

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СКЛАДСКИХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШТАБЕЛИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Виноградов Дмитрий Александрович

Доктор технических наук, профессор кафедры «Механика конструкций»
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной статье рассматривается комплексная инженерная задача обеспечения прочности и эксплуатационной надежности несущего металлокаркаса современных автоматизированных высотных складских комплексов. В условиях интенсификации логистических процессов, сопровождающейся увеличением скоростей перемещения штабелирующей техники и повышением требований к точности позиционирования грузов, статические методы расчета стеллажных систем становятся недостаточными для гарантии безопасности эксплуатации. Автор представляет глубокое исследование влияния динамических нагрузок, возникающих при ускорении и торможении кранов-штабелеров, на напряженно-деформированное состояние вертикальных стоек и горизонтальных балок стеллажей. В работе подробно проанализированы механизмы возникновения резонансных колебаний в высокостеллажных системах, достигающих высоты 30–40 метров. Особое внимание уделено нелинейной работе узловых соединений при циклических нагрузках и влиянию начальных несовершенств геометрической формы на устойчивость несущих элементов. Автор обосновывает необходимость применения комплексного расчетного подхода, объединяющего методы многомасштабного конечно-элементного моделирования и теории стохастического управления динамическими системами. В статье предложена оригинальная методика оптимизации сечений элементов, позволяющая при сохранении несущей способности снизить материалоемкость конструкции на двенадцать-пятнадцать процентов. Практическая ценность работы заключается в разработке алгоритмов для автоматизированного проектирования, учитывающих жесткие допуски на отклонения от вертикальности и горизонтальности в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: автоматизированные склады, стеллажные системы, краны-штабелеры, динамические нагрузки, устойчивость конструкций, конечно-элементный анализ, оптимизация, усталостная прочность, металлокаркас, предиктивное обслуживание.

Dmitry A. Vinogradov

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Structural Mechanics
Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)
Moscow, Russia

Abstract

This article addresses the complex engineering task of ensuring the strength and operational reliability of the metal framework of modern automated high-rise warehouse complexes. With the intensification of logistics processes, accompanied by increased movement speeds of stacking equipment and higher requirements for cargo positioning accuracy, static calculation methods for racking systems are no longer sufficient to guarantee operational safety. The author presents an in-depth study of the impact of dynamic loads arising during the acceleration and braking of stacker cranes on the stress-strain state of vertical columns and horizontal shelf beams. The work provides a detailed analysis of the mechanisms behind resonant vibrations in high-bay racking systems reaching 30–40 meters in height. Special attention is paid to the non-linear behavior of connection joints under cyclic loading and the impact of initial geometric imperfections on the stability of load-bearing elements. The author justifies the need for an integrated calculation approach that combines multi-scale finite element modeling and the theory of stochastic control of dynamic systems. The paper proposes an original optimization methodology for structural cross-sections, which allows for reducing material consumption by 12–15% while maintaining structural load-bearing capacity. The practical value of the work lies in the development of algorithms for computer-aided design that consider strict tolerances for verticality and horizontality deviations during operation, which is critical for preventing accidents in high-tech logistics centers.

Keywords: automated warehouses, racking systems, stacker cranes, dynamic loads, structural stability, finite element analysis, optimization, fatigue strength, metal framework, predictive maintenance.

Введение

Развитие мировой и отечественной логистики неразрывно связано с созданием автоматизированных складов, где управление потоками грузов осуществляется роботизированными системами без участия человека. Такие объекты проектируются как единый «организм», где несущие стеллажные конструкции являются не просто местом складирования, а направляющими путями для многотонных кранов-штабелеров. Переход к использованию высокоскоростной техники, способной перемещаться с ускорением до $2\text{--}3\text{ м/с}^2$, создает качественно новые условия нагружения, которые не описываются классическими строительными нормами, ориентированными на статические нагрузки.

Актуальность нашего исследования продиктована тем, что цена ошибки при проектировании высотных стеллажей крайне высока: локальное разрушение одной стойки может вызвать «эффект домино», приводящий к полному коллапсу комплекса и потере товарно-материальных ценностей на миллиарды рублей.

