

Литовка С.В.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка  
E-mail: litovkasvj@yandex.ru

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ АКУСТИЧЕСКОЙ  
ЭМИССИИ В ПРОЦЕССЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ  
ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ

УДК 621.891:620.179

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

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, трибосопряжение, шероховатость поверхности, энергия, диагностирование.

### Введение.

Ресурс трибосопряжений мобильных машин во многом определяется их интенсивностью изнашивания. Из анализа существующих методов и подходов к оцениванию трибологических свойств подвижных сопряжений известно, что для оценки параметров изнашивания наиболее пригодными являются разновидности акустического метода, а именно метод акустической эмиссии (АЭ) [1-3]. Фундаментальными исследованиями было установлено, что АЭ при деформации и разрушении микронеровностей трибосопряжений содержит значительный объем важной информации о происходящих в них физических процессах, наличии макро- и микродефектов, энергии разрушения, скорости разрушения и т.п. [4, 5].

### Анализ публикаций

Существуют следующие механизмы возникновения АЭ в металлах: ускоренное движение и размножение дислокаций, скольжение, двойникование, разрушение и размножение осажденных частиц, включений и частиц износа, некоторые коррозионные процессы, зарождение и рост микротрещин, скачки трещин и процесс трения при закрытии и открытии трещин [6].

В процессе взаимодействий поверхностей АЭ проявляется в изменении полей механических напряжений трибосопряжения, которые образуются в результате следующих процессов [6, 7]: удара микронеровностей друг о друга; в установления и разрушения адгезионного контакта; структурно-фазовых превращениях поверхностных слоев; при образовании микротрещины и образовании новых поверхностей.

Контакт единичных микронеровностей существует конечное время, которое определяется скоростью скольжения. Поэтому трение твердых тел можно рассматривать как поверхностный динамический процесс одновременного возникновения и распада множества пятен контакта [8].

Упругие колебания при нагружении структуры твердого тела представляются в виде тепловых фононов с энергией порядка  $10^{-10}$  Дж и характерной частотой колебаний  $10^{10} \dots 10^{13}$  Гц [7].

В процессе нагружения цепочки атомов материала происходит деформация связей. Значение энергии в области максимума силы связи для атомов железа составляет порядка  $10^{-19}$  Дж. [7]. Параметры сигналов единичных импульсов АЭ для некоторых источников представлены в таблице.

В работе [9] 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/с приближается к величинам порядка  $10^3$  с<sup>-1</sup>. При этом скорость сдвиговых деформаций имеет порядок  $10^4$  с<sup>-1</sup>, т.е. соответствует ударным нагрузкам [10].

Таблица.1

Параметры сигналов АЭ для некоторых источников [7]

Вид источника АЭ	Амплитуда или энергия импульса АЭ, Па или Дж	Длительность сигнала, мкс	Ширина спектра сигнала, МГц
Дислокационный источник Франка-Рида	$(10^{-8}$ - $10^{-7})G$ , Па	$5$ - $50 \cdot 10^3$	1
Аннигиляция дислокации длиной $10^{-8}$ - $10^{-6}$ м	$4 \cdot (10^{-18}$ - $10^{-16})$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^2$
Образование микротрещины	$10^{-12}$ - $10^{-10}$	$10^{-3}$ - $10^{-2}$	50
Исчезновение двойника размером $10^{-9}$ м <sup>3</sup>	$10^{-3}$ - $10^{-2}$	$10^4$	-
Пластическая деформация объёма материала со стороны $10^{-4}$ м	$10^{-4}$	$10^3$	0,5
Энергия тепловых шумов в единичной полосе частот	$4,2 \cdot 10^{-21}$ Дж/Гц	-	до 10
Примечание: G - модуль сдвига.			

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

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

где  $\eta$  - акустическое сопротивление среды, Па/(с·м);  $S$  - площадь волнового фронта, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  - скорость деформаций, м/с;  $t$  - время, с.

Энергию АЭ, которая выделяется при образовании микротрещин из скопления дислокаций, можно оценить, используя данные работы [7]. Упругая энергия, запасенная объемом деформированного поверхностного слоя, пропорциональна среднему действующему напряжению  $\sigma$  и величине деформации  $\varepsilon$ . Накопленная энергия деформации при образовании разрыва атомарных связей распределиться 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/м<sup>2</sup>;  $S$  - площадь поверхности частицы износа, м<sup>2</sup>;  $l$  - размер фрагментированной структуры, м;  $\gamma$  - величина поверхностной энергии, Дж/м<sup>2</sup>.

