

Литовка С.В.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка,
E-mail: litovkasvjob@gmail.com

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ И НАГРУЗКИ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИИ НА ЭНЕРГИЮ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

УДК 621.891:620.179

Проведено теоретическое исследование энергии акустической эмиссии шероховатых поверхностей как функции скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжениях. Показано, что энергия акустической эмиссии увеличивается при увеличении скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении.

Ключевые слова: методы диагностирования, изнашивание, трибосопряжения, акустическая эмиссия, надежность машин.

Введение. Основными параметрами, характеризующими протекание процессов трения в трибосопряжениях агрегатов машин лесного комплекса, а также условий их смазки, являются величина коэффициента трения и температура поверхностей трения. В тоже время, фундаментальными исследованиями было установлено, что происходящие при трении упругие и пластические деформации микронеровностей, разрушение смазочной пленки и образование микродефектов, являются причиной ряда акустико-эмиссионных процессов вызывающих значительное изменение энергетического состояния в сопряжении [1].

Анализ публикаций. Поиск непрерывных методов контроля и изучение процессов трения и изнашивания подвижных сопряжений привел к интенсивному развитию методов, использующих сигналы АЭ. Физическая основа метода заключается в том, что механическое и молекулярное взаимодействие поверхностей трения способствует возникновению колебаний ультразвукового диапазона, несущих информацию как о наличии макро- и микродефектов, так и протекающих в трибосистеме процессах разрушения [2].

Контакт единичных микронеровностей существует конечное время, которое определяется скоростью скольжения. Динамика пятен контакта создает флуктуирующее по глубине и во времени поле механических напряжений, в котором возникают и растут приповерхностные трещины. Поэтому трение твердых тел можно рассматривать как поверхностный динамический процесс одновременного возникновения и распада множества пятен контакта [3].

В работе [4] показано, что время существования фрикционной связи составляет 10^{-5} - 10^{-6} с и может определяться как отношение средней величины диаметра пятна касания к скорости скольжения. Скорость деформации микровыступов пропорциональна скорости скольжения, и при скоростях порядка 1 м/сек приближается к величинам порядка 10^3 с⁻¹. При этом скорость сдвиговых деформаций имеет порядок 10^4 с⁻¹, т.е. соответствует ударным нагрузкам [5].

Моделирование микронеровностей с помощью стержневой модели показало, что акустическая энергия в единичном стержневом микровыступе с акустическим сопротивлением Z и площадью сечения s в отсутствие пластического течения может быть оценена по формуле [11]:

$$W = \frac{Z \cdot s \cdot \varepsilon^2 \cdot t}{2}, \quad (1)$$

где Z - акустическое сопротивление (для стали $15,2 \cdot 10^7$ кг/(с·м²), для меди $4,1 \cdot 10^7$ кг/(с·м²)), s - площадь сечения, ε - скорость деформаций, t - время.

Энергию АЭ, которая выделяется при образовании микротрещин из скопления

дислокацій, можна оцінити, используя данные работы [7]. Упругая энергия, запасенная объемом деформированного поверхностного слоя, пропорциональна среднему действующему напряжению σ и величине деформации ε . Накопленная энергия деформации при образовании разрыва атомных связей распределится между энергией необходимой для образования частиц износа, и энергией АЭ, тогда энергия АЭ:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma^2}{E} \cdot S \cdot l - \gamma \cdot S, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала, Н/м²; S – площадь поверхности частицы износа, м²; l – размер фрагментированной структуры, м; γ – величина поверхностной энергии, Дж/м².

Выход дислокаций на поверхность или слияние двух дислокаций противоположного знака происходит с излучением упругого импульса, энергия которого на единицу длины дислокации может быть оценена из выражения [8]:

$$W = \frac{\rho \cdot b^2}{8 \cdot \pi} \cdot v^2 \cdot \ln \frac{L}{b}, \quad (3)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³; b – величина вектора Бюргерса дислокаций; v – скорость сближения дислокаций, м/с; L – размер кристалла, м.

