

## ОЦЕНКА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ С МИКРОТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

<sup>1</sup>М.А. Иззатуллоев, <sup>2</sup>К.В. Гаврилов, <sup>1</sup>Ш.А. Бозоров

<sup>1</sup>Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) находят широкое применение в транспортном секторе и других областях для повышения эффективности и производительности труда. Даже при активном развитии электромобилей невозможно мгновенно заменить все автомобили с ДВС на электромобили. Таким образом, можно утверждать, что ДВС в автомобилях и других секторах народного хозяйства ещё продолжают использоваться на протяжении длительного времени. Корректное и рациональное проектирование деталей ДВС обеспечивает их надёжную и долговечную работу. В ДВС подшипники скольжения являются одними из ключевых элементов, обеспечивающих плавное и надёжное вращение коленчатого вала и шатунов. В целях повышения несущей способности и снижения потерь на трение в трибосопряжениях, в том числе в подшипниках скольжения, применяются различные конструктивные, технологические и эксплуатационные методы. В рамках конструктивных методов одним из путей снижения потерь на трение и повышения несущей способности трибосопряжений, в том числе подшипников скольжения, является текстурирование трущихся поверхностей. В данной статье исследуется влияние регулируемых параметров микрогеометрии, а именно их глубины, на гидромеханические характеристики радиальных подшипников скольжения.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, подшипник скольжения, трибологические характеристики, микрогеометрия, трибосопряжения, потери на трение, надёжность, долговечность.

## БАҶОДИҶИИ ХОСИЯТҶОИ ТРИБОЛОГИИ МИЛДОНИ ЛАҶҶИШИ БО САТҶИ МИКРОТЕКСТУРОНИДАШУДА

М.А. Иззатуллоев, К.В. Гаврилов, Ш.А. Бозоров

Мухарриқҳои дарунсӯз (МД) дар соҳаи нақлиёт ва дигар соҳаҳо бо мақсади зиёд намудани маҳсулнокии қор васеъ истифода бурда мешаванд. Ҳатто дар шароити рушди босуботи автомобилҳои гуногуни барқӣ ивази пурраи автомобилҳои, ки бо МД қор менамоянд ба автомобилҳои барқӣ ба яқборагӣ нумункин аст. Аз ҳамин сабаб метавон гуфт, ки МД дар автомобилҳо ва дигар соҳаҳои хоҷагии халқ метавонанд солиёни зиёд истифода гарданд. Тарҳрезии дуруст ва оқилонаи ҷузъҳои МД кафили боэътимодӣ ва дарозумрии қори он мебошад. Милдони лағҷиш яке аз ҷузъҳои калидии МД ба ҳисоб рафта даврзании мунтазам ва боэътимоди наварди зонудор ва шатунро таъмин менамояд. Барои баланд бардоштани қобилияти қорӣ ва кам намудани талафот дар соиши трибопайвастагиҳо аз он ҷумла милдонҳои лағҷиш роҳҳо ва усулҳои гуногун, аз қабилҳои конструктивӣ, истифодабарӣ ва технологӣ мавриди истифода қарор мегиранд. Дар доираи усули конструктивӣ яке аз роҳҳои кам намудани талафот дар соиш ва зиёд намудани қобилияти қорӣ трибопайвастагиҳо аз он ҷумла милдонҳои лағҷиш ин текстуронӣ (мақсаднок ноҳамворкунии сатҳҳои соиши трибопайвастагиҳо) ба ҳисоб меравад. Дар мақолаи мазкур оид ба таъсири бузургҳои микрогеометрияҳои танзимшаванда хусусан ҷуқурии онҳо дар сатҳ таъсирҳои гидромеханикии милдони лағҷиши радиалӣ тадқиқот гузаронида шудааст.

**Калидвожаҳо:** муҳарриқи дарунсӯз, милдони лағҷиш, хосиятҳои трибологӣ, микрогеометрия, трибопайвастагиҳо, талафот дар соиш, эътимоднокӣ, дарозумрӣ.

