

Научная статья  
УДК 621.873.1  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-540-553>  
EDN: JRJPER



## ВЛИЯНИЕ ДЕТАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ СЪЕМНОГО ГРУЗОЗАХВАТНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЁТА МОСТОВОГО КРАНА

А.В. Синельщиков

Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева,  
г. Астрахань, Россия  
[Laex@bk.ru](mailto:Laex@bk.ru)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Обеспечение безопасности при эксплуатации грузоподъемных кранов, особенно на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) при транспортировке опасных грузов, таких как отработавшие тепловыделяющие сборки, требует высокой точности расчетов несущих конструкций. Существующие подходы к моделированию не всегда учитывают влияние детализации съемных грузозахватных приспособлений (СГП) на общую картину напряженно-деформированного состояния крана. Целью данного исследования является оценка влияния уровня детализации конечно-элементной модели СГП типа траверсы на гибком подвесе на сходимость и точность результатов статического расчета мостового крана.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось на примере задачи транспортировки контейнеров ТУК-13 мостовым краном с использованием траверсы на гибком подвесе. Разработаны и проанализированы три варианта расчетно-статической модели (РСМ) крана, различающиеся способом моделирования СГП: 1) представление нагрузки от СГП и груза сосредоточенными массами (весом); 2) использование детализированной модели СГП с грузом с жесткими соединениями элементов; 3) применение детализированной модели СГП с грузом с учетом шарнирных соединений. Для каждой из трех моделей был выполнен статический расчет тремя различными методами: линейный статический анализ, статический расчет с учетом Р-Д и статический расчет с учетом Р-Д и больших перемещений.

**Выводы.** Сравнительный анализ показал, что учет гибких элементов подвеса и шарнирных соединений в конструкции СГП требует учета Р-Д эффекта и больших перемещений, для адекватного описания деформированного состояния системы «кран-СГП-груз». Линейные методы и упрощенные модели СГП могут приводить к существенным погрешностям. Выбор уровня детализации РСМ и метода расчета оказывает значительное влияние на достоверность получаемых результатов.

**Рамки исследования и возможность последующего использования.** Результаты применимы к статическому анализу мостовых кранов с гибкими подвесами и сложными СГП. В дальнейшем возможно расширение исследования на динамические режимы работы и другие типы СГП.

**Практическое значение.** Полученные выводы важны для инженерной практики при проектировании и проведении поверочных расчетов мостовых кранов, позволяя выбрать рациональное сочетание уровня детализации модели и метода расчета для обеспечения требуемой точности и безопасности.

**Оригинальность и ценность.** Новизна работы заключается в систематическом сравнении влияния как уровня детализации модели СГП (от сосредоточенных масс до детализированной модели с шарнирами), так и различных методов статического расчета на результаты для крана с гибким подвесом. Результаты будут полезны инженерам-конструкторам, расчетчикам и специалистам по безопасности, работающим с грузоподъемным оборудованием в ответственных отраслях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** мостовой кран, съёмное грузозахватное приспособление, объект использования атомной энергии, расчетно-статическая модель, статический расчет, Р-Д эффект, большие перемещения, сходимость методов, детализация модели

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 22.08.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Синельщиков А.В., 2025



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Синельщиков А.В. Влияние детализации модели съёмного грузозахватного приспособления на результаты статического расчёта мостового крана // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 4. С. 540-553. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-540-553>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-540-553>

EDN: JRJPER

## INFLUENCE OF REMOVABLE LOAD-HANDLING ATTACHMENT MODEL DETAILING ON OVERHEAD CRANE STATIC CALCULATION RESULTS

Alexey V. Sinelshchikov

Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev

Astrakhan, Russia

Laex@bk.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** Ensuring the operational safety of cargo lifting cranes, especially at nuclear power facilities when transporting hazardous loads such as spent fuel assemblies, requires high precision in the calculation of load-bearing structures. Existing modeling approaches do not always consider the influence of the detailing of removable load-handling attachments (RLHAs) on the overall stress-strain state of the crane. The objective of this study is to assess the influence of the finite element model's level of detail for a traverse type RLHA on a flexible suspension on the convergence and accuracy of the static calculation results for an overhead crane.

**Materials and Methods.** The study was conducted using the case of transporting TUK-13 containers with an overhead crane equipped with a traverse on a flexible suspension. Three variants of the crane's computational static model (CSM) were developed and analyzed, varying in the way the RLHA was modeled: 1) representation of the load from the RLHA and cargo as lumped masses (weight); 2) use of a detailed model of the RLHA with cargo, featuring rigid element joints; 3) application of a detailed model of the RLHA with cargo, taking into account hinged joints. For each of the three models, a static analysis was performed using three different methods: linear static analysis, static analysis considering the  $P$ - $\Delta$  effect, and static analysis paying attention to both the  $P$ - $\Delta$  effect and large displacements.

**Conclusions.** The comparative analysis showed that accounting for flexible suspension elements and hinged joints in the RLHA design requires consideration of the  $P$ - $\Delta$  effect and large displacements to adequately describe the deformed state of the "crane-RLHA-cargo" system. Linear methods and simplified RLHA models can lead to significant inaccuracies. The choice of the detailing level of RLHA and the calculation method significantly affects the reliability of the obtained results.

**Research Scope and Future Use.** The results are applicable to the static analysis of overhead cranes with flexible suspensions and complex RLHAs. Further research could be extended to dynamic operating modes and other types of RLHAs.

**Practical Significance.** The obtained information is important for engineering practice in the design and verification of overhead cranes' calculation, enabling the selection of a rational balance between the model's level of detail and the computing method to ensure the required accuracy and safety.

**Originality and Value.** The novelty of this work lies in the systematic comparison of the influence of both the RLHA model's level of detail (from lumped masses to a detailed model with hinged joints) and various static analysis methods on the results for a crane with a flexible suspension. The results will be useful for design engineers, stress-strain analysts, and safety specialists working with lifting equipment in critical industries.

**KEYWORDS:** overhead crane, removable load-handling attachment, nuclear power facilities, computational static model, static analysis,  $P$ -Delta effect, large displacements, convergence of methods, model detailing

**The article was submitted: April 28, 2025; approved after reviewing: June 23, 2025; accepted for publication: August 22, 2025.**

**The author has read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.**

© Sinelshchikov A.V., 2025



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

*For citation.* Sinelshchikov A.V. Influence of removable load-handling attachment model detailing on overhead crane static calculation results. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 540-553. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-540-553>

## ВВЕДЕНИЕ

Грузоподъемные краны играют важную роль в современной промышленности, обеспечивая эффективное пространственное перемещение материалов и изделий на всех этапах производственного цикла. Они являются неотъемлемой частью строительства, монтажа технологического оборудования, обслуживания производственных цехов, складов и логистических центров. Согласно статистике<sup>1</sup>, происходит ежегодный рост эксплуатируемых подъемных сооружений, при этом доля подъемных сооружений, которые исчерпали нормативный срок службы, составляет приблизительно 50%. В промышленном производстве наибольшее распространение получили мостовые краны и кран-балки, которые отличаются высокой производительностью, способностью обслуживать значительные площади и адаптироваться к различным технологическим процессам.

