

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Лозовая С.Ю., Латышев С.С., Кравченко В.М.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, вертикальный ротор, напряжение по Мизесу, линейные перемещения, допустимая деформация, измельчитель вертикального типа.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния вертикального ротора измельчителя для переработки резинотехнических отходов, выполненного в CAD/CAE системе *SOLIDWORKS Simulation*. Целью исследования являлась оценка прочности и жесткости конструкции при эксплуатационных нагрузках. Построена детализированная модель сборки, включающая вал, шнек, режущие органы и элементы крепления. Анализ проведен для двух критических режимов работы с частотами вращения 130 и 270 мин⁻¹, что позволило оценить влияние инерционных нагрузок. В результате расчета получены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу, линейных перемещений и деформаций. Установлено, что максимальные напряжения концентрируются в зоне шпоночного соединения вала под ременную передачу, что характерно для концентраторов напряжений. Наибольшие, но допустимые перемещения наблюдаются на зубьях режущего и регулировочного ножа. Деформации распределены по всему телу ротора. Сопоставление полученных значений с допусками для материала подтвердило, что конструкция удовлетворяет требованиям прочности и жесткости для обоих режимов. Результаты работы наглядно демонстрируют эффективность применения конечно-элементного моделирования для верификации и оптимизации силовых элементов промышленного оборудования на ранних стадиях проектирования.

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A VERTICAL CRUSHER ROTOR DURING PROCESSING OF RUBBER WASTE

Lozovaya S.Yu., Latyshev S.S., Kravchenko V.M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Keywords: stress-strain state, finite element method, vertical rotor, von Mises stress, linear displacements, permissible deformation, vertical crusher.

Abstract. The paper presents the results of a finite element analysis of the stress-strain state of the vertical rotor of a shredder for processing rubber waste, performed in the CAD/CAE *SOLIDWORKS Simulation* system. The purpose of the study was to evaluate the strength and rigidity of the structure under operating loads. A detailed assembly model has been built, including a shaft, auger, cutting organs and mounting elements. The analysis was carried out for two critical operating modes with rotational speeds of 130 and 270 min⁻¹, which made it possible to assess the effect of inertial loads. As a result of the calculation, the distributions of equivalent Mises stresses, linear displacements and deformations are obtained. It is established that the maximum stresses are concentrated in the area of the keyway connection of the belt drive shaft, which is typical for stress concentrators. The largest but permissible movements are observed on the teeth of the cutting and adjusting knives. Deformations are distributed throughout the rotor body. A comparison of the obtained values with the tolerances for the material confirmed that the structure meets the requirements of strength and rigidity for both modes. The results of the work clearly demonstrate the effectiveness of using finite element modeling for verification and optimization of power elements of industrial equipment at the early stages of design.

Введение

Согласно Распоряжению Правительства РФ № 1589-р от 25 июля 2017 года, с 1 января 2019 года все действующие полигоны в России лишены права принимать на захоронение любые резинотехнические отходы [1]. Данная мера повысила актуальность проблемы их утилизации и переработки. В настоящее время перспективным направлением вторичной переработки резинотехнических отходов является механическое измельчение [2], которое чаще всего реализуется в оборудовании с горизонтальной комплектацией, оснащённом

роторами с набором режущих элементов. Эффективное измельчение резины до крошки требуемой фракции является актуальной технологической и экологической задачей.

В новом измельчителе вертикального типа используется сборный ротор включающий: вал, режущие элементы, шайбы, детали крепления, функционирующие в условиях сложных нагружений, при изменении крутящего момента с совместными изгибающими и ударными нагрузками. В связи с этим, при проектировании узлов и оборудования особое значение приобретает анализ напряженно-деформированного состояния в зонах концентрации напряжений, к ним относятся шпоночные пазы, галтели, посадочные поверхности и др., в которых могут произойти усталостные разрушения, что приводит к отказу оборудования [3].