Акустическая энергия согласно [9]:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot \frac{f^2}{c^2} \cdot A^2, \quad (4)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³; f – частота волн взаимодействия, с⁻¹; c – скорость распространения звука в металле, м/с; A – амплитуда акустического сигнала, м.

Энергия, выделяемая источником АЭ и переносимая волнами, возникающими в материале в общем случае определяется выражением [10]:

$$W = \frac{1}{Z} \cdot \int_0^t u^2(t) dt \quad (5)$$

где: Z – электрический импеданс преобразователя АЭ с учётом входной цепи прибора, $u(t)$ – мгновенное значение сигнала.

Энергия, выделяемая источником АЭ, согласно работе [11, 12], определяется выражением:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\pi} \cdot \frac{A_{\max} \cdot t}{E \cdot T}, \quad (6)$$

где A_{\max} – максимальная амплитуда импульса, м; t – текущее время, с; E – модуль упругости материала, Н/м²; T – половина продолжительности события, являющегося источником АЭ, с.

В работе [13] энергию импульса упругой волны считают приблизительно равной энергии одного периода основной частоты спектра импульса АЭ f_R и определяют как:

$$W = \frac{1}{2} \cdot U^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_R)^2 \cdot \rho_0 \cdot C_i \cdot S \cdot \tau_{AЭ}, \quad (7)$$

где U – амплитуда смещений в волне; $\rho_0 \cdot C_i$ – волновое сопротивление среды; S – площадь волнового фронта; $\tau_{AЭ} = 1 / f_R$ – период колебаний.

Однако анализ зависимостей акустической энергии не позволяет оценить величины энергии АЭ при взаимодействия шероховатых поверхностей сопряжений в процессе трения.

Цель работы. Целью данной работы является установление функциональной зависимости между скоростью скольжения, нагружением в трибосопряжении и энергией АЭ.

Основная часть. При моделировании акустических свойств фрикционного контакта при сухом трении в основу было положено утверждение, что акустические сигналы возникают в результате силового взаимодействия микронеровностей контактирующих тел (рис. 1).

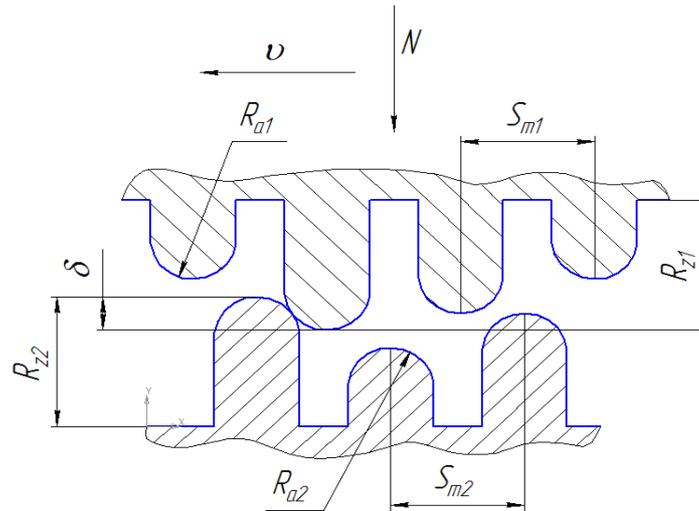


Рис. 1. – Схема модели контакта микронеровностей трибосопряжения

При выборе расчетных соотношений делаем следующие допущения: модель шероховатых поверхностей состоит из полусферических сегментов радиусом R_a , расположенных на стержне суммарной высоты R_z , закрепленных на жестком основании; сближение двух поверхностей определяется нагрузкой N в трибосопряжении; ближайшие контакты не влияют друг на друга; распределение сферических сегментов таково, что воспроизводится реальное распределение материала по высоте шероховатого слоя; нагрузка прикладывается нормально относительно основания микронеровностей; в процессе взаимодействия выступов микронеровностей друг с другом происходит упругая деформация последних.

