

## Динамическое определение опасных участков механизмов методами САПР Autodesk Inventor

Н.В. Путеев<sup>a</sup>, Д.Г. Латушкин, В.В. Савицкий  
Витбский государственный технологический университет, Республика Беларусь  
E-mail: [\\*tiomp\\_vstu@mail.ru](mailto:*tiomp_vstu@mail.ru)

**Аннотация.** Целью работы являлось изучение процесса потери устойчивости стрелы манипуляторной установки методами твердотельного моделирования, выявление опасных участков в конструкции, способных разрушиться, выработка рекомендаций по предотвращению разрушения стрелы.

Предложено устанавливать измерительные датчики в местах, где напряжение коррелируется с напряжением в месте опасного участка, определённого с помощью системы прочностного анализа САПР Autodesk Inventor.

**Ключевые слова:** манипулятор, потеря устойчивости стрелы манипулятора, коэффициент запаса прочности, твердотельное моделирование, визуализация процесса деформирования.

## Dynamic Determination of Dangerous Areas of Mechanisms with Autodesk Inventor CAD Methods

N. Puteev<sup>a</sup>, D. Latushkin, V. Savitsky  
Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus  
E-mail: [\\*tiomp\\_vstu@mail.ru](mailto:*tiomp_vstu@mail.ru)

**Annotation.** The aim of the work was to study the resistance process of the boom of a manipulator installation of solid modeling methods, to identify dangerous areas in the structure with an increase in deformations, a way to collapse, and develop recommendations to prevent the collapse of an arrow.

It is proposed to install measuring sensors in places determined by using the Autodesk Inventor CAD strength analysis system.

**Key words:** manipulator, loss of stability of the manipulator boom, safety factor, solid modeling, visualization of the deformation process.

Республика Беларусь каждый год увеличивает номенклатуру выпускаемой промышленной продукции. При этом рынок требует необходимую технику, обладающую высокой надёжностью и прочностью.

Традиционные методы проектирования не дают уверенности в обеспечении требуемых качеств, а для проведения испытаний конструкции ещё и затратны по времени. Поэтому всё большее значение приобретают современные программные продукты, позволяющие не только определять опасные участки в конструкции механизмов и давать визуализацию напряженного состояния, но и выявлять влияние динамических нагрузок при изменении места приложения сил во времени и пространстве.

Классические методы сопротивления материалов на взгляд авторов в настоящее время допустимо применять в следующих случаях.

В первом случае для расчёта класса деталей,

геометрическая форма которых для выполнения расчётов моделируется стержнями, оболочками, пластинами, фермами, их сочетаниями и т. д. Удовлетворяющие по точности расчёты прочности можно получить, если на нагружение детали не оказывают существенного влияния контактные нагрузки и отсутствуют концентраторы напряжений, например, проточки, элементы креплений и тому подобное.

Во втором случае выполняется расчёт прочности деталей механизмов, которые не подвержены опасности разрушения вследствие потери устойчивости.

Однако, узлы современных механизмов, таких как роботы, манипуляторы, которые управляются компьютером и выполняют оптимизированный по затратам времени технологический процесс, испытывают сложно-пространственное нагружение деталей. Это неизбежно приводит к необходимости оценки опасности потери устойчивости элементов конструкций

таких механизмов от действия нагрузок, отклонившихся по разным причинам от расчётных плоскостей. Классическим примером механизма, в котором протекает такой процесс, является разрушение вертикально нагруженного стержня при отклонении нагрузки от оси стержня, приведенный в работе [1]. Данная ситуация типична для грузоподъёмных механизмов, в частности манипуляторов, конструктивные элементы которых при расчётах рассматриваются как стержни.

Проведем анализ методик решения задачи исследования устойчивости элемента конструкции методами классической механики и сопротивления материалов, описанных в трудах известных ученых.

При этом отметим, что в большинстве случаев исследуется потенциальная энергия изгиба в одной из плоскостей и энергия кручения стержня относительно его оси (рис. 1) [1].

