

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВИЛ ПОГРУЗЧИКА ПРИ СМЕЩЕНИИ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ГРУЗА

© 2025 И.Е. Адеянов, М.Ю. Александрова

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

Вилочный погрузчик является универсальным инструментом, который значительно облегчает работу с тяжелыми грузами во множестве отраслей, включая складскую логистику, сельское хозяйство, строительство и другие сферы деятельности. Для безопасной и эффективной работы необходимо использовать правильно подобранные вилы, соответствующие характеристикам груза и условиям эксплуатации. В работе проанализирована упрощенная конструкция вилок и номинальная полезная нагрузка, затем выполнен статический анализ на основе метода конечных элементов. По результатам расчетов были построены кривые распределения значений напряжений, коэффициентов запаса прочности и перемещений.

Ключевые слова: вилочный погрузчик, вилы, напряженно-деформированное состояние, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-255-260

EDN: QYARWJ

В современных условиях, благодаря стремительному развитию логистической отрасли, для организации складского пространства и размещения грузов требуется специальная техника. Технологии производства вилочных погрузчиков продолжают развиваться, предлагая как электрические модели на аккумуляторных батареях для внутренних работ, так и дизельные или газовые версии для более тяжелых условий эксплуатации. Вилочные погрузчики стали активно использоваться в складской логистике для удержания грузов, штабелирования и транспортировки на короткие расстояния. В литературе встречается множество работ, посвященных различным аспектам расчетов вилочных погрузчиков и их конструктивных элементов [1, 2]. Для разработки и проектирования погрузчиков используют, в том числе и численные методы расчета. Например, для исследования поведения вилок при повышенных нагрузках [3], оптимизации их геометрической формы и размеров [4, 5], выбора материала [6].

Эффективность работы погрузчика и безопасность его эксплуатации во многом зависят от прочности и жесткости вилок. Вилы жестко закреплены на раме погрузчика и нагружаются распределенными нагрузками в пределах допускаемых значений. В некоторых случаях на вилы действует статическая нагрузка в виде веса емкостей, наполненных сыпучими или жидкими веществами. Этот вес нелинейно распределяется по длине вилок и расположение его центра тяжести может смещаться.

С помощью численного анализа методом конечных элементов (МКЭ) были проведены расчеты вилок погрузчика при различных условиях нагружения. Твердотельная модель исследуемого электрического вилочного погрузчика изображена на рис. 1.

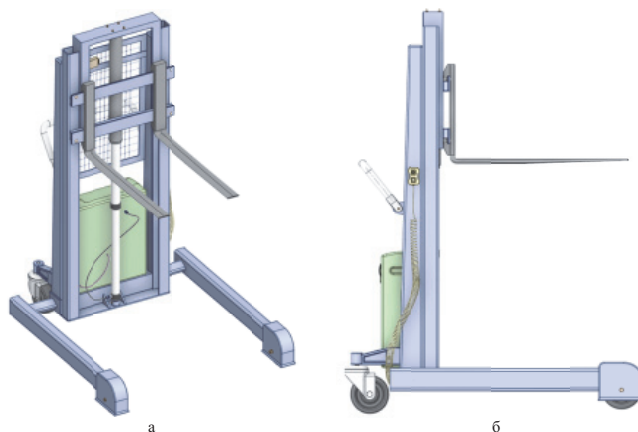


Рис. 1. Твердотельная модель электрического вилочного погрузчика:

а) изометрический вид; б) вид сбоку

Основные параметры вилы показаны на рис. 2. Цифрам на рис. 2 соответствуют: 1 – клык вилы; 2 – спинка вилы; 3 – нижний захват; 4 – верхний захват. Длина клыка вилы $a = 910$ мм, высота спинки $b = 505$ мм, размеры сечения $g \times f$ (25×80 мм), расстояние между нижним и верхним захватами $d = 445$ мм, расстояние от нижнего захвата до нижней поверхности клыка $e = 37$ мм.

Технические характеристики вил включают полезную нагрузку G , расстояние до центра масс груза C , а также материал вил и термическую обработку, которые определяют грузоподъемность. Материал вил – сталь 35Х, обладающая следующими физико-механическими свойствами: модуль упругости $E = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, предел текучести $\sigma_T = 530$ МПа, плотность $\rho = 7850$ кг/м³.