Для расчета энергии АЭ, в первом приближении, воспользуемся моделью предложенной в работе [6]. На основании модели микронеровности поверхности представим в виде стержней. Тогда, энергия, перенесенная за единицу времени, при упругой деформации стержневого тела, равна:

$$W = I \cdot S_m \cdot t, \quad (8)$$

где I – интенсивность волн (вектор Умова) в стержне; S – площадь сечения микронеровности, m^2 ; t – время.

Интенсивность волн в микронеровности:

$$I = 2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot a^2 \cdot \sqrt{E \cdot \rho}, \quad (9)$$

где f – частота взаимодействия микронеровности, s^{-1} ; a – амплитуда деформации, м; E – модуль упругости материала, Па; ρ – плотность материала, kg/m^3 .

Площадь сечения микронеровности:

$$S_m = \pi \cdot R_a^2, \quad (10)$$

где R_a – радиус кривизны вершин острия микронеровности, м.

Моделирование проводится для пары «кольцо – кольцо», поверхности взаимодействуют торцовыми сторонами. При этом, частота импульсов АЭ пропорциональна среднему количеству контактов в единицу времени [...]:

$$f(v_{ck}, N) = \frac{v_{ck}}{S_{m2}} \cdot \frac{F_{\min}}{S_{m2}^2} \cdot \int_0^{\delta(N)} \left[\int_0^{R_{z1}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_1} \cdot e^{-\frac{(x-M_1)^2}{2\sigma_1^2}} dx \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_2} \cdot e^{-\frac{(x-M_2)^2}{2\sigma_2^2}} dx, \quad (11)$$

где v_{ck} – скорость скольжения микронеровностей, м/с; S_{m2} – средний шаг микронеровностей по вершинам (принимается меньший), м; F_{\min} – номинальная площадь контакта по меньшей поверхности трения, м²; δ – сближение поверхностей, м; N – нагрузка в трибосопряжении, Н; R_{z1} – максимальная высота вершин микронеровностей, м; M – математическое ожидание отклонения профиля, м; σ – среднее квадратическое отклонение профиля, м.

Амплитуду деформации микронеровности принимаем равной сближению. Для наиболее часто используемой модели эквивалентной шероховатой поверхности сближение рассчитывается по формуле [14]. Тогда амплитуда равна:

$$a(N) = \delta(N) = R_p \cdot \left(\frac{N}{\alpha \cdot H_m \cdot F_c \cdot t_m} \right)^{\frac{1}{v_m}}, \quad (12)$$

где R_p – радиус кривизны вершин острия микронеровности, м; α – коэффициент, учитывающий вид контакта; H_m – твердость по Майеру, Па; F_c – контурная площадь контакта, м²; v_m, t_m – параметры опорной кривой [15].

При расчете необходимо учитывать свойства более мягкого материала и шероховатость более твердого.

Контурная площадь контакта, моделируемая сферическими сегментами шероховатых волн, определяется на основании выражения [14]:

$$F_c = 1,84 \cdot F_{\min} \cdot K_w \left(\frac{r_w}{R_w} \right)^{\frac{2}{4+2\delta_w}} \cdot \left(\frac{N}{F_{\min}} \cdot E_e \right)^{\frac{2}{2+2\delta_w}}, \quad (13)$$

где K_w и δ_w – коэффициенты, зависящие от свойств материала и от соотношения высоты волн и шероховатости [14]; r_w – радиус кривизны волны, м; R_w – высота волны, м; E_e – упругая постоянная деформируемых поверхностей, Па⁻¹.

Индексы 1 и 2 при аббревиатурах величин соответствуют указанию на поверхности трения.

Упругая постоянная деформируемых поверхностей определяется как [15]:

$$E_e = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}, \quad (14)$$

где μ_1, μ_2 – коэффициент Пуассона материала, соответственно первой и второй повехности; E_1, E_2 – модули упругости материалов поверхностей, Па.