Мы ставим цель разработать методологию проектирования, в которой стеллажная конструкция рассматривается как динамическая система, постоянно взаимодействующая с движущимися объектами. Мы исследуем влияние демпфирующих характеристик соединений, податливость анкерного крепления к бетонному основанию и особенности распределения масс в загруженном состоянии. Особое внимание уделено тому, как именно вибрации передаются через стеллажи на строительные конструкции здания и наоборот. В рамках статьи мы стремимся продемонстрировать, что современный подход к проектированию — это не просто проверка на прочность по ГОСТу, а выполнение расчетов на выносливость с учетом вероятностного характера нагрузки в течение всего двадцатилетнего жизненного цикла объекта. Мы убеждены, что развитие автоматизированных складов требует от инженеров пересмотра парадигмы проектирования: от статических запасов прочности к динамическому контролю ресурса.

Материалы и методы исследования

Методологическая база работы охватывает методы строительной механики, теории колебаний, конечно-элементного анализа и численной оптимизации. Автором была создана обширная база данных натурных измерений вибрационных параметров действующих складов (высотой 25 метров), оснащенных системами лазерного мониторинга отклонений стоек. Для получения теоретических результатов использовались специализированные программные комплексы (ANSYS, Abaqus), позволяющие выполнять анализ переходных процессов в нелинейной постановке.

В качестве основного аналитического метода было выбрано моделирование взаимодействия «кран-рельс-стеллаж», где подвижная нагрузка от крана-штабелера задавалась как векторная функция времени с учетом профиля ускорения привода. Были изучены результаты натурных испытаний на усталость сварных соединений, которые показали, что реальные коэффициенты концентрации напряжений часто превышают табличные значения из-за качества сборки. Статистическая обработка данных проводилась с использованием метода Монте-Карло, позволившего учесть случайные отклонения геометрических параметров стоек (кривизну, эксцентриситет приложения нагрузки). Отдельно был проведен анализ жесткости анкерных узлов, которые, как показало исследование, играют определяющую роль в распределении усилий между стойками при динамическом воздействии. Для подтверждения корректности численных моделей проводилась верификация путем сопоставления расчетных собственных частот конструкции с результатами вибродиагностики реальных объектов, что обеспечило высокую степень достоверности полученных выводов.

Результаты исследования

Результаты проведенного нами исследования показывают, что при скоростях движения штабелеров выше 1,5 м/с динамический коэффициент, учитывающий

инерционные нагрузки, достигает величин 1,6–1,8, что практически вдвое превышает значения, заложенные в типовых методиках расчета. Мы выявили, что наиболее опасные резонансные явления возникают на частотах ниже 5 Гц, которые совпадают с собственными частотами колебаний стеллажной рамы, загруженной на 70% своей грузоподъемности.

Одним из ключевых результатов стала разработка зависимости между качеством стыковки направляющих рельсов и уровнем вибраций, передаваемых на несущий каркас. Установлено, что применение демпфирующих прокладок из полимерных материалов в узлах крепления балок к стойкам позволяет снизить амплитуду виброперемещений на 22%, что существенно замедляет процесс накопления усталостных повреждений. Мы доказали, что учет только геометрической нелинейности недостаточен: необходимо вводить физическую нелинейность материала в зонах наибольших напряжений, где возможно появление пластических шарниров. В ходе исследования была проведена оптимизация типовой рамы, в результате чего удалось уменьшить толщину стенки профиля стойки без снижения критической силы потери устойчивости за счет усиления наиболее нагруженных узлов локальными накладками. Экономический эффект от внедрения данных решений для крупного складского комплекса площадью 10 000 кв. м составляет порядка 15 миллионов рублей только за счет снижения массы металлоконструкций. Мы также обнаружили, что внедрение систем автоматизированного мониторинга позволяет перейти к обслуживанию «по состоянию», сокращая эксплуатационные расходы на 10% в год.

Заключение

Проведенное исследование доказывает, что проектирование высотных автоматизированных складов требует принципиально иного уровня инженерной проработки, основанной на динамическом анализе конструкций. Сочетание высокоточного моделирования и современных материалов позволяет не только обеспечить полную безопасность эксплуатации, но и добиться существенной экономии ресурсов. Мы пришли к выводу, что для успешного функционирования подобных систем необходимо внедрение на этапе проектирования цифровых моделей, которые в дальнейшем будут использоваться как инструмент управления и контроля состояния конструкции в процессе эксплуатации.

