

УДК 691.891

В.Н. Стадніченко<sup>1</sup>, О.Н. Трошин<sup>2</sup>, А.В. Приймак<sup>2</sup>, Е.А. Кисель<sup>2</sup>,  
Р.С. Веретельников<sup>2</sup>, К.А. Гуржий<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет, Киев

<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил, Харьков

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ТРИБОСИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ НАНОИЗНАШИВАНИЯ, МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

*В данной статье рассмотрено методология применения метода акустической эмиссии при решении задач диагностики и прогнозирования трибосистем, работающих в режимах наноизноса. Произведена оценка метрологических характеристик автоматизированных систем трибодиагностики.*

**Ключевые слова:** трибосистема, нанотехнологии, акустическая эмиссия, износ, чувствительность, погрешности, прогнозирование

### Введение

С учетом постановки задачи на эксплуатацию авиационной техники гражданской и военной авиации по техническому состоянию возникает проблема существенного повышения эффективности ее контроля.

Появление в настоящее время быстродействующих цифровых вычислительных машин, а также создание теории идентификации позволили проводить мониторинг состояния объекта контроля по результатам наблюдений над входными и выходными сигналами при его функционировании.

В настоящее время в авиационной, ракетно-космической и энергетических отраслях эту задачу решают путем широкого внедрения систем встроенного автоматизированного контроля (ВАК) и наземных диагностических комплексов (НДК) [1, 2]. Математическая модель функционирования, которых определяется в общем случае уравнением:

$$x_0 = k_1, x_1 + k_2, x_2 + \dots + k_i, x_i + \dots + k_n, x_n, \quad (1)$$

где  $k_i$  – искомые параметры, характеризующие объект контроля;  $x_i$  – переменная диагностирования.

Отказы агрегатов топливной и гидравлических систем в основном обусловлены износом подвижных сопряжений, поэтому задачи безразборной диагностики таких узлов сводятся к контролю скорости изнашивания этих узлов и прогнозирования их долговечности (ресурса).

Входные и выходные параметрами в ВАК и НДК, как правило, имеют различную физическую природу, и установление взаимосвязи между ними представляет достаточно трудную задачу, как с технической, так и с метрологической точки зрения.

Такого рода работы, как правило, выполняются при лабораторных или стендовых испытаниях авиационной техники. В качестве методов диагностирования агрегатов самолета и двигателя в процессе их эксплуатации в настоящее время широко используется метод акустической эмиссии (АЭ). Однако мет-

рологические аспекты применения данного метода до настоящего времени изучены не достаточно.

### Анализ последних достижений и публикаций.

Работы по исследованию физики процессов и изучению разрушения материалов и конструкций с использованием метода АЭ проводятся во многих странах, прежде всего в США, Японии, Великобритании, ФРГ, России и других государств мира. Результаты, опубликованные за последние десятилетия, затрагивают широкий круг аспектов в изучении явления АЭ, которые касаются теоретических разработок в моделировании механизмов формирования и распространения, хранения и анализа информации о процессах объемного [3] и поверхностного разрушения [4].

**Целью данной работы** является оценка метрологических характеристик акустико-эмиссионного метода, позволяющих оценить точность и чувствительность при определении скорости изнашивания элементов трибосистемы с применением статистических методов.

### Изложение материалов исследования

Метод АЭ позволяет на микроуровне обнаруживать дефекты и автоматизировать процесс измерения регистрируемых параметров. Он основан на регистрации упругих волн, излучаемых дефектами, которые развиваются в нагруженных конструкциях.

Зародившееся упругие волны напряжений деформаций распространяются в материале объекта контроля и поступают на вход преобразователей АЭ установленном на исследованном изделии. С входа преобразователей АЭ электрический сигнал передается на вход измерительной аппаратуры, фильтруется, усиливается и преобразуется из аналогового в цифровой, а затем вводится в компьютер, где производится обработка информации. При этом с использованием разработанного программного обеспечения и в соответствии с методикой регистрации и обработки сигналов АЭ принимается решение о дефектности объекта контроля [3].

Полная математическая модель, учитывающая подробности «тонкой структуры» импульса достаточно сложна, поэтому при анализе импульсов используются числовые параметры, дающие упрощенное представление о его форме. К таким параметрам можно отнести: амплитуду  $A$ ; длительность импульса  $\tau_{\text{и}}$ ; длительность фронта  $\tau_{\text{ф}}$  и длительность среза  $\tau_{\text{с}}$  импульса.

Линейное пространство сигналов  $L$  является нормированным, если каждому сигналу  $U(t) \in L$  однозначно сопоставлено число  $U$  – норма этого сигнала, причем должны выполняться определенные аксиомы нормированного пространства. Норму сигналов в линейном пространстве вводят разными способами [3]. Так для сигнала  $(U(t), t \in T)$  можно записать:

$$U(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}. \quad (2)$$

Квадрат данной нормы является энергией, а после приведения этой величины ко времени дискретизации – мощностью сигнала.