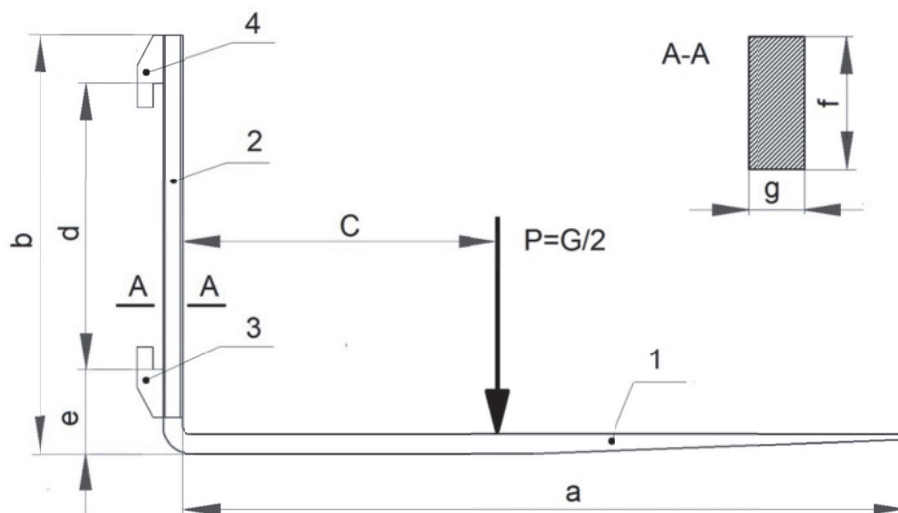


Рис. 2. Схема вилы и части рамы погрузчика

В рабочем режиме вилы погрузчика движутся с малой скоростью, поэтому нагрузки, прикладываемые к ним, можно считать статическими.

Спинка вилы в месте верхнего захвата закреплена жестко, а в месте нижнего захвата закреплена подвижным шарниром (рис. 3). В качестве нагрузок на клык вилы в численном расчете были применены собственный вес тел и распределенная нагрузка по поверхности клыка вилы с интенсивностью, меняющейся в промежутке от p_1 до p_2 .

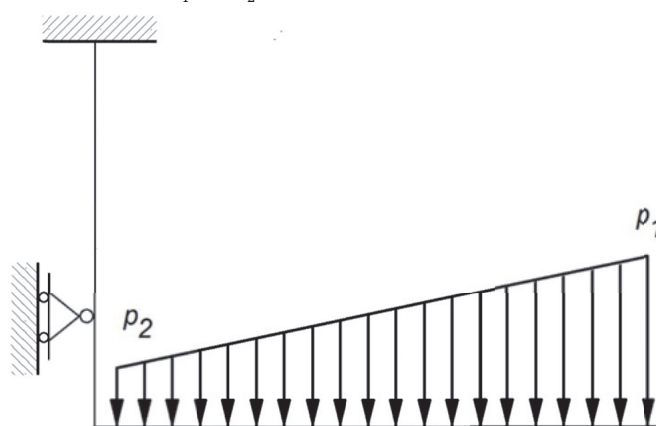


Рис. 3. Расчетная схема вилы погрузчика

Учитывая симметрию рамы и вил погрузчика, а так же прикладываемой к ним нагрузки, в работе рассматривалась одна вила и часть рамы, к которой она крепится.