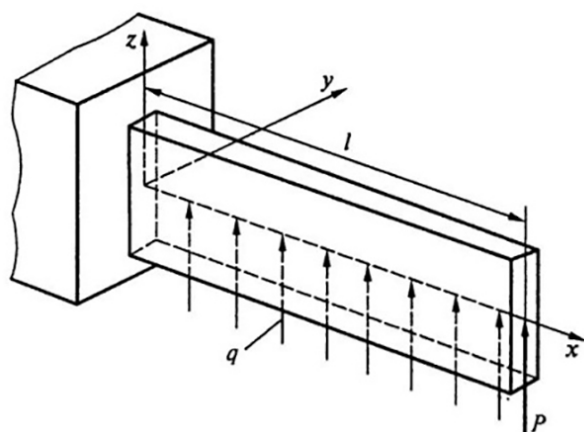


Рисунок 1 – Искривление стержня при косом изгибе

Так в [1] уравнению устойчивости стержня описывается перемещение  $v$  точек оси стержня и угла  $\varphi$  поворота сечения в плоскости  $yz$  (рис. 2)

$$\Delta W = \frac{1}{2} \int_0^l EJ v''^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^l GJ_K \phi'^2 dx + \int_0^l \left( \int_F \sigma_x \varepsilon_x dF \right) dx,$$

где  $EJ$  – изгибная жёсткость стержня в плоскости  $xu$ ;  $GJ_K$  – жёсткость стержня на кручение;  $\varepsilon_x$  – дополнительные квадратичные удлинения.

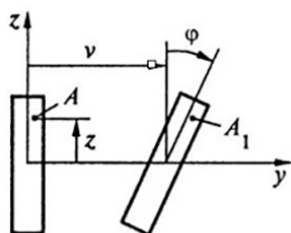


Рисунок 2 – Деформирование стержня при потере устойчивости

В источнике [1] приведены формулы для определения значений критических моментов и сил

В источнике [2] также исследовалась устойчивость стержней по полной потенциальной энергии в составе потенциальной энергии начального прямолинейного состояния равновесия и изменения полной потенциальной энергии, вызванной изгибом стержня, и получены формулы для определения энергии и наибольшего сжимающего напряжения.

Расчёты с использованием формул, приведенных в [1–2], при очевидной сложности приводят к результатам неприемлемой точности, о чём отмечали сами авторы, поэтому неудивительно, что происходил поиск более адекватных методов расчёта.

Так, в трудах С.П. Тимошенко и других ученых появилась теория структур, матричный структурный анализ, развитие которых привело к появлению метода конечных элементов (МКЭ).

Сущность и основное преимущество МКЭ – точность, отразил О. Зенкевич. В работе [3] автор указывает, что «метод конечных элементов по существу сводится к аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью ... элементов, имеющих конечное число степеней свободы, между этими элементами ... устанавливается взаимосвязь. Предварительный расчет позволяет однозначно определить напряжения в любой заданной точке через узловые перемещения». Поэтому МКЭ очень хорошо сочетается с программными продуктами твердотельного 3D-проектирования. Поскольку 3D-модели деталей позволяют получать высокоточные значения перемещений во всех геометрических элементах детали, расчёты по МКЭ в системах автоматизированного проектирования (САПР) являются достаточно точными, наглядными и не требуют значительных затрат времени.

В трудах современных исследователей данное направление исследований успешно развивается. Однако, применение программных продуктов, требующих серьезных упрощений в схемах «деталь-нагрузка» [4–5], на наш взгляд, не дает достоверных результатов. Поэтому все чаще исследователями применяется САПР AUTODESK INVENTOR [6–7].

При работе в САПР на базе программных продуктов AUTODESK, вследствие реализации в них МКЭ, устраняются указанные выше недостатки применения расчётных методов: существенное упрощение геометрической модели детали и искажение нагружения при выборе расчётной схемы.

Целью работы являлась выработка рекомендаций по предотвращению разрушения стрелы вследствие потери устойчивости. При этом методами твердотельного моделирования выявляются опасные участки в конструкции стрелы манипуляторной установки, способные разрушиться при нарастании деформаций.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- выбор объекта исследования;
- определение метода исследования напряжённо-деформированного состояния объекта;
- построение 3D-модели конструкции стрелы манипулятора;
- определение схемы нагружения;
- моделирование и визуализация распределения нагрузок на 3D-модель;
- динамическая визуализация процесса нагружения и деформирования;
- анализ полученных результатов;
- выявление опасных участков конструкции;
- предложение по предупреждению аварийных ситуаций.