## EVALUATION OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF A JOURNAL BEARING WITH A MICROTTEXTURED SURFACE

M.A. Izzatulloev, K.V. Gavrilov, Sh.A. Bozorov

Internal combustion engines are widely used in the transportation sector and other areas to improve efficiency and productivity. Even with the active development of electric vehicles, it is impossible to instantly replace all internal combustion engine vehicles with electric vehicles. Thus, it can be stated that internal combustion engines will continue to be used in automobiles and other sectors of the national economy for a long time. Correct and rational design of internal combustion engine parts ensures their reliable and long-lasting operation. In internal combustion engines, journal bearings are one of the key elements that ensure smooth and reliable rotation of the crankshaft and connecting rods. In order to increase the load-bearing capacity and reduce friction losses in tribounits, including in journal bearings, various design, technological and operational methods are used. In the context of design methods, one of the ways to reduce friction losses and increase the load-bearing capacity of tribounits, including plain bearings, is texturing the rubbing surfaces. This paper investigates the influence of controllable microgeometry parameters, namely their depth, on the hydrodynamic characteristics of radial journal bearings.

**Keywords:** internal combustion engine, journal bearings, tribological characteristics, microgeometry, tribounit, friction loss, reliability, durability.

### Введение

Согласно анализам, проведённым экспертами в области транспорта, количество автомобилей (легковых, грузовых, автобусов и др.) во всём мире в 2025 году достигло примерно 1,64 миллиарда единиц [1]. В опубликованной статье Michael Gross под названием «Планета с двумя миллиардами автомобилей» (A Planet with Two Billion Cars) отмечается, что общее количество автомобилей к 2030 году достигнет двух миллиардов единиц [2]. Приведённые цифры свидетельствуют о том, что техника

и технологии развиваются быстрыми темпами, однако тревожным фактором является то, что с увеличением количества транспортных средств, особенно тех, которые работают на различных видах топлива, возрастает и объём выбросов парниковых газов. Исследования показывают, что выбросы парниковых газов являются одной из основных причин глобального потепления климата планеты, что может привести к ускоренному таянию ледников, повышению уровня морей и океанов и, как следствие, к другим неблагоприятным последствиям для живых организмов Земли [3].

Учёные по всему миру проводят различные исследования, направленные на сокращение выбросов парниковых газов от промышленных предприятий, в том числе от транспортных средств [19–22]. Отечественные и зарубежные исследователи считают, что одним из путей снижения выбросов парниковых газов в атмосферу является переход от автомобилей с двигателями, работающими на топливе, к электромобилям [5–6].

Другим способом уменьшения выбросов парниковых газов является снижение потерь на трение путём текстурирования поверхностей трения трибосопряжений двигателя внутреннего сгорания, в данном направлении также проведены исследования отечественными и зарубежными учёными [7–9].

С целью уменьшения потерь на трение и, тем самым, сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу при проектировании ДВС, особое внимание уделяется их трибосопряжению.

Потери энергии на трение в поршневых машинах, включая ДВС, являются одной из наиболее серьезных статей энергобаланса, достигая 30% от общей мощности [7]. Наибольший вклад в эти потери вносят два узла: пара «поршень-цилиндр» и подшипники скольжения коленчатого вала, занимающие вторую позицию по величине потерь (рис. 1). Именно поэтому минимизация фрикционных потерь в этих критически важных элементах является приоритетной инженерной задачей при создании современных ДВС. Ключевыми направлениями решения проблемы выступают: использование антифрикционных покрытий, оптимизация финишной обработки поверхностей, применение смазочных материалов улучшенного качества [4] и внедрение технологий лазерного текстурирования (создания искусственного микрорельефа). Текстурирование опосредованно позволяет снизить расход масла, уменьшить механические потери, снизить вредные выбросы выхлопных газов, улучшить надёжность и срок службы двигателя, снизить требования к техническому обслуживанию и увеличить интервалы обслуживания [10–11].