Для исследования влияния распределения усилия за исходное значение принималась допустимая статическая нагрузка, равномерно распределенная по длине вилы:

$$q = \frac{F[\sigma]}{a}, [\sigma] = \frac{\sigma_T}{n}, \quad (1)$$

где $F = g \cdot f = 2000$ мм² – площадь поперечного сечения, $[\sigma]$ – допускаемые напряжения, n – коэффициент запаса прочности. Были рассмотрены три расчетных случая РС1-РС3 с различными коэф-

коэффициентами запаса, равными соответственно 1.2, 1.35, 1.5. При этом для каждого расчетного случая центр тяжести прикладываемой нагрузки смещался на $\Delta = 15\%$ в одну и в другую сторону от исходного положения, соответствующего нагрузке с постоянной интенсивностью p . Значения давления p_1 до p_2 определялись по формулам

$$p_1 = p(1 + 6\Delta), \quad p_2 = p(1 - 6\Delta). \quad (2)$$

Для решения задачи использовался метод конечных элементов [7]. Твёрдотельная модель была разбита трехмерными двадцатиузловыми конечными элементами (рис. 4). Были заданы условия симметрии, а так же жесткое и шарнирное закрепления согласно схеме на рис. 3. В качестве нагрузок задавались собственный вес вилы и давление.

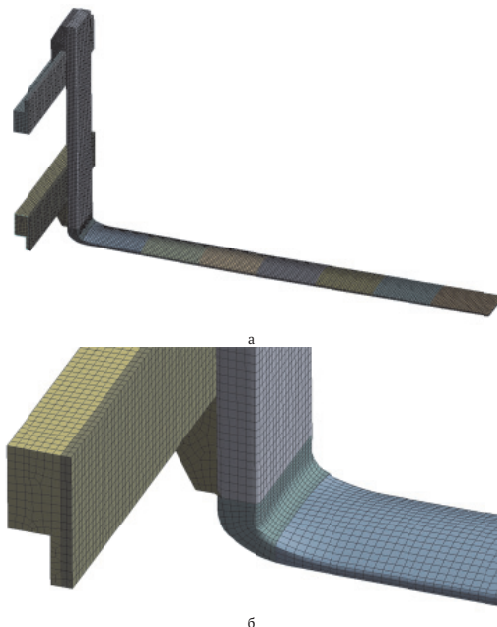


Рис. 4. Конечно-элементная модель одной вилы и части рамы:
а) полная модель; б) часть модели в месте перехода спинки в клык

Исходные данные для всех расчетных случаев представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчетных случаев PC1-PC-3

PC №	1	2	3
Коэффициент запаса	1.2	1.35	1.5
Допускаемое напряжение, МПа	442	393	353
Постоянное давление p , МПа	0.041	0.046	0.052
G , кг	566	635	717

Смещения центра тяжести нагрузки и давления p_1 до p_2 приведены в табл. 2. Знак “+” величины Δ соответствует смещению центра тяжести груза в сторону свободного конца клыка вилы, знак “-” соответствует смещению в противоположном направлении.

Таблица 2. Смещения центра тяжести нагрузки и соответствующие им давления

Δ , %	-15	-10	-5	+5	+10	+15
PC 1						
p_1 , МПа	0.0041	0.0164	0.0287	0.0533	0.0656	0.0779
p_2 , МПа	0.0779	0.0656	0.0533	0.0287	0.0164	0.0041
PC 2						
p_1 , МПа	0.0046	0.0184	0.0322	0.0598	0.0736	0.0874
p_2 , МПа	0.0874	0.0736	0.0598	0.0322	0.0184	0.0046
PC 3						
p_1 , МПа	0.0052	0.0208	0.0364	0.0676	0.0832	0.0988
p_2 , МПа	0.0988	0.0832	0.0676	0.0364	0.0208	0.0052

В качестве примеров полученных результатов на рис. 5-6 приведены распределения перемещений и напряжений для наиболее опасного случая РС 3 и $\Delta = 15\%$. Максимальная интенсивность эквивалентных напряжений возникает во всех рассмотренных случаях в месте стыка стенки с клыком вилы.