Актуальной задачей является применение современных методов инженерного анализа для оценки напряженно-деформированного состояния роторных систем на этапе проектирования. Метод конечных элементов обеспечивает возможность моделирования статического и динамического поведения сложных сборок с необходимой точностью, что позволяет обоснованно выбирать конструктивные параметры и материалы для их изготовления. Реализация метода конечных элементов в составе CAD/CAE-систем, таких как *SOLIDWORKS Simulation*, предоставляет интегрированный подход к проведению исследований, начиная с этапа геометрического моделирования, заканчивая верификацией прочности. В представленном исследовании с применением инструментов *SOLIDWORKS Simulation* [4] выполнен анализ напряженно-деформированного состояния ротора при различных режимах работы, проверены выполнения условий напряжений, перемещений и деформации, а также проведен анализ влияния изменения частоты его вращения на распределение нагрузок в зонах их концентрации.

Материалы и методы исследований

Объект исследования – сборка вертикального ротора измельчителя (рис. 1) [5,6], основными элементами которого являются: 1 – вал, 2 – гайка, 3 – шнек, 4 – конусная втулка, 5 – режущих ножей, 6 – регулировочный нож, 7 – втулка, 8 – шпонка под ременную передачу, 9 – шпонка для режущей части. Материал для изготовления основных напряженных элементов таких как вал и шпонки сталь 40ХН, с допустимым напряжением $[\sigma] = 520$ МПа [7], а режущие и регулировочные ножи изготовлены из быстрорежущей стали Р6М5, с допустимым напряжением $[\sigma] = 2500$ МПа [8].

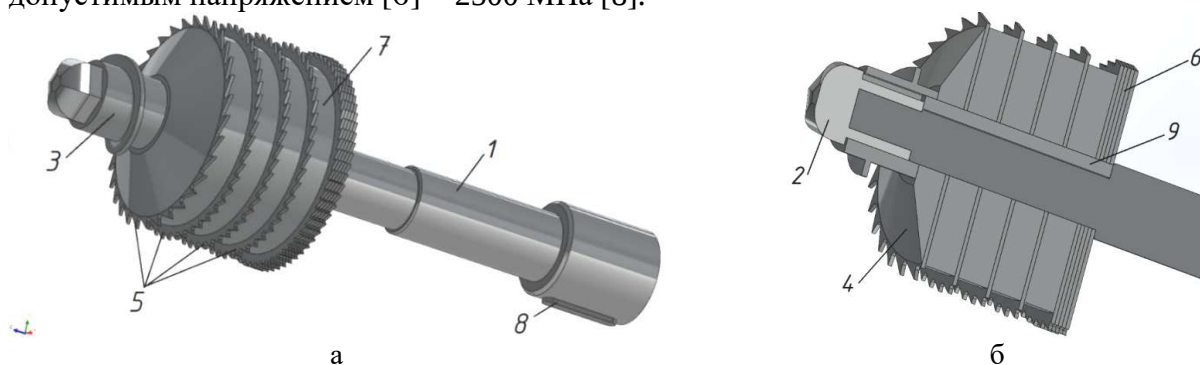


Рис. 1. Цифровая модель вертикального ротора в сборе: а – общий вид ротора; б – разрез режущую часть ротора

Для проведения анализа напряженно-деформированного состояния была выполнена расчетная модель сборки ротора, с проведением корректности совмещения всех деталей [9]. Граничные условия были заданы с учетом реальных условий эксплуатации: зона шпоночного паза в нижней части вала зафиксирована для имитации подшипникового крепления. Нагрузка прикладывалась к режущим ножам и соответствующим участкам вала в виде усилий, соответствующих двум режимам работы: при частоте вращения 130 мин^{-1} ; при частоте вращения 270 мин^{-1} .

Для получения значений эквивалентных напряжений по Мизесу, линейных перемещений и деформации была построена на основе геометрической модели

тетраэдральная конечно-элементная сетка (рис. 2). Параметры дискретизации заданы для всей сборки единообразно, что упрощает процесс подготовки модели [10]. Данные настройки позволили получить сетку, обеспечивающую баланс между точностью расчета и требуемыми вычислительными ресурсами.

