

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9.04
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-128-133



ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВТУЛОК ЦИЛИНДРОВ БУРОВЫХ НАСОСОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕРОГО ЧУГУНА С УПРОЧНЕННЫМ СЛОЕМ

Некрасов Р.Ю., Овсянников В.Е., Губенко А.С.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Буровые насосы широко используются предприятиями топливно-энергетического комплекса в ходе работ по освоению новых месторождений. Конструктивно буровой насос представляет собой комплекс оборудования. При этом качество функционирования всей установки в целом зависит от отдельных ее элементов. Одним из «слабых мест» в данном случае являются цилиндрические узлы. Проведенный авторами анализ рисков показал, что это наиболее уязвимая часть оборудования. Главной причиной выхода из строя данного узла является нарушение эксплуатационных характеристик цилиндрической втулки. При этом втулки цилиндров буровых насосов чаще всего изготавливают из двух компонентов: в обойму из стали запрессовывают втулку из чугуна. После сборки требуется финишная механическая обработка. При этом использование закаленного износостойкого чугуна снижает эффективность обработки резанием. В данной работе рассматривается возможность замены втулки из высокопрочного чугуна на втулку из серого чугуна, который подвергнут поверхностному упрочнению. **Цель работы.** Повышение качества цилиндрических узлов буровых насосов на основе использования втулок из серого чугуна с упрочненным слоем. **Используемые методы.** В работе использованы методы планирования эксперимента, расчетов на прочность, квалитетическая оценка, метод конечных элементов, теория резания. **Новизна.** Изготовление износостойких элементов выполняется с использованием нового метода термодиффузионного упрочнения нагревом в контакте с оксидами легирующих элементов. Это позволяет получить на поверхности серого чугуна слой с обратным распределением твердости. В работе проведено комплексное исследование, которое обуславливает возможность замены износостойкого чугуна на серый с упрочненным слоем. **Результат.** Проведены исследования влияния поверхностного упрочнения серого чугуна посредством нагрева в контакте со смесью оксидов легирующих элементов на прочность и жесткость цилиндрических втулок буровых насосов. В результате установлено, что данные свойства сопоставимы с высокопрочным чугуном. В качестве исходных данных по нагрузке принимались значения давлений, которые возникают при образовании посадки с натягом между обоймой втулки и рабочей частью. Рассмотрены вопросы обрабатываемости резанием. Проведено сравнение использования втулки с элементом из серого чугуна и износостойкого с использованием дифференциального метода. **Практическая значимость.** Разработанная конечно-элементная модель дает возможность исследовать взаимодействие элементов цилиндрических втулок буровых насосов. При этом имеется возможность изменения действующих усилий и размеров, а также геометрической конфигурации деталей, что позволяет расширить область применения модели. Использование полученных результатов на стадии проектирования узлов машин дает возможность повысить качество продукции за счет грамотного выбора параметров соединения. Также имеется возможность снизить себестоимость продукции за счет применения более дешевого материала и снижения затрат на изготовление. Получены предварительные рекомендации по режимам обработки резанием.

Ключевые слова: качество, втулка насоса, чугун, упрочнение, качество поверхностного слоя, технология

© Некрасов Р.Ю., Овсянников В.Е., Губенко А.С., 2025

Для цитирования

Некрасов Р.Ю., Овсянников В.Е., Губенко А.С. Повышение качества втулок цилиндров буровых насосов на основе использования серого чугуна с упрочненным слоем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 128-133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-128-133>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

