

**Войтов В.А.,****Захарченко М.Б.**Харьковский национальный технический  
университет с/х им. П. Василенко,  
г. Харьков, Украина

E-mail: ndch\_khntusg@mail.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ  
И ИЗНАШИВАНИЯ В ТРИБОСИСТЕМАХ  
В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ.  
ЧАСТЬ 3. ДОБРОТНОСТЬ ТРИБОСИСТЕМЫ**

УДК 621.891

Разработана математическая модель расчета скорости изнашивания и коэффициента трения в трибосистемах, работающих в условиях граничной смазки, которая позволяет определять ресурс и механические потери на трение проектируемых трибосистем без проведения предварительных экспериментов. Модель учитывает свойство совместимости материалов в трибосистеме, которое получило определение, как добротность трибосистемы. Приведены результаты моделирования скорости изнашивания и коэффициента трения различных конструкций трибосистем с оценкой адекватности и ошибки моделирования.

**Ключевые слова:** трибосистема, моделирование, скорость изнашивания, сила трения, граничная смазка, совместимость материалов, добротность трибосистемы, критерий добротности трибосистемы.

**Актуальность проблемы**

Исследования данной работы являются продолжением работ [1, 2] и направлены на разработку критерия оценки совместимости материалов в трибосистеме с учетом трибологических свойств смазочной среды.

Формирование поверхностных слоев при трении – это сложный нестационарный процесс, развитие которого зависит от физико-механических свойств материалов, микрогеометрии поверхностей трения, наличия смазочной среды, условий нагружения. Пластические и упругие свойства поверхностных слоев значительно отличаются от объемных. Оптимальный механизм приспособляемости материалов при трении – это приобретение им такой структуры в поверхностных слоях, которая будет препятствовать распространению пластической деформации вглубь материала и локализовывать ее только в поверхностных слоях.

Трибологические свойства смазочной среды не могут рассматриваться в отрыве от материалов трибосистемы, а, следовательно, их выбор в трибосистему должен осуществляться комплексно. Смазочная среда оказывает большое влияние на совместимость материалов в трибосистеме в процессе эксплуатации, следовательно, определяет ресурс и потери на трение. Результатом взаимодействия присадок смазочной среды с материалами поверхностей трения являются процессы физической адсорбции, хемосорбции и химических реакций, которые и влияют на износостойкость трибосистемы.

Для прогнозирования износостойкости трибосистем, а также для расчета скорости изнашивания и потерь на трение, необходимо иметь критерий, который является структурно-чувствительной характеристикой материалов, из которых изготовлены трибоэлементы, а также учитывать отмеченные выше процессы в поверхностных слоях.

**Анализ публикаций, посвященных данной проблеме**

Наиболее фундаментальные работы, посвященные вопросам совместимости материалов, принадлежат Н.А. Буше и Н.М. Алексею [3 - 5]. В данных работах поставлен ряд задач, которые необходимо решать, чтобы изучить проблему совместимости материалов. В первую очередь, определено понятие совместимости материалов. Оно заключается в способности контактирующих материалов приспособляться друг к другу и к изменяющимся условиям трения с учетом взаимодействия материалов со смазочной и окружающей средой, обеспечивая заданную долговечность трибосистемы и устойчивую ее работу без смазки или в режиме нарушения целостности смазки. В более поздней работе [6], было уточнено понятие совместимости – как способности трибосистемы обеспечивать оптимальное состояние в заданном диапазоне условий работы по выбранным параметрам.

Учитывая то, что трение является динамическим и диссипативным процессом, количественной характеристикой релаксационных свойств поверхностных слоев материалов может служить внутреннее трение [7, 8]. С помощью внутреннего трения можно определять структурно-чувствительную характеристику материала, которая зависит не только от типа кристаллической решетки, но и от структурных особенностей, возникающих на протяжении эксплуатации трибосистемы. Внутреннее трение характеризует способность структуры материала к рассеиванию энергии колебаний, связанной с плотностью, концентрацией и подвижностью дислокаций и точечных дефектов.

