

## Расчет вероятности безотказной работы грузоподъемного оборудования с применением компьютерного моделирования

*И.А. Пуртова, Е.А. Богданова, И.Н. Спирина*

*Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Тюмень*

**Аннотация:** В статье выполнен расчет вероятности безотказной работы деталей несущей конструкции грузоподъемного оборудования зарубежного производства, предназначенного для выполнения погрузочно-разгрузочных работ каменного строительного материала. При выполнении расчетов применено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов. Отличительной особенностью предложенной методики расчета является минимальное необходимое количество выполнений компьютерных экспериментов, учитывая, что часть задаваемых исходных данных являются переменными.

**Ключевые слова:** вероятность безотказной работы, грузоподъемное оборудование, надежность.

### Введение

Отказ грузоподъемного оборудования в большинстве случаев происходит при потере прочности какой-либо детали в результате воздействия механических нагрузок. Поэтому вероятность безотказной работы рассчитываются путем оценки действующих и допускаемых напряжений в деталях грузоподъемного оборудования.

Расчет вероятности безотказной работы по действующим и допускаемым напряжениям представляет собой определение вероятности того, что действующие напряжения не превысят допускаемые. Ввиду того, что обе величины являются случайными, получают две функции плотности распределения [1], после чего определяют их общую площадь, которая будет являться вероятностью отказа. Чем больше площадь пересечения двух функций плотности распределения, тем больше вероятность отказа, и, следовательно, меньше вероятность безотказной работы ( $R = 1 - P$ ). Математически общая площадь двух функций плотности распределения реализуется через взятие двойного интеграла этих функций [2].

Для восстановления функций плотности распределения необходимо получить либо средние значения действующих и допускаемых напряжений (если параметры распределений известны), либо рассчитать выборки значений, затем восстановить функции плотности распределения. Как правило, параметры распределения допускаемых напряжений известны [3], поэтому рассчитывают среднее значение допускаемых напряжений через предел выносливости. Действующие напряжения напрямую зависят от нагрузок, которые получает грузоподъемное оборудование при эксплуатации. Применить параметры распределения случайных величин нагрузок для восстановления функции плотности распределения действующих напряжений невозможно, согласно теории статистики [4], т. к. математические модели для расчета напряжений являются степенными функциями (либо расчет выполняется при нескольких случайных величинах передаваемых нагрузок), и закон распределения расчетной величины становится неизвестным. Поэтому функцию плотности распределения действующих напряжений восстанавливают по расчетной выборке статистическими методами обработки данных [5].

Для расчета действующих напряжений типовых деталей машин используют общепринятые расчетные формулы [6,7]. Однако, при расчете вероятности безотказной работы грузоподъемного оборудования, необходимо получить выборку напряжений для несущих элементов конструкции, которые могут иметь сложную геометрическую формулу. Кроме того, грузоподъемное оборудование имеет подвижные детали (секции стрелы крана, вилы фронтального погрузчика), что требует выполнять расчет напряжений для различных положений этих деталей относительно друг друга.

Аналитические методы расчета действующих напряжений могут привести к искажению результатов, ввиду применяемых допущений [8].

---

Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов повысит точность расчетов и позволит определить наиболее нагруженные места в моделях сложной геометрической формы и/или при сложном напряженном состоянии [9,10]. Однако, при расчете вероятности безотказной работы грузоподъемного оборудования для получения выборки значений (не менее 1000) действующих напряжений потребуется провести огромное количество компьютерных экспериментов, что для конструктора не целесообразно. Тем не менее, в [11] для расчета вероятности безотказной работы корпуса арматуры трубопровода при воздействии двух видов переменных нагрузок предложен метод, позволяющий значительно снизить количество компьютерных экспериментов для получения выборки действующих напряжений.

Суть метода [11] заключается в том, что при помощи компьютерного моделирования был реализован двухфакторный эксперимент с пятью уровнями первого фактора и тремя уровнями второго фактора. При выполнении компьютерных экспериментов фиксировались напряжения наиболее нагруженных элементов (узлов) сетки. Полученные значения напряжений каждого элемента аппроксимировались полиномом, который представлял собой математическую модель изменения напряжений в расчетном элементе. Полученная зависимость позволяла получить выборку напряжений уже аналитическим методом при помощи классических программных средств, используемых конструкторами при выполнении однотипных расчетов.

