

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-229.42

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-70-76>

Исследование параметров рассеяния натягов в соединении выходного конца вала КПП ЯМЗ с манжетой

О.А. Леонов¹, Н.Ж. Шкаруба²✉, Ю.Г. Вергазова³, Л.А. Гринченко⁴^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>² shkaruba@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>³ vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>⁴ grinchenko@rgau-msha.ru

Аннотация. Долговечность работы соединения «Вал-уплотнение» сельскохозяйственной техники влияет на ресурс работы агрегата. Анализ факторов, влияющих на долговечность работы соединения «Вал-уплотнение», выявил необходимость исследования качества формирования первоначального диапазона натягов в соединении «Вал-уплотнение» и их соответствия параметрам размерной взаимозаменяемости, заложенным в конструкторской документации на этапе проектирования агрегата. Цель исследований – оценка вероятностных характеристик рассеяния соединений внутреннего диаметра манжеты и наружного диаметра фланца КПП ЯМЗ-239. Исследовались 100 фланцев и 100 манжет 1.2-100×125-12. Измерение диаметров концов валов проводилось с помощью скобы рычажной СРП 100-0,001. Внутренний диаметр манжет определялся на приборе ДИП-6 с системой НИИК-890. Оценка параметров рассеяния размеров поверхности выходного вала КПП ЯМЗ-239 под манжету 100/10 показала, что при изготовлении вала обеспечивается точность технологического процесса выше требуемой с удовлетворительной настроенностью, имеется сдвиг в сторону исправимого брака. Исследование внутреннего диаметра манжет показало, что точность процесса формирования внутреннего диаметра манжет хорошая, настроенность процесса удовлетворительная, имеется небольшой сдвиг в сторону неисправимого брака, но сам брак отсутствует. Проведенный анализ рассеяния натягов показал, что вероятный процент бракованных соединений, как характеристики долговечности, составил 0,01%. В результате исследований установлено, что точность изготовления деталей, образующих соединение «Фланец-манжета», отвечает заданным требованиям, а возникающие проблемы с утечками смазочного материала из уплотнений следует искать, исходя из параметров износостойкости указанных деталей, а также из анализа износа влияющих размеров, образующих размерную цепь, где в качестве исходного замыкающего звена будут выступать отклонение от соосности и радиальное биение вала по отношению к диаметру манжеты.

Ключевые слова: вал, уплотнение, натяг, точность, брак, рассеяние натягов, манжета, фланец

Для цитирования: Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Гринченко Л.А. Исследование параметров рассеяния натягов в соединении выходного конца вала КПП ЯМЗ с манжетой // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 70-76. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-70-76>

ORIGINAL ARTICLE

Study of interference dispersion parameters in the joint of the YAMZ gearbox shaft output end and a seal

O.A. Leonov¹, N.Zh. Shkaruba²✉, Yu.G. Vergazova³, L.A. Grinchenko⁴^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>² shkaruba@rgau-msha.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>³ vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>⁴ grinchenko@rgau-msha.ru

Abstract. Durable operation of the “shaft-seal” joint in agricultural machines affects their service life. The analysis of factors affecting the durability of the “shaft-seal” joint has revealed the need to study the quality of the initial tension range in the “shaft-seal” joint and their compliance with the parameters of dimensional