В работах, выполненных под руководством В.В. Шевели [9 - 11], показано, что релаксационные

процессы проявляют более высокую структурную чувствительность к изменению напряженно-деформированного состояния материала при динамическом нагружении по сравнению с физико-механическими свойствами. Основным выводом указанных выше работ является то, что реологические свойства фрикционного контакта можно представить в виде четырех уровней, в которых сосредоточены процессы контактного взаимодействия.

На основании выполненного анализа работ можно сделать вывод, что релаксационные свойства структуры материалов, из которых изготовлена трибосистема, влияют на совместимость материалов, и являются функцией износостойкости и прирабатываемости, что доказано в работе [12]. В данной работе приводится параметр – коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в структуре материала, который характеризует величину внутреннего трения и методика его измерения.

Взаимодействие материалов трибоэлементов со смазочной средой оценивается различными параметрами. Авторами работ [13, 14] предлагается энергетический параметр – удельная работа изнашивания тестового материала в испытываемой смазочной среде, который связан с работой трения на удаление объема материала с поверхности трения и может выступать интегральным энергетическим параметром смазывающих свойств.

Анализируя накопленный опыт при решении подобных задач можно сделать вывод, что разработка критерия, который учитывает совместимость материалов в трибосистеме, является актуальной задачей.

### Цель исследований

Исследовать влияние функции добротности трибосистемы на скорость изнашивания и коэффициент трения с определением функциональных зависимостей и коэффициентов корреляции.

### Методический подход в проведении исследований

В основу методического подхода при исследовании функции добротности трибосистемы используется зависимость между объемной скоростью изнашивания  $I$  и скоростью работы диссипации трибосистемы  $W_{TP}$ , которая представлена в предыдущей статье [2]:

$$I = Q^{-1} W_{TP}, \quad (1)$$

где  $Q^{-1}$  – коэффициент пропорциональности.

Запишем выражение (1) в виде размерностей:

$$\frac{\text{м}^3}{\text{с}} = \frac{\text{м}^3}{\text{Дж}} \times \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

Как следует из размерностей коэффициент пропорциональности  $Q^{-1}$  между объемной скоростью изнашивания  $I$  и скоростью работы диссипации в трибосистеме  $W_{TP}$  имеет размерность  $\text{м}^3/\text{Дж}$ , который является обратной величиной размерности трибологических свойств смазочной среды и, одновременно, внутреннего трения структуры материалов, из которых изготовлены трибоэлементы.

По аналогии с добротностью электрического контура в работе [2] получено выражение для определения добротности трибосистемы:

$$Q^{-1} = \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_n \cdot \delta_n)}}, \text{ м}^3/\text{Дж}, \quad (2)$$

где  $E_y$  – трибологические свойства смазочной среды, Дж/м<sup>3</sup>;

$\delta_n$  и  $\delta_n$  – коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в структуре материала подвижного и неподвижного трибоэлементов, безразмерные величины.

Данные коэффициенты прямо пропорциональны внутреннему трению структуры сопряженных материалов.

Как следует из выражения (2) коэффициент пропорциональности  $Q^{-1}$  между скоростью изнашивания и скоростью работы диссипации в трибосистеме обратно пропорционален трибологическим свойствам смазочной среды и произведению внутреннего трения структуры материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов. Чем выше значение  $E_y$ ,  $\delta_n$  и  $\delta_n$ , тем меньше значение  $Q^{-1}$ , а, следовательно, и меньше скорость изнашивания, формула (1).

На основании формулы (2) можно получить выражение для оценки добротности трибосистемы:

$$Q = E_y \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}}, \text{ Дж}/\text{м}^3. \quad (3)$$

Как следует из формулы (3) добротность трибосистемы – это размерная величина, которая оценивает способность сопрягаемых материалов в трибосистеме (смазочная среда и реологические свойства структуры материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов) превращать работу сил трения в

тепловую энергию, тем самым препятствовать запасам энергии в поверхностных и подповерхностных слоях трибоэлементов, которые можно оценить деформируемым объемом.

Чем большая часть работы трения будет преобразована в тепло и меньший объем материала будет участвовать в деформации, тем больше добротность трибосистемы.

