УДК 921.01
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-280-286

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАРЫ ТРЕНИЯ ТИПА „ДИСК ПО ДИСКУ“

Л. В. Ефремов[1*], А. В.Тикалов[2]

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *АО „Компрессор“, Санкт-Петербург, Россия*
[*] *levlefr@mail.ru*

Аннотация. Предложены алгоритмы оценки износа пары трения качения с проскальзыванием типа „диск по диску“ при испытаниях на машине трения СМЦ-2. Приведены три варианта режима проскальзывания дисков при моделировании трения скольжения и качения на примере основных видов повреждений зубчатых передач. В основу алгоритмов расчета линейной и объемной износостойкости дисков, в случае трения скольжения от проскальзывания, положен метод block-on-ring. Работа актуальна для изучения факторов, влияющих на износ. Предложенная и обоснованная методика готова к применению при испытаниях пар трения типа „диск по диску“.

Ключевые слова: *износ, износостойкость, диск, образец, сегмент, трение, хорда, диск по диску*

Ссылка для цитирования: *Ефремов Л. В., Тикалов А. В.* Экспериментальная оценка износостойкости пары трения типа „диск по диску“// Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 280—286. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-280-286.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE WEAR RESISTANCE OF A DISC-ON-DISC FRICTION PAIR

L. V. Efremov[1]*, A. V. Tikalov

[1] *Institute of Mechanical Engineering Problems of the RAS, St. Petersburg, Russia*
[2] *JSC "Compressor", St. Petersburg, Russia*
[*] *levlefr@mail.ru,*

Abstract. Algorithms for estimating the wear of a rolling friction pair with slippage of the “disk on disk” type during tests on an SMC-2 friction machine are proposed. Three variants of the disc slip mode are given when simulating sliding and rolling friction on the example of main types of damage to gears. The algorithms for calculating the linear and volumetric wear resistance of discs, in the case of sliding friction against slippage, are based on the block-on-ring method. The work is supposed to be relevant for studying wear affecting factors. The proposed and substantiated technique is ready for use in testing friction pairs of the “disk-on-disk” type.

Keywords: wear, wear resistance, disc, sample, segment, friction, chord, ring on ring

For citation: Efremov L. V., Tikalov A. V. Experimental evaluation of the wear resistance of a disc-on-disc friction pair. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 4. P. 280—286 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-280-286.

Введение. При испытаниях образцов материалов на износ широко применяются трибометры типа СМЦ-2, оснащенные парами трения скольжения и качения [1]. Наиболее эффективные пары трения скольжения типа „брусок по диску“, или „block-on-ring“ [2], состоят из изнашиваемого образца в виде плоского бруска *2* и изнашивающего его диска *1* (рис. 1, *а*). У пары трения качения типа „диск по диску“, или „ring-on-ring“ (RR), изнашиваемый образец представляет собой вращающийся диск *2*, который может проскальзывать относительно сопрягаемого с ним диска *1* (рис. 1, *б—г*) [1].

При трении скольжения износ образца Δh проявляется в виде некоторого уменьшения его размеров и массы за назначенное время сеанса испытаний, что позволяет оценивать

© *Ефремов Л. В., Тикалов А. В., 2022*

линейную ε_L и объемную ε_W износостойкость как характеристику трибологических свойств пар трения.