interchangeability, preset in the design documentation. The research purpose is to evaluate the probabilistic characteristics of the dispersion of joints of the inner diameter of the seal and the outer diameter of the flange of the transmission gearbox YAMZ-239. The study involved 100 flanges and 100 seals 1.2-100×125-12. The diameters of shaft ends were measured using a lever bracket SRP 100-0,001. The inner diameter of the seals was determined with a DIP-6 instrument and the NIK-890 system. The conducted estimation of the dispersion parameters of the surface dimensions of the gearbox output shaft of YAMZ-239 under the 100h10 seal showed that shaft manufacturing provides a technological accuracy above the required level with satisfactory adjustment. However, there is a growing probability of a correctable defect. The study of the inner diameter of the seals showed that the accuracy of forming the inner diameter of the seals is good, the process adjustment is satisfactory; there is a slight shift towards a probability of an uncorrectable defect, but the defect itself is absent. The conducted analysis of tension dispersion showed that the probable percentage of defective joints, as a durability indicator, was 0.01%. The study found that the accuracy of manufacturing the “flange-seal” joint parts meets the specified requirements. The problems with the lubricant leakage from the seals should be solved based on the parameters of wear resistance of these parts, as well the wear analysis of the influencing dimensions that form a dimensional chain. In this chain, the initial closing link is the deviation from alignment and radial runout of the shaft in relation to the seal diameter.

Keywords: shaft, seal assembly, interference fits, accuracy, defects, size dispersion, seal, flange

For citation: Leonov O.A., Shkaruba N.Zh., Vergazova Yu.G., Grinchenko LA. Study of interference dispersion parameters in the joint of the YAMZ gearbox shaft output end and a seal. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):70-76 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-70-76>

Введение

Долговечность работы соединения «Вал-уплотнение» сельскохозяйственной техники влияет на ресурс работы агрегата, в котором оно установлено [1, 2], и зависит от различных факторов жизненного цикла агрегата.

При проектировании соединения «Вал-уплотнение» должны быть учтены факторы, обеспечивающие его надежность [3-5]: физические и химические свойства материалов вала и уплотнения; особенности поверхностного слоя вала, находящегося в контакте с уплотнением; конструктивные и геометрические параметры вала и уплотнения; параметры нагружения в виде давления уплотнения на вал и давления уплотняемой жидкости; параметры размерной взаимозаменяемости (отклонения формы и расположения поверхностей в виде отклонения от соосности и радиальное биение вала относительно манжеты, которые должны компенсироваться натягом в соединении).

На стадии изготовления соединения «Вал-уплотнение» долговечность определяется точностью обработки поверхности вала под манжету и точностью технологического процесса изготовления манжет. На этом этапе возможно формирование заданной и повышенной долговечности манжеты путем внесения модификаторов в ее материал [6]. Долговечность вала можно повысить путем нанесения специальных износостойких покрытий [7, 8].

На стадии эксплуатации долговечность соединения «Вал-уплотнение» зависит от качества

и состава применяемых смазочных материалов, режимов эксплуатации и запыленности внешней и внутренней среды.

Исследования, проведенные инженерами Ярославского моторного завода, выявили, что в процессе эксплуатации силовых агрегатов ЯМЗ (двигатель в сборе с КПП) при наработке свыше 8000-10000 тыс. ч на поверхности вала под рабочей кромкой манжет появляется износ на глубину до 0,2 мм, приводящий к утечкам смазочного материала. Замена старой манжеты на новую в такой ситуации течь масла не устраняет [9]. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости исследования формирования первоначального диапазона натягов в соединении «Вал-уплотнение» и их соответствия параметрам размерной взаимозаменяемости, заложенным в конструкторской документации на этапе проектирования агрегата. При выполнении требований проводится анализ отклонений от соосности и радиального биения вала относительно манжеты. Необходимо исследовать и новые, и изношенные соединения путем составления размерных цепей, формирующих данные отклонения.

Цель исследований: оценка вероятностных характеристик рассеяния соединений внутреннего диаметра манжеты и наружного диаметра фланца КПП ЯМЗ-239.

Материалы и методы

При проведении исследований были использованы основы теории вероятности и математической статистики, а также элементы теории точности.

При обработке результатов (прямые измерения с многократными наблюдениями) использованы стандартные методики.

В качестве объекта исследований выбран фланец коробки передач ЯМЗ-239 (рис. 1). Предмет исследований – соединение «Вал-уплотнение». Были отобраны 100 фланцев и 100 манжет 1.2-100×125-12. Параметры точности фланцев и манжет представлены в таблице 1.