Понятие добротности трибосистемы дополняет понятие совместимости материалов в трибосистеме, под которым понимают способность контактирующих материалов приспосабливаться друг к другу и к изменяющимся условиям трения с учетом взаимодействия материалов со смазочной и окружающей средой, обеспечивая заданную долговечность и устойчивую работу во всем диапазоне эксплуатации.

Увеличению добротности трибосистемы способствует увеличение трибологических свойств смазочной среды (наличие поверхностно-активных и химически-активных веществ в смазочной среде), а так же увеличение внутреннего трения структуры материалов, из которых изготовлены подвижный и неподвижный трибоэлемент. При этом смазочная среда является более весомым фактором, чем внутреннее трение структуры сопряженных материалов, т.к. в формуле (3) присутствует в первой степени, а внутреннее трение структуры материалов в степени 1/2.

### Результаты исследования

Результаты измерений коэффициента затуханий на рабочих частотах 2,5, 5 и 10 МГц для различных материалов представлены в табл. 1. В табл. 1 также представлены значения среднеквадратического отклонения  $\delta$  и коэффициента вариации  $\nu$  измеряемых величин. Как следует из полученных результатов измерения логарифмического коэффициента затухания ультразвуковых колебаний на рабочей частоте 5 МГц дает наименьшее значение коэффициента вариации, а, следовательно, и обеспечивает наибольшую точность получаемых результатов с ошибкой измерений не превышающей 2,7%. Измерения на частоте 2,5 МГц дают ошибку 3,91 %, а на частоте 10 МГц – 3,77 %.

Экспериментально полученные данные коэффициента затухания ультразвуковых колебаний для различных конструкционных материалов, которые представлены в табл. 1, характеризуют структуру материала трибоэлемента, т.е. способность к релаксации механических напряжений.

Трибологические свойства смазочной среды можно учитывать с помощью параметра  $E_y$ , Дж/м<sup>3</sup> – удельная работа изнашивания единицы объема тестового материала (шарики из стали ШХ-15) в испытываемой смазочной среде. Физический смысл данного параметра следует из выражения:

$$E_y = E_1 + E_2 + E_3 = \frac{f_1 P_1 L_1}{D_u^3} + \sum_{i=196}^{P_K} \frac{f_i P_i L_2}{D_i^3} + \sum_{j=P_K}^{P_{C-1}} \frac{f_j P_j L_2}{D_j^3}, \quad (4)$$

где  $E_1$  – величина удельной работы изнашивания, которая характеризует наличие противозносных свойств в смазочном материале, Дж/м<sup>3</sup>;

$E_2$  – величина удельной работы изнашивания, которая характеризует диапазоны работы противозносных присадок, Дж/м<sup>3</sup>;

$E_3$  – величина удельной работы изнашивания, которая характеризует наличие в смазочном материале противозадирных присадок и диапазон их работы, Дж/м<sup>3</sup>;

$f_1$  – коэффициент трения при нагрузке  $P_1 = 196$  Н;

$P_1$  – нагрузка равная 196 Н для определения показателя износа на четырехшариковой машине, ГОСТ 9490-75;  $L_1$  – путь трения при определении показателя износа, равен 2119 м;

$D_u$  – средний диаметр пятен износа трех нижних шариков при определении показателя износа, м;

$\sum_{i=196}^{P_K}$  – суммарное значение числа испытаний от нагрузки 196 Н до критической нагрузки, согласно первого нагрузочного ряда приведенного в ГОСТ 9490;

$f_i$  – значения коэффициента трения при нагрузках от 196 Н до  $P_K$ ;

$P_i$  – нагрузка согласно первого нагрузочного ряда от 196 Н до  $P_K$ , Н;

$L_2$  – путь трения при времени испытания 10 сек, равный 5,88 м;  $D_i$  – средний диаметр пятен износа трех нижних шариков при нагрузках от 196 Н до  $P_K$ , м;

$\sum_{j=P_K}^{P_{C-1}}$  – суммарное значение числа испытаний от  $P_K$  до нагрузки, предшествующей нагрузке свивания  $P_{C-1}$ ;

$f_j$  – значение коэффициента трения при нагрузках от  $P_K$  до  $P_{C-1}$ , Н;

$D_j$  – средний диаметр пятен износа трех нижних шариков при нагрузках от  $P_K$  до  $P_{C-1}$ , м.