Традиционно проектирование и расчетное обоснование грузоподъемных кранов сосредоточено на обеспечении их прочности и устойчивости при воздействии эксплуатационных нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации. Основное внимание уделяется анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) металлоконструкций крана при подъеме и перемещении грузов в пределах установленной грузоподъемности [1]. Этот подход регламентируется рядом нормативных документов, устанавливающих требования к расчету и конструированию грузоподъемных кранов с целью обеспечения безопасности их эксплуатации, таких как ГОСТ 34017–2016<sup>2</sup>, ФНП «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения»<sup>3</sup>.

В некоторых случаях стандартных расчетов на эксплуатационные нагрузки может быть недостаточно [2, 3]. Повышенные требования предъявляются к грузоподъемным кранам, выполняющим ответственные операции или включенным в технологические операции на опасных производствах<sup>4</sup>, например, при транспортировке опасных грузов, работе кранов над сложным и ответственным оборудованием, в условиях повышенной сейсмичности или вблизи взрывоопасных объектов [4]. Разрушение (падение) такого крана может привести к крупным авариям с тяжелыми экологическими, социальными и экономическими последствиями. Для таких кранов необходимо учитывать дополнительные факторы, влияющие на их надежность и безопасность.

Важно отметить, что падение кранов общепромышленного использования, не связанных с опасными производствами, также может приводить к человеческим жертвам и значительному материальному ущербу. Это подчеркивает необходимость рассматривать вопросы безопасности грузоподъемных кранов на всех этапах их жизненного цикла, от проектирования и изготовления до эксплуатации и технического обслуживания.

Определение адекватной степени детализации расчетной модели является ключевым аспектом при выполнении прочностных расчетов грузоподъемных кранов [5, 6]. Перед проектировщиком стоит научно-техническая задача поиска рационального компромисса, поскольку повышение детализации, способствуя более полному учету физических эффектов и повышению достоверности результатов, неизбежно сопряжено с усложнением расчетной модели и увеличением вычислительных и временных затрат. В то же время чрезмерное упрощение ведет к получению

<sup>1</sup> Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2023 году [Электронный ресурс] / Ростехнадзор. Электрон. дан. Москва, 2024. Режим доступа: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/Годовой отчет 2023.pdf](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Годовой%20отчет%202023.pdf). (дата обращения: 20.01.2025).

<sup>2</sup> ГОСТ 34017–2016 Краны грузоподъемные. Классификация режимов работы (с Поправкой) – Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2017. 21 с.

<sup>3</sup> Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» (в ред. от 12.04.2016). СПб.: Изд-во ДЕАН, 2016. 160 с.

<sup>4</sup> Синельщикова А.В., Панасенко Н.Н. Нормативно-техническая база обеспечения сейсмостойкости грузоподъемных кранов на ОИАЭ // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (26–27 мая 2022 г., Брянск) / под ред. К.А. Гончарова. Брянск: БГТУ, 2022. С. 167–180.

некорректных результатов и существенной недооценке напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции, что недопустимо с точки зрения безопасности [7, 8, 9]. Таким образом, оптимальная расчетная модель должна с достаточной достоверностью описывать реальное поведение конструкции, оставаясь при этом вычислительно эффективной [10].

Выбор конкретного уровня детализации определяется совокупностью факторов, включающих как объективные ограничения, такие как доступные вычислительные ресурсы и временные рамки проекта, так и цель самого анализа, тип и назначение крана. Например, для кранов общепромышленного назначения часто применяются упрощенные подходы, тогда как оборудование для опасных производств требует более детального моделирования. Аналогично для предварительной оценки расчетных характеристик крана может использоваться упрощенная модель, в то время как для детального анализа НДС требуется более точная [11]. Для управления этой сложностью в инженерной практике сложились стандартные методы упрощения расчетных моделей, такие как замена массивных ненесущих элементов эквивалентными объектами упрощенной геометрии или сосредоточенными массами [5, 12].

Наконец, следует учитывать, что сам процесс проектирования является многоэтапным и итеративным [13]. Для сокращения трудозатрат одна и та же расчетная модель зачастую используется как для статических, так и для последующих динамических расчетов, что повышает требования к качеству и универсальности исходной статической модели [14, 15]. Первым этапом подтверждения ее адекватности традиционно служат результаты статического расчета. Однако важно понимать, что в зависимости от сложности и детализации модели простой линейный статический анализ может оказаться недостаточным для полной оценки ее качества<sup>5</sup>. Это, в свою очередь, может потребовать дальнейшего совершенствования как самой расчетной модели, так и применения более сложных методов анализа на последующих этапах проектирования [16]. Принятые проектировщиком упрощения, приведшие к снижению точности расчетного анализа, в некоторых случаях приходится

компенсировать уже на стадии эксплуатации грузоподъемного крана [17].

Целью работы является совершенствование методологии расчетного анализа несущих конструкций мостовых кранов путем исследования влияния уровня детализации СГП на сходимость и точность результатов, а также определение областей рационального применения различных методов статического расчета для обеспечения требуемого уровня безопасности.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Объектом исследования является мостовой кран грузоподъемностью 130/32 т и пролетом 33,5 м, применяемый в технологическом цикле на объекте использования атомной энергии. В качестве СГП рассматривается траверса на гибком подвесе (рисунок 1) общей массой 5,4 т и грузоподъемностью 160 т, предназначенная для транспортировки контейнеров ТУК-13 (рисунок 2). Указанные контейнеры используются для перемещения транспортно-упаковочных комплектов с отработавшими тепловыделяющими сборками (ОТВС) реактора ВВЭР-1000 массой 95,5 т. Суммарная рабочая нагрузка равна  $Q_{\Sigma} = 100,9$  т (СГП и контейнер ТУК-13).

Сравнительное исследование реакции расчетно-статической модели (PCM) мостового крана проведено в программе SAP2000 для трех вариантов PCM мостового крана, отличающихся степенью детализации СГП и рабочим грузом. Для каждого варианта проведен статический расчет (трижды расчетными методами) без рабочего груза (только СГП) с нагрузкой от СГП  $Q_{\Sigma} = 5,4$  т и с рабочей нагрузкой (СГП и контейнер ТУК-13)  $Q_{\Sigma} = 100,9$  т.

Первый вариант (I) моделирует рабочую нагрузку сосредоточенными массами, приложенными к поперечным балкам тележки в четырех точках (рисунок 3). Для случая без транспортируемого груза  $|F| = 1,35$  т, с рабочим грузом  $|F| = (1,35 + 23,875) = 25,225$  т.