Выбор средств контроля диаметра уплотнения и вала осуществлялся по ГОСТ 8.051-81¹. Выбор номенклатуры средств измерений для отверстия манжеты и вала с учетом метрологических характеристик проводился из условия:

$$\pm\Delta_{lim} \leq \pm\delta, \tag{1}$$

где Δ_{lim} – предельная погрешность средства измерений; δ – допускаемая погрешность измерения.

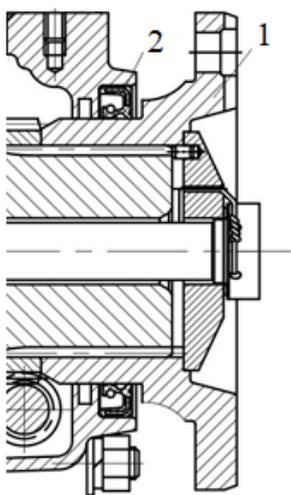


Рис. 1. Эскиз соединения фланца с манжетой коробки передач ЯМЗ:
1 – фланец; 2 – манжета

Fig. 1. Draft view of the flange joint with the seal of the YaMZ gearbox:
1 – flange; 2 – seal

Для наружного диаметра фланца (выходной вал коробки перемены передач) $d_n = \varnothing 100h10_{(-0,14)}$ имеем допуск $T = 140$ мкм и $d = \pm 30$ мкм.

Для измерения диаметров концов валов выбрано средство измерений максимально возможной точности – скоба рычажная СРП 100-0,001 с диапазоном показаний $\pm 0,07$ мм и погрешностью измерений $\pm 0,0014$ мм.

Для измерения внутреннего диаметра манжеты в исследованиях использовался двухкоординатный измерительный прибор ДИП-6 с оптико-электронной измерительной системой НИИК-890, дискретность отсчета 0,01 мм (рис. 2).

Результаты и их обсуждение

В процессе работы агрегата происходит изнашивание поверхности вала и манжеты и уменьшение натягов, что приводит к началу утечек и отказу соединения. Величины натягов, формируемые в соединении вала с манжетой, должны компенсировать отклонения формы и расположения поверхностей и гарантировать отсутствие утечек уплотняемой жидкости.



Рис. 2. Контроль внутреннего диаметра манжеты
Fig. 2. Checking the inner diameter of the seal

Таблица 1
Параметры точности фланцев и манжет 1.2-100×125-12 выходного вала коробки передач ЯМЗ-239

Table 1
Accuracy parameters of flanges and seals 1.2-100×125-12 of the output shaft of the YaMZ-239 gearbox

Объект измерения <i>Name of the measured part</i>	Номинальный размер с отклонениями, мм <i>Nominal size with deviations, mm</i>	Допуск, мм <i>Tolerance, mm</i>	Размер, предельно допустимый, без ремонта, мм <i>Maximum permissible size without repair, mm</i>
Фланец / Flange	100h10 _(-0,14)	0,14	99,7
Отверстие манжеты / Seal hole	100 ^{-2,0} _{-3,0}	1,0	*

* При ремонте все манжеты заменяются на новые.

¹ ГОСТ 8.051-81 (СТ СЭВ 303-76). Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров, до 500 мм. М.: Изд-во стандартов, 1986. 84 с.

Проведены измерения поверхности под манжету у новых фланцев и внутренних диаметров отверстий манжет. По результатам измерений были рассчитаны параметры распределения рассеяния диаметров посадочных поверхностей под манжету фланцев и внутренних диаметров отверстий манжет (табл. 2).

По данным, представленным в таблице 2, построим гистограммы и графики распределения рассеяния контролируемых параметров (рис. 3, 4).

Для оценки точности и настроенности технологического процесса обработки поверхности фланца

под манжету и внутреннего диаметра манжеты рассчитаем коэффициент точности технологического процесса

$$K_T = \frac{T}{6 \cdot \sigma} \tag{2}$$

и коэффициент настроенности технологического процесса

$$K_C = \frac{X_{cp} - \bar{X}}{2 \cdot T}, \tag{3}$$

где X_{cp} – середина поля допуска контролируемого параметра.