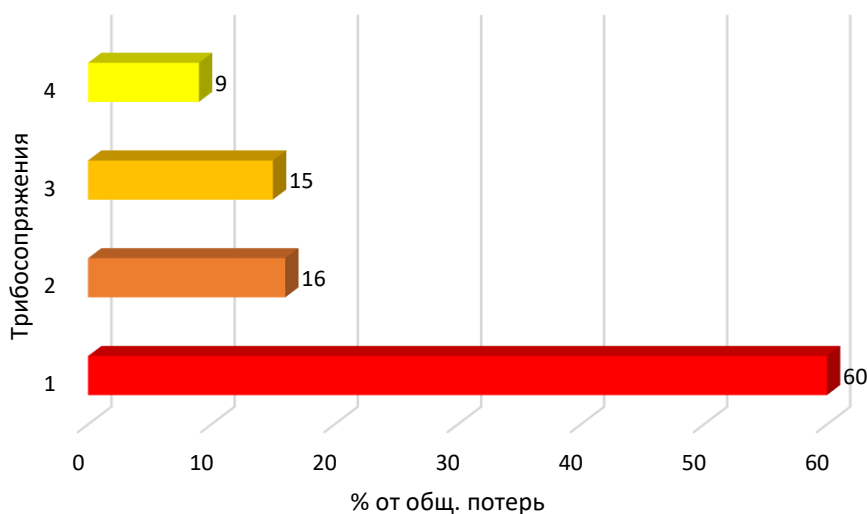


Рисунок 1 – Распределение механических потерь на трение в основных трибосопряжениях ДВС  
 1 — цилиндро-поршневая группа, 2 — коренные подшипники, 3 — система клапанов,  
 4 — шатунные подшипники.

Согласно обзору литературы, одна из первых работ по текстурированным подшипникам скольжения принадлежит авторам [12].

Благодаря первому углубленному исследованию в области текстурирования, проведенному авторами [13–14], было обнаружено, что трение в торцевых уплотнениях с текстурированной поверхностью на 90% ниже, чем с нетекстурированным уплотнением.

N. Tala-Ighil и его коллеги [12] исследовали влияние сферических углублений на рабочие характеристики подшипников, решив двумерное уравнение Рейнольдса с помощью метода конечных разностей. В результате было установлено, что наличие текстуры оказывает существенное влияние на

ключевые параметры подшипника: толщину смазочной пленки, гидродинамическое давление, объемные расходы смазки и момент трения. Исследователи подчеркнули, что эффективность текстурирования напрямую зависит от оптимального выбора геометрических параметров и схемы расположения микроуглублений.

В ранее проведенных исследованиях [7, 9] было изучено влияние различных параметров микротекстур (рис. 2) на гидромеханические характеристики подшипника скольжения. В данном исследовании более подробно рассматривается именно влияние глубины микроямки на гидромеханические характеристики подшипника скольжения.

### Методы исследования

При численном моделировании текстурирования (регулярной микрогеометрии) контактирующих поверхностей радиальных подшипников скольжения толщину смазочной пленки  $h$  определяют на основе заданного профиля микрорельефа.

В качестве одного из вариантов текстурирования поверхности радиальных подшипников скольжения выступают эллиптические микроямки (рис 2). Их применение позволяет увеличить несущую способность подшипника.

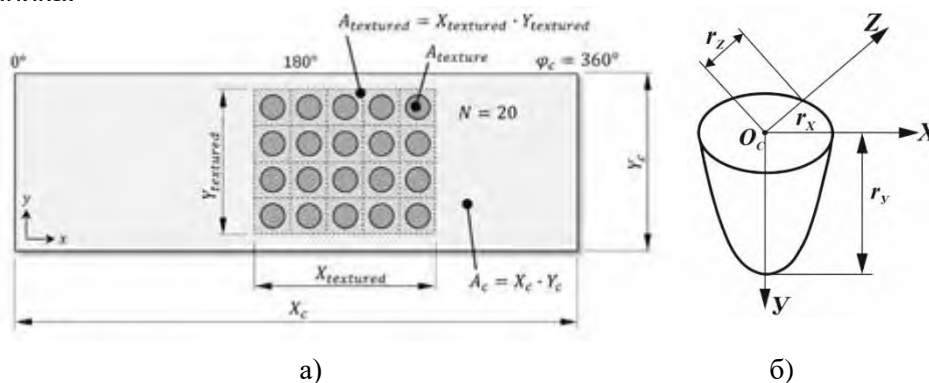


Рисунок 2 – Текстурированная поверхность вкладыша подшипника [18]:  
а) развернутая поверхность вкладыша, б) микроямка