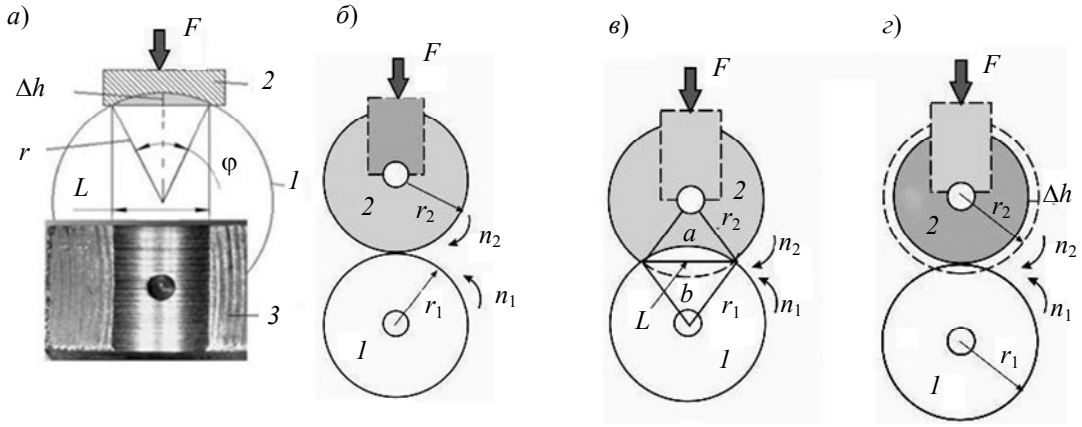

Рис. 1

Решение этой задачи можно показать на примере измерения износов методом block-on-ring при изнашивании прямоугольного бруска шириной H_k, в плоскость которого врезается диск радиусом r, образуя износ в виде сегмента с хордой (длиной L) на поверхности за время сеанса испытаний t (рис. 1, *а*). На брусок действует постоянная нагрузка F, а диск вращается с частотой n. Тогда переменное удельное давление на образец $P=F/D$ (МПа), где $D=H_k L$ (мм²) — площадь пятна контакта. При вращении диска относительно неподвижного образца каждая точка контакта совершает путь трения $S=2\pi rnt$ (мм), что соответствует работе трения $A=10^{-3}FS$ (Н·м) [1].

Как видно из рис. 1, *а*, переменная длина хорды L определяется любым мерительным инструментом. При этом она является аргументом всех функций, входящих в алгоритм расчета упрощенного варианта метода block-on-ring.

Линейная износостойкость ε_L представляет собой отношение пути трения S к линейному износу Δh (мм) за время сеанса испытаний t, а объемная износостойкость ε_W (Н·м/мм³) — это отношение работы трения A (Н·м) к объему продуктов износа W (мм³) за то же время.

В соответствии со стандартом ASTM G77 метода block-on-ring предусматривается оценка только объемной износостойкости ε_W. Для этого была получена формула расчета объема продуктов износа W [2—4]:

$$W=\left[r^2\arcsin\left(\frac{L}{2r}\right)-\frac{L}{2}\sqrt{r^2-\left(\frac{L}{2}\right)^2}\right]H_k\to\left(\frac{L^3}{12\,r}+\frac{L^5}{160\,r^3}+\frac{3L^7}{3584\,r^5}..\right)H_k\approx\frac{L^3}{12r}H_k, \quad (1)$$

которая была упрощена в зависимости от длины хорды L с погрешностью не более 2—3 % путем разложения точного выражения (1) в ряд Тейлора. Отсюда следует упрощенная функция линейного износа Δh от хорды L:

$$\Delta h=W/D=W/L\,H_k\approx\frac{L^2}{12\,r}. \quad (2)$$

Таким образом, получены все переменные, необходимые для перехода от функции объемной износостойкости ε_W:

$$\varepsilon_L=\frac{S}{\Delta h}=\frac{10^3\,A/F}{W/D}=\frac{10^3\,A/W}{F/D}=1000\frac{\varepsilon_W}{P} \quad (3)$$

к функции линейной износостойкости ε_L

$$P=F/D=F/L\,H_k; \quad (4)$$

с учетом формул (2) и

$$\varepsilon_W=A/W=10^{-3}\,F\,S/W \quad (5)$$

для износа Δh и давления P. Отметим, что формула (4) является универсальным законом для сравнительной оценки износостойкости материалов по ГОСТ 23.001-2004* как при постоянном, так и переменном давлении (вне зависимости от способа проведения испытаний).

На рис. 1, *б—г* показаны три варианта эскиза для трех вариантов работы пары трения „ring-on-ring“ с учетом коэффициента проскальзывания k_k . Учет проскальзывания поверхности контакта имеет принципиальное значение для расчета износа пары трения „ring-on-ring“. В общем случае величина линейного износа зависит от остаточного пути трения пятна контакта ΔS и коэффициента скольжения k_p, которые определяются по формулам:

$$\Delta S = 2\,\pi t \left| r_1\, n_1 \, - r_2\, n_2 \right| = 2\,\pi\, r_1\, n_1\, t \,\left| 1 - \frac{r_2 n_2}{r_1 n_1} \right| = 2\,\pi r_1\, n_1\, t\, k_k ; \tag{6}$$

$$k_k = \left| 1 - \frac{r_2\, n_2}{r_1\, n_1} \right|. \tag{7}$$

Режим пары трения рис. 1, *б* (без проскальзывания) соответствует варианту, когда $n_1 r_1 = n 2 r_2$ и $k_k = 1 - 1 = 0$. Этот вариант соответствует режиму трения качения, когда повреждения поверхности возникают в виде каверн из-за действия знакопеременных напряжений в масленом слое, подробное рассмотрение которых не входит в рамки задач настоящей работы.