Потеря устойчивости приводит, как правило, к разрушению металлоконструкции манипуляторной установки (МУ) без возможности её дальнейшего восстановления, а также возможным вторичным разрушениям и даже человеческим жертвам.

Согласно ГОСТ 32579.1–2013 [8] нагрузки на манипуляторные установки по частоте возникновения делятся на несколько категорий: регулярные, нерегулярные, исключительные и особые. Конкретные виды нагрузок, относящихся к этим категориям, зависят от типа грузоподъемного устройства и условий его эксплуатации:

- а) регулярные нагрузки обусловлены гравитацией, а также действием ускорений (замедлений), создаваемых механизмами при перемещении масс манипуляторного устройства и груза. Кроме того, регулярными нагрузками могут быть технологические воздействия на элементы специальных кранов;
- б) к нерегулярным нагрузкам относятся нагрузки от ветра рабочего состояния, от снега и льда, тепловых воздействий и перекосов;
- в) исключительные нагрузки могут возникать несколько раз в течение срока службы манипуляторного устройства. Исключительными являются нагрузки, возникающие при испытаниях устройства, ветре нерабочего состояния, в аварийных и других ситуациях;
- г) особые нагрузки возникают при монтаже, демонтаже или транспортировке устройства.

Моделирование нагрузок на манипуляторную установку проводилось в САПР Autodesk Inventor. САПР содержит среду прочностного анализа деталей, которая позволяет реализовать проверку моделей без создания опытных образцов. Вычислительный модуль Autodesk Inventor для прочностных расчётов использует современный конечно-элементный вычислительный комплекс. Это позволяет не упрощать конструкцию, что необходимо при использовании классических методов расчёта. Как следствие, распределение напряжений по элементам конечно-элементной модели ближе к действительному в конструкции реального механизма. При этом необходимо лишь правильно определять граничные условия и схему приложения нагрузок.

Для работы в среде прочностного анализа потребовалось создать 3D-модель конструкции стрелы манипулятора и выбрать материалы, из которых выполнены её элементы. Проектирование модели выполнялось средствами САПР Autodesk Inventor. Используя полученную 3D-модель, в среде прочностного анализа были заданы действующие нагрузки и проанализированы контакты между элементами конструкции. Это позволило задать параметры конечно-элементной сетки, изображённой на рисунке 3.

Система прочностного анализа обладает широким спектром возможностей по выводу результатов расчётов. Она позволила получить цветные карты распределения напряжений (рис. 4), смещений (рис. 5) и выявить опасные участки по коэффициенту запаса прочности (рис. 6).

На основании результатов исследования были обнаружены опасные участки в конструкции манипулятора, потеря устойчивости стрелы; недостаточная прочность проявлялась в проушинах секции стрелы. При этом по соотношению величин нагрузок в стреле и проушине установлено, что они коррелируются.

Для обеспечения надёжной работы манипуляторов, они снабжаются следующими автоматическими приборами и системами безопасности: блоком ограничения грузоподъемности; блоком аварийной остановки; системой ограничения поднимаемой массы, учитывающей длину выноса стрелы и угол поворота манипулятора; системой контроля углового положения и устойчивости шасси.

Для контроля предельной нагрузки на стреле манипулятора серийно устанавливаются датчики деформаций. Существует множество способов измерения деформаций: тензорезистивный, пьезоэлектрический, оптико-поляризационный, пьезорезистивный, волоконно-оптический, или простым считыванием показаний с линейки механического тензодатчика. Среди электронных датчиков наибольшее распространение получили тензорезистивные датчики.

Датчик деформации прикрепляется непосредственно к плоской поверхности нагружаемого объекта. Однако в месте выявленного опасного участка невозможно установить серийные датчики предельной нагрузки из-за их габаритов.

В связи с этим предложено устанавливать измерительные датчики в местах, где напряжение коррелируется с напряжением в месте опасного участка, определённого с помощью системы прочностного анализа САПР Autodesk Inventor. Для параметризации показаний датчика деформации используют управляющий контакт. Значения параметров определяют при нулевом и максимальном значении приложенной нагрузки.

При этом настройку сигнала опасности производят не по напряжению прочностного предела в стреле манипулятора, а по пределу устойчивости с учётом корреляции напряжений в стреле и проушине.