Цель статьи – получить вероятность безотказной работы деталей несущей конструкции грузоподъемного оборудования, используя компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов.

### Компьютерный эксперимент

В качестве экспериментального объекта пример грузоподъемное оборудование [12] фирмы «Probst GmbH» (Германия), используемое для погрузочно-разгрузочных работ строительных каменных материалов (рис. 1). Подвижные Г-образные секции 3 (рис. 1), изменяя длину вылета в интервале от 344 мм до 1352 мм, позволяют перемещать грузы различной ширины. П-образные секции 7 (рис. 1) фиксируются в двух положениях для возможности увеличения максимальной высоты перемещаемых грузов. Фиксация грузов осуществляется за счет сил трения между губками захвата 6 (рис. 1) и грузом. При этом усилие сжатие создается гидроцилиндрами 2 (рис. 1). Максимальная грузоподъемность оборудования составляет 1350 кг.

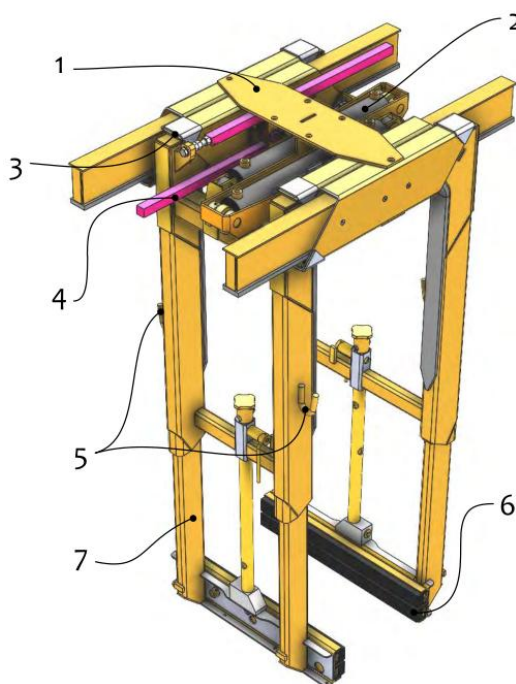


Рис. 1. – Грузоподъемное оборудование фирмы «Probst GmbH» [12]:

1 – корпус; 2 – гидроцилиндр; 3 – выдвижная Г-образная секция; 4 – ограничитель; 5 – дополнительные крюки; 6 – губки захвата; 7 – выдвижная П-образная секция

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния П-образных выдвижных секций 7 не зависят от положения Г-образных секций

3, и на значения их напряжений на прямую влияет масса груза. Ввиду того, что П-образные секции фиксируются к Г-образным при помощи цилиндрического стержня, расчет можно свести к проверке на срез стержня и смятие отверстия под крепление в месте крепления деталей.

В случае же расчета корпуса 1 результат будет зависеть от положения Г-образных секций 3 и массы перемещаемого груза. Кроме того, на конструкцию корпуса и Г-образные секции воздействуют реакции от сил сжатия в гидроцилиндрах 2. Поэтому корпус и Г-образные секции находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии. Т.к. усилие сжатия в гидроцилиндрах 2 постоянное, принимаем компьютерный эксперимент как двухфакторный: первый фактор – масса груза, второй фактор – положение Г-образных секций. Для выполнения компьютерного эксперимента была составлена матрица эксперимента (Таблица 1) со значениями факторов на каждом уровне в параметрическом виде и действительных значениях.

Таблица № 1

Матрица планирования компьютерного эксперимента

| № эксперимента | Параметр      |               | Действительное значение |   |
|----------------|---------------|---------------|-------------------------|---|
|                | первый фактор | второй фактор | масса груза, кг         | расстояния между Г-образными секциями, мм |
| 1              | -1            | -1            | 270                     | 344                                       |
| 2              | -1            | 0             | 270                     | 848                                       |
| 3              | -1            | 1             | 270                     | 1352                                      |
| 4              | -0,5          | -1            | 540                     | 344                                       |
| 5              | -0,5          | 0             | 540                     | 848                                       |
| 6              | -0,5          | 1             | 540                     | 1352                                      |
| 7              | 0             | -1            | 810                     | 344                                       |
| 8              | 0             | 0             | 810                     | 848                                       |
| 9              | 0             | 1             | 810                     | 1352                                      |
| 10             | 0,5           | -1            | 1080                    | 344                                       |
| 11             | 0,5           | 0             | 1080                    | 848                                       |
| 12             | 0,5           | 1             | 1080                    | 1352                                      |
| 13             | 1             | -1            | 1350                    | 344                                       |
| 14             | 1             | 0             | 1350                    | 848                                       |
| 15             | 1             | 1             | 1350                    | 1352                                      |