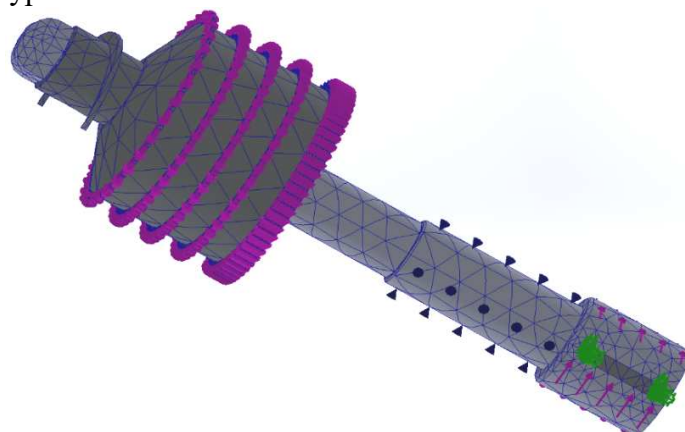


Рис. 2. Конечно-элементная модель ротора в сборе

Результаты моделирования показали, что зона максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу находится в области шпоночного соединения под ременную передачу (рис. 3). Напряжения носят локальный контактный характер на смятие. Была выявлена обратно пропорциональная зависимость между частотой вращения и уровнем напряжений: при увеличении частоты вращения ротора с 130 до 270 мин⁻¹ максимальное напряжение снизилось с 5,6 МПа до 2,8 МПа, то есть в два раза. Это можно объяснить изменением характера нагружения системы: с ростом частоты вращения происходит перераспределения нагрузок, снижается влияние статических составляющих и оказывают влияние такие факторы, как проскальзывание измельчаемого материала, центробежные силы и аэродинамические эффекты.

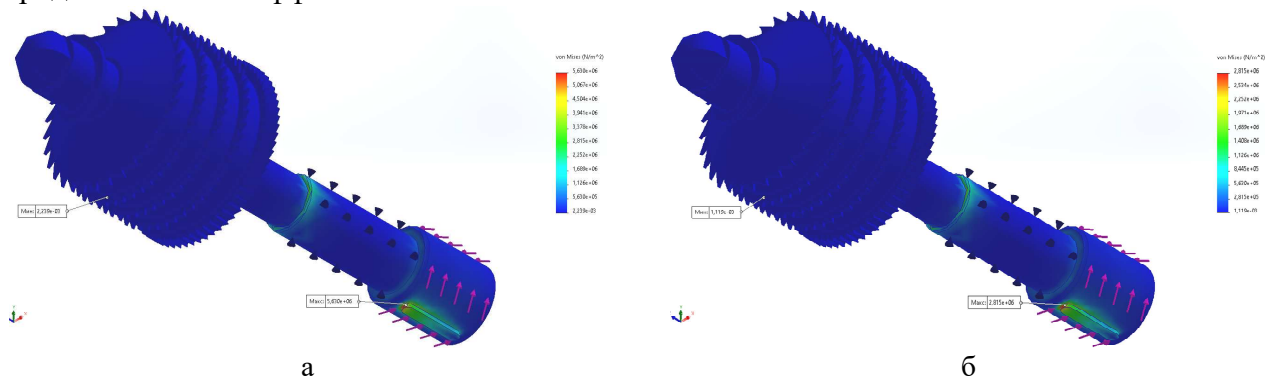


Рис. 3. Распределение напряжений по Мизесу: а) 5,6 МПа при 130 мин⁻¹; б) 2,8 МПа при 270 мин⁻¹

Запас прочности в зоне максимальных напряжений определяется:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}} \geq [n], \quad (1)$$

где n – коэффициент запаса прочности, МПа; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала ротора, МПа; $\sigma_{\max}$ – максимальное расчетное напряжение, МПа; $[n]$ – допустимый коэффициент запаса прочности, МПа.

Максимальные расчетные напряжения ротора в сборе равны 5,6 и 2,8 МПа при частоте вращения ротора 130 мин⁻¹ и 270 мин⁻¹ выполняются.

Анализ линейных перемещений выявил, что их максимальные значения имеют место быть на зубьях режущих ножей, расположенных напротив зоны их соединения с валом через шпонку (рис. 4). Концентрация перемещений в этом узле обусловлена его конструктивными особенностями: шпоночный паз является концентратором напряжений, а наличие

технологических зазоров вызывает локальную микроподвижность элементов. Данный узел испытывает комплексное нагружение, включающее кручение, изгиб и контактное давление. Максимальные величины перемещений составили: при 130 мин^{-1} – 10^{-3} мм ; при 270 мин^{-1} – $5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$. Полученные значения подтверждают обратную зависимость перемещений от частоты вращения.