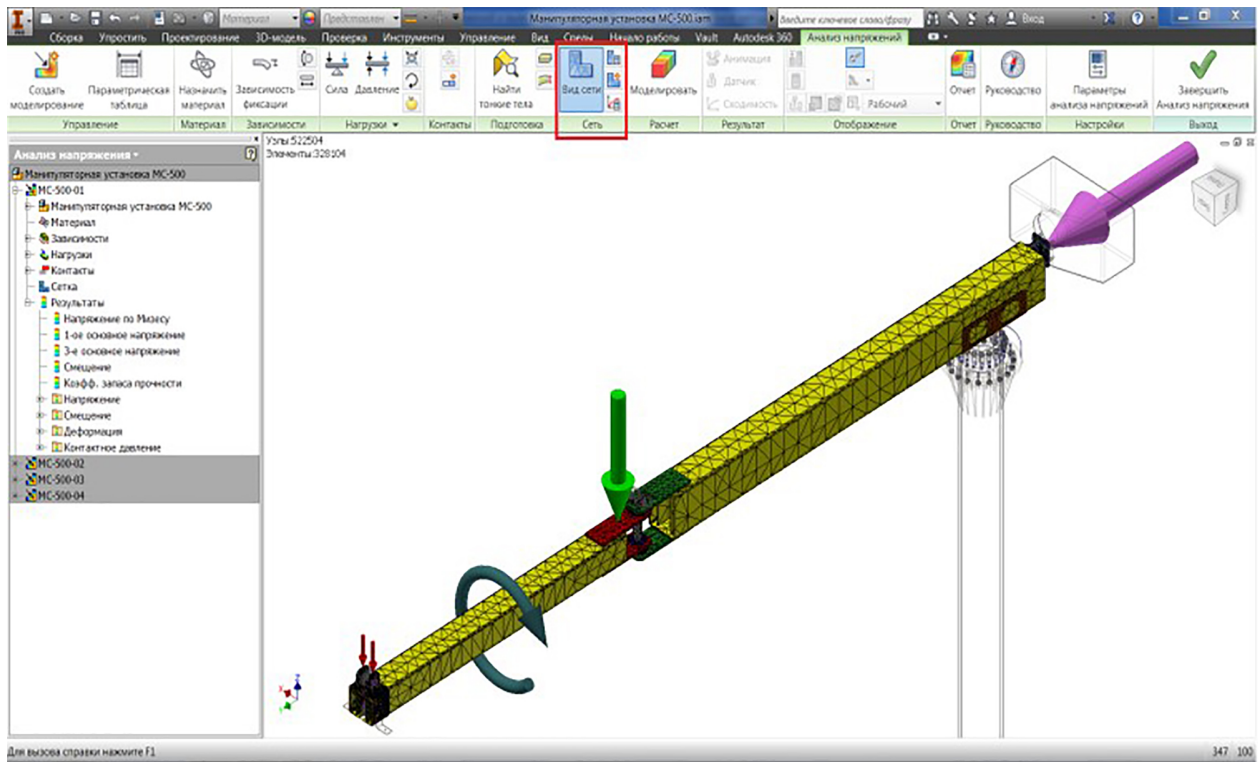


Рисунок 3 – Задание нагрузок и параметров КЭ-сетки

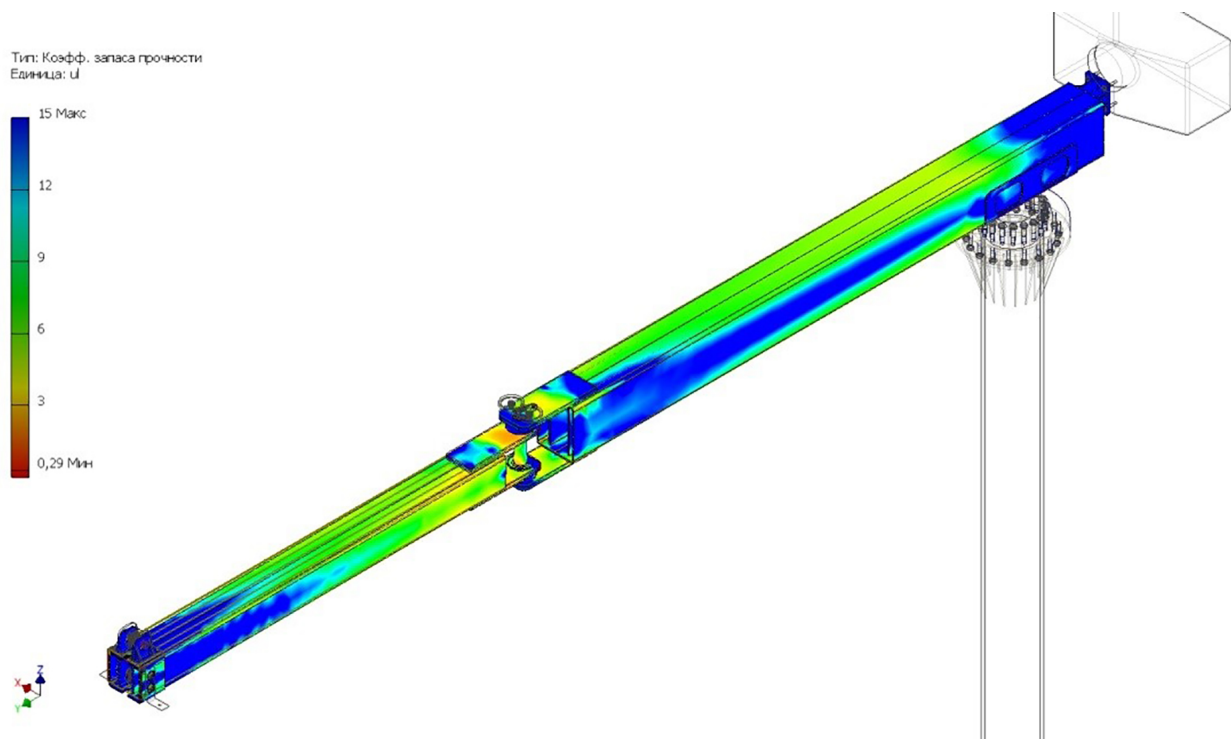