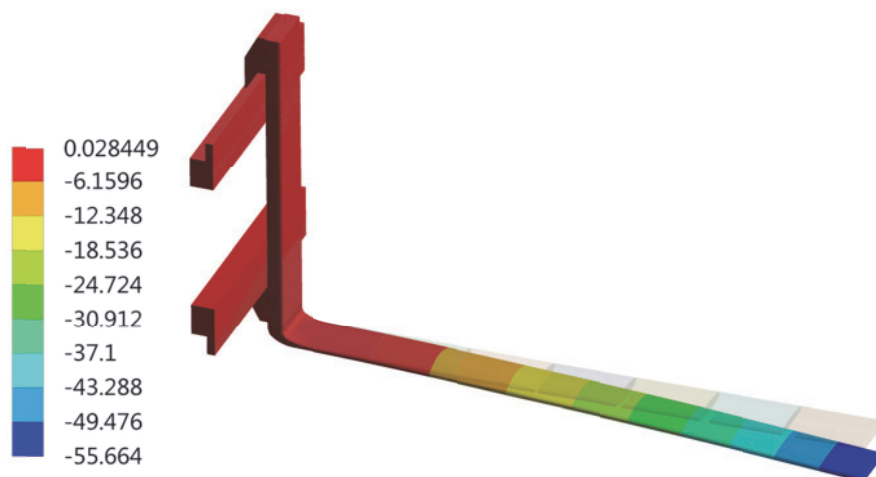


Рис. 5. Поле вертикальных перемещений, мм

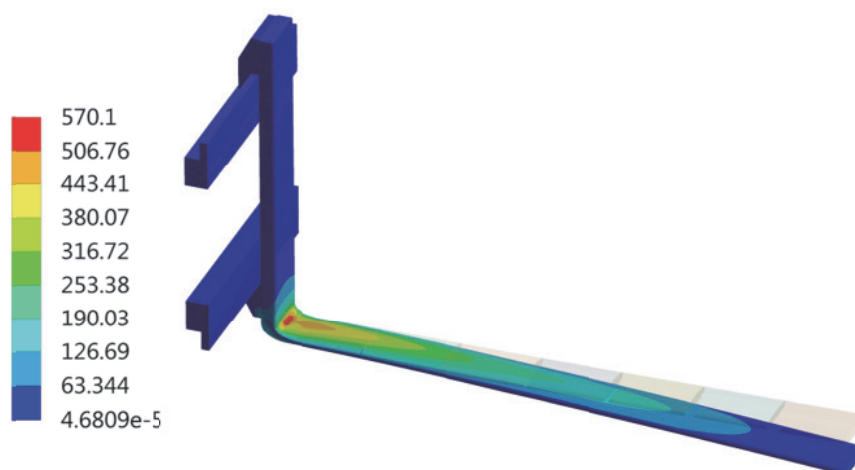


Рис. 6. Поле эквивалентных по Мизесу напряжений, МПа

Результаты проведенных расчетов были обобщены в виде зависимостей напряжений, коэффициентов запаса и перемещений от положения центра тяжести груза и представлены в виде графиков на рис. 7-9.

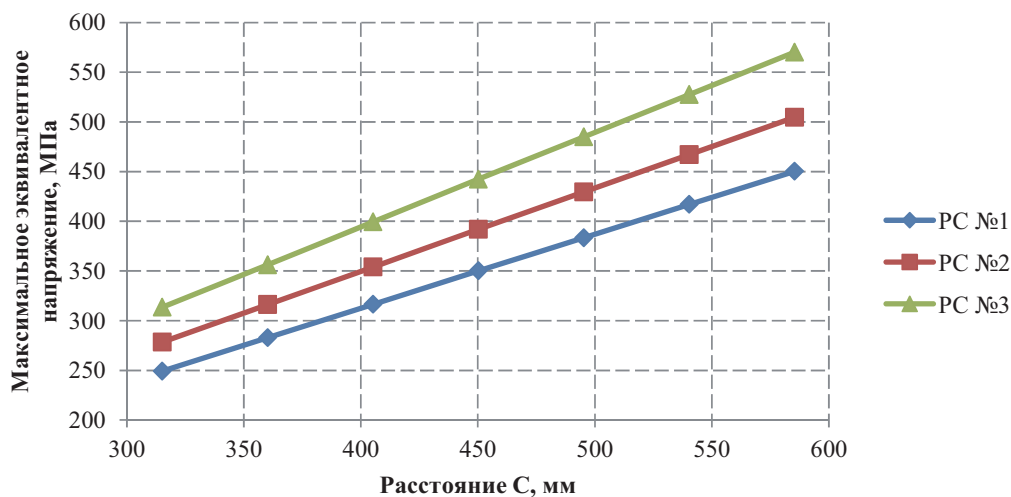


Рис. 7. Графики зависимостей максимальных эквивалентных напряжений от положения центра тяжести груза