Расчет распределения гидродинамических давлений в смазочном слое исследуемых трибосопряжений выполнялся на основе модифицированного уравнения Элрода. Детали реализации конечно-разностной аппроксимации данного уравнения изложены в работах [15]. Динамика подвижных элементов системы рассчитывалась с использованием метода ФДН [16]. В модели учитывалось наличие искусственно созданной текстуры на рабочей поверхности подшипника в виде регулярных микроуглублений различной геометрии. С учетом влияния макроотклонений формы и микрорельефа выражение для локальной толщины смазочного слоя принимало следующий вид:

$$h(\varphi, z) = h_0(\varphi, z) + h_1(\varphi, z) \tag{1}$$

где  $h_0(\varphi, z)$  описывает макрогеометрию подшипника, а  $h_1(\varphi, z)$  – микрогеометрию поверхности с учетом микроуглублений (микрорельефа).

Геометрия исследуемых микрорельефов в рамках данной модели описывается следующим образом:

$$\frac{(x - x_c)^2}{r_x^2} + \frac{(y - y_c)^2}{r_y^2} + \frac{(z - z_c)^2}{r_z^2} = 1. \tag{2}$$

$$y = \frac{r_y}{r} \sqrt{r^2 - (x - x_c)^2 - (z - z_c)^2}. \tag{3}$$

$$\Delta h = \begin{cases} \frac{r_y}{r} \sqrt{r^2 - (x - x_c)^2 - (z - z_c)^2}, & \text{если } \sqrt{x^2 + z^2} \leq r, \\ 0, & \text{если } \sqrt{x^2 + z^2} > r. \end{cases} \tag{4}$$

Согласно условию (4), приращение толщины смазочного слоя  $\Delta h$  вносится только в том случае, если расстояние от центра микроямки до рассматриваемой точки не превышает её радиуса  $r$ . При этом

$\Delta h$  определяется изменением координаты  $y$  в пределах ямки. Если же расстояние до точки больше  $r$ , текстурирование не влияет на толщину слоя, и она остаётся неизменной.

### Результаты исследования

Параметрические исследования были проведены с использованием разработанной программы трибологического анализа [8]. Основное назначение данной программы – расчётный анализ радиальных гидродинамических трибосопряжений, а именно коренных и шатунных подшипников коленчатого вала ДВС.

Для расчётного анализа трибосопряжений (ТС) «вал – вкладыш» ДВС в разработанной программе в качестве исходных данных использовались индикаторная диаграмма рабочего процесса в цилиндре, геометрические и технологические параметры, включая микротопографию поверхностей трения, а также режимные и эксплуатационные характеристики.

К параметрам – микрогеометрическим характеристикам радиального подшипника относятся следующие:

$r$  – радиус микроямки,

$r_y$  – глубина микроямки,

$\varphi_n, \varphi_k$  – начало и конец зоны расположения микротекстурирования по углу подшипника,

$\varepsilon_b$  – плотность расположения микроямок на поверхности трения.

$$\varepsilon_b = f(N_B, N_L) \quad (5)$$

где:  $N_B$  – количество микроямок по ширине,  $N_L$  – количество микроямок по длине.

На основе разработанной программы выполнены расчётные исследования, в рамках которых оценивалось влияние микрогеометрических параметров текстурирования вкладышей на гидромеханические характеристики (ГМХ) шатунного подшипника форсированного дизеля ЧН 13/15, подробные значения данных для расчёта которого приведены в работе [17].

Основные параметры ГМХ, которые впоследствии определяют положительное или отрицательное влияние микрогеометрии на работу подшипника, являются следующие:  $N_{тр}^*$  – средняя мощность потерь на трение,  $h_{min}^*$  – средняя толщина смазочного слоя,  $P_{max}^*$  – среднее гидродинамическое (ГД) давление.