Второй (II) и третий (III) варианты PCM мостового крана соответствуют суммарной рабочей нагрузке  $Q_{\Sigma} = 100,9$  т, но моделируют ее как составную часть PCM мостового крана, отражая конструктивные особенности и распределение масс СГП и контейнера ТУК-13. В этих вариантах СГП соединен с поперечными балками грузовой тележки посредством конеч-

<sup>5</sup> Синельщиков А.В. Расчетно-динамические модели грузоподъемных кранов для целей обоснования их сейсмостойкости // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: материалы Всероссийской научно-практической конференции (26–27 мая 2022 г., Брянск) / под ред. К. А. Гончарова. Брянск: БГТУ, 2022. С. 140–153.

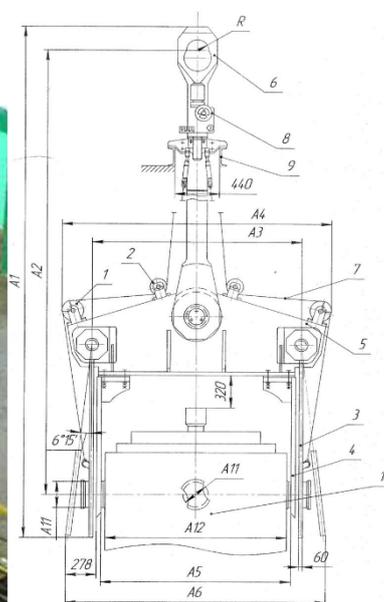
ных элементов (КЭ) типа «нить», моделирующих канат. Как отмечено в работе [18], включение в расчетную модель мостового крана груза на гибком подвесе позволяет точнее моделировать его НДС при исследовании режимов подъема груза. Включение СГП в РСМ приводит к добавлению 65 узлов, 45 стержневых КЭ и 4 КЭ типа «канат». Различие между вторым и третьим вариантами заключается в моделировании соединений элементов СГП: во втором варианте все соединения КЭ жесткие, в то время как в третьем варианте в РСМ введены шарнирные соединения в соответствии с конструкцией СГП (рисунок 4).

РСМ мостового крана г/п 130/32 т без СГП (рисунок 5) состоит из 2094 узлов (число степе-

ней свободы  $n = 12564$ ), количество КЭ – 2398 (в том числе 124 стержня, 2140 пластинчатых КЭ, 122 – жестких связей и 12 объемных КЭ). Положение грузовой тележки на главных балках выбрано как 1/3 пролета мостового крана. Конечно-элементная сетка для пластинчатых КЭ генерировалась программным комплексом SAP2000 автоматически (в виде адаптивной сетки с переменным шагом) с учетом размера КЭ, соотношения его сторон, наличия примыкания других КЭ. Закрепление РСМ осуществлялось в местах контакта ходовых колес (ХК) с крановым рельсом в виде сферического шарнира для одного углового ХК и ограничений по направлениям Z и X для остальных ХК (крановый рельс не включен в РСМ).



а



б

Рисунок 1 – Съёмное грузозахватное приспособление для транспортировки контейнера ТУК-13:  
а – траверса на гибком подвесе; б – траверса ТК-13  
Источник: фотография и схема выполнены автором.

Figure 1 – Removable load-handling attachment for transporting TUK-13 container:  
a – traverse on a flexible suspension; b – TK-13 traverse.  
Source: compiled by the author.

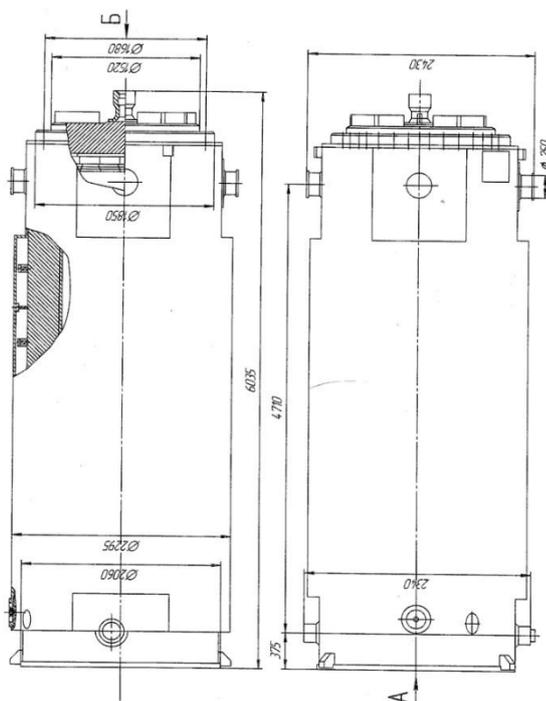


Рисунок 2 – Контейнер ТУК-13 на 12 ОТВС реакторов типа ВВЭР-1000 или АСТ500 массой  $Q = 95,5$  т  
 Источник: схема выполнена автором.

Figure 2 – TUK-13 container for 12 spent fuel assemblies, water-water (cooled) energetic reactor type (WWER -1000) or boiling water-water reactor type (BWR-500) with a mass of  $Q=95.5$  tons  
 Source: compiled by the author.

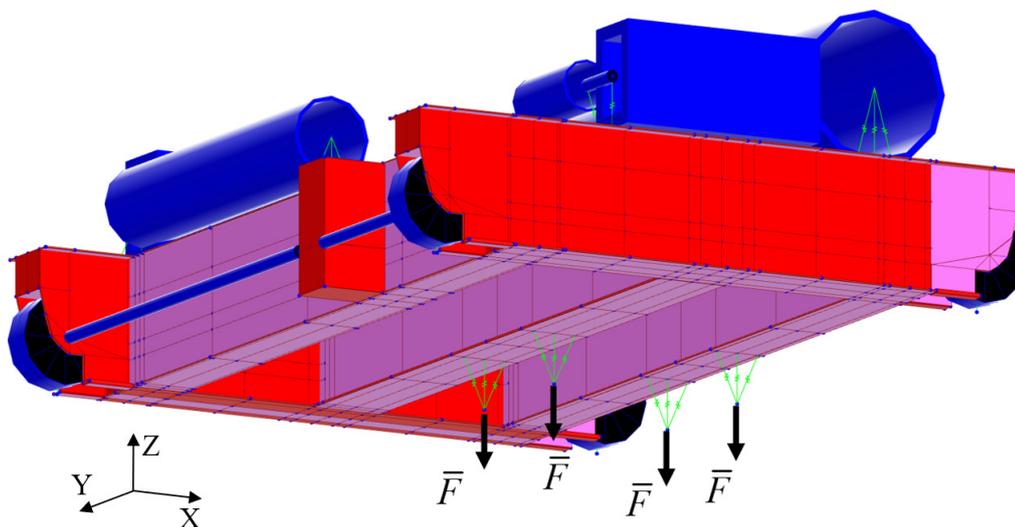


Рисунок 3 – Рабочая нагрузка задана сосредоточенными массами от СГП и контейнера ТУК-13, приведенными к поперечным балкам тележки в четырех точках  
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – Operational load defined by lumped masses from the removable load-handling attachment and TUK-13 container, applied to the trolley crossbeams at four points  
 Source: compiled by the author.