Вместе с тем широкие возможности современной вычислительной техники основаны на оперировании с дискретными числами (дискретными сигналами). Простейшую модель дискретного сигнала  $U_{\text{д}}(t)$  можно представить как счетное множество точек  $t_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) на оси времени, в каждой из которых определено отсчетное текущее значение сигнала  $U_i$ . Как правило, шаг дискретизации является постоянной величиной, т.е.  $\Delta t = t_{i+1} - t_i = \text{const}$ .

Любому аналоговому сигналу можно сопоставить его дискретный образ, имеющий например, вид последовательности прямоугольных видеоимпульсов одинаковой длительности, высота которых пропорциональна значению  $U(t)$  в отсчетных точках. При идеальной дискретизации время выборки сигнала бесконечно мало, т.е. дискретизация осуществляется с помощью бесконечно коротких импульсов, совокупность которых формирует так называемую гребенчатую функцию  $\text{Ш}(t)$ . Если задан сигнал  $x(t) \leftrightarrow X(\nu)$ , то дискретизация  $x(t)$  с частотой  $F_a$  – это умножение функции  $x(t)$  на сумму импульсов Дирака, разделенных промежутками времени  $T_a = 1/F_a$ . Такую сумму импульсов Дирака можно записать в виде:

$$\text{Ш}F_a(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(t - \frac{k}{F_a}\right). \quad (3)$$

Если обозначить  $x_{\text{д}}(t)$  как дискретизированный сигнал, то:

$$x_{\text{д}}(t) = x(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(t - \frac{k}{F_a}\right). \quad (4)$$

Реальные устройства приема и обработки сигналов обладают конечной шириной полосы пропускания. Тогда для сигнала  $x(t)$  спектр, которого распределен в интервале  $(-f_c, f_c)$ , можно записать:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x\left(\frac{k}{F_a}\right) \frac{\sin \pi F_a (t - (k/F_a))}{\pi F_a (t - (k/F_a))}, \quad (5)$$

т.е. для частоты дискретизации  $F_a$  справедливо неравенство  $F_a \geq 2f_c$ , где  $f_c$  – наибольшая частота спектра функции  $x(t)$  однозначно восстанавливается по дискретным значениям  $x(k/F_a)$ ,  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ .

Точное значение отсчета сигнала в двоичной форме по уровню, имеет следующий вид:

$$x = \sum_{n=0}^{\infty} a_n 2^{-n}, \quad (6)$$

где коэффициенты  $a_n = 0$  или  $1$ .

Однако сигналы после цифрового преобразования представляются в виде последовательности чисел с ограниченным числом разрядов ( $N$ ). Поэтому получается машинное представление отсчета сигнала:

$$X = \sum_{n=0}^{N-1} a_n 2^{-n} + \beta_N 2^{-N}. \quad (7)$$

Коэффициент  $\beta_N$  равен либо  $\alpha_N$ , либо  $\alpha_{N+1}$  в зависимости от того, нуль или единица содержится в  $(N+1)$  разряде.

Таким образом, непрерывный сигнал  $x(t)$  на некотором интервале  $\{0, T\}$  описывается своими отсчетными значениями  $(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{M-1})$ , взятыми соответственно в моменты времени  $(0, \Delta t, \dots, (M-1)\Delta t)$ , где  $\Delta t$  шаг дискретизации;  $M = T/\Delta t$  полное число отсчетов, рис. 1.

Наличие цифровых массивов чисел, описывающих сигнал  $x(t)$ , позволяет определять все его основные параметры, включая и усредненную спектральную мощность, где интеграл заменяется суммированием на интервале усреднения действия сигнала. При этом размерность по регистрируемому параметру в данном случае усредненной мощности определяется размерностью единицы младшего разряда для заданного числа разрядов аналого-цифрового преобразователя, а размерность по времени – размерностью шага дискретизации  $\Delta t$ .

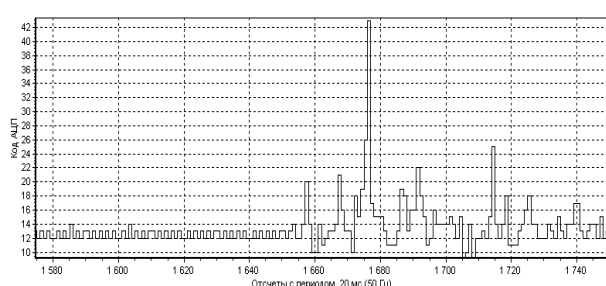


Рис. 1. Диаграмма измерения усредненной мощности сигналов АЭ при регистрации износа

Цифровое описание сигналов, представляемое в виде цифровых массивов упорядоченных данных, позволяют производить обработку и построения во времени зависимостей изменения параметров индивидуальных сигналов (пиковых значений параметров сигналов) или двухпараметрических распределений зависимостей сигналов АЭ и характеристик изнашивания трибосопряжений. Если рассматриваются импульсные потоки за определенное время испытаний на износ, то производится обработка и построение зависимостей изменения усредненных значений мощности сигналов АЭ как на определенных интервалах (за один файл – 3-5 минут), так и во всем диапазоне времени испытаний трибосистемы:

$$\bar{x}(kt) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Pi_{ik} ;$$

$$\Pi_{ik} \in [(k-1)\tau, k\tau], k = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

где  $\Pi_{ik}$  – обрабатываемый параметр сигнала;  $\tau$  – длительность интервала усреднения на данной длине реализации  $T_1$ , ( $m = T_1/\tau$ );  $n$  – количество сигналов на  $k$ -м интервале усреднения.

