воздушных потоков.
2. Адаптивное демпфирование – системы активного подавления вибраций в реальном времени.
3. Информационное моделирование (ТИМ) – комплексная цифровая модель всех этапов строительства и эксплуатации, способствующая повышению эф-

фективности проектирования и снижению материальных затрат.

Особую значимость приобретает внедрение технологий информационного моделирования (ТИМ), которые позволяют многократно проводить симуляции аэродинамической обстановки и механических нагрузок, сокращая расход материалов и повышая точность прогнозов поведения зданий при ветровых воздействиях. Современные расчётные программы обеспечивают интерактивный анализ модели, позволяя снижать максимальные нагрузки на сооружение примерно на 10–15%.

Перспективы дальнейшего развития

связаны с созданием интегральных систем, сочетающих предиктивные алгоритмы на основе искусственного интеллекта для прогнозирования ветровых режимов с актуальными данными мониторинга конструкций. Это позволит перейти к сквозному интеллектуальному моделированию жизненного цикла здания в ветровом потоке, что включает в себя создание адаптивных архитектурных систем, динамически оптимизирующих свои аэродинамические характеристики в ответ на изменяющиеся ветровые условия. Это открывает новые горизонты для строительства сверхвысоких сооружений.

### Список используемых источников

1. Галямичев, А. В. Анализ методик определения ветровой нагрузки / А. В. Галямичев, Д. И. Дьяков // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием. Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербург, 19–24 ноября 2018 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – С. 209-212.
2. Moon K. S. Dynamic Interrelationship between Technology and Architecture in Tall Buildings / K. S. Moon // International Journal of High-Rise Buildings. – 2018. – Vol. 7, № 4. – P. 271-279.
3. Горнак, Д. С. Особенности определения ветровой нагрузки / Д. С. Горнак // Вестник магистратуры. – 2019. – № 1-2(88). – С. 37-40.
4. Тринкер, А. Б. Как рождалась Останкинская телебашня / А. Б. Тринкер // Технологии бетонов. – 2017. – № 9-10(134-135). – С. 52-55.
5. Тринкер, А. Б. Почему же устояла Останкинская телебашня? / А. Б. Тринкер // Технологии бетонов. – 2016. – № 3-4(116-117). – С. 53-55.
6. Лапшин, В. Я. Об использовании элювиальных грунтов в качестве основания сооружения / В. Я. Лапшин, Б. Г. Алексеев, Ю. Б. Рахлин // Строительство и образование / Уральский государственный технический университет. Том Выпуск 2. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 1999. – С. 46-47.
7. Башня "Canton Tower" / В. В. Егоров, М. С. Абу-Хасан, О. А. Бакина, Л. Р. Лебедева // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии: Материалы VIII Международной научно-практической интернет-конференции, Санкт-Петербург, 23 июня 2021 года. – Москва: ООО "Издательство "Спутник+", 2021. – С. 112-118.
8. Варибрус Д. С., Абакумов Р. Г. Особенности проектирования и строительства уникальных фундаментов высотного здания «Бурдж Халифа» // Инновационная наука. – 2016. – №11-3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-proektirovaniya-i-stroitelstva-unikalnyh-fundamentov-vysotnogo-zdaniya-burdzh-halifa> (Дата обращения: 26.10.2025).
9. Варибрус, Д. С. Современные подходы к проектированию высотных зданий (на примере Бурдж Халифа) / Д. С. Варибрус // Международный студенческий строительный форум – 2016: (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства): электронный сборник докладов, Белгород, 24 ноября 2016 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 298-302.
10. Трошина, М. К. Анализ способов снижения ветрового воздействия на высотные здания / М. К. Трошина, Е. А. Хаустова, А. С. Шилов // X Всероссийский фестиваль науки : Сборник докладов, Нижний Новгород, 14–15 октября 2020 года / Редколлегия: А.А. Лапшин, И.С. Соболев, Д.В. Мониц, А.А. Смыков [и др.]. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – С. 44-49.