Подставляя в выражение (8) зависимости (9)-(14) и преобразую их получаем формулу, описывающую функциональную зависимость энергии АЭ от скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении, приведенную к одному обороту пары «кольцо – кольцо»:

$$W(v_{ck}, N) = \pi^2 \cdot f(v_{ck}, N)^2 \cdot a(N)^2 \cdot \sqrt{E_2 \cdot \rho_2} \cdot R_a^2 \cdot \frac{v_{ck}}{R_k} \quad (15)$$

где R_k – средний радиус кольца трибосопряжения, м.

Для расчета в первом приближении предполагаем, что радиус кривизны вершины острия микронеровности равен среднеарифметическому отклонению профиля R_a .

Для расчетов принимаем следующие данные: радиус кривизны вершин острия микронеровности $R_{a1} = 0,8 \cdot 10^{-6}$; $R_{a2} = 0,125 \cdot 10^{-6}$ м; максимальная высота вершин микронеровностей, $R_{z1} = 3,2 \cdot 10^{-6}$ м, $R_{z2} = 0,6 \cdot 10^{-6}$ м; номинальная площадь контакта по меньшей поверхности трения, $F_{min} = 0,15 \cdot 10^{-4}$ м²; средний шаг микронеровностей по вершинам, $S_{m2} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м; математическое ожидание отклонения профиля, $M_1 = 1,6 \cdot 10^{-6}$ м, $M_2 = 0,2 \cdot 10^{-6}$ м; среднее квадратическое отклонение профиля, $\sigma_1 = 0,92 \cdot 10^{-6}$ м, $\sigma_2 = 0,15 \cdot 10^{-6}$ м; нагрузка в трибосопряжении, $N = 0 \dots 1000$ Н; радиус кривизны вершин острия микронеровности принимаем равным R_a для учета приработки поверхности, $R_p = R_{a1} = 0,8 \cdot 10^{-6}$ м; $R_{a2} = 0,125 \cdot 10^{-6}$ м; коэффициент, учитывающий вид контакта, при упругом контакте $\alpha = 0,5$; твердость по Майеру, для бронзовой поверхности $H_m = 800$ МПа; параметры опорной кривой, для бронзовой поверхности $\nu = 3$, $t_m = 0,5$; модуль упругости материала сталь, $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; модуль упругости материала бронзы, $E_2 = 1,1 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициенты Пуассона материала сталь, $\mu_1 = 0,3$; коэффициенты Пуассона материала бронзы, $\mu_2 = 0,35$; коэффициенты, зависящие от свойств материала и от соотношения высоты волн и шероховатости, $K_w = 1,5$; $\delta_w = 0,6$; радиус кривизны волны, $r_w = 50 \cdot 10^{-6}$; плотность материала, $\rho = 7500$ кг/м³; скорость скольжения микронеровностей, $v_{ck} = 0 \dots 5$ м/с; средний радиус кольца трибосопряжения, $R_k = 0,024$ м.

Результаты исследования. Результаты расчета энергии АЭ в зависимости от скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении представлены на рисунке 2.

Из анализа зависимости (15) и графика на рисунке 2 видно, что энергия АЭ увеличивается при увеличении нагрузки и скорости скольжения повехностей.

Показано, что при увеличении скорости скольжения интенсивность энергии АЭ увеличивается и для представленных максимальных значений скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении достигает $6,2 \cdot 10^{-8}$ Дж.

Показано, что при изменении нагрузки в трибосопряжении в диапазоне от 0 Н до 1000 Н при скорости скольжения 5 м/с энергия АЭ увеличивается до 6,5 раз.

Кроме этого, на графике видно, что с увеличением нагрузки в трибосопряжении при постоянной скорости скольжения частота импульсов АЭ на начальной стадии уве-

личивается интенсивно и далее интенсивность снижается. Можно предположить, что наступает момент насыщения сигнала.