Результаты расчёта влияния регулируемых микрогеометрий на ГМХ шатунного подшипника форсированного дизеля ЧН 13/15, выполненного с помощью разработанной программы [8], приведены на рисунках 3-5 и в таблице 1.

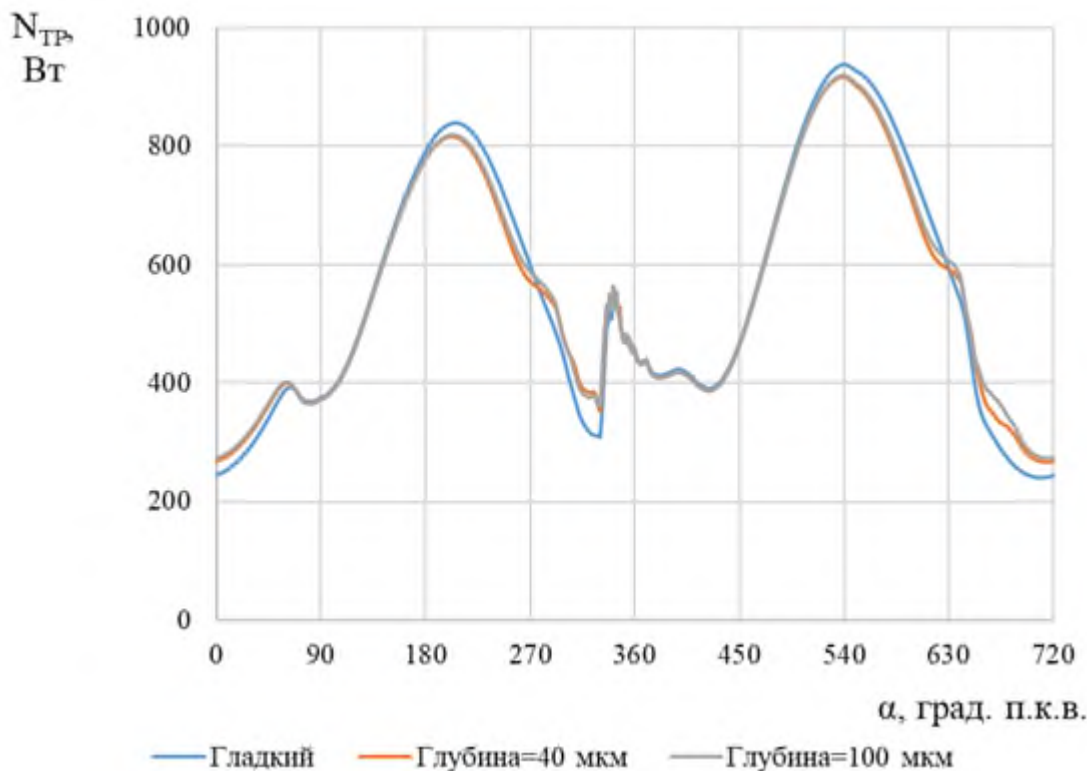


Рисунок 3 – Изменение потерь мощности на трение в зависимости от угла поворота коленчатого вала при различной глубине микроямок