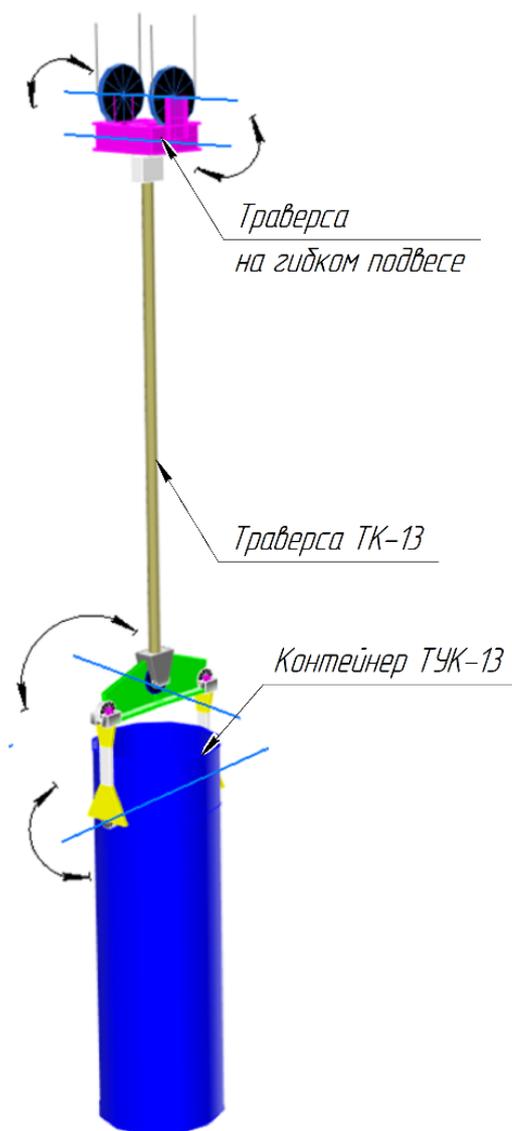


Рисунок 4 – Расчетно-статическая модель траверсы на гибком подвесе траверсы ТК-13 и контейнера ТУК-13 с шарнирным соединением КЭ  
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Calculation and static model of the traverse on a flexible suspension of the TK-13 traverse, and TUK-13 container with a hinged connection of the finite element  
Source: compiled by the author

Следует отметить, что в отличие от первого варианта РСМ, представляющего собой наиболее благоприятный случай для анализа методами строительной механики вследствие жесткого соединения всех конечных элементов РСМ [19], второй и третий варианты характеризуются особенностями, потенциально влияющими на устойчивость численного решения. Второй вариант включает в РСМ две условно разделенные части: мостовой кран

и рабочий груз (СГП и контейнер), соединенные гибкими элементами (канатами). Третий вариант, помимо этого, включает шарнирные соединения в конструкции рабочего груза, моделируя его как механизм. В связи с указанными особенностями для анализа второго и третьего вариантов применяются численные методы, учитывающие Р-Δ эффект и эффект больших перемещений [20].

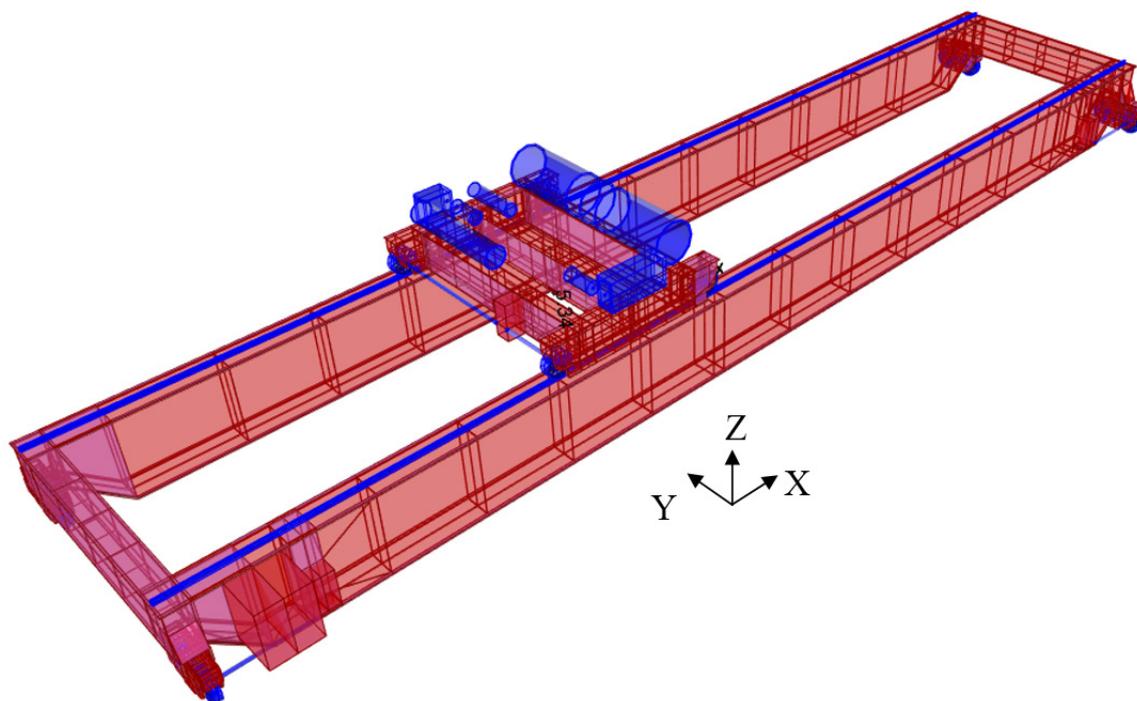


Рисунок 5 – Расчетно-статическая модель мостового крана грузоподъемностью 130/32 т без рабочего груза  
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Calculation and static model of the overhead crane with load capacity of 130/32 tons without operational load  
Source: compiled by the author.

С целью последующего сравнительного анализа результатов, для вариантов нагружения расчеты проведены тремя расчетными методами – линейный статический расчет (А), статический расчет с учетом Р-Δ эффекта (с учетом геометрической нелинейности) [21] (Б) и статический расчет с учетом Р-Δ эффекта и больших перемещений (анализ по деформированной схеме) [22] (В). Принципиальная разница между вариантом Б и В заключается в степени учета изменения геометрии и в физических эффектах, которые каждый метод способен учесть. Если при учете Р-Δ эффекта деформации все еще считаются малыми, то анализ по деформированной схеме на каждом шаге итерационного процесса полностью пересчитывает геометрию и жесткость всей конструкции. При этом учитывается не только Р-Δ эффект, но и большие повороты и влияние продольного растягивающего усилия на изгибную жесткость, что особенно важно для гибких растянутых элементов типа канат. Расчеты проводились без учета физической нелинейности, пластические свойства материала не учитывались.