При обработке непрерывного сигнала с колебаниями вокруг некоторого уровня, на интервале наблюдения  $(0, t)$  отсчетные цифровые значения  $(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{M-1}) > 0$ , обработка и вывод усредненных значений может осуществляться в соответствии с выражением (8).

Пиковые значения регистрируемых параметров АЭ оцениваются величиной информации, что делает возможным использование относительных информационных единиц в качестве критерия оценки скорости изнашивания трибосистем. С точки зрения получения информации о кинетике процессов изнашивания с использованием обработки сигналов АЭ, наиболее приемлемой является организация непрерывного режима записи информации. Он заключается в обеспечении непрерывного проведения измерений сигналов акустической эмиссии в процессе изнашивания трибосистемы, с последовательной записью и сохранением каждого результата измерения на устройстве запоминания (жестком диске ПК). Запись информации осуществляется через оперативное запоминающее устройство.

В непрерывном режиме работы объем первичной информации, который регистрируется, определяется частотой опроса датчика АЭ. При сохранении информации в виде низкочастотного сигнала, с частотой опроса 25...50 Гц, объем данных, который получен в течение 100 часов испытаний на трение и изнашивание, составляет 50...100 Мбайт. При увеличении частоты опроса, пропорционально увеличивается объем данных и может вычисляться десятками Гбайт, время диагностирования будет ограничиваться объемом запоминания и возможностью обработки больших массивов данных вычислительной техникой.

При этом сохранение исходной информации на устройстве запоминания позволяет проводить гибкую, многоразовую вторичную обработку с использованием программно-математического обеспечения, обработка сигналов и построения зависимостей производится в Microsoft Excel. Такой подход обеспечивает получение максимального количества информации об износе трибосистемы, позволяет регистрировать переход к различным видам повреждаемости, рис. 2.

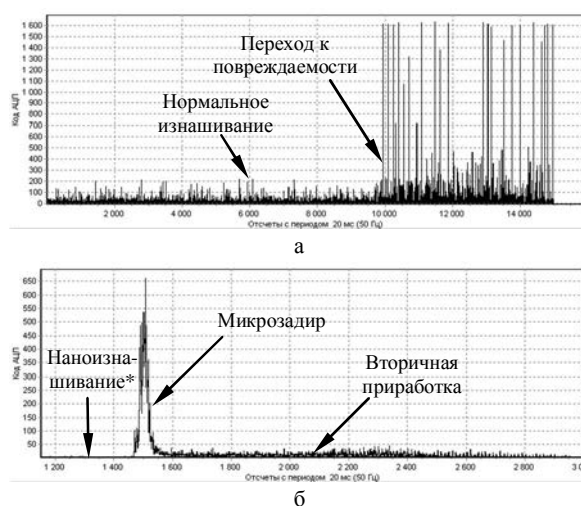


Рис. 2. Характер изменения скорости изнашивания в относительных информационных единицах:

а – при переходе от нормального износа к повреждаемости; б – при микрозадира

(\*наноизнашивание подразумевает суммарный износ трибосистемы, который не может быть измерен после 8-ми часов непрерывных испытаний на максимальных эксплуатационных режимах)

Специальное программно-математическое обеспечение акустико-эмиссионной системы было создано на основе комплекса алгоритмов в выбранной среде программирования под управлением Windows с использованием функций WinAPI.

Экранный интерфейс рис. 3, обеспечивает формирование меню «оператора», выполненного в виде многооконной структуры, в которой кроме параметров АЭ регистрируются все основные параметры трибосистемы (момент трения, среднеповерхностная температура в области контакта и т.д.).