IMPROVING THE QUALITY OF DRILLING PUMP CYLINDER LINERS BASED ON THE USE OF GRAY IRON WITH A HARDENED LAYER

Nekrasov R.Yu., Ovsyannikov V.Ye., Gubenko A.S.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Drilling pumps are widely used by enterprises of the fuel and energy complex during the development of new fields. Structurally, the drilling pump is a set of equipment. At the same time, the quality of functioning of the entire unit as a whole depends on its individual elements. One of the “weak points” in this case are cylinder units. The risk analysis carried out by the authors showed that this is the most vulnerable part of the equipment. The main reason for the failure of this unit is a violation of the performance of the cylinder liner. In this case, the liners of the cylinders of drilling pumps are most often made of two components: a liner of cast iron is pressed into a steel cage. After assembly, finishing machining is required. At the same time, the use of hardened wear-resistant cast iron reduces the efficiency of cutting. In this paper, the possibility of replacing a liner made of high-strength cast iron with a liner made of gray cast iron, which has been subjected to surface strengthening, is considered. **Objectives** are improving the quality of cylinder assemblies of drilling pumps based on the use of liners made of gray cast iron with a hardened layer. **Methods used.** The paper uses methods of experiment planning, strength calculations, qualimetric evaluation, finite element method, cutting theory. **Novelty.** The manufacture of wear-resistant elements is carried out using a new method of thermodiffusion hardening by heating in contact with oxides of alloying elements. This makes it possible to obtain a layer with an inverse hardness distribution on the surface of gray cast iron. A comprehensive study has been carried out, which makes it possible to replace wear-resistant cast iron with a gray reinforced layer. **Result.** Studies of the effect of surface strengthening of gray cast iron by heating in contact with a mixture of oxides of alloying elements on the strength and rigidity of cylinder liners of drilling pumps were carried out. As a result, it was found that these properties are comparable to high-strength cast iron. As initial data on the load, the pressure values that arise during the formation of an interference fit between the liner cage and the working part were taken. The issues of machinability by cutting are considered. The use of a liner with a grey cast iron element and a wear-resistant one is compared using the differential method. **Practical Relevance.** The developed finite element model makes it possible to study the interaction of elements of the cylinder liner of drilling pumps. You can change the forces and dimensions involved, as well as the geometric configuration of the parts, to expand the scope of the model. The use of the obtained results at the design stage of machine components makes it possible to improve the quality of products due to the competent selection of connection parameters. It is also possible to reduce the cost of production by using a cheaper material and reducing manufacturing costs. Preliminary recommendations for cutting modes have been received.

Keywords: quality, pump liner, cast iron, hardening, surface layer quality, technology

For citation

Nekrasov R.Yu., Ovsyannikov V.Ye., Gubenko A.S. Improving the Quality of Drilling Pump Cylinder Liners Based on the Use Of Gray Iron with a Hardened Layer. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 128-133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-128-133>

Введение

Буровые насосы типа УНБТ широко используются организациями топливно-энергетического комплекса Российской Федерации. Данные устройства являются составными частями буровых установок. Основная задача насоса бурового заключается в осуществлении прокачки бурового раствора.

Анализируя данные по отказам элементов оборудования [1-3], были получены данные по среднему расходу деталей бурового насоса в зависимости от наработки, которые приведены в табл. 1.

Однако информация, которая представлена в табл. 1, не дает полной картины, так как рассматриваемые элементы имеют разную трудоемкость изго-

Таблица 1. Данные по наработке на отказ деталей насосов буровых (расход деталей $N \cdot 10^4$)
Table 1. Data on time for failures of drilling pump parts (parts consumption $N \cdot 10^4$)

Деталь насоса	1 год эксплуатации	2 года эксплуатации	3 года эксплуатации	4 года эксплуатации	5 лет эксплуатации	6 лет эксплуатации	7 лет эксплуатации
Клапан	8,8	10	13,7	16,2	22,7	30,0	35,0
Шток поршней	4,8	5,0	5,15	8,2	9,0	13,5	15,2
Втулка цилиндров	4,8	5,0	5,15	7,6	8,0	11,9	14,4
Поршень	5,2	6,2	8,4	12,4	15,4	18,9	25,0

товления, а следовательно, и себестоимость. В этом свете удобнее проводить количественную оценку на основе расчета величины риска [4, 5]. Количественно значение риска можно определить по расчетной зависимости вида

$$R = P \cdot X, \quad (1)$$

где P – вероятность выхода из строя; X – значение ущерба, руб.

Оценка величины ущерба в данной работе производилась затратным методом [6], то есть производилась калькуляция затрат на восстановление соответствующего вышедшего из строя объекта. На **рис. 1** приведены результаты расчета величины риска по видам деталей, представленных выше.