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 [12]:

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

где  $\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $b$  – величина вектора Бюргерса дислокаций;  $v$  – скорость сближения дислокаций, м/с;  $L$  – размер кристалла, м.

Средняя энергия акустических колебаний в единице объема среды согласно [13]:

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

где  $f$  – частота волн взаимодействия, с<sup>-1</sup>;  $c$  – 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 [14]:

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

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

Энергия, выделяемая источником АЭ, согласно работе [11, 15], 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;  $T$  – половина продолжительности события, являющегося источником АЭ, с.

В работе [16] энергию импульса упругой волны считают приблизительно равной энергии одного периода основной частоты спектра импульса АЭ  $f$  и определяют как:

$$W = \frac{1}{2} \cdot A^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot \eta \cdot S \cdot \tau, \quad (7)$$

где  $\tau = 1/f$  – период колебаний, с.

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 в условиях динамического (ударного) взаимодействия микронеровностей в режиме сухого трения.

Основная часть

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

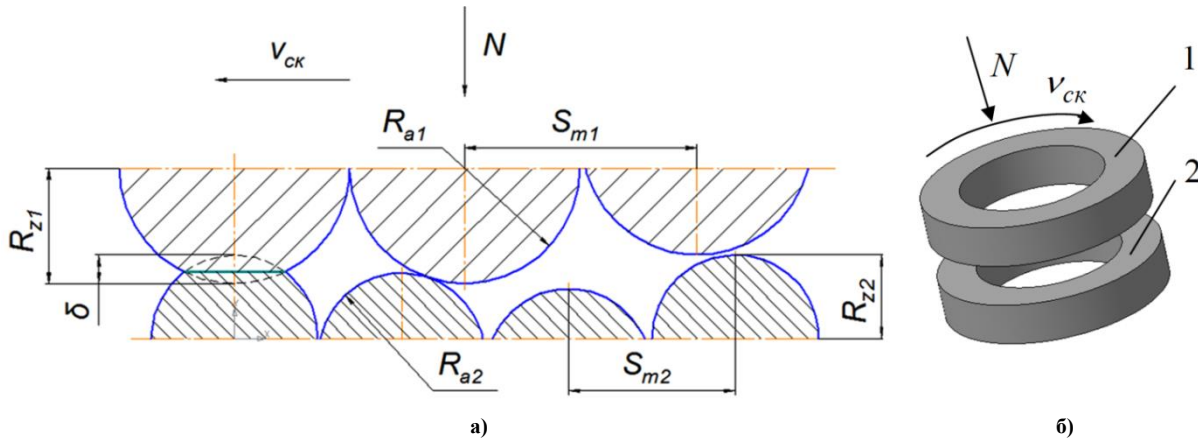


Рис. 1 – Схема модели контакта микронеровностей трибосопряжения:  
 а) – контакт микронеровностей; б) моделируемая пара «кольцо – кольцо» (1 – стальной образец, 2– бронзовый образец)

При выборе расчетных соотношений делаем следующие допущения: модель шероховатых поверхностей состоит из полусферических сегментов радиусом  $R_a$ , распределенных по высоте от 0 до  $R_z$ , закрепленных на жестком основании; шаг между микронеровностями соответствует среднему шагу неровностей  $S_m$ ; 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 вычисления энергии АЭ воспользуемся моделью контакта микронеровностей поверхности представленной в виде полусфер (рис. 1). Расчет производим численным методом.

Мгновенное значение энергии АЭ на моделируемой поверхности определяем как сумму энергий, выделившихся при взаимодействии единичных микронеровностей:

$$W_{AE} = \sum_{i=1}^{n_i} W_i, \quad (8)$$

где  $i$  – уровень сближения при контактировании микронеровностей;  $n_i$  – количество взаимодействующих микронеровностей на  $i$ -том уровне.

Известно, что полную энергию колебательного движения механической среды, в данном случае микронеровности, можно представить следующей зависимостью [17]:

$$W_i = 2 \cdot \pi^2 \cdot f_i^2 \cdot A_i^2 \cdot \rho \cdot V_i, \quad (9)$$

где  $f$  – частота колебаний микронеровности,  $s^{-1}$ ;  $A$  – амплитуда деформации, м;  $\rho$  – плотность материала,  $kg/m^3$ ;  $V$  – объем деформируемого материала,  $m^3$ .