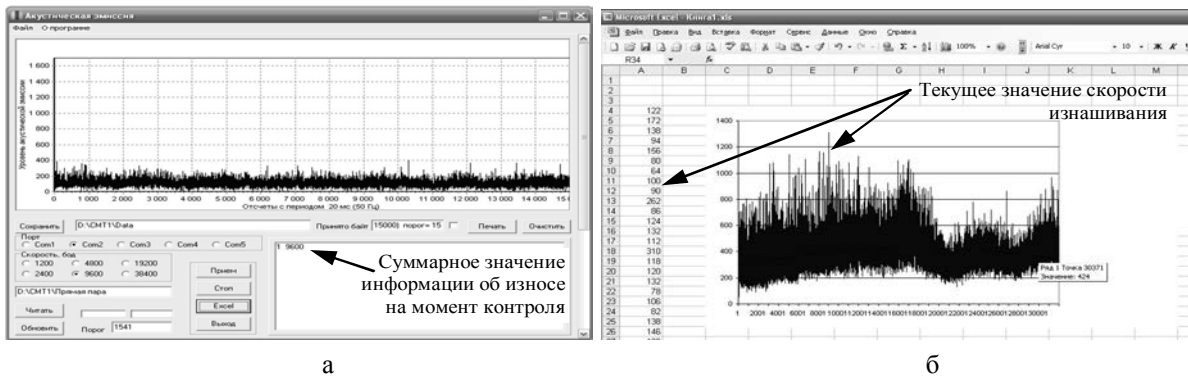


Рис. 3. Интерфейсы программ интегральной оценки скорости изнашивания в относительных информационных единицах об износе: а – текущее значение за один файл испытаний (5 мин); б – интегральное значение за весь период испытания

После полного проведения эксперимента проводится построение итоговых интегральных характеристик

изнашивания трибосистем во времени испытаний и их анализ, рис. 4.

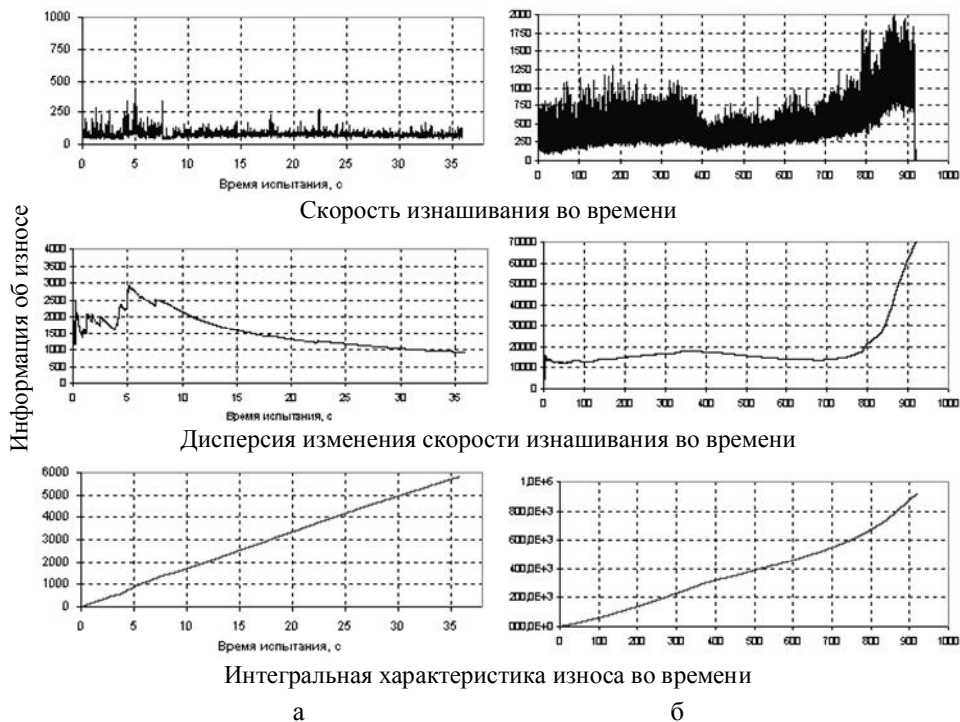


Рис. 4. Характер изменения регистрируемых параметров АЭ во времени эксплуатации реальных трибосистем: а – период приработки и переход к нормальному изнашиванию; б – период исчерпания ресурса и переход к повреждаемости

Разработанная методология регистрации скорости изнашивания в относительных информационных единицах позволяет регистрировать наноизнос который не может быть измерен традиционными методами за 8...50 часов непрерывных испытаний трибосистемы на машине трения, рис. 5, средний уровень пиковых значений скорости изнашивания, в этом случае не превышает 10 байт.

С учетом цифрового преобразования сигналов усредненной мощности в интерфейсе пользователя по существу регистрируется информация о скорости изнашивания. Ценой деления скорости изнашивания является байт. Поэтому проблема определения точности и чувствительности метода АЭ сводится к

задаче определения связи единицы информации об износе с реальным износом.

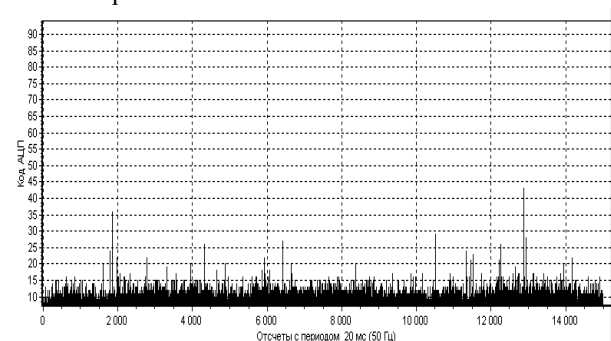


Рис. 5. Диаграмма изменения скорости наноизнашивания за один файл (5 мин.)

