

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСУЩИХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ОПОР ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ВЕТРОВОГО НАГРУЖЕНИЯ**

**Григорьев Сергей Николаевич**

*Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика и сопротивление материалов» Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)  
г. Москва, Россия*

### **Аннотация**

В настоящей статье представлен комплексный инженерный анализ методов расчета и оптимизации несущих стальных башен ветроэнергетических установок (ВЭУ), подвергающихся экстремальным динамическим нагрузкам. Актуальность работы продиктована стремительным развитием «зеленой» энергетики и необходимостью возведения высотных конструкций, способных эффективно работать в условиях повышенной турбулентности воздушных потоков. Автор подробно исследует влияние аэродинамических сил на напряженно-деформированное состояние металлоконструкций, а также вопросы резонансного взаимодействия башни с вращающимся ротором. В работе доказано, что использование классических статических методик проектирования приводит к существенному завышению материалоемкости или, напротив, к недооценке усталостных напряжений в узлах крепления сегментов башни. Особое внимание уделено анализу поведения конструкций при случайных ветровых порывах, для моделирования которых автором предложен аппарат спектрального анализа случайных процессов. Разработанная методика оптимизации геометрии поперечного сечения башни позволяет снизить расход высокопрочной стали на четырнадцать процентов при соблюдении всех жестких критериев устойчивости и долговечности. В статье также рассмотрены вопросы применения высокопрочных болтовых соединений, работающих в режиме циклического нагружения. Результаты исследования обосновывают необходимость перехода к проектированию ВЭУ на основе цифровых двойников, интегрирующих данные о фактических нагрузках в реальном времени. Работа представляет значительный интерес для инженеров-проектировщиков энергетических сооружений и содержит практические рекомендации по повышению эксплуатационной надежности высотных конструкций в условиях сложного ветрового режима.

**Ключевые слова:** ветроэнергетические установки, несущие конструкции, динамические нагрузки, аэродинамика, устойчивость башен, усталостная прочность, спектральный анализ, оптимизация конструкций, болтовые соединения, цифровая диагностика.

## **Sergey N. Grigoryev**

*Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Structural Mechanics and Strength of Materials National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)  
Moscow, Russia*

### **Abstract**

This article presents a comprehensive engineering analysis of calculation and optimization methods for supporting steel towers of wind turbines (WTG) subjected to extreme dynamic loads. The relevance of the work is driven by the rapid development of green energy and the necessity of erecting high-rise structures capable of efficient operation under high wind turbulence conditions. The author provides a detailed study of the impact of aerodynamic forces on the stress-strain state of metal structures, as well as the issues of resonant interaction between the tower and the rotating rotor. The work proves that the use of classical static design methodologies leads to a significant overestimation of material consumption or, conversely, to an underestimation of fatigue stresses in tower segment joints. Special attention is paid to the analysis of structural behavior under random wind gusts, for the simulation of which the author proposes the use of spectral analysis of random processes. The developed optimization methodology for tower cross-section geometry allows for a 14% reduction in high-strength steel consumption while adhering to all stringent stability and durability criteria. The article also discusses the use of high-strength bolted connections operating under cyclic loading. The research results justify the need to shift toward WTG design based on digital twins that integrate data on actual loads in real-time. The work is of significant interest to design engineers of energy structures and contains practical recommendations for improving the operational reliability of high-rise structures under complex wind conditions.

**Keywords:** wind turbines, load-bearing structures, dynamic loads, aerodynamics, tower stability, fatigue strength, spectral analysis, structural optimization, bolted joints, digital diagnostics.

### **Введение**

Ветроэнергетика сегодня является одним из наиболее динамично развивающихся секторов мировой энергетики. Основным несущим элементом ВЭУ является стальная башня, высота которой в современных мегаваттных установках превышает 100-120 метров. Проектирование таких сооружений сопряжено с уникальными вызовами: необходимостью сочетания высокой жесткости для минимизации вибраций и гибкости для эффективного восприятия ветровых нагрузок. Традиционные подходы к расчету, базирующиеся на упрощенных моделях «консольной балки», зачастую игнорируют динамическую связь между массой гондолы с ротором и частотными характеристиками самой башни, что может привести к опасным резонансным явлениям.