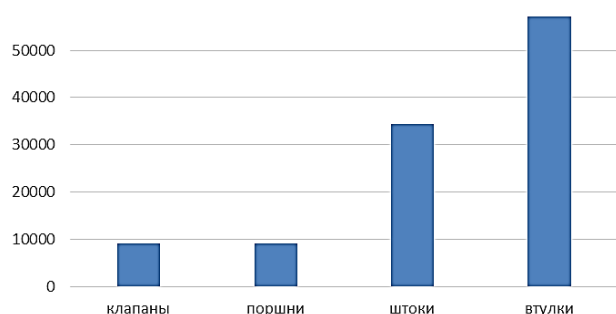


Рис. 1. Данные по рискам выхода из строя элементов бурового насоса

Fig. 1. Data on risks of failure of drilling pump components

Из полученных данных, которые приведены в **табл. 1** и на **рис. 1**, можно сделать вывод, что, несмотря на самую высокую частоту отказов (для клапанов), наиболее уязвимым элементом являются цилиндрические втулки. Основной причиной выхода их из строя является механическое изнашивание. В целях повышения долговечности цилиндрические втулки часто изготавливают сборными, причем рабочая часть выполняется из чугуна. Традиционно для изготовления рабочей части втулок используется дорогостоящий легированный чугун с шаровидным графитом. В качестве упрочнения применяется закалка. К основным недостаткам в данном случае относится высокая стоимость и плохие литейные свойства данных марок чугунов.

В рамках данной работы рассматривается возможность замены материала на серый чугун, который подвергнут поверхностному упрочнению нагревом в контакте со смесью легирующих элементов [7]. Микроструктура слоя приведена на **рис. 2**.

В ходе предварительных исследований было установлено, что слой имеет толщину до 3 мм (что в 10-50 раз превышает аналоги), обратное распределение твердости и ферритную кайму на поверхности (толщиной 0,1–0,3 мм). При этом наличие ферритной каймы дает возможность повысить эффективность механической обработки детали после упрочнения.

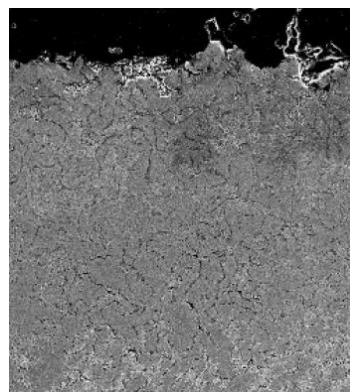


Рис. 2. Микроструктура упрочненного слоя, $\times 100$
Fig. 2. Hardened layer microstructure, $\times 100$

Материалы и методы исследования

Исследование физико-механических свойств втулок выполнялось с использованием метода конечных элементов. Исходные данные для построения конечно-элементной модели брались с результатов исследования образцов, полученных экспериментально. Исследовались свойства втулок из закаленного чугуна марки ЧХ-22 ГОСТ 7769-82, серого чугуна марки СЧ-20 ГОСТ 1412-85 и серого чугуна СЧ-20 с упрочненным слоем. В качестве вычислительной среды использовался программный пакет Solid Works.

В расчетных моделях нагружение принималось равным величине давления, которое возникает при образовании натяга в соединении между обоймой и рабочей частью втулки. Согласно рабочей докумен-

тации, размер составляет $\varnothing 172 \frac{+0.063}{+0.480}$. Требуемая $+0.040$

величина натяга определяется по следующему выражению [8]:

$$N_{\min} \geq p_{\min} \cdot d \cdot \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) \cdot 10^6, \quad (2)$$

где p_{\min} – необходимое давление в месте контакта деталей; d – диаметр сопряжения; E – модули продольной упругости материалов деталей; C – коэффициенты Ляме.

Из выражения (2) определялась искомая величина давления. В ходе расчетов определялись напряжения во втулке и деформации. Также измерялась твердость образцов с использованием портативного твердомера.

Сравнение рассматриваемых вариантов производилось на основе квалитетической оценки дифференциальным методом [9]. За базовый образец принимались втулки, изготавливаемые с использованием износостойких чугунов. В качестве показателей для сравнения были использованы:

- значения напряжений по Мизесу;
- эквивалентная деформация;
- толщина упрочненного слоя;
- твердость;

- период стойкости реза;
- себестоимость изготовления.

Для обеспечения корректности сравнения твердость всех вариантов изготовления втулок переводилась в шкалу Бринелля. Себестоимость изготовления оценивалась по величине приведенных затрат [10].

Механическая обработка образцов производилась на токарном станке с числовым программным управлением марки dmgt mori seoline. В качестве режущего инструмента использовались стандартные резцы со сменными многогранными пластинами. Были проведены стойкостные испытания. При этом устанавливалось фиксированное значение глубины резания, равное $t = 0,2$ мм. Величина продольной подачи составляла $S = 0,25$ мм/об. Скорость резания $V = 180$ м/мин.