Для выполнения компьютерного эксперимента были созданы 3 геометрические модели (3D сборки) с положением Г-образных секций на расстоянии друг от друга в 344 мм, 848 мм и 1352 мм. В качестве материала элементов конструкции принята «1023 Листовая углеродистая сталь». Расчетная сетка конечных элементов модели смоделирована по условию кривизны геометрической модели (чем меньше радиус кривизны грани, тем гуще сетка на этой грани). Размер конечных элементов находился в диапазоне от 9,1 мм до 45,5 мм. Общее число конечных элементов 76098.

Масса груза задавалась в расчете силой тяжести в местах крепления П-образных подвижных секций к Г-образным секциям (рис. 2а). Усилие в гидроцилиндрах задавалось в местах их креплений (рис. 2б).

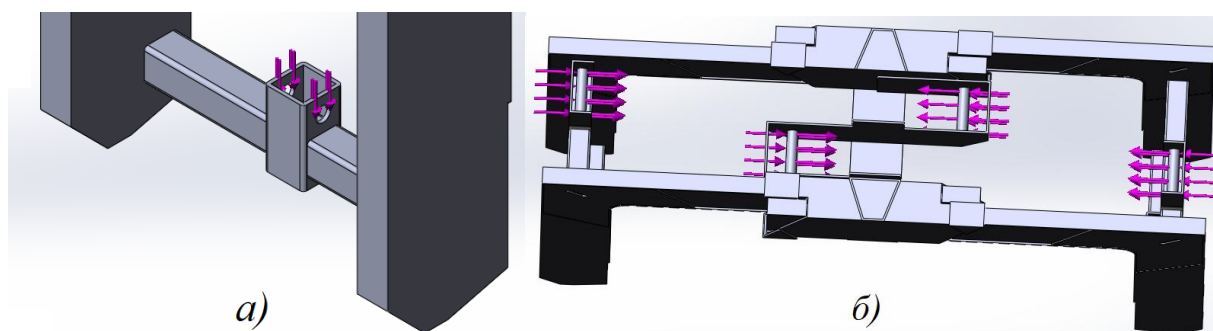


Рис. 2. – Задание расчетных усилий:

а) сила тяжести от массы груза; б) усилие сжатия гидроцилиндрами

Статическая определимость расчетной модели задавалось фиксацией корпуса (жесткая заделка) в сварном шве, соединяющем пластину крепления с корпусом (рис. 3а). Кроме того, при фиксированном корпусе у Г-образных секций сохраняется одна степень подвижности, которая исключается при сжатии груза П-образными секциями. Поэтому в расчетной модели заданы скользящие опоры в местах, где происходит упор поверхностей Г-образных секций с П-образными секциями (рис. 3б).

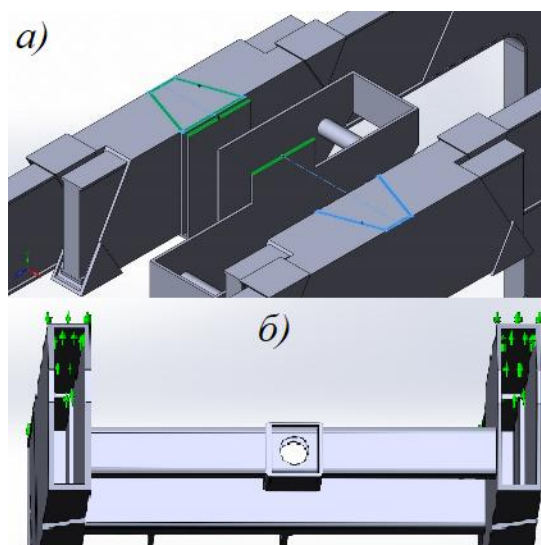


Рис. 3. – Фиксация расчетной модели:

а) жесткая заделка корпуса; б) скользящие опоры Г-образной секции

Выполненные компьютерные эксперименты позволили определить наиболее напряженные участки корпуса и Г-образных секций детали (рис. 4). Кроме того, зафиксированные значения максимальных напряжений на этих участках позволили получить аппроксимирующие функции изменения напряжений в зависимости от массы груза (Таблица 2).