Таблица 2

Параметры распределения рассеяния диаметров посадочных поверхностей под манжету фланцев и внутренних диаметров отверстий манжет

Table 2

Parameters of the dispersion distribution of the diameters of the seating surfaces under the flange seal and the internal diameters of the seal holes

Параметры распределения рассеяния <i>Parameters of the dispersion distribution</i>	Усл. обозначение <i>Designation</i>	Манжеты <i>Seals</i>	Фланцы <i>Flanges</i>
Среднее арифметическое, мм / <i>Arithmetic mean, mm</i>	\bar{X}	97,578	99,956
Среднее квадратическое отклонение, мм / <i>Standard square deviation, mm</i>	σ	0,176	0,018
Зона рассеяния, мм / <i>Dispersion zone, mm</i>	ω^*	1,056	0,108

*Зона рассеяния определяется как квантиль, равный 6 (вероятность – 0,9973), умноженный на среднее квадратическое отклонение.

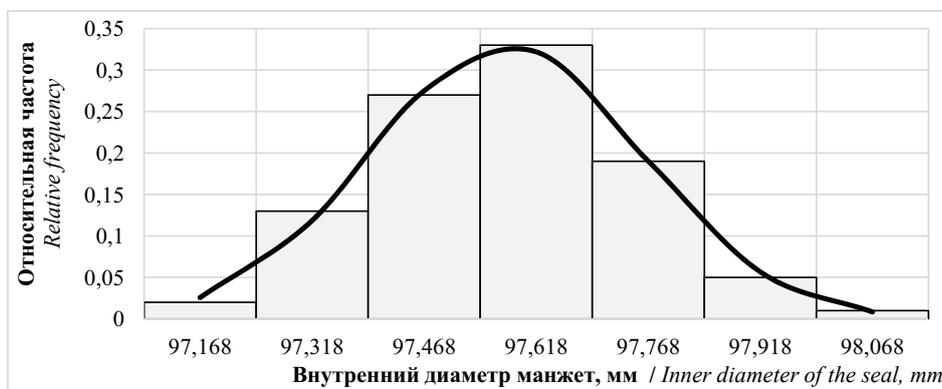


Рис. 3. Распределение внутренних диаметров манжет

Fig. 3. Distribution of internal diameters of seal

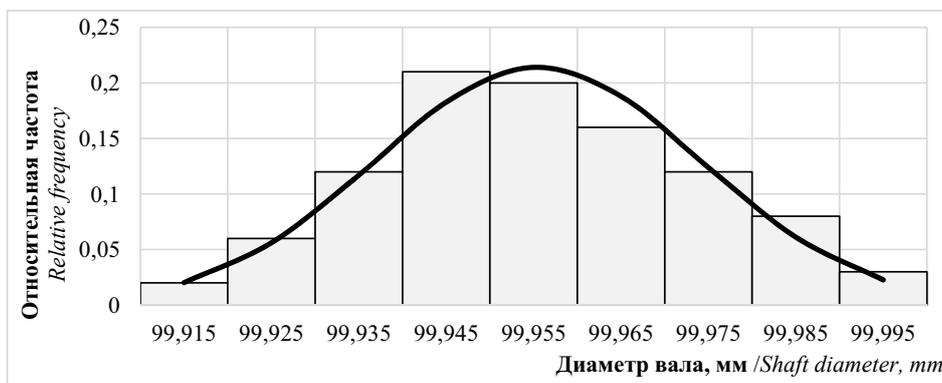


Рис. 4. Распределение поверхности фланца под манжету

Fig. 4. Distribution of the flange surface under the seal

Результаты расчетов коэффициентов точности и настроенности технологического процесса обработки поверхности фланцев под манжету и внутренних диаметров манжет, рассчитанные по формулам (2), (3), представлены в таблице 3.