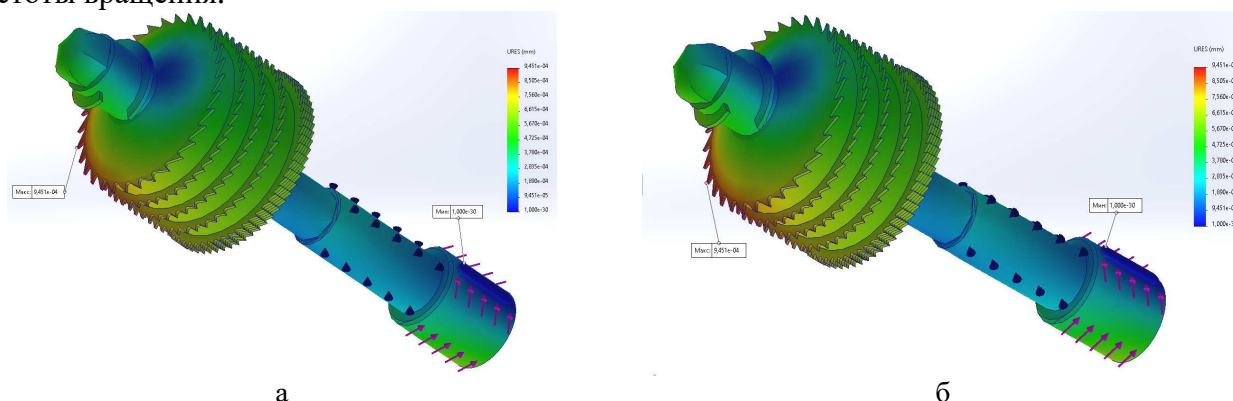


Рис. 4. Линейные перемещения элементов ротора в сборе: а) 10^{-3} мм при 130 мин^{-1} ; б) $5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$ при 270 мин^{-1}

Условие жесткости определяется как:

$$\delta_{\max} = \frac{a}{1000} \leq [\delta], \quad (2)$$

где $\delta_{\max}$ – максимальное расчетное перемещение, мм; $[\delta]$ – допускаемое перемещение, мм; a – максимально габаритный размер конструкции, мм.

Максимальное перемещение элементов ротора выполняются, так при 130 мин^{-1} $\delta_{\max} = 10^{-3} \leq 0,365 \text{ мм}$, а при 270 мин^{-1} $\delta_{\max} = 5 \cdot 10^{-4} \leq 0,365 \text{ мм}$.

Согласно результатам исследования, максимальная эквивалентная деформация ротора в сборе обратно пропорциональна частоте вращения. С ростом скорости с 130 мин^{-1} до 270 мин^{-1} деформация уменьшается вдвое – с $0,002\%$ до $0,001\%$, то есть происходит двукратное снижение деформации при увеличении частоты вращения в 2 раза, что объясняется изменением характера нагружения (рис. 5). С ростом скорости вращения центробежные силы способствуют самоцентрированию ротора, что снижает влияние изгибающих моментов. Одновременно возрастает радиальная жесткость системы, что приводит к уменьшению относительных перемещений и, как следствие, к снижению деформаций во всех элементах сборки.