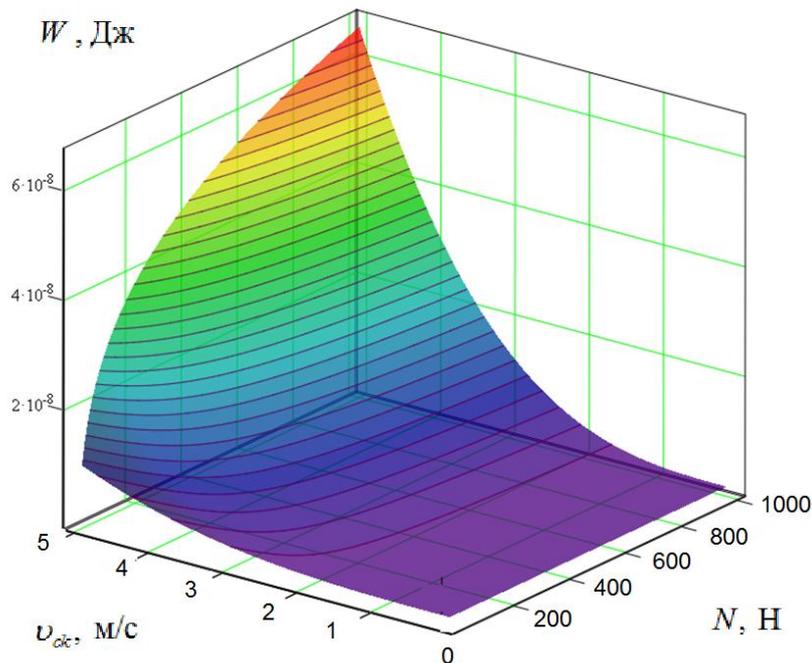


Рис. 2. – График зависимости энергии АЭ от скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении

Выводы. На основании теоретических исследований установлена функциональная связь энергии АЭ при взаимодействии шероховатых поверхностей со скоростью скольжения поверхностей и нагрузкой в трибосопряжении. Показано, что при увеличении скорости скольжения трибосопряжений интенсивность роста энергии АЭ увеличивается. При увеличении нагрузки в трибосопряжении частота импульсов на начальном этапе увеличивается интенсивно и далее наступает момент насыщения сигнала.

Литература

1. Горностаев, А.И. Повышение эффективности контроля качества приработки сопряжений методом акустической эмиссии / А.И. Горностаев, А.А. Деев, Е.А. Панюков // Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения. - 2009. - № 2. - С. 27-31.
2. Деев А.А. Акустические колебания в фрикционном контакте как способ контроля поверхностей трения на этапе приработки двигателей внутреннего сгорания / Вестник Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина. – 2010.- Вып. 3. – С. 132-148.
3. Фадин Ю.А. Динамика разрушения поверхности при сухом трении // Письма в Журнал технической физики. - 1997. -Т. 23. - № 15. - С. 75-78.
4. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. - М.: Наука, 1963. 472 с.
5. Бабаков И.М. Теория колебаний. - М.: Наука. 1968, 560 с.
6. Враский С.Б. Волны и акустика. - Л.: 1967. 123 с.
7. Иванов В.И., Белов В.И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
8. Надик В.Д., Чишко К.А. Звуковое излучение дислокаций, движущихся у поверхности кристалла // Физика твердого тела. – 1978. – Т.20. – Вып. 2. – С. 457-465.

9. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.
10. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. - Т.7: в 2 книгах: Кн.1: В.И. Иванов, И.Э. Власов Метод акустической эмиссии. Кн.2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова [и др.]. Вибродиагностика. - М.: Машиностроение, 2005. - 829 с.
11. Свириденко А. И., Мышкин Н. К., Калмыкова Т. Ф. и др. Акустические и электрические методы в триботехнике. Минск: Наука и техника, 1987. – 280 с.
12. Stephens R.W.B., Pollock A.A. Waveforms and frequency spectra of acoustic emission // J. Acoustic. Soc. Amer. – 1971. – V.50. – №3. – P. 904 – 910.
13. Буденко Г.А., Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики / Буденко Г.А., Недзвецкая О.В. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2004. – 136 с.
14. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для вузов. 2-е изд. переработ, и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. - 664 с.
15. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, Н.М. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

Summary

Litovka S. Influence of sliding speed and load in the friction units on energy of acoustic emission

A theoretical study of the energy of acoustic emission as a function of sliding speed and load in the friction units has been conducted. It is shown that the energy of the acoustic emission increases with increasing sliding speed and load in the friction units.