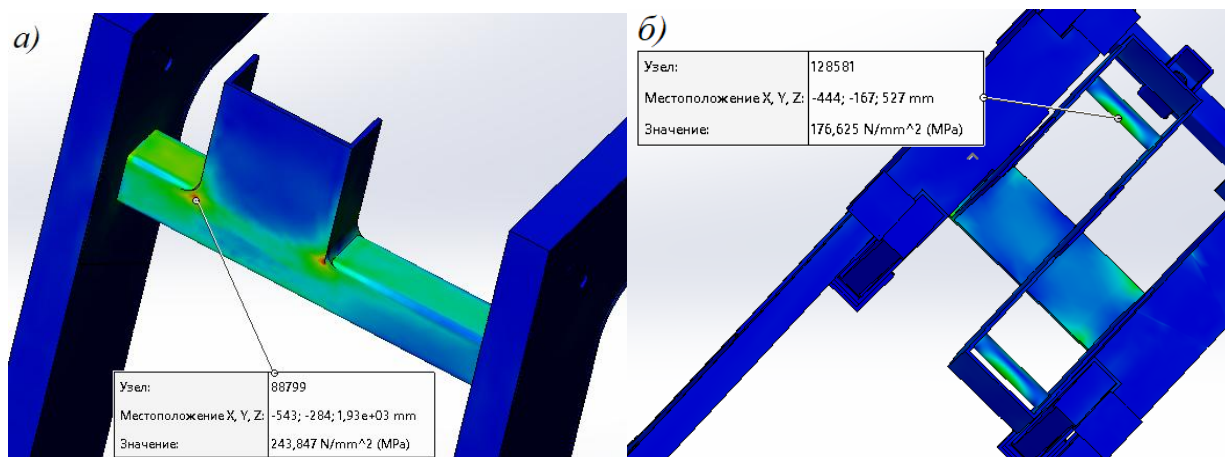


Рис. 4. – Участки максимальных напряжений:

