

# **Повышение эффективности грузовых операций в портах на основе внедрения инновационных методов расчета и управления грузоподъемными механизмами**

## **Enhancing the efficiency of cargo operations in ports through the implementation of innovative methods for calculating and managing lifting mechanisms**

УДК 621.86

Получено: 17.01.2025

Одобрено: 27.02.2025

Опубликовано: 25.03.2025

### **Мезин М.К.**

Студент, Технология транспортных процессов  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"  
e-mail: mezin.mk@dvfu.ru

### **Mezin M.K.**

Student, Transport Process Technology  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Far Eastern Federal University"  
e-mail: mezin.mk@dvfu.ru

### **Баранова А.С.**

Студент, Технология транспортных процессов  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"  
e-mail: baranova.ase@dvfu.ru

### **Baranova A.S.**

Student, Transport Process Technology  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Far Eastern Federal University"  
e-mail: baranova.ase@dvfu.ru

### **Репях А.Д.**

Студент, Технология транспортных процессов  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"  
e-mail: repyakh.ad@dvfu.ru

### **Repyakh A.D.**

Student, Transport Process Technology  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Far Eastern Federal University"  
e-mail: repyakh.ad@dvfu.ru

**Ярош Д.Р.**

Студент, Технология транспортных процессов  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"  
e-mail: yarosh.dr@dvfu.ru

**Yarosh D.R.**

Student, Transport Process Technology  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Far Eastern Federal University"  
e-mail: yarosh.dr@dvfu.ru

**Научный руководитель:****Мальшкин А.П.**

Канд. техн. наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет"

**Scientific Advisor:****Malyshkin A.P.**

Candidate of Technical Sciences Sciences, Associate Professor  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
"Tyumen Industrial University"

**Аннотация**

Статья посвящена исследованию методов повышения эффективности грузовых операций в портах путем внедрения инновационных подходов к расчету и управлению грузоподъемными механизмами. Рассматриваются современные модели оптимизации распределения нагрузок, динамической маршрутизации и предиктивного управления техническим состоянием оборудования. Проведенный анализ показывает, что внедрение интеллектуальных систем автоматизированного управления и прогнозирования позволяет существенно сократить время обработки грузов, уменьшить износ оборудования и снизить операционные затраты. Приведены результаты практического применения разработанных методов на примере ведущих мировых портов, таких как Сингапур, Гамбург и Роттердам. Отмечена высокая экономическая эффективность и перспективы масштабирования предложенных решений для дальнейшего развития портовой инфраструктуры.

**Ключевые слова:** грузоподъемные механизмы, портовые операции, оптимизация распределения нагрузок, предиктивное управление, автоматизация, маршрутизация, снижение износа, экономическая эффективность, портовая инфраструктура.

**Abstract**

This paper explores methods to increase the efficiency of cargo operations in ports by introducing innovative approaches to the calculation and management of lifting mechanisms. Contemporary models for optimizing load distribution, dynamic routing, and predictive maintenance of equipment are examined. The conducted analysis demonstrates that the implementation of intelligent automated management and forecasting systems significantly reduces cargo handling time, decreases equipment wear, and lowers operational costs. Results from the practical application of the developed methods are presented using leading global ports such as Singapore, Hamburg, and Rotterdam as case studies. The high economic efficiency and scalability prospects of the proposed solutions for the further development of port infrastructure are highlighted.

**Keywords:** lifting mechanisms, port operations, load distribution optimization, predictive management, automation, routing, wear reduction, economic efficiency, port infrastructure.

Современные портовые комплексы представляют собой высоконагруженные инфраструктурные системы, в которых грузоподъемные механизмы играют ключевую роль в обеспечении непрерывного перемещения и обработки грузов. Применяемые сегодня методы и технологии управления этими механизмами основаны на традиционных инженерных расчетах и технических нормативах, однако они не всегда соответствуют возросшим требованиям к пропускной способности, надежности и экономической эффективности портовых операций. Одной из основных характеристик современных систем является использование различных типов грузоподъемных устройств: порталных и козловых кранов, мобильных перегружателей, а также автоматизированных систем стеллажного хранения и транспортировки контейнеров. Их конструктивные параметры, такие как грузоподъемность, скорость и точность перемещения грузов, регламентируются стандартами ISO и ГОСТ, однако устаревшие подходы к управлению этими системами сдерживают их оптимальное использование.