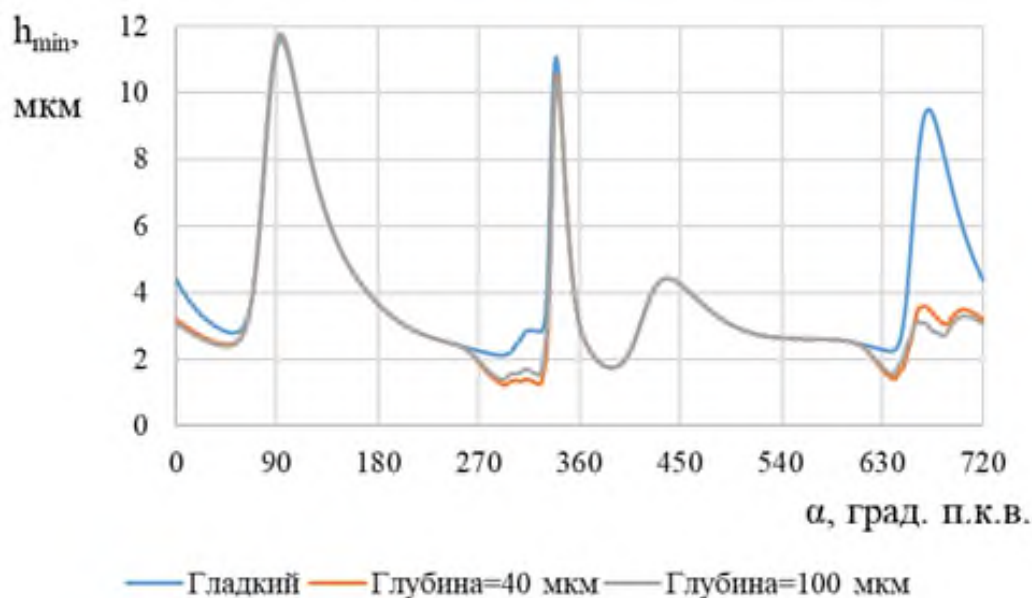


Рисунок 4 – Изменение минимальной толщины смазочного слоя от угла поворота коленчатого вала при разной глубине микрорямок

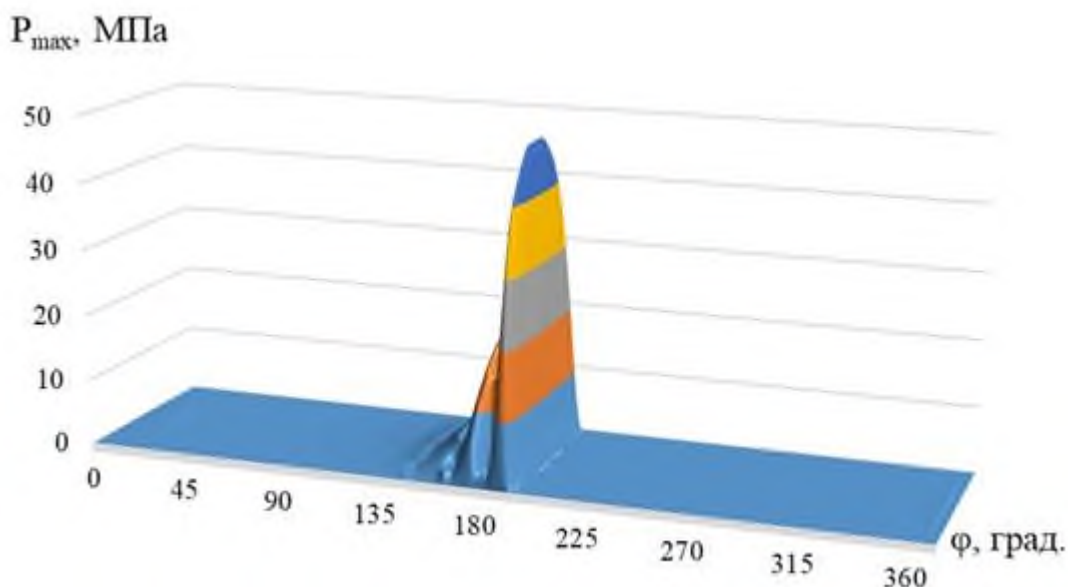


Рисунок 5 – Эпюра давления на поверхности подшипника при угле поворота шипа 191 градус п.к.в., полученная для поверхности, покрытой микрорямками по всей площади (диаметр ямки 400 мкм, глубина 20 мкм).

Таблица 1 – Результаты расчёта влияния регулируемых микрогеометрий на ГМХ шатунного подшипника при текстурировании по всем поверхностям

$r$ - радиус ямки мкм	$r_y$ - глубина ямки мкм	$N_{тр}^*$ Вт	$h_{min}^*$ мкм	$P_{max}^*$ МПа
200	20	688,2	2,4	614,3
200	60	777,3	1,4	870,4
200	100	761,1	1,2	979,2

### Обсуждение результатов

Как следует из результатов расчётов, текстурированная поверхность вкладыша оказывает различное влияние на ГМХ шатунного подшипника дизеля ЧН 13/15. В результате варьирования глубины микрорямок установлено, что в диапазоне значений от 20 до 100 мкм наблюдается улучшение показателей потерь на трение в пределах 10–12%. Эти показатели при частичном текстурировании поверхности подшипника существенно изменяются, что будет показано в дальнейших исследованиях.