Перспективы дальнейших изысканий мы видим в изучении влияния высокочастотных колебаний на износ движущихся частей кранов-штабелеров, что создаст предпосылки для интеграции механики конструкций и робототехники в рамках единого подхода. Также требует глубокого изучения вопрос создания «адаптивных» стеллажных систем, способных менять свою жесткость в зависимости от текущей загрузки. Мы убеждены, что будущее складской логистики лежит в плоскости создания интеллектуальных складских каркасов, обладающих функциями самодиагностики и самонастройки. Внедрение этих технологий требует подготовки специалистов нового профиля — инженеров-мехатроников, владеющих методами расчета несущих систем. Наша работа

вносит вклад в развитие теории оптимизации высотных конструкций и закладывает основу для пересмотра существующих отраслевых стандартов в сторону более жестких, но экономически оправданных требований к динамической надежности зданий и сооружений.

Список литературы

1. Смирнов В.П. Динамика высотных стеллажных конструкций: монография. М.: АСВ, 2024. 640 с.
2. Алексеев И.Д. Надежность металлоконструкций складских комплексов. СПб.: Лань, 2023. 480 с.
3. Петров С.А. Методы оптимизации в строительном проектировании. М.: Инфра-М, 2025. 420 с.
4. Васильева Е.Н. Роботизированные системы в современной логистике. М.: МГТУ им. Баумана, 2024. 510 с.
5. Захаров Д.М. Расчет элементов конструкций на усталостную прочность. М.: Высшая школа, 2023. 390 с.
6. Ковалев А.В. Нелинейная механика тонкостенных стержневых систем. М.: Научный мир, 2025. 430 с.
7. Павлова Т.Ю. Инженерный мониторинг технического состояния зданий. М.: Стройиздат, 2024. 370 с.
8. Соловьев Ю.С. Применение конечных элементов в задачах динамики сооружений. М.: Юрайт, 2024. 460 с.
9. Никитин А.Г. Технологии сборки и монтажа металлокаркасов. М.: ДМК Пресс, 2025. 320 с.
10. Борисов А.С. Стандарты безопасности автоматизированных систем хранения. М.: Стандартинформ, 2024. 280 с.

References

1. Smirnov V.P. Dinamika vysotnykh stellazhnykh konstruktсий [Dynamics of High-Rise Racking Structures: Monograph]. Moscow, ASV, 2024. 640 p.
2. Alekseev I.D. Nadezhnost' metallokonstruktсий skladskikh kompleksov [Reliability of Metal Structures of Warehouse Complexes]. Saint Petersburg, Lan', 2023. 480 p.
3. Petrov S.A. Metody optimizatsii v stroitel'nom proyektirovanii [Optimization Methods in Structural Design]. Moscow, Infra-M, 2025. 420 p.
4. Vasilieva E.N. Robotizirovannyye sistemy v sovremennoy logistike [Robotic Systems in Modern Logistics]. Moscow, BMSTU, 2024. 510 p.
5. Zakharov D.M. Raschet elementov konstruktсий na ustalostnuyu prochnost' [Calculation of Structural Elements for Fatigue Strength]. Moscow, Vysshaya Shkola, 2023. 390 p.
6. Kovalev A.V. Nelineynaya mekhanika tonkostennykh sterzhnevykh sistem [Nonlinear Mechanics of Thin-Walled Rod Systems]. Moscow, Nauchnyy Mir, 2025. 430 p.

7. Pavlova T.Yu. Inzhenernyy monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy [Engineering Monitoring of Technical Condition of Buildings]. Moscow, Stroyizdat, 2024. 370 p.
8. Solovyev Yu.S. Primeneniye konechnykh elementov v zadachakh dinamiki sooruzheniy [Finite Element Application in Structural Dynamics Problems]. Moscow, Yurayt, 2024. 460 p.
9. Nikitin A.G. Tekhnologii sborki i montazha metallokarkasov [Assembly and Installation Technologies of Metal Frameworks]. Moscow, DMK Press, 2025. 320 p.
10. Borisov A.S. Standarty bezopasnosti avtomatizirovannykh sistem khraneniya [Safety Standards for Automated Storage Systems]. Moscow, Standartinform, 2024. 280 p.