Обрабатывались образцы из серого чугуна марки СЧ-20 с упрочненным слоем и износостойкого чугуна марки ЧХ-22 после закалки. Учитывая тот факт, что рассматривается чистовая обработка, в качестве критерия стойкости инструмента принималась шероховатость обработанной поверхности. Измерение шероховатости производилось на профилографе марки Mitutoyo Sufest SJ-500.

За предельное значение шероховатости обработанной поверхности принималась величина $Ra = 3,2$ мкм, так как это предельное значение среднеарифметического отклонения профиля, установленное конструкторской документацией производителя втулок цилиндрических.

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 3 показан пример расчета напряжений, на рис. 4 – пример расчета деформаций.

Определение размеров сетки и проверка адекватности полученных результатов выполнялось на основе сравнения данных, полученных на рис. 3, с результатами испытаний образца на прессе. Погрешность не превышала 10%. Аналогичные исследования были проведены для серого чугуна с упрочненным слоем. В результате было установлено, что по прочности образцы из серого чугуна с упрочненным слоем уступают износостойкому чугуну не более чем на 10%. По эквивалентной деформации (пример расчета на рис. 4) предлагаемый вариант уступает базовому до 25%. Однако данные характеристики материала вполне удовлетворительные с точки зрения служебного назначения, так как в результате моделирования было установлено, что рабочая часть цилиндрических втулок из серого чугуна с упрочненным слоем выдерживает усилие запрессовки с коэффициентом запаса прочности, равного 2. В то же время серый чугун без упрочнения таких нагрузок не выдерживает.

В ходе исследования процессов механической обработки образцов из серого чугуна с упрочненным слоем было установлено, что при удалении ферритного слоя образуется стружка, которая по конфигурации соответствует неупрочненному серому чугуну. Также были получены зависимости Ra обработанной

поверхности от основного времени. На рис. 5 приведен пример зависимости при обработке серого чугуна с упрочненным слоем.

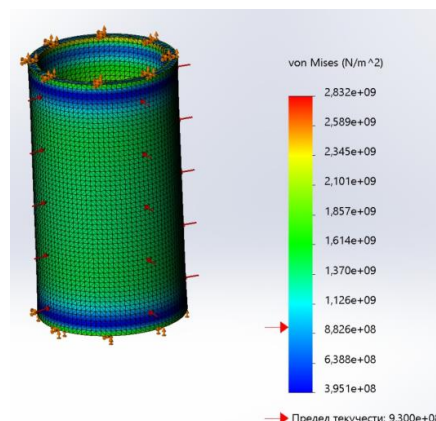


Рис. 3. Пример расчета напряжений (втулка из чугуна ИЧ-22)

Fig. 3. Stress calculation example (cast iron liner ICh-22)

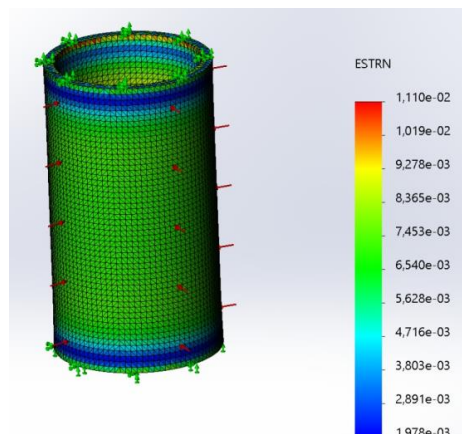


Рис. 4. Пример расчета деформаций (втулка из чугуна ИЧ-22)

Fig. 4. Example of deformation calculation (cast iron liner ICh-22)

Ra , мкм

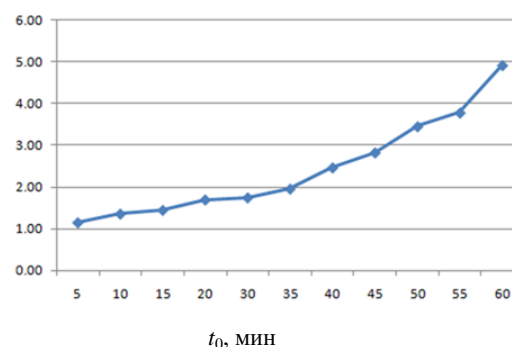


Рис. 5. Зависимость среднеарифметического отклонения Ra от основного времени t_0 , мин

Fig. 5. The dependence of the arithmetic mean deviation of Ra on the basic time t_0 , min

Сравнение вариантов требует оценки рассматриваемых альтернатив по ряду критериев. Для сравнения вариантов будем использовать дифференциальный метод сравнения. В качестве критериев для сравнения возьмем следующие:

- напряжение по Мизесу и эквивалентную деформацию. Данные показатели характеризуют возможность реализации служебного назначения детали, главное требование в данном случае – способность выдержать усилие запрессовки;

- толщина упрочненного слоя, твердость и период стойкости резца при обработке материала. Данные показатели характеризуют технологические свойства;

- для оценки экономических аспектов применяется расчет себестоимости.