Сводные результаты расчета приведены в конце настоящей работы в таблице.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнительный анализ результатов статического расчета РСМ мостового крана, выполненного тремя различными методами для первого варианта РСМ, демонстрирует полное совпадение полученных значений. На рисунке 6 представлена визуализация деформированного состояния РСМ, полученная в результате статического расчета с учетом Р-Δ эффекта и больших перемещений.

Применение линейного статического расчета (А) для второго варианта оказалось неэффективным. Наличие в расчетной модели гибких элементов (канатов) с низкой изгибной жесткостью, обеспечивающих соединение двух частей модели, привело к получению неприемлемых результатов, характеризующихся чрезмерной деформацией канатов.

Результаты расчета второго варианта методами (Б) и (В) дали схожие результаты. Для иллюстрации на рисунке 7 приведено деформированное состояние мостового крана г/п 130/32 т с рабочей нагрузкой  $Q_{\Sigma} = 100,9$  т, полученное статическим расчетом с учетом Р-Δ эффекта.

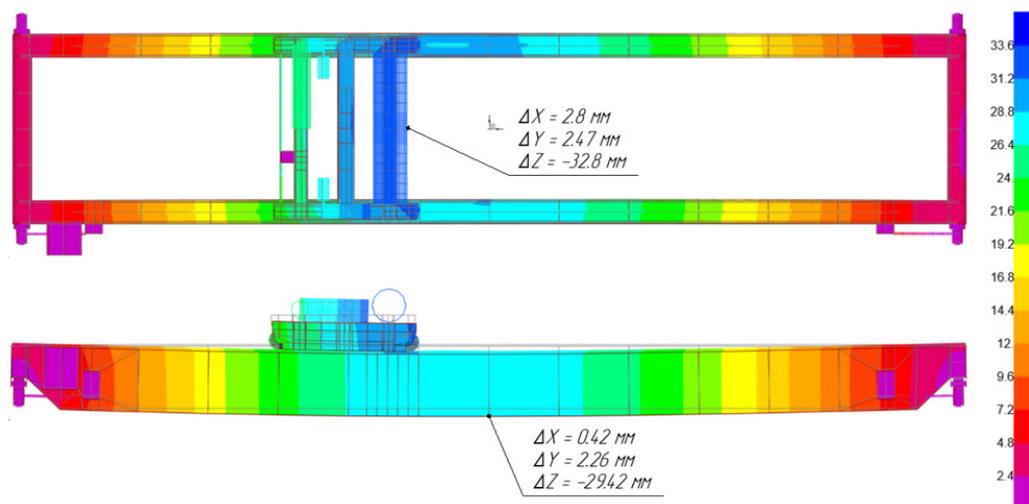


Рисунок 6 – Деформированное состояние мостового крана г/п 130/32 т с рабочей нагрузкой  $Q_{\Sigma} = 100,9$  т, полученное для первого варианта РСМ статическим расчетом с учетом P-Δ эффекта и больших перемещений  
Источник: составлено автором.

Figure 6 – Deformed state of the overhead crane with a lifting capacity of 130/32 tons under the operational load of  $Q_{\Sigma} = 100.9$  tons, obtained for the first variant of the Computational Static Model by static analysis with consideration of the P-Δ effect and large displacements.  
Source: compiled by the author.

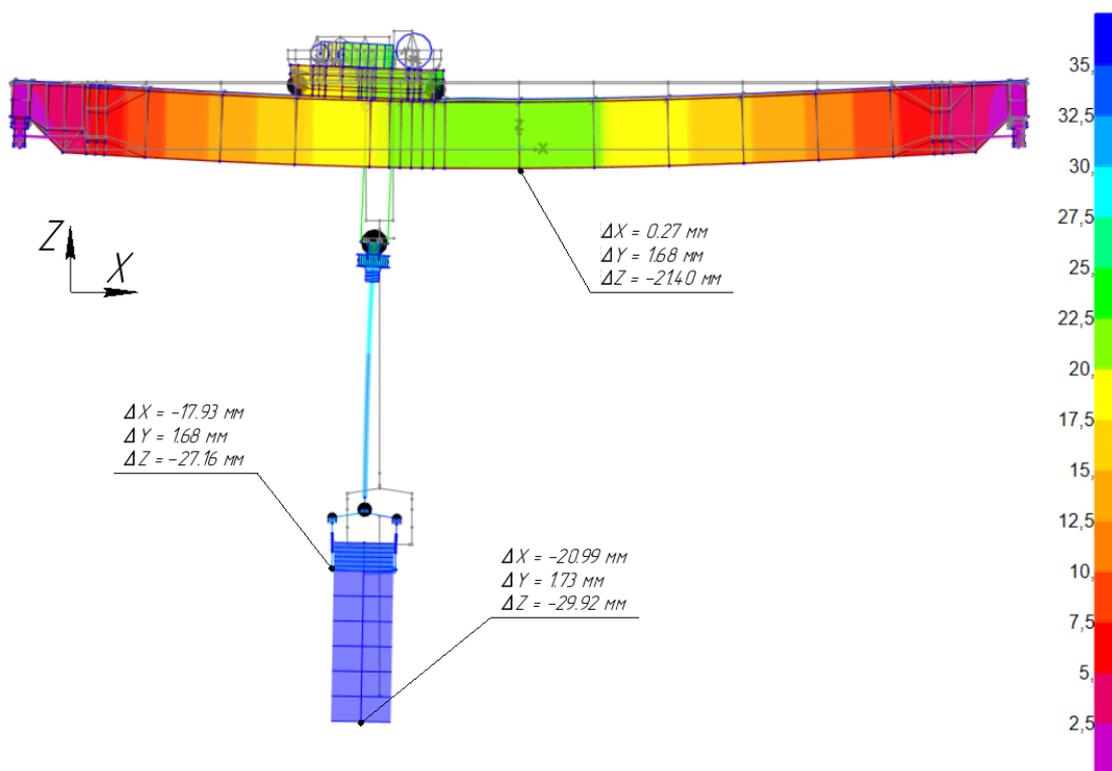


Рисунок 7 – Деформированное состояние мостового крана г/п 130/32 т с рабочей нагрузкой  $Q_{\Sigma} = 100,9$  т, полученное для второго варианта статическим расчетом с учетом P-Δ эффекта  
Источник: составлено автором.

Figure 7 – Deformed state of the overhead crane with a lifting capacity of 130/32 tons under the operational load of  $Q_{\Sigma} = 100.9$  tons, obtained for the second variant of the Computational Static Model by static analysis with consideration of the P-Δ effect.  
Source: compiled by the author.