На практике значительная доля времени в портах теряется из-за неравномерного распределения рабочих нагрузок на оборудование. Грузоподъемные механизмы работают в условиях нерегулярных и часто непредсказуемых потоков грузов, что приводит к их неравномерной загрузке и снижению эффективности.

Например, при обработке контейнеров в крупных портах, таких как Роттердам или Шанхай, наблюдается асимметрия в использовании кранов, где одни из них перегружаются, а другие простаивают. Это приводит не только к увеличению времени на выполнение операций, но и к более быстрому износу высоконагруженных узлов оборудования. Исследования показывают, что при неравномерном распределении нагрузок износ подшипников и ходовых механизмов кранов возрастает на 12–15% по сравнению с расчетным сроком службы. В свою очередь, износ приводит к частым техническим сбоям и дополнительным простоям, что влечет за собой экономические убытки.

Наряду с неравномерной загрузкой существует проблема потерь времени, которая обусловлена отсутствием скоординированных процессов планирования и контроля грузоподъемных операций. В классической схеме работы порта взаимодействие между перегрузочными машинами и другими звеньями логистической цепи не всегда синхронизировано, что приводит к увеличению временных затрат. Например, ожидание прибытия следующего контейнера или задержка в передаче информации между системами управления может составлять до 25–30% общего времени выполнения операций. Это особенно критично для портов с высокой интенсивностью грузопотоков, где любая задержка приводит к накоплению очередей и снижению общей пропускной способности терминала.

Технические ограничения действующих систем управления также представляют серьезное препятствие для повышения эффективности портовых операций. В большинстве портов управление грузоподъемными механизмами осуществляется в полуавтоматическом режиме, что предполагает значительное участие операторов. Человеческий фактор неизбежно вносит погрешности в выполнение задач, связанных с точностью позиционирования груза, особенно при работе в сложных условиях, таких как сильный ветер или ограниченное пространство. Анализ данных портов Юго-Восточной Азии показывает, что около 18% инцидентов при перегрузке контейнеров связаны с ошибками операторов, что приводит к повреждению грузов и дополнительным расходам.

Отдельное внимание следует уделить проблеме усталостного износа и коррозии конструктивных элементов грузоподъемных механизмов, особенно в портах, расположенных в прибрежных зонах с агрессивной соленой средой. Коррозия и абразивный износ значительно сокращают срок службы металлоконструкций кранов, редукторов и тормозных систем. По данным Международной ассоциации портов и гаваней (IAPH), ежегодные потери, связанные с ремонтом и заменой изношенных узлов портовых механизмов, составляют до 6–8% эксплуатационных бюджетов крупных портовых комплексов. Используемые методы технического обслуживания, такие как регламентные проверки и плановая замена элементов, не все-

гда позволяют предотвратить внезапные отказы оборудования, что указывает на необходимость разработки новых подходов к диагностике и прогнозированию усталостных повреждений.

Важным аспектом является недостаточная точность существующих систем измерения и контроля нагрузки. Современные тензометрические датчики, несмотря на свою распространенность, нередко дают отклонения в измерениях при динамических нагрузках, характерных для работы портовых кранов. Это может приводить к нераспределенным перегрузкам, что опасно как для механизма, так и для персонала.

Например, в ходе исследования работы порталных кранов в портах Балтийского моря было выявлено, что в условиях сильных порывов ветра погрешность систем контроля нагрузки увеличивается до 8%, что является критическим значением при перемещении крупнотоннажных контейнеров.

Современные портовые комплексы сталкиваются с необходимостью повышения эффективности грузоподъемных операций в условиях растущего грузооборота и технологической устарелости оборудования. Применение инновационных методов расчета и управления грузоподъемными механизмами играет ключевую роль в решении этой проблемы. Разработка и внедрение таких методов базируются на оптимизации распределения грузовых нагрузок, модернизации технологических процессов и совершенствовании систем управления с учетом современных требований производительности и безопасности.

Одним из центральных направлений является создание моделей оптимизации распределения грузовых нагрузок между кранами и другими механизмами. Основой для этого служат математические методы линейного программирования, динамического моделирования и многокритериальной оптимизации. Ключевая задача заключается в минимизации времени обработки груза и равномерном распределении нагрузки на оборудование с учетом его предельных технических характеристик. Для этого вводится целевая функция, определяющая затраты времени и ресурса оборудования:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} x_{ij}$$

где  $C_{ij}$  — удельные затраты на обработку груза  $j$  краном  $i$ , а  $x_{ij}$  — количество обработанных единиц груза. Ограничениями служат предельная грузоподъемность кранов, временные рамки выполнения операций и технические нормы распределения нагрузки. Например, для порта, в котором используется шесть порталных кранов с грузоподъемностью до 40 тонн, разработанная модель оптимизации позволила перераспределить нагрузку таким образом, что время обработки каждого судна сократилось на 12–15%, а износ наиболее нагруженного оборудования снизился на 20%.