Key words: *methods of diagnosing, wear, tribomating, acoustic emission, machine reliability.*

References

1. Gornostayev, A.I. Povysheniye effektivnosti kontrolya kachestva prirabotki sopryazheniy metodom akusticheskoy emissii / A.I. Gornostayev, A.A. Deyev, Ye.A. Panyukov // Innovatsii v aviatsionnykh kompleksakh i sistemakh voyennogo naznacheniya. - 2009. - № 2. - S. 27-31.
2. Deyev A.A. Akusticheskiye kolebaniya v friktsionnom kontakte kak sposob kontrolya poverkhnostey treniya na etape prirabotki dvigateley vnutrennego sgoraniya / Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta im. S.A. Yesenina. – 2010.- Vyp. 3. – S. 132-148.
3. Fadin YU.A. Dinamika razrusheniya poverkhnosti pri sukhom trenii // Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. - 1997. -T. 23. - № 15. - S. 75-78.
4. Akhmatov A.C. Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya. - М.: Nauka, 1963. 472 s.
5. Babakov I.M. Teoriya kolebaniy. - М.: Nauka. 1968, 560 s.
6. Vraskiy S.B. Volny i akustika. - L.: 1967. 123 s.
7. Ivanov V.I., Belov V.I. Akustiko-emissionnyy kontrol' svarki i svarnykh soyedineniy. – М.: Mashinostroyeniye, 1981. – 184 s.
8. Natsik V.D., Chishko K.A. Zvukovoye izlucheniye dislokatsiy, dvizhushchikhsya u poverkhnosti kristalla // Fizika tverdogo tela. – 1978. – Т.20. – Vyp. 2. – S. 457-465.

9. Pavlov B.V. Akusticheskaya diagnostika mekhanizmov. – M.: Mashinostroyeniye, 1971. – 224 s.
10. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: v 7 t. / Pod obshch. red. V.V. Klyuyeva. - T.7: v 2 knigakh: Kn.1: V.I. Ivanov, I.E. Vlasov Metod akusticheskoy emissii. Kn.2: F.YA. Balitskiy, A.V. Barkov, N.A. Barkova [i dr.]. Vibrodiagnostika. - M.: Mashinostroyeniye, 2005. - 829 s.
11. Sviridenok A. I., Myshkin N. K., Kalmykova T. F. i dr. Akusticheskiye i elektricheskiye metody v tribotekhnike. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987. – 280 s.
12. Stephens R.W.B., Pollock A.A. Waveforms and frequency spectra of acoustic emission // J. Acoustic. Soc. Amer. – 1971. – V.50. – №3. – P. 904 – 910.
13. Budenko G.A., Dinamicheskiye zadachi teorii uprugosti v prilozhenii k problemam akusticheskogo kontrolya i diagnostiki / Budenko G.A., Nedzvetskaya O.V. – M.: Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 2004. – 136 s.
14. Osnovy tribologii (treniye, iznos, smazka): Uchebnik dlya vuzov. 2-ye izd. pererabot, i dop. / A.V. Chichinadze, E.D. Braun, N.A. Bushe i dr.; Pod obshch. red. A.V. Chichinadze. M.: Mashinostroyeniye, 2001. - 664 s.
15. Kragel'skiy I.V. Osnovy raschetov na treniye i iznos / I.V. Kragel'skiy, N.M. Dobychin, V.S. Kombalov. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 526 s.