Рисунок 4 – Карта распределения напряжений



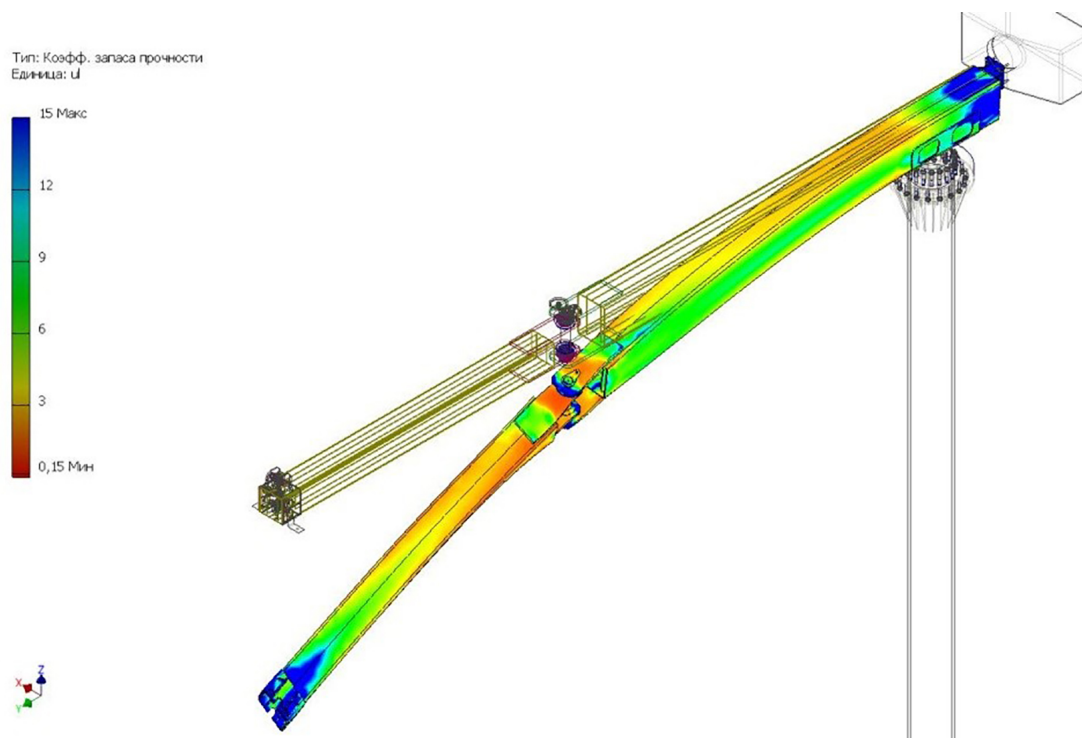


Рисунок 5 – Стрела манипулятора при допустимой нагрузке и после потери устойчивости