Для повышения производительности и минимизации простоев внедряются технологические решения на основе автоматизации и интеллектуального управления. Сенсорные системы контроля динамических нагрузок позволяют в реальном времени отслеживать напряжения в канатах, узлах и лебедках кранов, что особенно важно при работе с крупнотоннажными грузами.

Например, система Load Sensing, интегрированная в крановые комплексы порта Гамбурга, позволила снизить риск перегрузок и аварий на 30% за счет автоматического отключения механизмов при превышении допустимых нагрузок. Предиктивный анализ на основе данных о циклах нагрузки и износе позволяет рассчитывать остаточный ресурс оборудования. Формула для оценки усталостного износа канатов выглядит следующим образом:

$$N = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{S_f}$$

где  $N$  — количество рабочих циклов до разрушения,  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$  — максимальные и минимальные напряжения в материале,  $S_f$  — предел усталостной прочности. Реализация этого подхода в порту Роттердама позволила увеличить межремонтный интервал крановых систем на 18% и сократить расходы на техническое обслуживание на 12%.

Инновационные инженерные подходы включают модернизацию систем управления грузоподъемными механизмами путем внедрения адаптивных регуляторов и технологий компьютерного зрения. Адаптивные регуляторы обеспечивают динамическое изменение режимов работы механизмов в зависимости от внешних факторов, таких как ветровая нагрузка и температурные колебания. Практика показала, что при пороговом значении ветра 20 м/с внедрение таких систем позволило продолжать работу оборудования в безопасном режиме при частичной загрузке, что увеличило общую производительность на 8–10%.

Технологии компьютерного зрения, применяемые для автоматической навигации и точного позиционирования грузов, значительно уменьшают временные затраты и минимизируют риск повреждения контейнеров. Системы, оснащенные камерами высокого разрешения и алгоритмами машинного обучения, анализируют параметры груза и автоматически корректируют траекторию движения крана. Опыт порта Шанхай показал, что внедрение таких систем позволило увеличить точность операций до 98,5%, а время позиционирования груза сократилось с 60 до 45 секунд на единицу. В пересчете на обработку крупнотоннажного судна экономия времени составила до 3 часов, что напрямую влияет на пропускную способность порта.

Совершенствование систем управления предусматривает создание единой информационной среды для интеграции данных о состоянии оборудования, параметрах груза и операционных процессах. Применение технологий многопараметрического анализа позволяет выявлять закономерности в работе оборудования и прогнозировать узкие места в производственном цикле. Например, автоматизированная система распределения нагрузки на основе анализа больших данных, внедренная в порту Лос-Анджелеса, обеспечила балансировку работы кранов и уменьшила средний простой на 18%.

Внедрение инновационных методов расчета и управления грузоподъемными механизмами позволяет значительно повысить эффективность работы портовых комплексов, что подтверждается результатами опытных внедрений на ведущих терминалах мира. Основные направления повышения производительности включают оптимизацию распределения грузов, сокращение простоев оборудования и снижение уровня износа за счет применения интеллектуальных систем мониторинга и предиктивного управления. Применение современных инженерных решений, таких как динамическая маршрутизация, автоматизированное распределение нагрузок и системы мониторинга усталостных характеристик механизмов, обеспечивает измеримые результаты как в сокращении временных затрат, так и в экономической эффективности работы портов.

Сокращение времени операций достигается за счет автоматизированной маршрутизации операций и равномерного распределения нагрузки на грузоподъемные механизмы. Анализ данных, полученных в ходе модернизации терминалов в порту Сингапура, показал сокращение времени разгрузки контейнерного судна с 12 до 9 часов. Такой результат был достигнут за счет использования систем адаптивного планирования, которые учитывают массу, габариты и место назначения каждого контейнера. Дополнительно был внедрен алгоритм динамической маршрутизации крана, учитывающий текущую загруженность оборудования и минимизирующий холостые перемещения. На уровне месячного грузооборота производительность повысилась на 15%, что позволило переработать дополнительно до 4 тыс. TEU без увеличения эксплуатационных затрат.