Объем деформированной микронеровности, представленной в виде сферического сегмента, равен:

$$V_i = \pi \cdot \delta_i^2 \cdot \left( R - \frac{1}{3} \cdot \delta_i \right), \quad (10)$$

где  $\delta$  – сближение поверхностей, м;  $R = (R_{a1} \cdot R_{a2}) / (R_{a1} + R_{a2})$  – приведенный радиус кривизны вершин микронеровностей [18], м.

Разделив левую и правую части формулы (9) с учетом (10) на время  $t$  и площадь  $S$ , получим выражение, связывающее интенсивность акустической волны и скорость ее распространения:

$$I_i = \frac{2 \cdot \pi^3 \cdot f_i^2 \cdot A_i^2 \cdot \rho \cdot \delta_i \cdot \left( R - \frac{1}{3} \cdot \delta_i \right)}{S_i} \cdot v, \quad (11)$$

где  $I$  – интенсивность волн (вектор Умова), Дж/(с·м<sup>2</sup>);  $v$  – скорость распространения волны,  $v = \delta / t$  м/с;  $S$  – площадь контакта, через которую распространяется волна, м<sup>2</sup>.

В объеме материала скорость распространения волны является постоянной величиной и для продольной волны равна [10]:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (12)$$

где  $E$  – модуль упругости материала поверхности, Па.

Энергия гармонических колебаний, перенесенная за единицу времени, при упругой деформации микронеровностей трибосопряжений, равна [10]:

$$W_i = I_i \cdot S_i \cdot t, \quad (13)$$

где  $t$  – время, с.

Подставляя в выражение (13) зависимости (11)-(12) и преобразую их получаем функциональную зависимость энергии АЭ от частоты колебаний и сближения поверхностей трибосопряжения. Приведем ее к единице времени, тогда приведенная энергия АЭ микронеровности равна:

$$W_{npi} = 2 \cdot \pi^3 \cdot f_i^2 \cdot A_i^2 \cdot \delta_i \cdot \left( R - \frac{1}{3} \cdot \delta_i \right) \cdot \sqrt{E \cdot \rho}. \quad (14)$$

Амплитуду деформации микронеровности принимаем равной сближению. Для наиболее часто используемой модели эквивалентной шероховатой поверхности сближение рассчитывается по формуле [18]:

$$A_i = \delta_i = R_p \cdot \left( \frac{N_i}{\alpha \cdot H_m \cdot F_i \cdot t_m} \right)^{\frac{1}{v_m}}, \quad (15)$$

где  $R_p$  – высота сглаживания, м;  $N$  – нагрузка в трибосопряжении, Н;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий вид контакта;  $H_m$  – твердость по Майеру, Па;  $F$  – контурная площадь контакта, м<sup>2</sup>;  $v_m, t_m$  – параметры опорной кривой [19].

Для равновесной шероховатости высота сглаживания равна [20]:

$$R_p = k \cdot R_a, \quad (16)$$

где  $k$  – коэффициент (для подшипников скольжения  $k = 1, 25$ ).

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

Контурная площадь контакта, моделируемая сферическими сегментами шероховатых волн, определяется на основании выражения [18]:

$$F_i = 1,84 \cdot F_{\min} \cdot K_w \left( \frac{r_w}{R_w} \right)^{4+2\delta_w} \cdot \left( \frac{N_i}{F_{\min}} \cdot E_e \right)^{2+2\delta_w}, \quad (17)$$

где  $F_{\min}$  – номинальная площадь контакта по меньшей поверхности трения, м<sup>2</sup>;  $K_w$  и  $\delta_w$  – коэффициенты, зависящие от свойств материала и от соотношения высоты волн и шероховатости;  $r_w$  – радиус кривизны волны, м;  $R_w$  – высота волны, м;  $E_e$  – приведенный модуль упругости, Па<sup>-1</sup>.

Приведенный модуль упругости полусферических микронеровностей поверхностей определяется как [18]:

$$E_e = \frac{4}{3} \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right), \quad (18)$$

где  $\mu_1, \mu_2$  – коэффициент Пуассона материала, соответственно первой и второй поверхности;  $E_1, E_2$  – модули упругости материалов поверхностей, Па.