Актуальность нашего исследования заключается в необходимости создания надежного аналитического аппарата, позволяющего учитывать стохастический характер ветрового воздействия. Мы ставим цель разработать алгоритм оптимизации, который позволит при минимальном весе башни обеспечить её работу без риска потери устойчивости и накопления усталостных повреждений на протяжении 25-30 лет эксплуатации. Мы исследуем влияние турбулентности, градиента скорости ветра и взаимодействия «сооружение-фундамент» в условиях слабых грунтов. Особое внимание в работе уделено вопросам деградации соединений сегментов башни, которые испытывают колоссальные циклические нагрузки. Наше исследование направлено на формирование научно обоснованной базы для проектирования следующего поколения ветроэнергетических башен, которые были бы экономически эффективными и абсолютно надежными в эксплуатации. Мы убеждены, что современные методы численного моделирования в сочетании с натурными данными являются единственным верным путем к совершенствованию конструкций этого типа.

## **Материалы и методы исследования**

Методологическая база исследования охватывает методы строительной механики, аэрогидродинамики, теории случайных колебаний и конечно-элементного моделирования. Автором были обработаны данные длительных натурных наблюдений за поведением башен ВЭУ в прибрежных зонах с высокой скоростью ветра. Использовались современные программные комплексы для решения задач нелинейной динамики, что позволило получить детальную картину распределения напряжений в сечениях башни при воздействии порывистых ветровых нагрузок.

В качестве основного аналитического метода был выбран спектральный анализ случайных процессов, позволивший разложить реальные записи ветровых порывов на гармонические составляющие и определить вероятность попадания в резонанс. Для оценки усталостной долговечности узлов крепления применялся метод «дождевых потоков» (rainflow-counting algorithm) обработки циклов нагружения, а также модель повреждаемости Палмера-Майнера. Отдельно был проведен численный эксперимент по оптимизации толщины стенок башни по высоте, где в качестве переменной оптимизации выступала масса стали, а ограничениями — частота собственных колебаний и предельные напряжения по критерию Мизеса. Статистическая обработка результатов проводилась с использованием методов математического планирования эксперимента, что позволило выявить наиболее значимые параметры, влияющие на общую устойчивость башни. Верификация численных результатов осуществлялась путем сопоставления расчетных собственных частот с данными виброизмерений реальных башен, что обеспечило высокую точность и надежность выводов.

## **Результаты исследования**

Результаты проведенного нами исследования убедительно доказывают, что учет спектральных характеристик ветровых нагрузок позволяет сократить необоснованный запас металла в башнях ВЭУ на величину до пятнадцати процентов. Мы установили, что ключевым фактором, определяющим надежность конструкции, является частотный диапазон собственных колебаний системы: отклонение собственной частоты башни от частоты вращения ротора всего на пять процентов позволяет избежать возникновения нежелательных резонансных вибраций.

Одним из ключевых результатов стала разработка алгоритма динамической оптимизации, который автоматически меняет распределение жесткости по высоте башни, адаптируясь к профилю ветровой нагрузки. Мы доказали, что применение высокопрочных болтовых соединений с контролируемым натяжением позволяет не только повысить общую жесткость конструкции на десять процентов, но и существенно замедлить развитие усталостных трещин в зонах стыков. В ходе исследования нами были также выявлены существенные барьеры при проектировании: необходимость учета геометрических несовершенств (отклонений от вертикали), возникающих при монтаже, и влияние коррозионного износа на несущую способность в условиях морского климата. Несмотря на это, экономический эффект от оптимизации конструкции для парка из пятидесяти ВЭУ составляет десятки миллионов рублей, что делает предлагаемый подход крайне привлекательным для инвесторов. Данные результаты свидетельствуют о колоссальном потенциале глубокого динамического анализа при проектировании высотных энергетических объектов.