Из данных таблицы 3 и рисунка 3 можно сделать вывод о том, что точность процесса формирования внутреннего диаметра манжет является хорошей, настроенность процесса – удовлетворительной; имеется небольшой сдвиг в сторону неисправимого брака.

Данные таблицы 3 и рисунка 4 свидетельствуют о том, что при изготовлении фланца обеспечивается точность технологического процесса выше требуемой с удовлетворительной настроенностью, имеется сдвиг в сторону исправимого брака, вероятность появления неисправимого брака равна нулю. Такие параметры распределения обуславливают необходимость обеспечения шероховатости поверхности вала под манжету $Ra = 0,32$ мкм, которую можно сформировать тонким шлифованием (это будет 6-й или 7-й квалитеты точности), алмазным обтачиванием продольной подачи (6-й квалитет

точности) и обычным полированием (6-й квалитет точности).

С использованием данных таблицы 2 выполнена оценка рассеяния вероятных натягов в соединении «Фланец-манжета». Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Используя данные таблицы 4, построим схему рассеяния действительных натягов в посадке «Фланец-манжета» (рис. 5).

Анализ рассеяния натягов позволил сделать следующие выводы. Вероятный процент бракованных соединений по наименьшему натягу, как характеристики долговечности, составил 0,01%. Вероятный процент бракованных соединений по наибольшему натягу, который характеризует границу допустимого износа материала манжеты до пружины, составил 0,17%. Полученное значение свидетельствует о том, что качество изготовления манжет и фланцев находится на высоком уровне, качество обработки поверхности фланца под манжету обеспечивает запас по требуемой точности, а рассеяние размеров отверстий манжет показывает практически полное совпадение с требуемыми характеристиками.

Таблица 3
Параметры точности и настроенности технологического процесса обработки поверхности фланцев под манжету и внутренних диаметров манжет

Table 3
Parameters of accuracy and adjustment of technological processing the surface of flanges under the seal and the internal diameters of the seals

Коэффициент / Coefficient	Манжеты / Sealse	Фланцы / Flanges
Точности технологического процесса, K_T / Accuracy of the technological process, K_T	0,95	1,27
Настроенности технологического процесса, K_C / Tuning of the technological process, K_C	0,06	-0,09

Таблица 4
Вероятностные характеристики рассеяния натягов в соединении «Фланец-манжета»

Table 4
Probability characteristics of interference dispersion in the flange-to-seals joint

Характеристика рассеяния натягов / Characteristic of interference dispersion in the flange-to- seal joint	Значение / Value
Среднее квадратическое отклонение зазоров (натягов), мм / Standard deviation of gaps (interference), mm	0,177
Средний действительный натяг, мм / Average actual interference, mm	2,378
Коэффициент риска по наибольшему натягу / Risk coefficient for the greatest interference	2,92
Коэффициент риска по наименьшему натягу / Risk coefficient for the least interference	3,51
Предельный наибольший натяг, мм / Limiting greatest interference, mm	2,91
Предельный наименьший натяг, мм / Limiting least interference, mm	1,843
Вероятный процент бракованных соединений по наибольшему натягу, % Probable percentage of defective joints for the greatest interference, %	0,17
Вероятный процент бракованных соединений по наименьшему натягу, % Probable percentage of defective joints for the least interference, %	0,01
Суммарный вероятный процент брака, % / Total probable percentage of defect, %	0,18