Если целью испытаний модели „ring-on-ring“ является оценка износостойкости материала диска *2*, то следует применить схему пары трения рис. 1, *в* (при неподвижном состоянии диска), когда $n_2 r_2 = 0$, а $k_k = 1 - 0 = 1$. В этом случае наблюдаются чистое скольжение и полный линейный износ без признаков трения качения. Поэтому появляется возможность оценивать износостойкость материала по методу block-on-ring с учетом того, что диск *1* врезается не в плоскую, а в круглую поверхность диска *2*. Как видно из рис. 1, *в,* площадь врезания состоит из двух пересекающихся сегментов *a* и *b* с общей хордой *L*. Объем износа каждой части сегмента можно определить по формуле (1), а затем рассчитать общий суммарный износ по формуле:

$$W = W_a + W_b \approx \frac{L^3\, H_k}{12} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \tag{8}$$

Далее, используя площадь пятна контакта D, определяем линейный износ Δh и удельное давление P (МПа), а затем рассчитываем объемную ε_W и линейную ε_L. износостойкость по формулам:

$$\Delta h = W / D = W / L\, H_k \approx \frac{L^2}{12} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right); \tag{9}$$

$$P = F / D = F / L\, H_k ; \tag{10}$$

$$\varepsilon_W = A / W = 10^{-3}\; F\, S / W = \; 10^{-3}\; F\, 2\,\pi r_1\, n_1\, t\,(1+0) / W ; \tag{11}$$

$$\varepsilon_L = \; 1000 \frac{\varepsilon_W}{P}. \tag{12}$$

Из сравнения расчета параметров по формулам (1)—(5) и (8)—(12) можно заметить, что метод block-on-ring является частным случаем метода ring-on-ring (см. рис. 1, *в*) при $r_2 \to \infty$ и $1/ r_2 \to 0$. Это позволяет сравнить их при одинаковых исходных данных (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные

L, мм	H_k, мм	n, об/мин	F, Н	t, мин	S, мм	A, Нм	D, мм²
4	10	100	200	10	$1{,}57\ 10^5$	$3{,}142\ 10^4$	40

* Р 50—95—88. Рекомендации обеспечение износостойкости изделий. Основные положения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989.

Результаты расчета по программе MATHCAD приведены в табл. 2, из которой следует, что по сравнению с рис. 1, *а* (метод block-on-ring) вариант рис. 1, *в* (метод ring-on-ring) за одно и то же время показывает более высокий износ (4,8 мм³ против 2,1 мм³) и соответственно меньшую износостойкость ($1{,}31\ 10^6$ против $2{,}95\ 10^6$).

Таблица 2

Результаты расчета параметров износостойкости

Вариант	$R_{1,2}$, мм	W, мм³	Δh, мм	P, МПа	ε_W, Нм/мм³	ε_L, мм/мм	θ	НВ, МПа
Рис. 1, *в*	20	4,8	0,12	5	6545	$1{,}31\ 10^6$	2,6	58
Рис. 1, *а*	25	2,1	0,05	5	14630	$2{,}95\ 10^6$	3,1	98

Различие износостойкости рассмотренных вариантов пар трения можно объяснить разной твердостью материла исследуемых образцов. Значения твердости по шкале Мооса θ и Бринелля НВ (МПа), определенные по [5], приведены в табл. 2:

$$\theta = k_o \left(10^{-6}\varepsilon_L\right)^{0,25}; \tag{13}$$

$$\text{НВ} = 5\theta^{2,5}. \tag{14}$$

В формуле (13) коэффициент k_o= 2,4 при граничном трении со смазкой, k_o = 1,4 — при сухом абразивном трении. Отсюда следует, что при одинаковых хорде L = 4 мм, частоте вращения n = 100 об/мин и времени испытаний t = 10 мин наименьшая твердость материала НВ = 58 МПа наблюдается у варианта рис. 1, *в* ввиду большего объема продуктов износа W = 4,8 мм³. Вариант рис. 1, *в* рекомендуется применять для определения свойств материала диска. Для более твердых материалов необходимо „усиливать“ режим испытаний. Например, при n = 800 об/мин появляется возможность испытывать материал при твердости до НВ = 250 МПа (сталь).