Переход от косвенных измерений износа к прямым может быть решен путем градуировки средств измерений. В нашем конкретном случае необходимо определить цену информационной единицы в единицах износа измеряемых весовым методом, а также определить погрешности средств измерений и результатов измерений. Для решения этой задачи были проведены испытания на износ по схеме кольцо-кольцо трибосистем сталь по стали 30ХЗВА, азотирование, твердость 780 НV, где на поверхность подвижных и неподвижных образцов наносились ионно-плазменные покрытия на основе MoN и TiAlN. В процессе нанесения покрытий варьировалась толщина покрытий и физико-механические свойства подслоя.

Фрактографическое представление наноизноса отображено на рис. 6. Заметный износ наблюдается на поверхности трибоэлемента с покрытием TiAlN.

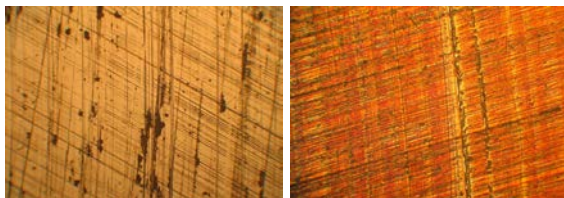


Рис. 6. Фрактография поверхностей трения трибосистемы с ионно-плазменными покрытиями, работающими в условиях наноизнашивания  $\times 450$ : а – MoN; б – TiAlN

Форма и размеры образцов для модельных триботехнических испытаний соответствовали требованиям ДСТУ 30480–97 с коэффициентом взаимного перекрытия  $K_{вз}=0,88$ .

Шероховатость и геометрия поверхностей трения образцов после нанесения покрытий соответствовали требованиям к деталям топливных насосов.

Для воспроизводимости результатов испытаний на износ контролировалось сопряжение торцевых поверхностей по величине контактной площади, не менее 90% рабочей поверхности каждого образца.

До проведения испытаний образцы промывались бензином «Калоша» ГОСТ 2603-71, сушились при температуре  $70^{\circ}\text{C}$ , взвешивались на весах ВЛР-200 с точностью до  $10^{-5}$  г.

Испытания проводили на серийной машине трения 2070 СМТ-1 в условиях граничной смазки.

Рабочая среда авиационный керосин ТС-1, расход 2 л/ч, при следующих условиях: нагрузка – 1600 Н; скорость скольжения – 0,5 м/с; время испытания – 480 мин.

Скорость изнашивания регистрировалась с помощью метода АЭ, где в качестве информации об износе использовались относительные информационные единицы (в байтах).

В процессе экспериментов, согласно требова-

ниям ДСТУ 30480–97, регистрировали:

- момент трения (пересчитывали в коэффициент трения), по величине которого судили о механических потерях в трибосистемах;

- температуру элементов непрерывно регистрировали в реальном масштабе времени испытаний.

Характеристики параметров усилительного тракта регистрации усредненной мощности сигналов АЭ:

- Входное сопротивление – 1 МОм;
- Чувствительность по входу – 10 мкВ;
- Частотный диапазон – 200...2000 кГц;
- Коэффициент усиления – 65...90 дБ;
- Динамический диапазон – 40...65 дБ;
- Шаг дискретизации – 20 микросек;
- Величина относительной погрешности – 0,7%;
- Питание от сети – 220 В;
- Частота – 50 Гц.

Для установки нуля при регистрации скорости изнашивания исследуемых трибосистем необходимо устранить аддитивную погрешность обусловленная уровнем сигналов АЭ от износа опоры приводного вала. Традиционные методы (установление уровня амплитудной дискриминации и кросскорреляционный метод) при регистрации наноизноса являются неприемлемым из-за соизмеримости шумам приводного вала машины трения. Эта задача была решена с применением технологии триботехнического восстановления с использованием ТВС «Комбат» [5, 6]. Установка нуля перед каждым опытом контролировали системой самоконтроля.

В результате многократных измерений суммарного весового износа и информации об износе в каждом из 30 опытов, табл. 1, получена зависимость вида  $y = f(x)$ , рис. 7, которая занимает некоторую полосу, что обусловлено особенностями изнашивания каждой трибосистемы, различием физико-механических свойств поверхностных слоев и связанных с ними погрешностей.