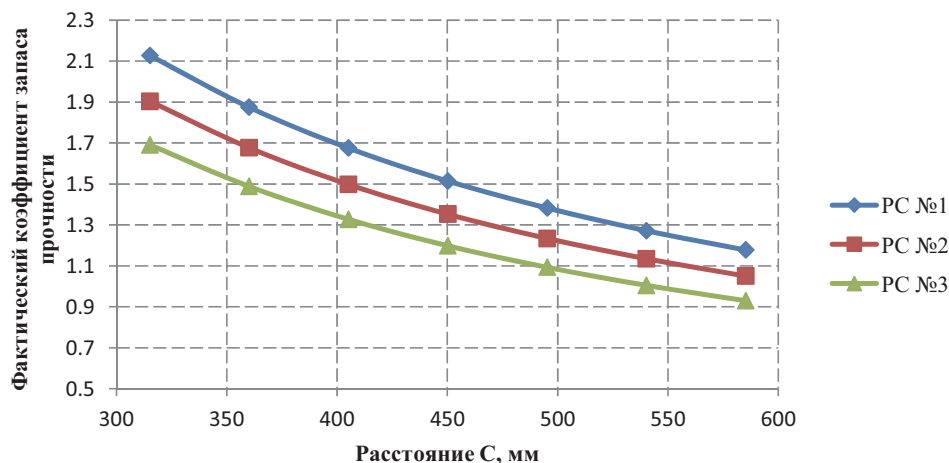


Рис. 8. Графики зависимостей фактических коэффициентов запаса прочности от положения центра тяжести груза

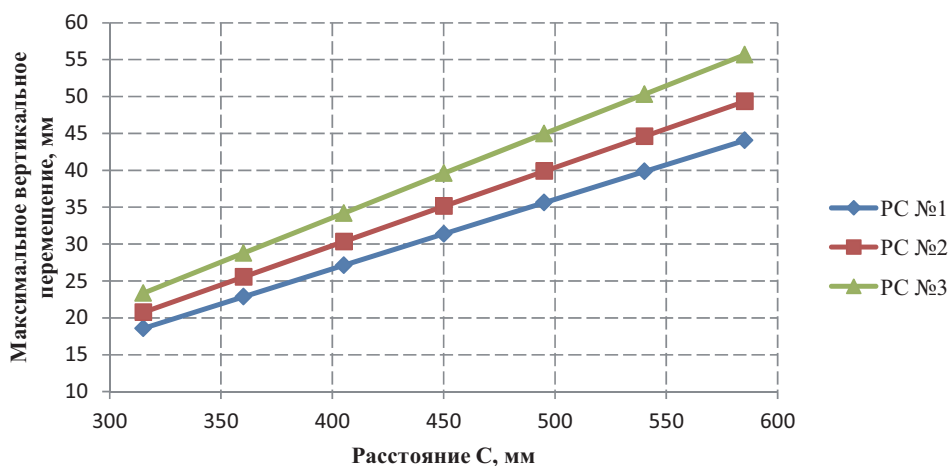


Рис. 9. Графики зависимостей максимальных вертикальных перемещений от положения центра тяжести груза

На основе полученных графиков можно определить коэффициент запаса при выбранной величине груза G и положении его центра тяжести в пределах от -15% до $+15\%$ от длины a . Результаты расчетов показали, что в РС 3 при $\Delta = 15\%$ максимальные эквивалентные напряжения превышают s_T и фактический предел запаса становится меньше 1. Таким образом, этот вариант является недопустимым.