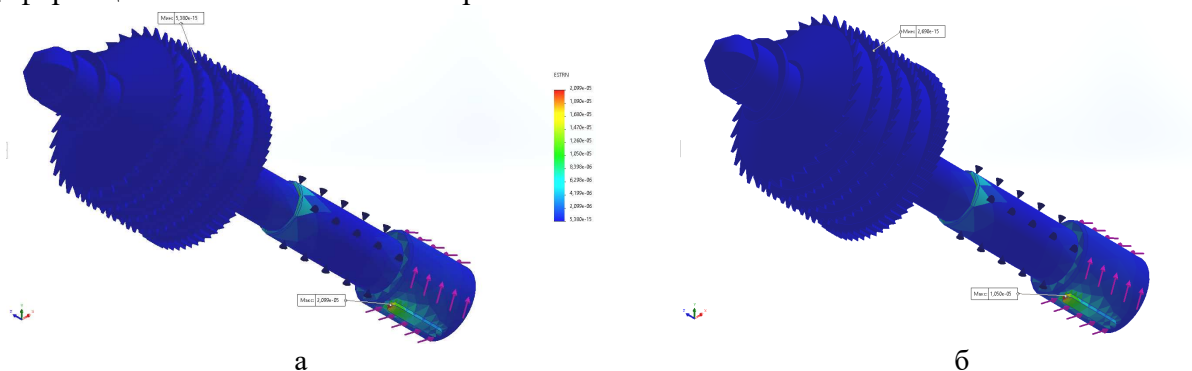


Рис. 5. Распределение эквивалентной деформации ротора: а) $0,002\%$ при 130 мин^{-1} ; б) $0,001\%$ при 270 мин^{-1}

По результатам проведенного напряженно-деформированного состояния конечно-элементного анализа установлено, что конструкция вертикального ротора в сборе соответствует требованиям прочности и жесткости для заданных эксплуатационных режимов.

Выводы

Анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния вертикального ротора в сборе методом конечных элементов с использованием CAD/CAE системы *SOLIDWORKS Simulation* подтверждает, что условия прочности и жесткости вала выполняются.

1. Максимальные напряжения по Мизесу локализуются на шпонке под шкив ременной передачи. В этой зоне наблюдается выраженная обратно пропорциональная зависимость: с ростом частоты вращения величина напряжения снижается. При увеличении скорости с 130 мин^{-1} до 270 мин^{-1} напряжение уменьшается в два раза с 5,74 МПа до 2,87 МПа. Это связано с более равномерным распределением напряжений по сечению вала из-за возрастания крутящего момента, а также с перераспределением нагрузок и ослаблением влияния статической составляющей. Дополнительными факторами снижения напряжений могут служить проскальзывание, возможное размягчение материала вследствие нагрева и изменение эффективного угла резания под действием центробежных сил.

2. Максимальные линейные перемещения возникают на зубьях режущих ножей в месте их соединения с валом через шпонку, что обусловлено концентрацией деформаций в шпоночном соединении режущей части. Данная зона подвергается комплексному нагружению (кручение, изгиб, контакт). Концентратор напряжений в виде шпоночного паза и наличие технологических зазоров, приводящих к микроподвижности ножей, вызывают повышенные деформации в узле. Величины максимальных линейных перемещений составляют 10^{-3} мм при 130 мин^{-1} и $5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$ при 270 мин^{-1} .

3. Величина максимальной эквивалентной деформации при 130 мин^{-1} составляет 0,002%, а при 270 мин^{-1} составляет 0,001%, что в два раза меньше. Снижение деформации с ростом скорости объясняется изменением характера нагружения в зоне шпоночного соединения. Увеличение частоты вращения приводит к перераспределению нагрузок: центробежные силы способствуют самоцентрированию ротора, уменьшая влияние изгибающих моментов, и повышают радиальную жесткость системы, что снижает относительные перемещения и деформации элементов ротора в сборе.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 июля 2017 г. № 1589-р «Об утверждении перечня видов отходов производства и потребления» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.pravo.gov.ru.
2. Серёдкин А.Н., Горячева А.А., Дярькин Р.А. Методологические аспекты переработки и утилизации резинотехнических отходов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2013. – №4. – С. 156-159.
3. Василёнок В.Д. Расчет двухопорных и трехопорных валов на подшипниках качения // Перспективные направления развития машиностроения в области мобильных машин, технологического оборудования и энергетических систем: сборник материалов 21-й Международной научно-технической конференции (Минск, 2024 г.). – Минск: БНТУ, 2024. – С. 20-35.
4. Шубин Н.А., Полонский В.Л. Расчет корпуса и валов редуктора на жесткость с помощью SolidWorks // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. В 2 ч. Ч. 2. – СПб.: Политех-Пресс, 2020. – С. 127-129.
5. Патент №2025114653 РФ. Вертикальный измельчитель для переработки резинотехнических изделий / В.М. Кравченко, С.Ю. Лозовая, В.А. Чмулев. – Заявка №2025114653 от 29.05.2025; опубл. 11.09.2025.
6. Кравченко В.М., Лозовая С.Ю., Бондаренко Ю.А. Исследование работоспособности вертикального ротора измельчителя при получении резиновой крошки // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – №3(99). – С. 214-222.
7. Малышев Н.О., Попов В.Ю., Архипов П.В. Анализ влияния материала вала на его прочностные характеристики с использованием Ansys Mechanical // ХСII Международные научные чтения (памяти П.П. Лазарева): сборник статей Международной научно-практической конференции. – М.: Изд-во «Научная артель», 2020. – С. 6-10.
8. Адашкин А.М. Повышение эффективности инструментов из быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов: монография. – М.: Инфра-М, 2022. – 392 с.
9. Lozovaya S.Yu., Topchy Ya.P., Kravchenko V.M. Investigation of particle kinematics and strength characteristics of a set of multi-knife tools for the disposal of rubber products // Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA: Proceedings of the International University Scientific Forum. – UAE, 2024. – P. 140-144.