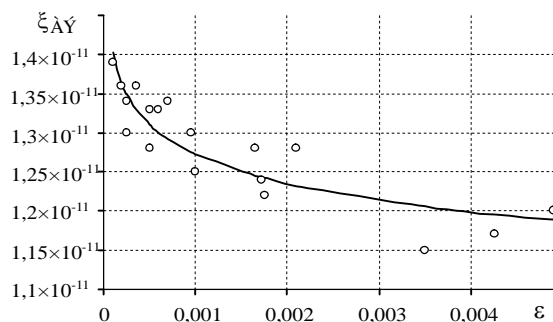


Рис. 7. Зависимость удельной эмиссионной активности  $\xi_{AЭ}$  от износа  $\varepsilon$

В процессе выполнения эксперимента были полученные исходные данные для обработки (табл. 1), которые представляют измеренные и полученные косвенным путем следующие характеристики износа элементов трибосистемы:

Таблица 1

## Исходные данные

№ эксп.	Износ, $\varepsilon$ , г	Информация, I, байт	$\xi_{AЭ}$ , г/байт	№ эксп.	Износ, $\varepsilon$ , г	Информация, I, байт	$\xi_{AЭ}$ , г/байт
1	0,10525	373226950	Задир	16	0,00035	25735294	$1,36 \times 10^{-11}$
2	0,0586	714463414		17	0,00025	19230769	$1,30 \times 10^{-11}$
3	0,0049	408333334	$1,20 \times 10^{-11}$	18	0,00025	18656716	$1,34 \times 10^{-11}$
4	0,00425	363251012	$1,17 \times 10^{-11}$	19	0,0002	14705882	$1,36 \times 10^{-11}$
5	0,0035	304347826	$1,15 \times 10^{-11}$	20	0,0001	7194244	$1,39 \times 10^{-11}$
6	0,0021	164062500	$1,28 \times 10^{-11}$	21	Измерение количества вещества при износе не может быть выполнено по причине конечной точности весов	3521126	–
7	0,00175	143443452	$1,22 \times 10^{-11}$	22		3571428	–
8	0,00172	138709678	$1,24 \times 10^{-11}$	23		3546099	–
9	0,00165	12890746	$1,28 \times 10^{-11}$	24		3511660	–
10	0,0011	88000814	$1,25 \times 10^{-11}$	25		3512260	–
11	0,00095	73076924	$1,30 \times 10^{-11}$	26		3511440	–
12	0,0007	52238806	$1,34 \times 10^{-11}$	27		3472222	–
13	0,0006	45112782	$1,33 \times 10^{-11}$	28		3378378	–
14	0,0005	37593984	$1,33 \times 10^{-11}$	29		3311258	–
15	0,0005	39062500	$1,28 \times 10^{-11}$	30		3164556	–

– количественная характеристика износа  $\varepsilon$  – получена путем взвешивания образца до и после эксперимента;

– общее количество информации об износе I за время испытаний (480 мин.) – получена путем подсчета количества информации об износе в каждом измерении  $\Delta t = 20$  микросек;– удельная эмиссионная активность  $\xi_{AЭ}$ :

$$\xi_{AЭ} = \varepsilon / I, \quad (9)$$

и представляет собой количество вещества, удаленного в процессе износа из трибосистемы, приходящееся на единицу информации.

В процессе статистической обработки результатов эксперимента решались следующие задачи:

1. Проверка воспроизводимости эксперимента в каждой от 1 до 20 точки.
2. Расчет по выбранной математической модели.
3. Проверка адекватности математического описания.

При решении первой задачи для проверки воспроизводимости эксперимента в каждой 1...20 точках использовался критерий Кохрена, имеющий вид:

$$G = \frac{\max\{S_i^2\}}{g} / \sum_{g=1}^N S_i^2 \{y\}, \quad (10)$$

где  $s_i^2$  – оценочные значения дисперсий (выборочные дисперсии), соответствующие каждой i-й точке эксперимента (в нашем случае  $i = 1...20$ ).

Проверка свидетельствует о том, что гипотеза об однородности выборочных дисперсий отвечает результатам наблюдений.

Расчет математической модели выполнялся в следующей последовательности:

**I. Выбор вида модели.** Выполнялся подбор кривых из некоторого семейства для получения зависимости  $\xi_{AЭ} = f(\varepsilon)$ .

Пригодность моделей для прогнозирования зависит от того, какая часть суммы квадратов отклонений относительно среднего ( $SS$  относительно среднего) приходится на сумму квадратов отклонений, которая обусловлена регрессией ( $SS$ , которая обусловлена регрессией), и какая приходится на сумму квадратов отклонений относительно регрессии ( $SS$  относительно регрессии). В этом плане критерием выбора вида регрессионной модели может служить величина  $R^2$ , которая в нашем случае является отношением:

$$R^2 = \frac{(\xi_{AЭi}^* - \bar{\xi}_{AЭ})^2}{(\xi_{AЭi}^* - \bar{\xi}_{AЭ})^2 + (\xi_{AЭi} - \xi_{AЭi}^*)^2}, \quad (11)$$

где  $\xi_i^*$  – оценочное значение  $\xi_{AЭ}$  в соответствующей i-й точке;  $\bar{\xi}_{AЭ}$  – среднее значение  $\xi_{AЭ}$ .

Очевидно, можно говорить о приемлемости модели, если  $R^2$  не сильно отличается от «1».