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

Моделирование проводится для пары «кольцо – кольцо» (рис. 1б), поверхности взаимодействуют плоскими сторонами. При этом, частота импульсов АЭ пропорциональна среднему количеству контактов в единицу времени [21]:

$$f_i = \frac{v_{ck} \cdot F_{\min}}{S_m^3} \cdot \int_0^{\delta_i} \left[ \int_0^{R_{a1}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_1} \cdot e^{-\frac{(x-M_1)^2}{2\sigma_1^2}} dx \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_2} \cdot e^{-\frac{(x-M_2)^2}{2\sigma_2^2}} dx, \quad (19)$$

где  $v_{ck}$  – скорость скольжения микронеровностей, м/с;  $S_m$  – средний шаг микронеровностей по вершинам, м;  $M$  – математическое ожидание отклонения профиля, м;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение профиля, м.

Подставляя в выражение (14) зависимости (15)-(19) и преобразуя их, получаем формулу, описывающую функциональную зависимость энергии АЭ от скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении. Приведем ее к единице времени, тогда приведенная энергия АЭ при взаимодействии шероховатых поверхностей равна:

$$W_{np}(v_{ck}, N) = \sum_{i=1}^m \left( \frac{2 \cdot \pi^3 \cdot f_i(v_{ck}, N_i)^2 \cdot \delta_i(N_i)^3 \cdot \sqrt{E \cdot \rho \cdot n_i}}{\left( R - \frac{1}{3} \cdot \delta_i(N_i) \right)^{-1}} \right). \quad (20)$$

Для расчетов принимаем следующие данные: материал образцов Сталь 40Х – БрАЖ 9-4; радиус кривизны вершин острия микронеровности  $R_{a1} = 0,8 \cdot 10^{-6}$ ;  $R_{a2} = 0,4 \cdot 10^{-6}$  м; максимальная высота вершин микронеровностей,

$R_{z1} = 1,6 \cdot 10^{-6}$  м,  $R_{z2} = 1,2 \cdot 10^{-6}$  м; номинальная площадь контакта по меньшей поверхности трения,  $F_{\min} = 0,15 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>; средний шаг микронеровностей по вершинам,  $S_m = 0,268 \cdot 10^{-3}$  м; математическое ожидание отклонения профиля,  $M_1 = 0,8 \cdot 10^{-6}$  м,  $M_2 = 0,4 \cdot 10^{-6}$  м; среднее квадратическое отклонение профиля,  $\sigma_1 = 0,7 \cdot 10^{-6}$  м,  $\sigma_2 = 0,35 \cdot 10^{-6}$  м; нагрузка в трибосопряжении,  $N = 0 \dots 1000$  Н; коэффициент, учитывающий вид контакта, при упругом контакте  $\alpha = 0,5$ ; твердость по Майеру, для бронзовой поверхности  $H_m = 150$  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,  $K_w = 1,4$ ;  $\delta_w = 1,3$ ; радиус кривизны волны,  $r_w = 200 \cdot 10^{-6}$  м; высота волны,  $R_w = 1,2 \cdot 10^{-6}$  м; плотность материала,  $\rho = 7600$  кг/м<sup>3</sup>; скорость скольжения микронеровностей,  $v_{ck} = 0 \dots 5$  м/с.

### Результаты исследования

Результаты расчета частоты импульсов АЭ и приведенной энергии АЭ шероховатой поверхности в зависимости от скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении представлены на рисунке 2.