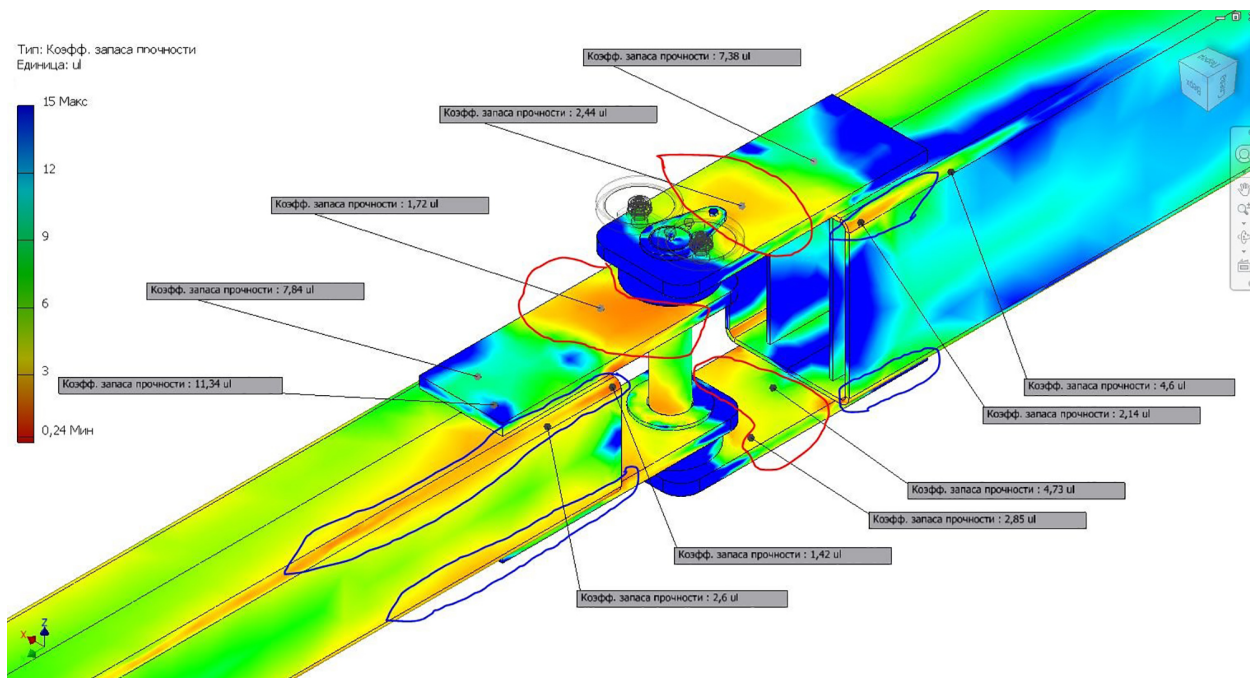


Рисунок 6 – Опасные участки, местные концентраторы напряжений (выделены замкнутыми линиями) и коэффициенты запаса прочности

Предложенный метод расчёта предельных нагрузок и динамического анализа нагружения, установки и настройки датчиков предельных нагрузок в местах выявленных опасных участков применим в различных отраслях машиностроения.