Результаты проверки с использованием данного показателя представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Выбор вида регрессионной модели

№ п/п	Вид регрессионной модели	Значение $R^2$	Примечание*
1	Линейная	0,7426	Не может быть использовано
2	Квадратичная	0,8248	Не может быть использовано
3	Логарифмическая	0,7926	–
4	Экспоненциальная	0,7505	Не может быть использовано
5	Степенная	0,7854	–

\*Примечание: «Не может быть использовано» обозначает невозможность использования указанных моделей по причинам недостаточной точности прогнозирования процесса изнашивания при низких значениях износа.

**II. Расчет коэффициентов модели с проверкой их значимости.** Использование метода наименьших квадратов позволило получить соответствующие коэффициенты модели, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3

Вид и коэффициенты регрессионных моделей

Вид модели	Математическая запись модели	Коэффициенты	
		a	b
Логарифмическая	$\xi_{AЭi}^* = a \ln(I_i) + b$	$5,27 \times 10^{-13}$	$2,23 \times 10^{-11}$
Экспоненциальная	$\xi_{AЭi}^* = a I_i^b$	$2,7 \times 10^{-11}$	-0,0414

Для статистического оценивания коэффициентов регрессии использовался критерий Стьюдента:

$$t_a = |a| / s\{a\}; \quad t_b = |b| / s\{b\}, \quad (12)$$

где  $s\{a\}$ ,  $s\{b\}$  – стандартные отклонения оценок соответствующих коэффициентов регрессии.

Для принятия решения о статистической значимости коэффициентов требуется выполнение следующего условия:

$$t_a; \quad t_b \geq t_{кр}^T, \quad (13)$$

где  $t_{кр}^T$  – критическое значение критерия, которое может быть найдено с использованием статистических таблиц.

В табл. 4 представлены результаты использования данного критерия для случая логарифмической модели.

Таблица 4

Результаты проверки коэффициентов логарифмической модели

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
Y-пересечение, b	$2,2324 \times 10^{-11}$	$1,1512 \times 10^{-12}$	19,3917
Переменная, a	$-5,2698 \times 10^{-13}$	$6,3873 \times 10^{-14}$	8,2505
Критическое значение, t	–	–	1,7291

В случае табл. 5 для выполнения расчетов использовалась замена выражения:

$$\xi_{AЭi}^* = a I_i^b,$$

на эквивалентное вида:

$$\ln(\xi_{AЭi}^*) = \ln(a) + b \times \ln(I_i).$$

И в первом, и во втором случаях полученные коэффициенты модели можно считать статистически значимыми;

Таблица 5

Результаты проверки коэффициентов степенной модели

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика
Y-пересечение, $\ln(a)$	-24,3343	0,0925	262,9756
Переменная, a	-0,0414	0,0051	8,0685
Критическое значение, t	–	–	1,7291

**III. Проверка гипотезы об адекватности математического описания опытным данным.** Проверка выполнялась с использованием F-критерия Фишера имеющего вид:

$$F^P = \bar{S}_y^2 / \bar{S}_{ост}^2, \quad (14)$$

где  $\bar{S}_y^2$  – оценочная дисперсия среднего;  $\bar{S}_{ост}^2$  – оценочное значение остаточной дисперсии.

При этом условии, при котором принимается гипотеза об адекватности математического описания, имеет вид:

$$F^P \geq F_{кр}^T, \quad (15)$$

где  $F_{кр}^T$  – табличное (критическое) значение критерия Фишера, взятое для соответствующих значений степеней свобод:

$$v_1 = n - 1; \quad v_2 = n - p - 1, \quad (16)$$

где  $n$  – количество экспериментальных точек;  $p$  – количество факторов, и, как правило, 5% степени значимости.

Результаты проверки моделей представлены в табл. 6.

Таблица 6

Проверка адекватности моделей

Вид модели	Расчетное значение F-критерия	Критическое значение F-критерия
Логарифмическая	68,0711	2,3216
Экспоненциальная	65,1003	

Таким образом, для обоих случаев математического описания выполняется условие (7), что свидетельствует о правомочности использования моделей соответствующих видов для прогнозирования износа.

**IV. Прогнозирование износа.** При этом порядок выполнения прогнозирования следующий:

1. Выполняем измерение количества информации при износе I.
2. Используя модель соответствующего вида (см. табл. 3) выполняем косвенное измерение  $\xi_{AY}$ .
3. Оцениваем количественную характеристику износа  $\varepsilon$  по формуле (1).

Спрогнозированные значения количественной характеристики износа  $\varepsilon$  для случая табл. 1 представлены ниже в табл. 7.