Результаты расчетов коэффициентов сравнения приведены в **табл. 2**.

В результате расчетов (см. **табл. 2**) однозначный вывод сделать нельзя. В этом случае целесообразно оценить уровень качества на основе определения значений показателей качества с использованием дифференциального метода оценки [9]. Значения показателей качества оцениваемых альтернатив:

$$y_{K1} = \frac{0,7 + 0,3 + 1 + 0,4 + 2,2 + 2,7}{6} = 1,21; \quad (3)$$

$$y_{K2} = \frac{0,97 + 0,75 + 0,86 + 0,95 + 2,5 + 2}{6} = 1,33. \quad (4)$$

Заключение

В результате расчетов показателей качества по рассматриваемой системе критериев оба варианта превышают базовый (и использование серого чугуна и серый чугун с упрочненным слоем). Однако использование дифференциального метода оценки на основе усреднения показателей имеет существенный недостаток ввиду того, что все критерии являются равнозначными. Поэтому полученные результаты требуют дополнительного анализа:

- было установлено, что обе альтернативы превышают базовый вариант;

- превышение достигнуто за счет показателей, которые характеризуют обрабатываемость материала и себестоимость;

- в ходе расчетов установлено, что серый чугун без упрочнения не выдерживает нагрузок при запрессовке, поэтому не может быть использован в конструкциях цилиндрических узлов буровых насосов;

- использование серого чугуна с упрочненным слоем обеспечивает выполнение служебного назначения и при этом существенно дешевле и технологичнее при изготовлении.

На основании изложенного выше можно сделать вывод о том, что использование серого чугуна с упрочненным слоем для изготовления рабочей части втулок цилиндрических узлов буровых насосов является альтернативой износостойкому чугуну.

Как перспективу для дальнейших исследований, целесообразно рассмотреть в качестве критериев помимо указанных в данной работе еще и долговечность, рабочие характеристики пары втулка-поршень и т.д.

Также следует отметить, что вопросы обработки резанием в данной работе рассмотрены предварительно. В качестве направления для дальнейших исследований целесообразно провести оптимизацию режимов обработки по критерию производительности.

Список источников

1. Харисов М.И., Забиров Ф.Ш. Обоснование направлений совершенствования клапанных пар поршневого бурового насоса с целью повышения наработки на отказ и герметичности // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. №2. С. 113-128.
2. Харисов М.И., Забиров Ф.Ш. Совершенствование конструкции клапанной пары бурового насоса // 69-я науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. матер. докл. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. 249 с.
3. Харисов М.И., Забиров Ф.Ш. Исследование способов и методов повышения надежности клапанной пары бурового насоса // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2018: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. Т. 2. С. 126–127.
4. Методы и инструменты управления рисками на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащенном виброактивным оборудованием / Лончих П.А., Головина Е.Ю., Лончих Н.П., Лившиц И.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 170-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-170-180>

Таблица 2. Результаты расчетов величины коэффициентов сравнения

Table 2. The results of calculations of the comparison coefficients

Наименование показателей качества, единицы измерения	Значения показателей качества P_{i0}, P_{i6}			Формула	y_{1i}	y_{2i}
	СЧ-20	СЧ20+упрочнение	Базовый образец ЧХ-22			
Напряжение по Мизесу (von Mises), Н/мм ²	$4,2 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^9$	P_{i6}/P_{i0}	0,7	0,97
Эквивалентная деформация, ESTRN	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	P_{i6}/P_{i0}	0,3	0,75
Толщина упрочненного слоя, мм	7	6	7	P_{i0}/P_{i6}	1	0,86
Твердость, HB	240	580	618	P_{i0}/P_{i6}	0,4	0,95
Период стойкости резца, мин	50	45	18	P_{i0}/P_{i6}	2,7	2,5
Себестоимость, руб.	14000	16000	32000	P_{i6}/P_{i0}	2,2	2