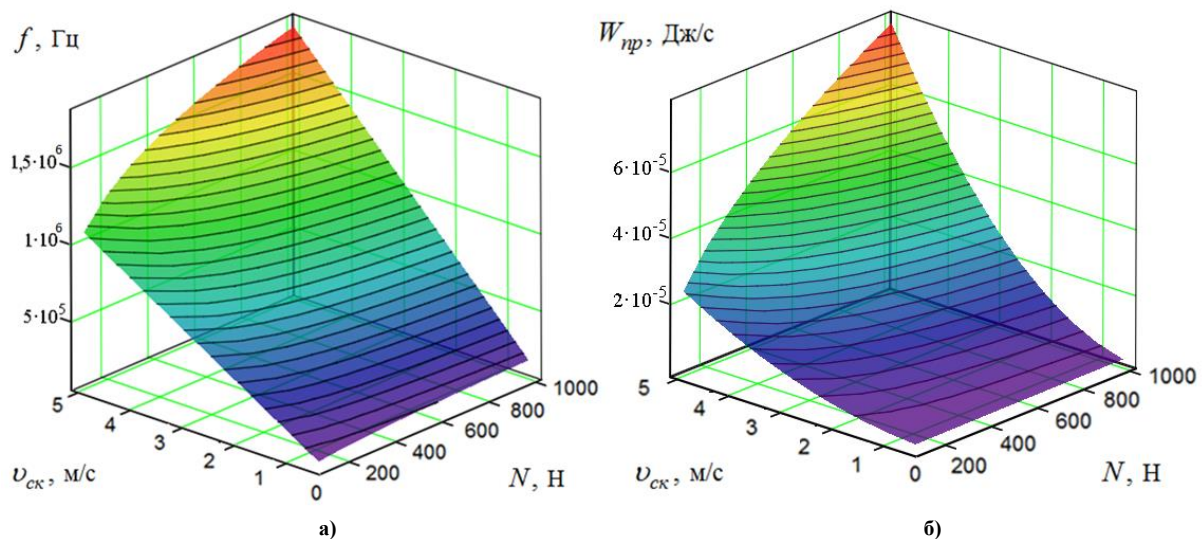


Рис. 2. – График зависимости частоты импульсов (а) и приведенной энергии АЭ (б) от скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении

Из анализа зависимости (19) и графика на рисунке 2а видно, что частота импульсов АЭ увеличивается при увеличении нагрузки и скорости скольжения поверхностей. Показано, что частота импульсов АЭ прямопропорционально зависит от скорости скольжения и для представленных максимальных значений скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении достигает 1,730 МГц. Данные значения хорошо коррелируют с экспериментальными данными [2,4].

Анализ зависимости (20) и графика на рисунке 2б показывает, что энергия АЭ увеличивается при увеличении нагрузки и скорости скольжения поверхностей. При увеличении скорости скольжения интенсивность приведенной энергии АЭ увеличивается и

для представленных максимальных значений скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении достигает  $7,83 \cdot 10^{-5}$  Дж/с.

Показано, что при изменении нагрузки в трибосопряжении в диапазоне от 0 Н до 1000 Н при скорости скольжения 5 м/с энергия АЭ увеличивается на два порядка. С увеличением скорости скольжения поверхностей увеличивается выделенная энергия АЭ. При этом, чем больше нагрузка, тем существенней влияние скорости скольжения на энергию АЭ.

Из анализа графика видно, что с увеличением нагрузки в трибосопряжении при постоянной скорости скольжения приведенная энергия АЭ на начальной стадии увеличивается интенсивно и далее интенсивность снижается.

### **Выводы**

На основании теоретических исследований установлена функциональная связь приведенной энергии АЭ при взаимодействии шероховатых поверхностей, моделируемых полусферическими микронеровностями, со скоростью скольжения поверхностей и нагрузкой в трибосопряжении. Показано, что при увеличении скорости скольжения трибосопряжений увеличивается энергия АЭ. При увеличении нагрузки в трибосопряжении энергия АЭ на начальном этапе увеличивается интенсивно и далее интенсивность сигнала снижается.

### **Литература**

1. Рубцов В.Е. Использование акустической эмиссии для анализа процессов изнашивания при трении скольжения / В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, А.В.Колубаев, В.Л.Попов //Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – Вып. 4. – С. 79-84.
2. Маленко П. И. Исследование методом акустической эмиссии поверхностей трения в условиях смазывания / Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – Т.13. – № 2. – С. 164—171.
3. Баранов А.В. Ультразвуковой мониторинг работы трибосопряжений / А.В. Баранов, С.В. Тарасевич, В.А. Вагнер // Ползуновский вестник. – 2012. – Вып. 1/1– С. 23-27.
4. Щавелин В.М., Сарычев Г.А. Акустический контроль узлов трения ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.
5. 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.
6. Оглезлева Л.А. Акустические методы контроля и диагностики. Часть II/ Л.А. Оглезлева, А.Н. Калиниченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 292 с.
7. Иванов В.И., Белов В.И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
8. Фадин Ю.А. Динамика разрушения поверхности при сухом трении // Письма в Журнал технической физики. - 1997. -Т. 23. - № 15. - С. 75-78.
9. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. - М.: Наука, 1963. – 472 с.
10. Враский С.Б. Волны и акустика. - Л.: Ленинградский электротехнический институт связи, 1967. – 123 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. Надик В.Д., Чишко К.А. Звуковое излучение дислокаций, движущихся у поверхности кристалла // Физика твердого тела. – 1978. – Т.20. – Вып. 2. – С. 457-465.
13. Павлов Б.В. Акустическая диагностика механизмов. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Воронкин А.С. Линейные колебания и волны: Введение в акустику : уч. пособ. – Луганськ: СПД Резніков В.С., 2012. – 224 с.
18. 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.
19. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, Н.М. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
20. Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor. Engineering tribology. – UK, USA: Butterworth-Heinemann, 2013 – 883 p.
21. Войтов В.А. Влияние скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении на частоту импульсов акустической эмиссии / В.А. Войтов, С.В. Литовка // Науковий журнал Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2015. – №3. – С. 234-239.