Такой возможности нет при использовании общего варианта рис. 1, *г* для метода ring-on-ring с разным коэффициентом проскальзывания при $nn_1r_1 > n_2r_2 > 0$ и $0 < k_k < 1$, поскольку износу подвергается вся круговая поверхность диска *2*. Тогда объемный износ второго диска будет равен объему W изношенного слоя, толщиной Δh мм (линейный износ). Величина W определяется по формуле

$$\begin{aligned} W &= \frac{\varphi}{2}\left(r_2^2 - \left(r_2 - \Delta h\right)^2\right) H_k = \frac{\varphi}{2}\left(r_2^2 - r_2^2 + 2\Delta h\, r_2 - \Delta h^2\right) = \\ &= \frac{\varphi}{2}\left(2 - \frac{\Delta h}{r_2}\right) r_2\ H_k \Delta h \approx 2\pi r_2\, H_k \Delta h = D\ \Delta h \end{aligned} \tag{15}$$

с учетом угла φ=2π рад и площади пятна контакта D

$$D = 2\pi r_2\, H_k \tag{16}$$

или методом взвешивания образца по формуле $W = \Delta G/\gamma$, где ΔG (мг) — масса изношенного материала, γ (мг/мм³) — плотность материала.

К указанным вариантам оценки объема W относятся соответствующие способы определения линейного износа Δh (мм): при ином методе взвешивания он рассчитывается по (15) с учетом площади пятна контакта D (14):

$$\Delta h = \frac{W}{D} = \frac{W}{2\pi r_2\, H_k}. \tag{17}$$

При инструментальном способе измерений величину Δh можно оценить методом искусственных баз с применением сверла [6]. Площадь пятна контакта D также применяется с целью расчета удельного давления P

$$P = \frac{F}{D} = \frac{F}{2\pi r_2\, H_k}. \tag{18}$$

Искомое значение объемной износостойкости устанавливается по формуле

$$\varepsilon_W = \frac{10^{-3} F \Delta S}{W} = \frac{2\,10^{-3} F \pi r_1 n_1 t}{2\pi r_2 H_k \Delta h} k_k = 10^{-3} \frac{F n_1 t}{H_k \Delta h} \frac{r_1}{r_2} \left[1 - \frac{r_2 n_2}{r_1 n_1} \right] \quad (19)$$

с учетом остаточного пути трения ΔS (6) из-за скольжения:

Два варианта оценки линейной износостойкости ε_L и ε_l отражают формулы

$$\varepsilon_L = 1000 \frac{\varepsilon_W}{P}, \quad (20)$$

$$\varepsilon_l (k_k) = \frac{\Delta S}{\Delta h} = \frac{2\,\pi r_1 n_1 t}{\Delta h} k_k = \frac{2\,\pi r_1 n_1 t}{\Delta h} \left[1 - \frac{r_2 n_2}{r_1 n_1} \right]. \quad (21)$$

Выражения (20) и (3) служат законом взаимосвязи линейной и объемной износостойкости, который позволяет использовать ГОСТ 23.001–2004 для сравнительного тестирования материалов при измерении износа методом взвешивания [3]. Исходные данные для расчета износостойкости пары трения типа рис. 1, *г* приведены в табл. 3. При определении ε_L и ε_l по формулам (20) и (21) результаты совпадают, как это показано в табл. 4.

На рис. 2 приведены зависимости износостойкости ε_l (21) и твердости по Моосу θ (13) от коэффициента скольжения k_k (7). Графики подтверждают, что при k_k=0,7 износостойкость ε_L=ε_l=4,4·10^7 (кривая *1*), а θ=6,181 (*2*).

Таблица 3

Исходные данные

r_2, мм	r_1, мм	H_k, мм	Δh, мм	F, Н	n_1, об/мин	n_2, об/мин	t, мин
25	25	10	0,01	200	200	60	20

Таблица 4

Результаты расчета параметров износостойкости

D, мм²	W, мм³	P, МРа	ε_W, Нм/мм³	ε_L, мм/мм	k_k,	θ
1,57·10^3	15,708	0,127	5,6·10^3	4,4·10^7	0,7	6,181

Исходные данные табл. 3 для проведения испытаний пар трения типа рис. 1, *г* определяются следующим образом: радиус дисков r_1 и r_2 — путем измерений мерительным инструментом, износ Δh — методом искусственных баз [7], нагрузка F — с помощью органов управления машины трения, время t — установкой хронометра в режиме будильника.