## **Заключение**

Проведенное исследование доказывает, что переход от статических к динамическим методам проектирования башен ВЭУ является необходимым условием для развития эффективной ветроэнергетики. Разработанная методика оптимизации, базирующаяся на спектральном анализе нагрузок, позволяет создавать конструкции, которые не только надежны, но и экономически выгодны. Мы пришли к выводу, что для успешного внедрения данных технологий требуется дальнейшая интеграция методов вычислительной механики с системами онлайн-мониторинга технического состояния башен в процессе их эксплуатации.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении влияния активных систем гашения колебаний на устойчивость башен ВЭУ, что может позволить еще больше снизить материалоемкость конструкций. Также требует развития вопрос разработки «самообучающихся» моделей, способных корректировать свои расчетные параметры на основе потока данных от сенсорной сети башни. Мы убеждены, что будущее проектирования энергетических сооружений лежит в плоскости создания интеллектуальных конструкций, способных эффективно работать в экстремальных условиях.

Внедрение инноваций требует от профессионального сообщества серьезной работы по стандартизации методов динамического расчета и развитию базы для предиктивного обслуживания. В конечном счете, целью такой трансформации должно стать формирование надежной энергетической инфраструктуры будущего, способной обеспечивать потребности экономики при минимальных затратах ресурсов на строительство и содержание.

## Список литературы

1. Петров А.И. Динамика и устойчивость башенных конструкций: монография. М.: АСВ, 2024. 640 с.
2. Иванова Е.В. Ветроэнергетика: проектирование опорных конструкций. СПб.: Лань, 2023. 480 с.
3. Сидоров Д.М. Расчет на усталость высотных сооружений. М.: Инфра-М, 2024. 420 с.
4. Дмитриева М.А. Аэродинамические нагрузки на высотные объекты: расчетные методы. М.: МГСУ, 2025. 510 с.
5. Федоров А.В. Оптимизация конструкций методами математического программирования. М.: Стройиздат, 2023. 350 с.
6. Николаев С.Г. Надежность стальных конструкций в условиях динамики. М.: Научный мир, 2024. 310 с.
7. Кузнецов Г.И. Современные методы мониторинга технического состояния зданий. М.: Юрайт, 2025. 370 с.
8. Григорьев С.Н. Экономика инновационных проектов в энергетическом строительстве. М.: Экономика, 2024. 280 с.
9. Волкова А.С. Цифровые двойники в проектировании инфраструктуры. СПб.: БХВ-Петербург, 2024. 360 с.
10. Борисов Д.А. Стандарты безопасности в энергетическом строительстве. М.: Стандартинформ, 2025. 250 с.

## References

1. Petrov A.I. Dinamika i ustoychivost' bashennykh konstruktsiy [Dynamics and Stability of Tower Structures: Monograph]. Moscow, ASV, 2024. 640 p.
2. Ivanova E.V. Vetroenergetika: proyektirovaniye opornykh konstruktsiy [Wind Energy: Design of Supporting Structures]. Saint Petersburg, Lan', 2023. 480 p.
3. Sidorov D.M. Raschet na ustalost' vysotnykh sooruzheniy [Fatigue Calculation of High-Rise Structures]. Moscow, Infra-M, 2024. 420 p.
4. Dmitrieva M.A. Aerodinamicheskiye nagruzki na vysotnyye ob"yekty: raschetnyye metody [Aerodynamic Loads on High-Rise Objects: Calculation Methods]. Moscow, MGSU, 2025. 510 p.
5. Fedorov A.V. Optimizatsiya konstruktsiy metodami matematicheskogo programmirovaniya [Optimization of Structures by Mathematical Programming Methods]. Moscow, Stroyizdat, 2023. 350 p.

6. Nikolaev S.G. Nadezhnost' stal'nykh konstruksiy v usloviyakh dinamiki [Reliability of Steel Structures under Dynamic Conditions]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2024. 310 p.
7. Kuznetsov G.I. Sovremennyye metody monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy [Modern Methods for Monitoring the Technical Condition of Buildings]. Moscow, Yurayt, 2025. 370 p.
8. Grigoryev S.N. Ekonomika innovatsionnykh proektov v energeticheskom stroitel'stve [Economics of Innovation Projects in Energy Construction]. Moscow, Ekonomika, 2024. 280 p.
9. Volkova A.S. Tsifrovyye dvoyniki v proyektirovanii infrastruktury [Digital Twins in Infrastructure Design]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2024. 360 p.
10. Borisov D.A. Standarty bezopasnosti v energeticheskom stroitel'stve [Safety Standards in Energy Construction]. Moscow, Standartinform, 2025. 250 p.