## Summary

**Litovka S.** Evaluation of energy of acoustic emission in the process microasperities interaction of tribocontact

*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.*

**Keywords:** *acoustic emission, friction units, roughness of the surface, energy, diagnostics.*

## References

1. Rubtsov V.E. Ispol'zovaniye akusticheskoy emissii dlya analiza protsessov iznashivaniya pri trenii skol'zheniya / V.Ye. Rubtsov, Ye.A. Kolubayev, A.V.Kolubayev, V.L.Popov //Pis'ma v ZHTF. – 2013. – Т. 39. – Вып. 4. – S. 79-84.
2. Malenko P. I. Issledovaniye metodom akusticheskoy emissii poverkhnostey treniya v usloviyakh smazyvaniya / Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy. – 2011. – Т.13. – № 2. – S. 164—171.
3. Baranov A.V. Ul'trazvukovoy monitoring raboty tribosopryazheniy / A.V. Baranov, C.V. Tarasevich, V.A. Vagner // Polzunovskiy vestnik. – 2012. – Vip. 1/1– S. 23-27.

4. Shchavelin V.M., Sarychev G.A. Akusticheskiy kontrol' uzlov treniya YAEU. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 176 s.
5. Deyev A.A. Akusticheskiye kolebaniya v friktsionnom kontakte kak sposob kontrolya poverkhnostey treniya na etape prirabotki dvigateley vnutrennego sgoraniya / Vestnik Ryzanskogo gosudarstvennogo universiteta im. S.A. Yesenina. – 2010.- Vyp. 3. – S. 132-148.
6. Oglezleva L.A. Akusticheskiye metody kontrolya i diagnostiki. Chast' II/ L.A. Oglezleva, A.N. Kalinichenko. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. – 292 s.
7. Ivanov V.I., Belov V.I. Akustiko-emissionnyy kontrol' svarki i svarykh soyedineniy. – M.: Mashinostroyeniye, 1981. – 184 s.
8. Fadin YU.A. Dinamika razrusheniya poverkhnosti pri sukhom trenii // Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. - 1997. -T. 23. - № 15. - S. 75-78.
9. Akhmatov A.C. Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya. - M.: Nauka, 1963. – 472 s.
10. Vraskiy S.B. Volny i akustika. - L.: Leningradskiy elektrotekhnicheskiiy institut svyazi, 1967. – 123 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. Natsik V.D., Chishko K.A. Zvukovoye izlucheniye dislokatsiy, dvizhushchikhsya u poverkhnosti kristalla // Fizika tverdogo tela. – 1978. – T.20. – Vyp. 2. – S. 457-465.
13. Pavlov B.V. Akusticheskaya diagnostika mekhanizmov. – M.: Mashinostroyeniye, 1971. – 224 s.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Voronkin A.S. Lineynyye kolebaniya i volny: Vvedeniye v akustiku : uch. posob. – Lugansk: SPD Rêznikov V.S., 2012. – 224 s.
18. 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.
19. 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.
20. Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor. Engineering tribology. – UK, USA: Butterworth-Heinemann, 2013 – 883 p.
21. Voytov V.A. Vliyaniye skorosti skol'zheniya i nagruzki v tribosopryazhenii na chastotu impul'sov akusticheskoy emissii / V.A. Voytov, S.V. Litovka // Naukoviy zhurnal Tekhnichniy servis agropromislovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv. – 2015. – №3. – S. 234-239.