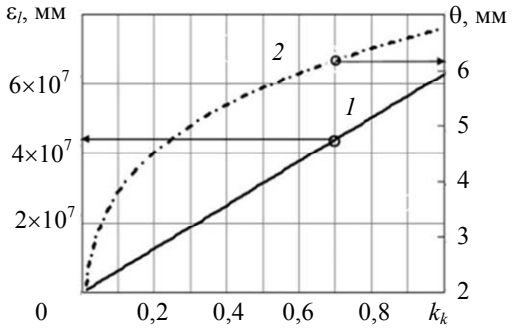

Рис. 2

Для оценки частоты вращения n_1 и n_2 (об/мин) целесообразно применять стробоскопы, например, testo-476 типа trobe™ (рис. 3) [7], который позволяет измерять частоту вращения в диапазоне от 30 до 12 500 об/мин (вспышек в минуту).

Рис. 3

В заключение целесообразно проанализировать особенности практического применения рассмотренных вариантов пар трения типа „ring-on-ring“: рис. 1, *б* при k_p =0,1; рис. 1, *в* при k_p=1 и рис. 1, *г* при $0<k_p<1$.

Согласно описанию машины СМЦ-2, пара трения типа „диск по диску“ предназначена для изучения повреждений некоторых устройств, например зубчатых передач [1]. На рис. 4 показаны их характерные дефекты: *а* — скол зубьев; *б* — усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев; *в* — изнашивание поверхностей зубьев; *г* — заедание зубьев [9].

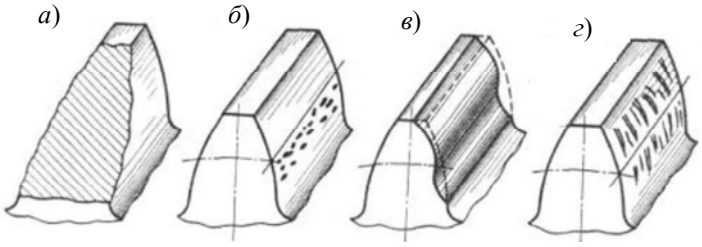

Рис. 4

Поломку и заедание зубьев можно отнести к внезапным аварийным отказам из-за достижения предельно допустимых усталостных напряжений или износов зубьев по технологическим или эксплуатационным причинам.

Усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев можно моделировать путем испытания пар трения (типа рис. 1, *б*) при нулевом скольжении. Возникновение повреждений такого рода характерно для передач закрытого типа без попадания в смазку абразивных частиц. Такое исследование не относится к тематике настоящей статьи, хотя оно может быть использовано для оценки времени (ресурса) достижения предельно допустимого размера каверн и решения других научных проблем при неподвижном диске *2*.

Испытания пар трения типа рис. 1, *в* при неподвижном диске *2* и $k_k = 1$ являются рекомендуемым методом исследования процесса изнашивания материала поверхности зубьев открытых передач с целью оценки и повышения их износостойкости за счет выбора оптимальной твердости, смазки и пр. Для имитации абразивного износа рекомендуется на диск *1* наклеить мелкозернистую абразивную шкурку и проводить испытания при неподвижном диске *2* и различных уровнях твердости. Методика расчета износостойкости пары трения типа рис. 1, *в* описана выше.

В случае применения пары трения типа рис. 1, *г* при $0<k_k<1$ на диске возникают признаки как изнашивания, так и усталостного разрушения поверхности. В этом случае целью исследования может быть оценка зависимости степени опасности этих повреждений от коэффициента проскальзывания, режима испытаний (нагрузки, частоты вращения, числа циклов), вида трения, свойств смазочного материала, условий работы и др.

Таким образом, описанная в настоящей работе методика может быть рекомендована для практического применения при испытаниях пар трения типа „ring-on-ring“ на трибометрах СМЦ-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сафонов Б. П., Лысюк А. Я., Лукиенко Л. В.* Лабораторные работы по курсу „Основы трения и изнашивания элементов трибомеханических систем оборудования“. Новомосковск: РХТУ им. Д. И. Менделеева. Новомосковский институт, 2000. 26 с.