10. Петров Н.И., Антонова Т.Л., Суняева М.Э. Методика расчета напряженно-деформированного состояния деталей двигателя внутреннего сгорания в системе SolidWorks // Вестник СибГУТИ. – 2024. – Т. 18, № 4. – С. 22-31.

References

1. Order of the Government of the Russian Federation of July 25, 2017 No. 1589-r "On Approval of the List of Types of Production and Consumption Waste" [Electronic resource]. – Access mode: www.pravo.gov.ru.
2. Seredkin A.N., Goryacheva A.A., Dyarkin R.A. Methodological aspects of processing and recycling of rubber waste // Intelligence. Innovations. Investments. 2013, no. 4, pp. 156-159.
3. Vasilenok V.D. Calculation of two-support and three-support shafts on rolling bearings // Promising directions of development of mechanical engineering in the field of mobile machines, technological equipment and energy systems: collection of materials of the 21st International scientific and technical conference (Minsk, 2024). – Minsk: BNTU, 2024. – P. 20-35.
4. Shubin N.A., Polonsky V.L. Calculation of gearbox housing and shaft stiffness using SolidWorks // SPbPU Science Week: Proceeding of the scientific conference with international participation. In 2 parts. Part 2. – SPb.: Polytech-Press, 2020. – P. 127-129.
5. Patent No. 2025114653 RU. Vertical shredder for processing rubber products / V.M. Kravchenko, S.Yu. Lozovaya, V.A. Chmulev. – Appl. No. 2025114653 from 29.05.2025; publ. 11.09.2025.
6. Kravchenko V.M., Lozovaya S.Yu., Bondarenko Yu.A. Study of the performance of a vertical rotor of a grinder in obtaining rubber crumb // Bulletin of the Rostov State Transport University. 2025, no. 3(99), pp. 214-222.
7. Malyshev N.O., Popov V.Yu., Arkhipov P.V. Analysis of the influence of the shaft material on its strength characteristics using Ansys Mechanical // XCII International Scientific Readings (in memory of P.P. Lazarev): collection of articles from the International Scientific and Practical Conference. – M.: Publ. house "Scientific Artel", 2020. – P. 6-10.
8. Adaskin A.M. Improving the efficiency of high-speed steel and hard alloy tools: monograph. – M.: Infra-M, 2022. – 392 p.
9. Lozovaya S.Yu., Topchy Ya.P., Kravchenko V.M. Investigation of particle kinematics and strength characteristics of a set of multi-knife tools for the disposal of rubber products // Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA: Proceedings of the International University Scientific Forum. – UAE, 2024. – P. 140-144.
10. Petrov N.I., Antonova T.L., Sunyaeva M.E. Methodology for calculating the stress-strain state of internal combustion engine parts in the SolidWorks system // Bulletin of SibSUTI. 2024, vol. 18, no. 4, pp. 22-31.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Лозовая Светлана Юрьевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механического оборудования	Lozovaya Svetlana Yurievna – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of mechanical equipment
Латышев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и графики	Latyshev Sergey Sergeevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of descriptive geometry and graphics
Кравченко Владимир Михайлович – старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и графики	Kravchenko Vladimir Mikhailovich – senior lecturer of the Department of descriptive geometry and graphics
lozwa@mail.ru	

Получена 26.01.2026