а) левая Г-образная подвижная секция; б) корпус

Таблица № 2

Результаты компьютерного эксперимента

| Ф-р 2 | Деталь          | № узла | Масса груза, кг |        |        |        |         | Уравнение аппроксимирующей кривой |
|-------|-----------------|--------|-----------------|--------|--------|--------|---------|-----------------------------------|
|       |                 |        | 270             | 540    | 810    | 1080   | 1350    |                                   |
| -1    | корпус          | 12746  | 169,52          | 169,51 | 169,52 | 169,52 | 169,53  | $y=0,000002x+169,51$              |
|       |                 | 12639  | 168,97          | 168,75 | 168,77 | 168,03 | 168,43  | $y=-0,000068x+169,13$             |
|       |                 | 128581 | 169,02          | 168,96 | 169,0  | 168,37 | 168,77  | $y=-0,000041x+169,15$             |
|       | левая Г-образ.  | 115187 | 141,52          | 141,57 | 141,47 | 141,41 | 141,36  | $y=-0,000018x+141,61$             |
|       |                 | 115331 | 140,33          | 140,83 | 140,73 | 140,21 | 140,9   | $y=0,000020x+140,44$              |
|       |                 | 88799  | 140,79          | 141,0  | 140,97 | 140,81 | 141,02  | $y=0,000010x+140,84$              |
|       | правая Г-образ. | 52863  | 145,02          | 145,05 | 145,08 | 145,12 | 145,17  | $y=0,000014x+144,98$              |
|       |                 | 52434  | 144,10          | 144,09 | 144,22 | 144,12 | 144,86  | $y=0,000059x+143,813$             |
|       |                 | 27586  | 144,88          | 144,42 | 144,73 | 144,55 | 145,0   | $y=0,000014x+144,61$              |
| 0     | корпус          | 12746  | 163,27          | 163,27 | 163,27 | 157,73 | 154,41  | $y=-0,000878x+167,37$             |
|       |                 | 12639  | 175,69          | 175,69 | 175,70 | 175,71 | 175,70  | $y=0,000002x+175,685$             |
|       |                 | 128581 | 173,20          | 173,76 | 171,99 | 172,23 | 173,29  | $y=-0,000051x+173,30$             |
|       | левая Г-образ.  | 115187 | 154,34          | 154,34 | 154,38 | 154,56 | 157,74  | $y=0,000265x+152,97$              |
|       |                 | 115331 | 174,14          | 174,14 | 174,23 | 174,14 | 174,05  | $y=-0,000007x+174,19$             |
|       |                 | 88799  | 172,86          | 172,86 | 171,63 | 171,85 | 171,98  | $y=-0,000105x+173,07$             |
|       | правая Г-образ. | 52863  | 159,95          | 159,69 | 159,97 | 160,05 | 160,61  | $y=0,000063x+159,55$              |
|       |                 | 52434  | 174,49          | 174,50 | 174,47 | 174,45 | 174,422 | $y=-0,000007x+174,5$              |
|       |                 | 27586  | 173,05          | 172,94 | 171,08 | 171,57 | 171,73  | $y=-0,000151x+173,28$             |
| 1     | корпус          | 12746  | 165,50          | 165,09 | 164,70 | 164,34 | 164,0   | $y=-0,000142x+165,85$             |
|       |                 | 12639  | 169,10          | 168,65 | 168,29 | 167,8  | 167,4   | $y=-0,000160x+169,52$             |
|       |                 | 128581 | 176,63          | 176,18 | 175,75 | 175,34 | 174,95  | $y=-0,000159x+177,03$             |
|       | левая Г-образ.  | 115187 | 201,1           | 202,66 | 204,23 | 205,8  | 207,38  | $y=0,000593x+199,52$              |
|       |                 | 115331 | 204,15          | 205,76 | 207,37 | 208,99 | 210,61  | $y=0,000610x+202,53$              |
|       |                 | 88799  | 243,85          | 245,35 | 246,87 | 248,39 | 249,92  | $y=0,000573x+242,32$              |
|       | правая Г-образ. | 52863  | 191,26          | 191,66 | 192,07 | 192,48 | 192,89  | $y=0,000154x+190,85$              |
|       |                 | 52434  | 215,66          | 216,41 | 217,17 | 217,93 | 218,69  | $y=0,000286x+214,90$              |
|       |                 | 27586  | 243,76          | 244,86 | 246,05 | 247,32 | 248,67  | $y=0,000464x+242,45$              |

Полученные аппроксимирующие прямые позволяют выполнить расчет вероятности безотказной работы деталей несущей конструкции грузоподъемного оборудования в участках максимальных напряжений.



### **Вероятность безотказной работы**

Для получения функций плотности напряжений действующих напряжений в расчетных участках полученные уравнения (Таблица 2) были запрограммированы в программном обеспечении MathCAD. Далее при помощи функций MathCAD была сгенерирована выборка случайных значения массы груза в диапазоне от 0 до 1350 кг с нормальным законом распределения. Используя полученные выборку в качестве исходных данных, выполнен расчет действующих напряжений по каждому запрограммированному уравнению. По рассчитанным выборкам действующих напряжений определялись медианы и среднеквадратические отклонения, которые являются параметрами функции плотности нормального распределения.

Функция плотности допускаемых напряжений также принята по нормальному закону распределения. Медианой принималось значение предела выносливости на растяжение материала. Среднеквадратическое отклонение рассчитывалось по рекомендациям [3].

В результате выполненных расчетов для узлов с максимальными напряжениями при различном положении Г-образных секций (второй фактор) показал, что вероятность безотказной работы для узлов № 88799 (левая Г-образная деталь) и № 27586 (правая Г-образная деталь) и при расстоянии между Г-образными секциями в 1352 мм составила 99,987% и 99,999% соответственно. Все остальные узлы показали 100% вероятность безотказной работы.

### **Выводы**

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. При помощи компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов получены

функции изменения действующих напряжений на наиболее нагруженных участках деталей несущей конструкции грузоподъемного оборудования.

2. Полученные функции изменения действующих напряжений позволили выполнить расчет вероятности безотказной работы деталей несущей конструкции грузоподъемного оборудования аналитическими методами без необходимости многократного моделирования напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов.