2. ASTM G77-05(2010). Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-onRing Wear Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. DOI: 10.1520/G0077-05R10.

3. *Shi-Quan Lai, Li Yueb, Tong-Sheng Li, Zhi-Meng Hu*. The friction and wear properties of polytetrafluoroethylene filled with ultrafine diamond // Wear. 2006. Vol. 260, N 4/5. P. 462—468.

4. *Ефремов Л. В., Тикалов А. В.* Алгоритмы оценки линейной, объемной (весовой) интенсивности изнашивания материалов на машине трения // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 291—299.

5. *Davydov R. V., Tikalov A. V., Chulkin S. G., Breki1A. D., Efremov L. B., Rud V. Yu., Bykova N. N., Valiullin L. R.* Development of a method for testing the wear resistance of friction pairs based on the synthesis of the method of M. V. Lomonosov with the improved method of artificial bases // J. of Physics: Conf. Series. 2021. P. 1—5. DOI:10.1088/1742-6596/1942/1/012058.

6. *Ефремов Л. В., Тикалов А. В.* Моделирование взаимосвязи твердости и износостойкости материалов при их сравнительном тестировании методом „block-on-ring“ // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 297—302. DOI: 10.17586/2226-1494-2021 -21 -2-297-302.

7. *Ефремов Л. В*. Проблемы управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб: Art-Xpress, 2015. 206 с.

8. Testo 476 — Стробоскопический тахометр [Электронный ресурс]: <http://pp66.ru/katalog/pribory/tahometry/testo-476---stroboskopicheskiy-tahometr-portativnyy-elektronn/>.

9. Виды разрушения зубьев [Электронный ресурс]: <https://helpiks.org/5-92478.html>.

Сведения об авторе

Леонид Владимирович Ефремов — д-р техн. наук, профессор; Институт проблем машиноведения РАН, кафедра трения и износа; главный научный сотрудник; E-mail: levlefr@mail.ru

Андрей Владимирович Тикалов — преподаватель-исследователь; АО „Компрессор“; начальник сектора; E-mail: tikalov2010@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.21; одобрена после рецензирования 15.12.21; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Safonov B.P., Lysyuk A.Ya., Lukienko L.V. *Laboratornyye raboty po kursu "Osnovy treniya i iznashivaniya elementov tribomekhanicheskikh sistem oborudovaniya"* (Laboratory Work on the Course "Fundamentals of Friction and Wear of Elements of Tribomechanical Equipment Systems"), Novomoskovsk, 2000, 26 p. (in Russ.)
2. *ASTM G77-05(2010), Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-onRing Wear Test*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. DOI: 10.1520/G0077-05R10.
3. Shi-Quan Lai, Li Yueb, Tong-Sheng Li, Zhi-Meng Hu. *Wear*, 2006, no. 4/5(260), pp. 462–468.
4. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 4(63), pp. 291–299. (in Russ.)
5. Davydov R.V., Tikalov A.V., Chulkin S.G., Breki1A.D., Efremov L.B., Rud V.Yu., Bykova N.N., Valiullin L.R. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, pp. 1–5, DOI:10.1088/1742-6596/1942/1/012058.
6. Efremov L.V., Tikalov A.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, no. 2(21), pp. 297–302. DOI: 10.17586/2226-1494-2021 -21 -2-297-302 (in Russ.)
7. Efremov L.V. *Problemy upravleniya nadezhnostno-oriyentirovannoy tekhnicheskoy ekspluatatsiyey mashin* (Problems of Managing Reliability-Oriented Technical Operation of Machines), St. Petersburg, 2015, 206 p. (in Russ.)
8. http://pp66.ru/katalog/pribory/tahometry/testo-476---stroboskopicheskiy-tahometr-portativnyy-elektronn/. (in Russ.)
9. https://helpiks.org/5-92478.html. (in Russ.)

Data on author

Leonid V. Efremov — Dr. Sci, Professor; Institute of Mechanical Engineering Problems of the RAS, Department of Friction and Wear; Chief Researcher; E-mail: levlefr@mail.ru

Andrey V. Tikalov — Lecturer-Researcher of JSC "Compressor"; Head of the Sector; E-mail: tikalov2010@mail.ru

Received 05.12.21; approved after reviewing 15.12.21; accepted for publication 28.02.22.