## Заключение

На основе разработанной расчётной модели и программы численного моделирования проведена оценка влияния параметров микротекстурирования на ГМХ опорного узла. Полученные данные показывают, что нанесение регулярного микрорельефа на поверхность трения подшипника позволяет существенно изменять его трибологические свойства. В ходе исследования установлено, что ключевое значение для изменения гидромеханических характеристик имеют не только глубина микрорельефа, но и другие параметры текстурирования, включая геометрию, размеры и плотность их распределения.

*Рецензент: Юнусов М.Ю. — к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта», ТПУ имени академика М.С. Осими.*

## Литература

1. Autokunbo.com: online car marketplace. – Текст: электронный // Autokunbo.com: [сайт]. – URL: <https://autokunbo.com/> (дата обращения: 09.02.2026).
2. M. Gross, “A planet with two billion cars,” *Curr. Biol.*, vol. 26, no. 8, pp. R307–R310, 2016, doi:10.1016/j.cub.2016.04.019.
3. Ahmad L. El Zein., Nour A. Chehayeb. The Effect of Greenhouse Gases on Earth’s Temperature // *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*. – 2015. – Vol. 3, No. 2. – P. 74–79. – DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijema.20150302.16>
4. Изменение качества моторного масла - индикатор текущего состояния автомобильных двигателей / Ф. С. Бодурбеков, М. Ю. Юнусов, Б. Ж. Мажитов, Н. Б. Сахибов // *Peasant*. – 2018. – № 1. – С. 38-40. – EDN STQAJE.
5. Абдулло, М. Оид ба бехатарии автомобилҳои барқӣ / М.А. Абдулло, Ш. С. Саъдуллозода, А. А. Абдуллоев // *Паёми политехникӣ. Бахши: Таҳқиқоти муҳандисӣ*. – 2025. – No. 3(71). – P. 104-118. – EDN KGBDRO.
6. Сайфиддинзода О.С. Углеродный след и климатическая уязвимость Республики Таджикистан / Сайфиддинзода О.С., Абдулло М.А., Джурахонзода Р.Дж., Давлатзода С.Х. // *Фурӯғи илм*. – 2025. – No. 4. – P. 53-61.
7. Иззатуллоев, М.А. Экспериментальная оценка влияния регулярной микрогеометрии на трибологические характеристики радиального подшипника скольжения / М. А. Иззатуллоев // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. – 2021. – № 1(53). – С. 87-94. – EDN BNOZAC.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664243 Российская Федерация. Микрогеометрия трибосистемы "вал-вкладыш" двигателя внутреннего сгорания: № 2019662988: заявл. 17.10.2019; опубл. 01.11.2019 / К. В. Гаврилов, М. А. Иззатуллоев; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»). – EDN KWTSAU.
9. Рождественский, Ю.В. Оценка влияния параметров микротекстурирования на гидромеханические характеристики подшипников коленчатого вала дизеля / Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов, М.А. Иззатуллоев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 30-37. – DOI 10.14529/engin200104. – EDN BPZHND.
10. Tung Simon C., McMillan Michael L. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. *Tribology International*, 2004, vol. 37, pp. 517–536. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.01.013.
11. Ohue Y., Tanaka H. Effect of Surface Texturing on Lubricating Condition under Point Contact Using Numerical Analysis. *J. Scientific Research*, 2013, no. 4, pp. 379–385. DOI: 10.4236/eng.2013.54050.
12. Effects of surface texture on journal-bearing characteristics under steady-state operating conditions / N. Tala-Ighil, P. Maspeyrot, M. Fillon, A. Bounif // *J Eng Tribol*. – 2007. – Vol. 221. – P. 623–633. DOI: 10.1243/13506501JET287.
13. Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing. *Tribology Letters*, 2004, vol. 17, iss. 4, pp. 733–737.
14. Etsion I., Halperin G. A Laser Surface Textured Hydrostatic Mechanical Seal. *Journal Tribology Transactions*, 2002, vol. 45, iss. 3, pp. 430–434. DOI: 10.1080/10402000208982570.
15. M Fesanghary, MM Khonsari (2011) A Modification of the Switch Function in the Elrod Cavitation Algorithm. *J. Tribol.*133(2): 1-4
16. Прокопьев В.Н., Рождественский Ю.В., Ширококов Н.В. Повышение эффективности алгоритмов расчета выходных параметров сложнагруженных опор скольжения двигателей транспортных машин // *Вестник Уральского межрегионального отделения Российской академии транспорта*. — 1999. — № 2. — С. 28.
17. Иззатуллоев, М.А. Динамика и смазка гидродинамических узлов трения с текстурированной поверхностью / М.А. Иззатуллоев, К.В. Гаврилов, Ю.В. Рождественский; МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН, ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени академика М.С. Осими. – Душанбе: Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими, 2022. – 150 с. – ISBN 978-99985—9009-0. – EDN AIJOJZ.