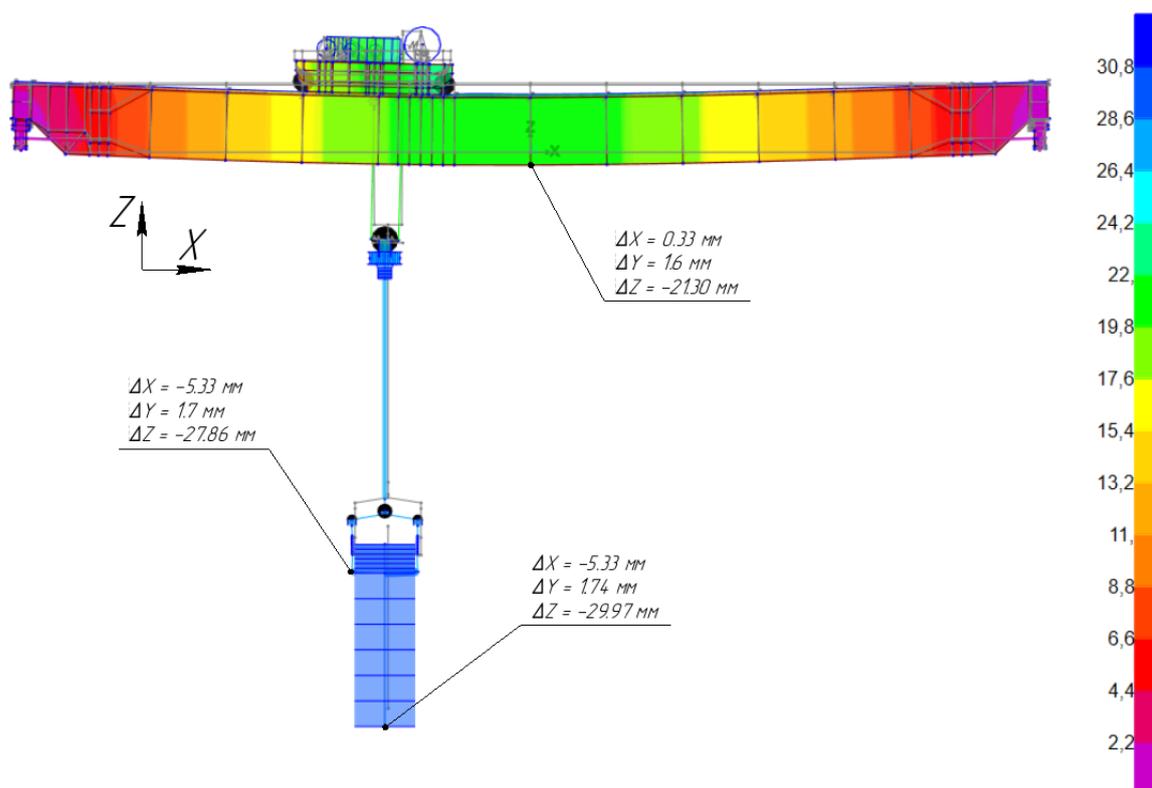


Рисунок 8 – Деформированное состояние мостового крана г/п 130/32 т с рабочей нагрузкой  $Q_{\Sigma} = 100,9$  т, полученное для третьего варианта РСМ статическим расчетом с учетом P-Δ эффекта  
Источник: составлено автором.

Figure 8 – Deformed state of the overhead crane with a lifting capacity of 130/32 tons under the operational load of  $Q_{\Sigma} = 100.9$  tons, obtained for the third variant of the Computational Static Model by static analysis with consideration of the P-Δ effect.  
Source: compiled by the author.

Включение в РСМ мостового крана СГП с грузом, как показано на рисунке 7, приводит к снижению расчетного прогиба главных балок мостового крана с 29,42 мм до 21,4 мм. При этом величина вертикального смещения нижней поверхности контейнера ТУК-13 сопоставима с перемещением нижней плоскости главных балок, полученным для первого варианта РСМ. Значительная часть вертикальных перемещений (приблизительно треть) обусловлена упругим растяжением канатного подвеса СГП. Несмотря на учет геометрической нелинейности, жестко-связанная подсистема «канат – СГП-контейнер» отклоняется от вертикального положения, горизонтальное смещение нижней плоскости контейнера ТК-13 составляет 21 мм.

Введение шарнирных соединений в СГП в третьем варианте РСМ позволило частично

компенсировать отклонение рабочего груза от вертикали. При этом применение расчетных методов (А) и (В) не привело к получению удовлетворительных результатов. Адекватное решение получено при учете P-Δ эффекта (рисунок 8).

В таблице приведены сводные результаты всех проведенных расчетов для различных вариантов РСМ мостового крана и различных вариантов рабочей нагрузки. Следует обратить внимание на то, что помимо результатов, изложенных на настоящей работе, в таблице приведены результаты серии аналогичных статических расчетов, проведенных для таких же расчетных случаев детализации СГП и такими же расчетными методами за исключением того, что в РСМ не был включен рабочий груз – контейнер ТУК-13 массой  $Q = 95,5$  т (группа столбцов «Без рабочего груза (только СГП)»).

Ключевыми в таблице являются строки «Деформированное состояние корректно», принимающие следующие значения:

1. «Да» – полученные деформации сопоставимы (и имеют тот же порядок) со статическим линейным расчетом.

2. «Да\*» – полученные деформации сопоставимы (и имеют тот же порядок) со статическим линейным расчетом, но наблюдается

отклонение от вертикали нижней точки СГП ( $\Delta X \neq 0$ ).

3. «Нет» – полученные деформации не сопоставимы (превышают на несколько порядков) со статическим линейным расчетом и/или наблюдаются перемещения конструктивных элементов РСМ как механизмов (прежде всего узлов СГП, соединенных с другими частями шарнирами и канатами).

Таблица

**Сводные результаты всех проведенных расчетов для различных вариантов РСМ мостового крана и различных вариантов рабочей нагрузки**  
Источник: составлено автором.

Table

**Summary results of all performed calculations for different variants of the Computational Static Model for overhead crane and different operational load varieties**  
Source: compiled by the author.