Итак, в данной работе был произведен расчет напряженно-деформированного состояния вил погрузчика методом конечных элементов. Он может быть использован для выбора допустимых величин груза и учета его возможного смещения в процессе транспортировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мачульский, И.И. Машины напольного безрельсового транспорта / И.И. Мачульский, Е.А. Алепин. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
2. Saurabh S Shah, Mohd Husain A Sunasara, Pramit S Jain, Zohaib Shirgaonkar. Wheel Forklift for Industrial Purposes // International Journal of Engineering Research & Technology, 2020. – Vol. 9. – Is. 06. – P. 1643-1656.
3. Ковалёва, Т. Е. Математическое моделирование поведения вил подъемника при повышенных нагрузках / Т.Е. Ковалёва // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. – Вып. 2. – С. 260-263.
4. Anil A. Sequeira , Saif Mohammed , Avinash A. Kumar , Muhammed Sameer , Yousef A. Kareem , Krishnamurthy H. Sachidananda. Design and Fabrication of Battery Operated Forklift // Journal Européen des Systèmes Automatisés, 2019. – Vol. 52 – No. 6 – P. 569-574.
5. Xing Gu1, Weijun Wang, Ning Lin1, Gong Zhang and Xiang Gu. The Finite Element Analysis for Fork Based on ANSYS // International Conference on Electrical, Electronics and Mechatronics (ICEEM), 2015. – P. 153-154.

6. *Karan Khebude*. Design and Analysis of Mechanical Forklift // International Journal of Scientific Research and Engineering Development, 2020. – Vol 3. – Is. 2. – P. 685 – 690.
7. *Бруйака, В.А.* Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учебное пособие / В.А. Бруйака, В.Г. Фокин, Я.В. Кураева. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2013. – 148 с.

FORKLIFT STRESS-STRAIN NUMERICAL ANALYSIS WHEN THE TRANSPORTED LOAD IS DISPLACED

© 2025 I. E. Adeyanov, M. Y. Alexandrova

Samara State Technical University, Samara, Russia

The forklift is a versatile machine that has a significant impact on handling of low-weight loads in many industries, including warehouse logistics, farming, construction and other fields. For safe and efficient operation, it is necessary to use the right forks that match the driving characteristics and operating conditions. In this paper, simplified fork design and nominal payloads were analyzed, and then a static analysis was performed based on the finite element method. Based on the calculation results, the distribution curves of stress values, safety factors and displacements were plotted.

Key words: forklift, fork, stress-strain state, computer simulation, finite elements method.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-255-260

EDN: QYARWJ

REFERENCES

1. *Machul'skij I.I.* Mashiny napol'nogo bezrel'sovogo transporta / I. I. Machul'skij, E. A. Alepin. – М.: Mashinostroenie, 1982. 232 s.
2. *Saurabh S Shah, Mohd Husain A Sunasara, Pramit S Jain, Zohaib Shirgaonkar*. Wheel Forklift for Industrial Purposes // International Journal of Engineering Research & Technology, 2020. – Vol. 9. – Is. 06. – P. 1643-1656.
3. *Kovalyova, T.E.* Matematicheskoe modelirovanie povedeniya vil pod"emnika pri povyshennyh nagruzkah / T.E. Kovalyova // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2022. – Vyp. 2. – S. 260-263.
4. *Anil A. Sequeira , Saif Mohammed , Avinash A. Kumar , Muhammed Sameer , Yousef A. Kareem , Krishnamurthy H. Sachidananda*. Design and Fabrication of Battery Operated Forklift // Journal Européen des Systèmes Automatisés, 2019. – Vol. 52 – No. 6 – P. 569-574.
5. *Xing Gu1, Weijun Wang, Ning Lin1, Gong Zhang and Xiang Gu*. The Finite Element Analysis for Fork Based on ANSYS // International Conference on Electrical, Electronics and Mechatronics (ICEEM), 2015. – P. 153-154.
6. *Karan Khebude*. Design and Analysis of Mechanical Forklift // International Journal of Scientific Research and Engineering Development, 2020. – Vol 3. – Is. 2. – P. 685 – 690.
7. *Bruyaka, V.A.* Inzhenernyj analiz v Ansys Workbench: Uchebnoe posobie / V.A. Bruyaka, V.G. Fokin, Ya.V. Kuraeva. – Samara: Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2013. – 148 s.

Igor Adeyanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor in the Department of Mechanics.

E-mail: adigorev@gmail.com

Margarita Aleksandrova, PhD in Engineering, Associate Professor in the Department of Mechanics. E-mail: kris-maks@mail.ru