18. Gropper, D. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings / D. Gropper, L. Wang, T. Harvey // J Tribology International. – 2016. – №94. – P. 509–529.

19. Бозоров, Ш.А. Истифодаи барномаи Excel ҳангоми иҷрои корҳои илмӣ-таҳқиқотӣ / Ш.А. Бозоров // Илм - асоси рушди инноватсионӣ: Маводҳои конференсияи IX байналмилалӣ илмӣ-амалӣ дар мавзӯи, Душанбе, 18–19 апрели 2024 года. – Душанбе: "Промэкспо", 2024. – P. 219-222. – EDN EPJVKZ.

20. Акрамов, Б.Н. Расчет несущего каната кабельного крана на основе теории гибких нитей, несущих силовую нагрузку / Б.Н. Акрамов, И.А. Исмаилов, К.З. Тиллоев // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2025. – № 3(11). – С. 11-16. – EDN IPNROE.

21. Тиллоев, К.З. Методика проведения экспериментальных исследований для определения бокового усилия конусного раскатчика при внедрении в грунт / К.З. Тиллоев // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2024. – № 4(8). – С. 4-8. – EDN VEMJUC.

22. Султонов, Х.Н. повышение эффективности работы гусеничного движителя строительных машин / Х.Н. Султонов, Д.А. Шарифов, К.Д. Мухиддинзода // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2024. – № 2(6). – С. 4-8. – EDN CLQSAE.

**МАЪЛУМОТ ОИД БА МУАЛЛИФОН–СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ–INFORMATION ABOUT AUTHORS**

TJ	RU	EN
Иззатуллоев Мубориз Акрамхонович н.и.т.	Иззатуллоев Мубориз Акрамхонович к.т.н.	Izzatulloev Muboriz Akramkhonovich Candidate of technical sciences
Донишгоҳи техники Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academic M.S. Osimi
E-mail: <a href="mailto:muboriz88@bk.ru">muboriz88@bk.ru</a> <a href="https://orcid.org/0009-0001-7349-8984">https://orcid.org/0009-0001-7349-8984</a>		
TJ	RU	EN
Гаврилов Константин Владимирович д.и.т.	Гаврилов Константин Владимирович д.т.н.	Gavrilov Konstantin Vladimirovich Doctor of Technical Sciences
Донишгоҳи давлатии Урали Чанубӣ (донишгоҳи миллии тадқиқотӣ)	Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)	South Ural State University (national research university)
E-mail: <a href="mailto:gavrilovkv@susu.ru">gavrilovkv@susu.ru</a>		
TJ	RU	EN
Бозоров Шамсуддин Аломуддинович н.и.т.	Бозоров Шамсуддин Аломуддинович к.т.н.	Bozorov Shamsuddin Alomuddinovich Candidate of technical sciences
Донишгоҳи техники Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academic M.S. Osimi
E-mail: <a href="mailto:bozorov_shamsuddin@mail.ru">bozorov_shamsuddin@mail.ru</a>		