Расчетный вариант		Без рабочего груза (только СГП)			С рабочим грузом (СГП и контейнер ТУК-13)		
		I	II	III	I	II	III
Статический линейный расчет	Деформированное состояние корректно	Да	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
	$\Delta Z$ (мм) середины главной балки	-14,04	-14,14	-14,14	-29,36	-21,38	-17,37
	$\Delta Z$ (мм) нижней точки СГП	–	$\approx -10^6$	$\approx -10^7$	–	$\approx -10^8$	$\approx -10^6$
Статический расчет с учетом Р-Д эффекта	Деформированное состояние корректно	Да	Да*	Да*	Да	Да*	Да*
	$\Delta Z$ (мм) середины главной балки	-14,06	-14,15	-14,15	-29,40	-21,40	-21,42
	$\Delta Z$ (мм) нижней точки СГП	–	-15,02 ( $\Delta X = -16$ мм)	-14,25 ( $\Delta X = -7$ мм)	–	-27,16 ( $\Delta X = -17,9$ мм)	-27,32 ( $\Delta X = -5,33$ мм)
Статический расчет с учетом Р-Д эффекта и больших перемещений	Деформированное состояние корректно	Да	Да*	Да*	Да	Да*	Да*
	$\Delta Z$ (мм) середины главной балки	-14,06	-14,15	-14,16	-29,42	-21,42	-21,30
	$\Delta Z$ (мм) нижней точки СГП	–	-15,02 ( $\Delta X = -12$ мм)	-14,26 ( $\Delta X = -6$ мм)	–	-28,54 ( $\Delta X = -17,9$ мм)	-27,86 ( $\Delta X = -5,33$ мм)

Примечание: \* результаты частично корректны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По представленным результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Линейный статический расчет применим только для упрощенных моделей. Когда СГП с грузом моделируется сосредоточенными массами (вариант I), линейный расчет дает адекватные результаты, совпадающие с методами статического расчета, учитывающие Р-Д эффект и/или большие перемещения. При большей детализации СГП с гибкими элементами (канаты) и шарнирными соединениями (варианты II и III) линейный расчет становится непригодным, приводя к нереалистичным деформациям.

2. Учет Р-Д эффекта целесообразен для моделей с гибкими элементами. Для моделей, включающих СГП с канатным подвесом (вариант II), учет Р-Д эффекта и/или больших перемещений дает корректные результаты. Учет больших перемещений в этом случае не приводит к существенным изменениям, но может быть важен для других типов нагрузок или конструкций.

3. Включение в РСМ шарнирных соединений требует особого внимания к результатам расчета. Введение шарниров в модель СГП (вариант III) усложняет расчет и требует учета Р-Д эффекта. Линейный расчет и расчет с учетом больших перемещений в этом случае не дают адекватных результатов.

4. Детализация СГП влияет на общую деформацию крана. Моделирование СГП как части конструкции крана (варианты II и III), а не как сосредоточенных масс (вариант I), приводит к изменению расчетных деформаций главных балок. Это говорит о важности учета конструкции СГП для получения более точных результатов.

5. Выбор метода расчета должен основываться на уровне детализации модели СГП. Для упрощенных моделей достаточен линейный расчет, но для более реалистичных моделей, учитывающих гибкие элементы и шарнирные соединения, необходим учет геометрической нелинейности и/или больших перемещений.

6. Учет особенностей конструкции СГП важен для точности моделирования. Различия в результатах для вариантов II и III подтверждают, что учет шарнирных соединений в СГП влияет на деформированное состояние системы и должен быть учтен в расчетной модели.

В целом исследование демонстрирует важность выбора правильного уровня детализа-

ции модели СГП и соответствующего метода расчета для получения достоверных результатов при оценке расчетных деформаций мостового крана, особенно при работе с тяжелыми и сложными грузами на опасных объектах, где требования к безопасности особенно высоки. Дальнейшие исследования связаны с изучением изменения динамического портрета РСМ мостового крана на моделях с различной степенью детализации СГП.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Niu C.M., Zhang H.W., Ouyang H.A. comprehensive dynamic model of electric overhead cranes and the lifting operations // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2012. Vol. 226, № 6. P. 1484–1503. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406211423586>.

2. Lei Z., Han S., Bouferguene A., Taghaddos H., Hermann U., & Al-Hussein M. Algorithm for Mobile Crane Walking Path Planning in Congested Industrial Plants. Journal of Construction Engineering and Management-Asce. 2015. 141(2), 05014016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000929](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000929)

3. Abel P., & Spaeth H. Method for measuring loads for cranes. 2006. <https://patents.google.com/patent/EP1748021B1/en>

4. Belleri A., Labo S., Marini A.C., Riva P. The Influence of Overhead Cranes in the Seismic Performance of Industrial Buildings// Frontiers in Built Environment. 2017. Vol. 3. Article 64. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00064>.

5. Синельщиков А.В., Панасенко Н.Н. Сравнительный анализ расчетно-динамических моделей портовых кранов на основе одно- и двумерных конечных элементов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2019. № 2. С. 127–144. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2019-2-127-144>

6. Jia Z., Song X., Xu Y. and Gu H. Static Analysis of Main Girder of Shipbuilding Gantry Crane-Based on ANSYS, n.d. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5276.2012.05.032>

7. Fatehi M.H., Eghtesad M., Amjadifard R. Modelling and Control of an Overhead Crane System with a Flexible Cable and Large Swing Angle // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 2014. Vol. 33, № 4. P. 395–409. DOI: <https://doi.org/10.1260/0263-0923.33.4.395>.

8. Mojallizadeh M.R., Brogliato B., Prieur C. Modeling and control of overhead cranes: a tutorial overview and perspectives // Annual Reviews in Control. 2023. Vol. 56. Article 100877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.002>.

9. Jin Y. (n.d.). The finite element analysis of the QTZ63 tower crane. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4303.2010.03.002>

10. Garcia A., Singhose W., Ferri A.A. Three-Dimensional Modeling and Experimental Verification of Off-Centered Crane Lifts // ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference (DSCC2015), Columbus, OH, October 28-30, 2015. Columbus: ASME, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1115/DSCC2015-9805>.
11. Zhu C., Miao W., Xu K., Xiao M., Li C. Lifting Attachments of Cranes: text // Theory and technology of crane systems / edited by K. Xu, W. Miao, C. Zhu, C. Li, Y. Liu, M. Xiao. Singapore: Springer, 2024. P. 745–844. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-4848-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-99-4848-2_8).
12. Панасенко Н.Н., Синельщиков А.В. Конечно-элементный анализ и проектирование подъемных сооружений в сейсмостойком исполнении: монография; под ред. Н.Н. Панасенко. М.: Издательство АСВ, 2020. 760 с. ISBN 978-5-4323-0351-6.
13. Котельников В.С., Панасенко Н.Н., Синельщиков А.В. Системная оценка расчетно-проектировочного анализа грузоподъемных кранов // ТехНАД-СОП. 2022. № 7–8 (185). С. 28–31.
14. Lanz, N., Spescha, D., Weikert, S., Wegener, K. Efficient Static and Dynamic Modelling of Machine Structures with Large Linear Motions. *International Journal of Automation Technology*. 2018. 12(5). 622–630. DOI: <https://doi.org/10.20965/IJAT.2018.P0622>
15. Wu, Z. Application of Nonlinear Dynamic Model Combined With Static Model. 2008. [https://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-ZGDC200829019.htm](https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-ZGDC200829019.htm)
16. Navale R.S., Patil P.M., Tadamalle A.P. Design optimization of single overhead crane girder using finite element analysis. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. // *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2023. Vol. 11, № 11. P. 733–737. DOI: <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i11.10088>.
17. Valtchev S., Sinyukov A., Sinyukova T., Gracheva E., Miceli R., Goncalves J. Increasing the Damping Capacity of Crane Electric Drive Systems When Moving Cargo with a Flexible Suspension // 2024 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, 2024. Suceava: IEEE, 2024. P. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.1109/DAS61944.2024.10541197>.
18. Haniszewski T. Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation // *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19, № 1. P. 75–86. DOI: <https://doi.org/10.21595/JVE.2016.17310>.
19. Строительная механика сварных пространственных металлоконструкций: коллективная монография / Н.Н. Панасенко, В.В. Смирнов, А.В. Синельщиков [и др.]. Волгоград: Волгоградское научное издательство, 2017. 480 с.
20. Синельщиков А.В. Большие перемещения в задачах расчетного анализа грузоподъемных кранов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2007. № 2 (37). С. 10–16.
21. Liu S. Z., Guo X. Y. A Practical Calculation Method of P- $\Delta$  Effect in Frame Structure. *Advanced Materials Research*. 2010. 1844–1848. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.163-167.1844>
22. Cusmano, V., Pantò, B., Rapicavoli, D., Calìo, I. A discrete-element approach accounting for P-Delta effects. 2023. 52(7). 2047–2066. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.3867>