Таблица 7

Спрогнозированные значения количественной характеристики износа  $\varepsilon$

№ эксперимента	Износ, $\varepsilon$ , г	Информация, I, байт	$\xi_{AY}$ , г/байт
21	0,0000506	3521126	$1,4473 \times 10^{-11}$
22	0,0000513	3571428	$1,4464 \times 10^{-11}$
23	0,0000510	3546099	$1,4468 \times 10^{-11}$
24	0,0000505	3511660	$1,4474 \times 10^{-11}$
25	0,0000505	3512260	$1,4474 \times 10^{-11}$
26	0,0000505	3511440	$1,4474 \times 10^{-11}$
27	0,0000500	3472222	$1,4481 \times 10^{-11}$
28	0,0000487	3378378	$1,4497 \times 10^{-11}$
29	0,0000477	3311258	$1,4509 \times 10^{-11}$
30	0,0000457	3164556	$1,4537 \times 10^{-11}$

Таким образом, результаты математического моделирования позволили выполнить оценку чувствительности метода АЭ при регистрации износа в анализируемых трибосопряжениях. Она находится в пределах диапазона изменения удельной эмиссионной активности  $\xi_{AY} = 1,2 \times 10^{-11} \dots 1,45 \times 10^{-11}$  г/байт. При этом погрешность прогнозирования обеспечивается на уровне не более 2...2,5% при условии нормального механохимического износа. В условиях перехода к повреждаемости (табл. 1, № эксперимента 1, 2) погрешности резко возрастают и применение метода АЭ в этом случае ограничивается диагностическими признаками, показанными на рис. 2.

В случае приближения к границам наноизноса и допустимого износа точность прогнозирования незначительно снижается. При работе в соответствующих областях предложенная методика измерения весового износа обеспечивает точность прогнозирования на уровне 4...5%.

## Выводы

Разработанная методика обработки акустико-эмиссионного излучения и определения скорости

изнашивания, позволяющая регистрировать скорость изнашивания с отделением первой частицы материала трибосистемы в информационных единицах [байт/с], позволяет определить общие закономерности механизмов изнашивания разных трибосистем, разработать критерии оценки их технического состояния, а также методики прогнозирования ресурса машин и механизмов. Таким образом, метод АЭ можно отнести к нанотехнологиям в измерении износа.

## Список литературы

1. Автоматизированная система сбора и анализа данных при трибомониторинге / К.В. Подмастерьев, В.В. Мишин, Е.В. Пахолкин, В.В. Марков // Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: Материалы междунар. научн.-практ. конф. – Новочеркасск: НПО «Темп», 2001. – Ч. 3. – С. 40-42.

2. Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. – 454 с.

3. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. Измерение, контроль, диагностика / С.Ф. Филоненко. – К.: КМУ-ГА, 1999. – 312 с.

4. Свиреденок А.И. Акустические и электрические методы в триботехнике / А.И. Свиреденок / под ред. В.А. Белого. – М.: Наука и техника, 1987. – 280 с.

5. Патент України UA 41896 МПК 2009. Спосіб безрозбірного відновлення поверхонь трибосистем / В.А. Войтов, В.М. Стадніченко, М.Г. Стадніченко, А.П. Білик. – Опубліковано 10.06.2009, бюл., №11. – 3 с.

6. Запорожець В.В. Механізм дисипації енергії при терті металокерамічного шару в технологіях триботехнічного відновлення деталей машин і механізмів / В.В. Запорожець, В.М. Стадніченко, О.М. Трошін // Системи озброєння і військова техніка – Х.: ХУПС, 2010. – №2(22). – С. 113-118.

7. Березняков А.И. О взаимосвязи характеристик акустического излучения поверхности трибосопряжения с трибологическими параметрами / А.И. Березняков, В.Н. Стадніченко // Трение и износ. – 1998. – Т.19, № 3. – С. 312-317.

Надійшла до редколегії 8.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Калкаманов, Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ТРИБОСИСТЕМ ПРАЦЮЮЧИХ В РЕЖИМІ НАНОЗНОШУВАННЯ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В.М. Стадніченко, О.М. Трошін, А.В. Приймак, Е.А. Кисіль, Р.С. Веретельников, К.О. Гуржій

В даній статті розглянуто методологія застосування методу акустичної емісії при вирішенні задач діагностики і прогнозування трибосистем працюючих в режимах нанозношування. Проведена оцінка метрологічних характеристик автоматизованих систем трибодіагностики.

**Ключові слова:** трибосистема, нанотехнології, акустична емісія, зношування, чутливість, похибка, прогнозування.

## PROGNOSTICATION OF THE TRIBOSYSTEM RESOURCE OF WORKING IN THE MODE NANOWEAR BY METHOD OF ACOUSTIC EMISSION

V.N. Stadnichenko, O.N. Troshin, A.V. Priymak, E.A. Kisyl, R.S. Veretelnikov, K.O. Gurgiy

In the given article it is considered methodology of application of method of acoustic emission at the decision of tasks of diagnostics and prognostication of tribosystem working in the modes of nanowear. Estimation of metrologic descriptions of the automated systems of tribodiagnostic is produced.

**Keywords:** tribosystem, nanotechnology, acoustic emission, wear, sensitiveness, errors, prognostication.