Наибольшая эффективность данного метода проявляется при проектировании механизмов со сложными пространственными элементами конструкции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алфутов, Н. А. Устойчивость движения и равновесия / Н. А. Алфутов, К. С. Колесников. – Москва, 2003. – 256 с.
2. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов / С. П. Тимошенко. – Москва, 1965. – 364 с.
3. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – Москва, 1975. – 541 с.
4. Чиров, А. Н. Силовой расчет плоского параллельного манипулятора / А. Н. Чиров, А. М. Сапегин, Л. В. Ручкин // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2020. – № 8. – С. 16–19.
5. Ручкин, Л. В. Силовой расчет параллельного манипулятора в программном пакете Labview / Л. В. Ручкин, Н. Л. Ручкина // Решетневские чтения. – 2017. – № 21. – Ч. 1. – С. 527–528.
6. Балакин, А. И. Исследование воздействия нагрузок на деталь с использованием метода конечных элементов / А. И. Балакин, Н. А. Балакина // Аллея науки. – 2017. – № 16. – Т. 2. – С. 810–815.
7. Бурков, П. В. Изучение напряженно-деформированного состояния трубопровода сложной формы под действием комплексной нагрузки методом конечных элементов с использованием программного обеспечения AUTODESK INVENTOR / П. В. Бурков, В. П. Бурков, П. О. Дедеев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 4. – С. 84–92.
8. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок : ГОСТ 32579.1–2013. – Введ. 2015-06-01. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 30 с.

## REFERENCES

1. Alfutov, N. A. Stability of motion and equilibrium / N. A. Alfutov, K. S. Kolesnikov. – Moscow, 2003. – 256 p.
2. Timoshenko, S. P. Resistance of materials / S. P. Timoshenko. – Moscow, 1965. – 364 p.
3. Zenkevich, O. The finite element method in technology / O. Zenkevich. – Moscow, 1975. – 541 p.
4. Chirov, A. N. Power calculation of a plane parallel manipulator / A. N. Chirov, A. M. Sapegin, L. V. Ruchkin // Computer-aided design in mechanical engineering. – 2020. – № 8. – P. 16–19.
5. Ruchkin, L. V. Force calculation of a parallel manipulator in the Labview software package / L. V. Ruchkin, N. L. Ruchkina // Reshetnevskiy chteniye. – 2017. – № 21. – Part 1. – P. 527–528.
6. Balakin, A. I. Investigation of the effect of loads on a part using the finite element method / A. I. Balakin, N. A. Balakina // Alley of Science. – 2017. – № 16. – Vol. 2. – P. 810–815.
7. Burkov, P. V. Study of the stress-strain state of a pipeline of complex shape under the action of a complex load by the finite element method using the AUTODESK INVENTOR software / P. V. Burkov, V. P. Burkov, P. O. Dedeev // Bulletin of KuzGTU. – 2018. – № 4. – P. 84–92.
8. Cranes. Design principles for loads and load combinations : GOST 32579.1–2013. – Enter 2015-06-01. – Moscow : Standardinform, 2015. – 30 p.

## SPISOK LITERATURY

1. Alfutov, N. A. Ustojchivost' dvizheniya i ravnovesija / N. A. Alfutov, K. S. Kolesnikov. – Moskva, 2003. – 256 s.
2. Timoshenko, S. P. Soprotivlenie materialov / S. P. Timoshenko. – Moskva, 1965. – 364 s.
3. Zenkevich, O. Metod konechnykh jelementov v tehnike / O. Zenkevich. – Moskva, 1975. – 541 s.
4. Chirov, A.N. Silovoj raschet ploskogo parallel'nogo manipuljatora / A.N. Chirov, A.M. Sapegin, L.V. Ruchkin // Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii. – 2020. – № 8. – S.16–19.
5. Ruchkin, L.V. Silovoj raschet parallel'nogo manipuljatora v programmnom pakete Labview / L.V. Ruchkin, N.L. Ruchkina // Reshetnevskie chteniya. – 2017. – № 21–1. – S. 527–528.
6. Balakin, A.I. Issledovanie vozdejstviya nagruzok na detal' s ispol'zovaniem metoda konechnykh jelementov / A.I. Balakin, N.A. Balakina // Alleja nauki. – 2017. – № 16. – Tom 2. – S. 810–815

7. Burkov, P.V. Izuchenie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija truboprovoda slozhnoj formy pod dejstviem kompleksnoj nagruzki metodom konechnyh jelementov s ispol'zovaniem programmnoho obespechenija AUTODESK INVENTOR / P.V. Burkov, V.P. Burkov, P.O. Dedeev // Vestnik KuzGTU. – 2018. – № 4. – С. 84–92.
8. Krany gruzopod#emnye. Principy formirovanija raschetnyh nagruzok i kombinacij nagruzok: GOST 32579.1–2013. – Vveden 06.01.2015. – Moskva: Standartinform, 2015. –30 s.

Статья поступила в редакцию 14.09.2023.