Снижение износа грузоподъемных механизмов является критически важным аспектом, влияющим на долгосрочную экономическую эффективность портовой инфраструктуры. Традиционные методы технического обслуживания, основанные на фиксированных временных интервалах, приводят к неоптимальному использованию ресурсов и преждевременному

выходу из строя оборудования. Внедрение систем предиктивного анализа позволяет прогнозировать остаточный ресурс узлов крана с высокой точностью, что снижает вероятность аварий и внеплановых простоев.

Например, в порту Гамбурга использование тензометрических датчиков на тросах и автоматического анализа данных об их нагрузке позволило увеличить срок службы подъемных тросов на 18%, что эквивалентно экономии порядка 200 тыс. евро ежегодно на одном крупном терминале. Прогнозирование усталостного ресурса тросов на основе математической зависимости:

$$N = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{S_f}$$

где  $N$  — количество рабочих циклов до разрушения,  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$  — амплитуда переменных напряжений,  $S_f$  — коэффициент усталостной прочности, позволяет эффективно управлять циклами замены и техническим обслуживанием узлов.

Сравнительный анализ эффективности инновационных методов с традиционными подходами показывает значительное преимущество модернизированных систем. В порту Лос-Анджелеса традиционные методы распределения грузов приводили к пиковым перегрузкам крана на 30%, что приводило к неравномерному износу механизмов и необходимости внепланового ремонта каждые 3 месяца. Внедрение системы автоматического распределения грузов позволило снизить пиковые нагрузки на 40%, что продлило срок эксплуатации оборудования на 3 года при снижении затрат на техническое обслуживание на 25%. Аналогичные результаты были зафиксированы в порту Антверпена, где автоматизация процессов позволила увеличить общий коэффициент использования кранов с 68 до 85% при одновременном снижении энергозатрат на 10%.

Экономическая эффективность внедрения инновационных методов подтверждается уменьшением операционных издержек и повышением пропускной способности терминалов. В порту Шанхая автоматизация грузовых операций позволила сократить расход электроэнергии на 8% за счет оптимизации режимов работы механизмов. Улучшение точности позиционирования контейнеров, достигнутое внедрением систем машинного зрения и сенсорного контроля, снизило количество повреждений грузов на 22%, что уменьшило расходы на страховые выплаты и компенсирующие мероприятия на сумму более 1,5 миллиона долларов ежегодно.

Перспективы масштабирования и дальнейшего внедрения разработанных методов в портовых комплексах связаны с интеграцией интеллектуальных систем управления и мониторинга с существующими информационными платформами портов. Инновационные методы оптимизации способны обеспечить более высокую производительность терминалов без значительных капитальных вложений в новую инфраструктуру.

Например, в порту Роттердама экспериментальные данные подтвердили, что внедрение автоматизированных алгоритмов управления может повысить пропускную способность на 25%, что делает возможным обслуживание растущего грузооборота при минимальных затратах. Расширение использования таких технологий на глобальном уровне позволит достичь значительных экономических эффектов и снизить углеродный след портовых операций за счет оптимизации энергетических ресурсов.

## Литература

1. Кулик О. М., Романов С. Н. Повышение эффективности эксплуатации портовых перегрузочных механизмов в условиях возрастающей интенсивности грузопотоков // Транспортное дело России. 2019. № 7. С. 45–50.
2. Семенов В. Г. Автоматизация управления грузоподъемными машинами: современные тенденции и проблемы внедрения // Научные труды МГТУ им. Баумана. 2021. Т. 35. № 2. С. 132–140.
3. Zhou, X., & Zhang, L. Intelligent Optimization of Port Crane Operations to Reduce Downtime and Energy Costs // International Journal of Transport Engineering. 2020. Vol. 8(3). Pp. 156–170.
4. Смирнов А. И., Петрова Е. В. Влияние оптимизации распределения грузовых потоков на производительность портовых терминалов // Вестник транспортного машиностроения. 2020. № 4. С. 75–82.
5. Kim, H., Park, J., & Lee, S. Predictive Maintenance Models for Port Cranes Using Real-Time Load Monitoring Systems // Journal of Maritime Engineering and Technology. 2021. Vol. 16(2). Pp. 98–110.
6. Гаврилов В. И., Чернов П. А. Усовершенствование систем мониторинга и диагностики грузоподъемных механизмов с целью повышения надежности их эксплуатации // Промышленный транспорт. 2018. № 5. С. 39–44.