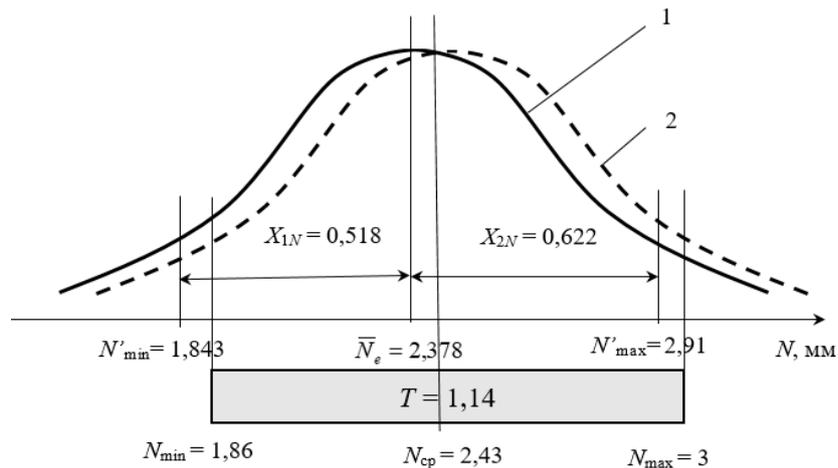


Рис. 5. Схема к расчету брака при сборке соединения «Манжета-вал»:

1 – реальное рассеяние натягов в посадке; 2 – идеальное рассеяние натягов в посадке

Fig. 5. Analytical model for calculating the defectiveness during assembling the “seal-to-shaft” joint:

1 – actual dispersion of the interference fit; 2 – ideal dispersion of the interference fit

Выводы

Точность изготовления деталей, образующих соединение «Фланец-манжета», отвечает заданным требованиям, а возникающие проблемы с утечками смазочного материала из уплотнений следует искать, исходя из параметров износостойкости

указанных деталей, а также из анализа износа влияющих размеров, образующих размерную цепь, где в качестве исходного замыкающего звена будут выступать отклонение от соосности и радиальное биение вала по отношению к диаметру манжеты.

Список источников

1. Мельников О.М., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю. и др. Совершенствование уплотнительных устройств подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24, № 3. С. 68-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
2. Мельников О.М. Работоспособность соединений «вал-манжета» и повышение их надежности // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина»*. 2018. № 2 (84). С. 50. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-50-54>
3. Журавлева С.Н., Денисов М.В. Исследование влияния конструктивной формы рабочей кромки манжетного уплотнения на обеспечение гарантированной герметизации // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2023. № 37. С. 21-25. EDN: AQJAMW
4. Ерохин М.Н., Белов М.И., Мельников О.М. Методика расчета контактного давления манжеты на вал // *Вестник машиностроения*. 2020. № 11. С. 39-45. EDN: PLAAFT
5. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж. и др. Применение размерного анализа для расчета суммарного отклонения от соосности манжеты относительно вала // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2021. № 6. С. 61-67. <https://doi.org/10.31857/S0235711921060067>
6. Мухаметшина А.И., Буторин И.В., Нурлыева Г.Д. и др. Влияние состава резины манжет на их работоспособность // *Автомобильная промышленность*. 2015. № 2. С. 34-36. EDN: TQTGHH
7. Пучков П.В., Зарубин В.П., Киселев В.В. и др. Повышение износостойкости валов дифференциалов за счет применения технологии алмазного выглаживания // *Современные*

References

1. Melnikov O.M., Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu., Skorohodov D.M., Belov M.I. Improving sealing elements of the bearing assembly of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(3):68-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-68-72>
2. Melnikov O.M. Operability of “shaft-cup” couplings and their reliability enhancement. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018;2:50-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-50-54>
3. Zhuravleva S.N., Denisov M.V. Investigation of the influence of the constructive from the working edge of the lip seal on ensuring guaranteed sealing. *Novye Tekhnologii i Materialy v Mashinostroeni*. 2023;3:21-25. (In Russ.)
4. Erokhin M.N., Belov M.I., Melnikov O.M. Method of calculating the contact pressure of the cuff on the shaft. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2020;11:39-45.
5. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.Zh. et al. Application of dimensional analysis for calculating the total misalignment between a seal and a shaft. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021;6:61-67. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0235711921060067>
6. Mukhametshina A.I., Butorin I.V., Nurlyeva G.D. et al. Study of rubber compounds on the performance of the cuff used in vehicle. *Avtomobilnaya Promyshlennost*. 2015;2:34-36. (In Russ.)
7. Puchkov P.V., Zarubin V.P., Kiselyov V.V. et al. Increasing the wear resistance of differential shafts through the application of diamond burning technology. *Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii. Regionalnoe Prilozhenie*. 2022;4(72):55-61. (In Russ.)
8. Vodiakov V.N., Kuznetsov V.V., Berezin M.A., Borisov V.I. Increasing resource of active type sealing connections by modification of mounting places. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2009;8:33-37. (In Russ.)

наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2022. № 4 (72). С. 55-61. EDN: URSHOF

8. Водяков В.Н., Кузнецов В.В., Березин М.А., Борисов В.И. Повышение ресурса уплотнительных соединений активного типа модификацией посадочных мест // Тракторы и сельхозмашины. 2009. № 8. С. 33-37. EDN: NBOLKF

9. Антропов Б.С., Бодров В.А., Басалов И.С. Методы обеспечения работоспособности уплотнений коленчатого вала на автотракторных двигателях ЯМЗ // Вестник АПК Верхневолжья. 2014. № 4 (28). С. 80-81. EDN: TOKUDN

Информация об авторах

¹ **Леонов Олег Альбертович**, д-р техн. наук, профессор; oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020; SPIN-код: 9399-5650, AuthorID: 367093

² **Шкаруба Нина Жоровна**, д-р техн. наук, профессор; shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; Scopus Autor ID: 57210255441; ResearcherID: AAF-6340-2019; SPIN-код: 4773-0700, AuthorID: 482487

³ **Вергазова Юлия Геннадьевна**, канд. техн. наук, доцент; vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; Scopus Autor ID: 57210258726; Researcher ID: AAD-5899-2022; SPIN-код: 1867-1420, AuthorID: 780919

⁴ **Гринченко Лаврентий Александрович**, аспирант, ассистент; grinchenko@rgau-msha.ru; SPIN-код: 1654-9555, AuthorID: 1097244

^{1,2,3,4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

О.А. Леонов – руководство исследованиями; формулирование основной концепции исследований и задач; Н.Ж. Шкаруба – разработка методологии исследований, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование; Ю.Г. Вергазова – верификация данных; разработка программного обеспечения;

Л.А. Гринченко – подготовка начального варианта текста, визуализация данных, формирование выводов, представление, описание результатов и формирование выводов исследований

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; поступила после рецензирования и доработки 12.02.2025; принята к публикации 13.02.2025

9. Antropov B.S., Bodrov V.A., Basalov I.S. Methods for ensuring of working capacity of crankshaft oil seals of automobile and tractor engines by Yaroslavl motor plant (YAMZ). *Vestnik APK Verkhnevolzhya = Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*. 2014;4:80-81. (In Russ.)

Author Information

Oleg A. Leonov¹, DSc (Eng), Professor; oaleonov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8469-8052>; Scopus Autor ID: 57209748174; Researcher ID: ABC-5873-2020

Nina Zh. Shkaruba², DSc (Eng), Professor; shkaruba@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2770-8442>; Scopus Autor ID: 57210255441; ResearcherID: AAF-6340-2019

Yuliya G. Vergazova³, CSc (Eng), Associate Professor; vergazova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7564-7656>; Scopus Autor ID: 57210258726; Researcher ID: AAD-5899-2022

Lavrenty A. Grinchenko⁴, postgraduate student, Assistant Professor; grinchenko@rgau-msha.ru
^{1,2,3,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia

Author Contribution

O.A. Leonov – research supervision; conceptualization; N.Zh. Shkaruba – research methodology, writing – finalizing (review and editing) of the manuscript; Yu.G. Vergazova – data verification; software development; L.A. Grinchenko – writing – original draft, visualization, results and discussion, conclusions.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 12.12.2024; Revised 12.02.2025; Accepted 13.02.2025