11. Саиян, С. Г., Маркова, С. А. Расчетные исследования мер снижения ветровых воздействий на высотные здания и сооружения // Системные технологии. – 2024. – №4 (53). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetnye-issledovaniya-mer-snizheniya-vetrovyh-vozdeystviy-na-vysotnye-zdaniya-i-sooruzheniya> (Дата обращения: 27.10.2025).
12. Жаданова В. А., Леонова А. Н., Гугулян А. А. Сейсмозащитные мероприятия при строительстве высотных зданий // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2020. – №. 4. – С. 250-253.

## References

1. Galyamichev, A. V. Analysis of Methods for Determining Wind Load / A. V. Galyamichev, D. I. Dyakov // SPbPU Science Week: Proceedings of the Scientific Conference with International Participation. Institute of Civil Engineering, Saint Petersburg, November 19–24, 2018. – Saint Petersburg: POLITEH-PRESS, 2018. – Pp. 209-212.
2. Moon K. S. Dynamic Interrelationship between Technology and Architecture in Tall Buildings / K. S. Moon // International Journal of High-Rise Buildings. – 2018. – Vol. 7, № 4. – P. 271-279.
3. Gornak, D. S. Features of Determining Wind Load / D. S. Gornak // Bulletin of the Magistracy. – 2019. – No. 1-2(88). – P. 37-40.
4. Trinker, A. B. How the Ostankino TV Tower Was Born / A. B. Trinker // Concrete Technologies. – 2017. – No. 9-10(134-135). – Pp. 52-55.
5. Trinker, A. B. Why Did the Ostankino TV Tower Survive? / A. B. Trinker // Concrete Technologies. – 2016. – No. 3-4(116-117). – Pp. 53-55.
6. Lapshin, V. Ya. On the use of eluvial soils as a foundation for a structure / V. Ya. Lapshin, B. G. Alekseev, Yu. B. Rakhlin // Construction and Education / Ural State Technical University. Volume Issue 2. – Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 1999. – Pp. 46-47.
7. The "Canton Tower" / V. V. Egorov, M. S. Abu-Khasan, O. A. Bakina, L. R. Lebedeva // Innovative Technologies in Construction and Geoecology: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Internet Conference, St. Petersburg, June 23, 2021. – Moscow: LLC "Publishing House "Sputnik+", 2021. – Pp. 112-118.
8. Varibrus D. S., Abakumov R. G. Features of Design and Construction of Unique Foundations for the Burj Khalifa High-Rise Building // Innovative Science. 2016. No. 11-3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-proektirovaniya-i-stroitelstva-unikalnyh-fundamentov-vysotnogo-zdaniya-burdzh-halifa> (accessed: 26.10.2025).
9. Varibrus, D. S. Modern Approaches to the Design of High-Rise Buildings (Based on the Example of the Burj Khalifa) / D. S. Varibrus // International Student Construction Forum - 2016 : (on the 45th anniversary of the Department of Construction and Urban Economy): electronic collection of reports, Belgorod, November 24, 2016. – Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2016. – Pp. 298-302.
10. Troshina, M. K. Analysis of ways to reduce wind impact on high-rise buildings / M. K. Troshina, E. A. Khaustova, A. S. Shilov // X All-Russian Science Festival : Collection of reports, Nizhny Novgorod, October 14-15, 2020 / Editorial board: A.A. Lapshin, I.S. Sobol, D.V. Monich, A.A. Smykov [et al.]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2020. –Pp. 44-49.
11. Saiyan S. G., Markova S. A. Calculative research of measures to reduce wind impacts on high-rise buildings and structures // System Technologies. – 2024. – No. 4 (53). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetnye-issledovaniya-mer-snizheniya-vetrovyh-vozdeystviy-na-vysotnye-zdaniya-i-sooruzheniya> (accessed: 27.10.2025).
12. Zhadanova, V. A., Leonova, A. N., Gugulyan, A. A. Seismic protection measures in the construction of high-rise buildings // Science. Technique. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2020. – No. 4. – Pp. 250-253.

Получено: 09.06.25

Прошла рецензирование: 20.06.25

Принята к публикации: 26.06.25

Доступно он-лайн: 01.08.25

Received: 09.06.25

Revised: 20.06.25

Accepted: 26.06.25

Available on-line: 01.08.25