## REFERENCES

1. Niu C.M., Zhang, H.W., Ouyang, H. A comprehensive dynamic model of electric overhead cranes and the lifting operations. *Proceedings1 of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2012; 226(6): 1484–1503. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406211423586>
2. Lei Z., Han S., Bouferguene A., Taghaddos H., Hermann U., & Al-Hussein M. Algorithm for Mobile Crane Walking Path Planning in Congested Industrial Plants. *Journal of Construction Engineering and Management-Asce*, 141(2); 2015; 05014016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000929](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000929)
3. Abel P., & Spaeth H. Method for measuring loads for cranes. 2006. <https://patents.google.com/patent/EP1748021B1/en>
4. Belleri A., Labo S., Marini A.C., Riva P. The influence of overhead cranes in the seismic performance of industrial buildings. *Frontiers in Built Environment*. 2017; 3, Article 64. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00064>
5. Sinelshchikov A.V., Panasenko N.N. Comparative analysis of computable dynamic models of port cranes on the basis of one and two-dimensional finite elements. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2019; 2: 127–144. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2019-2-127-144>.
6. Jia Z., Song X., Xu Y. and Gu H. Static Analysis of Main Girder of Shipbuilding Gantry Crane-Based on ANSYS, n.d. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5276.2012.05.032>
7. Fatehi M.H., Eghtesad M., Amjadifard R. Modelling and control of an overhead crane system with a flexible cable and large swing angle. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2014; 33(4): 395–409. DOI: <https://doi.org/10.1260/0263-0923.33.4.395>
8. Mojallizadeh M.R., Brogliato B., Prieur C. Modeling and control of overhead cranes: A tutorial overview and perspectives. *Annual Reviews in Control*. 2023; 56, Article 100877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.002>
9. JIN, Y. (n.d.). The finite element analysis of the QTZ63 tower crane. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4303.2010.03.002>
10. Garcia A., Singhose W., Ferri A.A. Three-dimensional modeling and experimental verification of off-centered crane lifts. *In ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference*. ASME.2015. DOI: <https://doi.org/10.1115/DSCC2015-9805>

11. Zhu C., Miao W., Xu K., Xiao M., Li C. Lifting attachments of cranes. In K. Xu, W. Miao, C. Zhu, C. Li, Y. Liu, M. Xiao (Eds.), *Theory and technology of crane systems*. Springer. 2024: 745-844. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-4848-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-99-4848-2_8)
12. Panasenko N.N., Sinelshchikov A.V. *Finite element analysis and design of lifting structures in seismic-resistant design: Monograph*. ASV Publishing House. 2020: 760.
13. Kotelnikov V.S., Panasenko N.N., Sinelshchikov A.V. Systematic assessment of the design analysis of lifting cranes. *TekhNADZOR*. 2022; 185(7-8): 28–31. (in Russ.)
14. Lanz N., Spescha D., Weikert S., & Wegener K. Efficient Static and Dynamic Modelling of Machine Structures with Large Linear Motions. *International Journal of Automation Technology*. 2018; 12(5): 622–630. DOI: <https://doi.org/10.20965/IJAT.2018.P0622>
15. Wu Z. Application of Nonlinear Dynamic Model Combined With Static Model. 2008. [https://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-ZGDC200829019.htm](https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-ZGDC200829019.htm)
16. Navale R.S., Patil P.M., Tadamalle A.P. Design optimization of single overhead crane girder using finite element analysis. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2023; 11(11): 733–737. DOI: <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i11.1008845>
17. Valtchev S., Sinyukov A., Sinyukova T., Gracheva E., Miceli R., Goncalves J. Increasing the damping capacity of crane electric drive systems when moving cargo with a flexible suspension. In 2024 International Conference on Development and Application Systems (DAS). 2024: 53–58. IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/DAS61944.2024.10541197>
18. Haniszewski T. Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation. *Journal of Vibroengineering*. 2017; 19(1): 75–86. DOI: <https://doi.org/10.21595/JVE.2016.17310>
19. Panasenko N.N., Smirnov V.V., Sinelshchikov A.V., Kotelnikov V.S., Korennov D.V. *Structural mechanics of welded spatial metal structures: A collective monograph*. Volgograd Scientific Publishing House. 2017: 480.
20. Sinelshchikov A.V. Large displacements in problems of computational analysis of lifting cranes. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology*. 2007; 2(37): 10–16. (in Russ.)
21. Liu S. Z., Guo X. Y. A Practical Calculation Method of P- $\Delta$  Effect in Frame Structure. *Advanced Materials Research*. 2010: 1844–1848. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.163-167.1844>
22. Cusmano V., Pantò B., Rapicavoli D., Calò I. A discrete-element approach accounting for P-Delta effects. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2023; 52(7): 2047–2066. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.3867>

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Синельщиков Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Информационные технологии» Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева (414056, Южный федеральный округ, Астраханская область, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а).

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3652-9016>,

**Scopus ID:** 57199405189,

**SPIN-код:** 1473-4782,

**e-mail:** [Laex@bk.ru](mailto:Laex@bk.ru)

## INFORMATION ABOUT AUTHOR

Sinelshchikov Alexei V. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Information Technologies of the Astrakhan State University named after V.N. Tatishchev (414056, Southern Federal District, Astrakhan Region, Astrakhan, Tatishcheva St., 20a)

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3652-9016>,

**Scopus ID:** 57199405189,

**SPIN-code:** 1473-4782,

**e-mail:** [Laex@bk.ru](mailto:Laex@bk.ru)