### Литература

1. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л. Вероятностная оценка прочностной надежности трубопроводов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2011. № 5(27). С. 14-22.
2. Фоминых А.Б., Бутарович Д.О. Определение срока службы зубчатых колес агрегатов трансмиссии автомобилей и военных колесных машин. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. 60 с.
3. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. Москва: Высш. шк., 1988. 238 с.
4. Тимашев С. А. Надежность больших механических систем. Москва: Наука, 1982. 184 с.
5. Сидняев Н. Статистический анализ и теория планирования эксперимента. Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2017. 200 с.
6. Babichev D.T., Lebedev S.Yu. Mechanisms and Machine Science // Mechanisms and Machine Science (book series). 2019. Vol. 73. P. 2937-2953. DOI 10.1007/978-3-030-20131-9\_290.
7. Бабичев Д.Т., Лебедев С.Ю. Опыт ТИУ по использованию компьютерных методов проектирования в курсе теории механизмов и машин // Проблемы машиноведения: материалы III Международной научно-

- технической конференции. Том Часть I. Омск: Омский государственный технический университет, 2019. С. 21-31.
8. Babichev D.T., Lebedev S.Y., Babichev D.A. Theoretical fundamentals of spur and helical gear synthesis based on assignment of meshing lines at face section // International Review of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 12, No. 9. P. 762-770. DOI 10.15866/ireme.v12i9.15580.
9. Мелехин Е.А., Иванов П.С., Малыгин А.Б. Численные исследования модульных систем трёхгранных ферм плоских покрытий зданий // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7687](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7687)
10. Ковалев А.В. Кисель Н.Н. Объемное моделирование СВЧ-нагревателя жидкости // Инженерный вестник Дона. 2022. № 7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7775](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7775)
11. Сызранцев В.Н., Невелев Я.П., Голофаст С.Л. Расчет прочностной надежности изделий на основе методов непараметрической статистики. Новосибирск: Наука, 2008. 216 с.
12. Block Loading Grab AKZ-H-UNIGRIP: Operating Instructions. Probst GmbH. 144 p.

### References

1. Syzrantsev V.N., Golofast S.L. Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika. 2011. № 5(27). pp. 14-22.
2. Fominykh A.B., Butarovich D.O. Opredeleniye sroka sluzhby zubchatykh koles agregatov transmissii avtomobiley i voyennykh kolesnykh mashin [Determination of the service life of the gears of the transmission units of automobiles and military wheeled vehicles]. Moskva: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana, 2021. 60 p.
3. Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeyev V.Z. Nadezhnost' mashin [Machine Reliability]. Moskva: Vyssh. shk., 1988. 238 p.

4. Timashev S. A. Nadezhnost' bol'shikh mekhanicheskikh sistem [Reliability of large mechanical systems]. Moskva: Nauka, 1982. 184 p.
5. Sidnyayev N. Statisticheskij analiz i teoriya planirovaniya eksperimenta [Statistical analysis and theory of experiment planning]. Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet im. N.E. Baumana, 2017. 200 p.
6. Babichev D.T., Lebedev S.Yu. Mechanisms and Machine Science (book series). 2019. Vol. 73. pp. 2937-2953. DOI 10.1007/978-3-030-20131-9\_290.
7. Babichev D.T., Lebedev S.Yu. Problemy mashinovedeniya : materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Tom Chast' I (Proc. International scientific conference “Mechanical Science and Technology Update”). Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet, 2019. pp. 21-31.
8. Babichev D.T., Lebedev S.Y., Babichev D.A. International Review of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 12, No. 9. pp. 762-770. DOI 10.15866/ireme.v12i9.15580.
9. Melekhin Ye.A., Ivanov P.S., Malygin A.B. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7687](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7687)
10. Kovalev A.V. Kisel' N.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7775](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7775)
11. Syzrantsev V.N., Nevelev YA.P., Golofast S.L. Raschet prochnostnoy nadezhnosti izdeliy na osnove metodov neparametricheskoy statistiki [Calculation of the strength reliability of products based on nonparametric statistics methods]. Novosibirsk: Nauka, 2008. 216 p.
12. Block Loading Grab AKZ-H-UNIGRIP: Operating Instructions. Probst GmbH. 144 p.