5. ГОСТ РВ 0015-002-2020. Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования. <https://euro-register.ru>
6. Гаврилова С.В. Концептуальные основы определения высокотехнологичного сектора экономики и функционирования высокотехнологичных компаний // Статистика и экономика. 2014. №2. С. 53-57.
7. Пат. 2493289 РФ. Способ диффузионного титанирования изделий из чугуна / Овсянников В.Е., Гуревич Ю.Г., Фролов В.А., Суханов П.А.; заявитель и патентообладатель Курганский государственный университет; опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26.
8. Основы взаимозаменяемости: учеб. пособие для вузов / Гольгин Н.Х., Педь С.Е., Дружинин П.В., Бойцов А.Г. М.: Изд-во МИИГАиК, 2020. 316 с.
9. Асаул В.В., Кошечев В.А., Цветков Ю.А. Оценка конкурентоспособности организаций в условиях цифровой экономики // Вопросы инновационной экономики. 2020. №1. С. 533-547
10. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. М.: Инфра-инженерия, 2021. 356 с.
1. Kharisov M.I., Zabirow F.Sh. Justification of the directions for improving the valve pairs of the piston drilling pump in order to increase the MTBF and tightness. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo»* [Network publication Oil and Gas Business], 2019;(2):113-128. (In Russ.)
2. Kharisov M.I., Zabirow F.Sh. Improving the design of the valve pair of the drilling pump. *69-ya nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenykh: sb. mater. dokl.* [69th scientific and technical conference of undergraduates, graduate students and young scientists: Proceedings]. Ufa: Publishing House of UGNTU, 2018, p. 249. (In Russ.)
3. Kharisov M.I., Zabirow F.Sh. Study of methods for improving the reliability of the valve pair of the drilling pump. *Sovremennye tekhnologii v neftegazovom dele – 2018: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. v 2 t.* [Modern technologies in oil and gas business. 2018: Proceedings of the International scientific and technical conference in 2 volumes]. Ufa: Publishing House of UGNTU, 2018, vol. 2, pp. 126-127. (In Russ.)
4. Lontsikh P.A., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Livshits I.I. Methods and tools for risk management at a high-tech machine-building enterprise equipped with vibroactive equipment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2024;22(2):170-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-170-180>.
5. State standard GOST RV 0015-002-2020. The system for the development and production of military equipment. Quality management systems. General requirements. Available at: <https://euro-register.ru>
6. Gavrilova S.V. A conceptual framework for determining a high-tech sector of the economy and functioning high-tech companies. *Statistika i ekonomika* [Statistics and Economics]. 2014;(2):53-57. (In Russ.)
7. Ovsyannikov V.E., Gurevich Yu.G., Frolov V.A., Sukhanov P.A. *Sposob diffuzionnogo titanirovaniya izdelij iz chuguna* [Method of diffusion titaniation of cast iron products]. Patent RU, no. 2493289, 2013.
8. Golygin N.Kh., Pedi S.E., Druzhinin P.V. Boitsov A.G. *Osnovy vzaimozamenyaemosti: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Fundamentals of interchangeability: A textbook for universities]. Moscow: Publishing house MSUGC, 2020, 316 p. (In Russ.)
9. Asaul V.V., Koshchev V.A., Tsvetkov Yu.A. Assessing competitiveness of organizations in the digital economy. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki* [Issues of Innovative Economics]. 2020;(1):533-547. (In Russ.)
10. Bezyazuchnuy V.F. *Metod podobiya v tekhnologii mashinostroeniya: monografiya* [Similarity method in mechanical engineering technology: monograph]. Moscow: Infra Engineering, 2021, 356 p. (In Russ.)

References

Поступила 09.10.2024; принята к публикации 17.03.2025; опубликована 30.06.2025
Submitted 09/10/2024; revised 17/03/2025; published 30/06/2025

Некрасов Роман Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: syncler@mail.ru. ORCID 0009-0002-0057-8550

Овсянников Виктор Евгеньевич – доктор технических наук, доцент,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: vik9800@mail.ru. ORCID0000-0002-8775-0781

Губенко Арсений Сергеевич – аспирант,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: gubenkoas@tyuiu.ru. ORCID 0009-0007-3108-3127

Roman Yu. Nekrasov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: syncler@mail.ru. ORCID 0009-0002-0057-8550

Victor E. Ovsyannikov – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: vik9800@mail.ru. ORCID0000-0002-8775-0781

Arseniy S. Gubenko – Postgraduate Student,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: gubenkoas@tyuiu.ru. ORCID 0009-0007-3108-3127