Таблица 1

## Результаты измерений коэффициента затухания ультразвуковых колебаний в различных материалах

Материал	Среднее значение $\bar{\delta}$	Среднеквадратическое отклонение, $S$	Коэффициент вариации $\nu = \frac{S}{\bar{\delta}} \cdot 100, \%$	Среднее значение $\bar{\delta}$	Среднеквадратическое отклонение, $S$	Коэффициент вариации $\nu = \frac{S}{\bar{\delta}} \cdot 100, \%$	Среднее значение $\bar{\delta}$	Среднеквадратическое отклонение, $S$	Коэффициент вариации $\nu = \frac{S}{\bar{\delta}} \cdot 100, \%$
	Сталь 20Х	1940	75,94	3,91	1945	52,7	2,7	1946	73,42
Сталь 40Х	2643	78,82	2,98	2644	56,8	2,14	2646	75,47	2,85
Сталь ШХ-15	2694	81,34	3,01	2700	62,48	2,31	2705	78,94	2,91
38Х2МЮА	2805	84,49	3,01	2810	64,28	2,28	2810	80,74	2,87
СЧ спец.	3315	94,70	2,85	3315	72,88	2,19	3320	90,47	2,72
ВЧ-70	3268	98,80	3,02	3270	72,22	2,2	3276	92,68	2,82
Бр.ОЦС-6-6-4	3430	106,82	3,11	3440	72,74	2,11	3440	96,14	2,79
Бр.АЖ 9-4	3490	109,83	3,14	3494	73,56	2,1	3496	98,72	2,82
ЛС 62-1,5	3462	112,14	3,23	3464	74,24	2,14	3464	99,94	2,88
ЛМцСКА 58-2-2-1-1	3805	121,42	3,19	3810	78,84	2,06	3810	105,13	2,75
АЛ-25	2410	90,13	3,73	2417	62,28	2,57	2417	80,42	3,32

В качестве рабочих жидкостей, которые одновременно выполняют функции смазочных материалов, были выбраны керосин ТС-1 и дизельное топливо, трибологические свойства которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Трибологические свойства топлив**

Тип топлива	$D_u$ , мм	$P_k$ , Н	$P_c$ , Н	$I_z$ , Н	$E_1 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_2 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_3 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_y \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>
Керосин ТС-1	0,90	490	784	17	0,34	0,07	0,003	0,413
Дизельное топливо ДТ	0,75	617	980	21	0,59	0,09	0,004	0,684

Трибологические свойства гидравлических масел представлены в табл. 3, моторных масел в табл. 4, трансмиссионных масел в табл. 5.

Таблица 3

**Трибологические свойства гидравлических масел**

Тип масел	$D_u$ , мм	$P_k$ , Н	$P_c$ , Н	$I_z$ , Н	$E_1 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_2 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_3 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_y \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>
МПП-10	0,55	710	1960	24	1,5	0,38	0,006	1,886
МГ-15-В	0,5	980	1960	28	1,99	0,44	0,007	2,437
ИПП-30	0,5	980	2450	32	1,99	0,44	0,009	2,439
МГЕ-46В	0,45	980	2450	36	2,73	0,48	0,009	3,219
МГЕ-68В	0,45	980	2450	41	2,73	0,52	0,01	3,26

Таблица 4

**Трибологические свойства моторных масел**

Тип масла	Классификация по API	$D_u$ , мм	$P_k$ , Н	$P_c$ , Н	$I_z$ , Н	$E_1 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_2 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_3 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_y \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>
М-10Г <sub>2к</sub>	CC	0,45	1235	2450	28	2,73	0,47	0,009	3,209
Schell-Ro-tella X	CC	0,45	1235	3087	32	2,73	0,82	0,094	3,644
Schell-Rimula C	CD	0,35	1568	3087	48	5,82	0,96	0,090	3,870
ESSO ULTRA	SL/CD	0,4	1568	3920	59	3,89	0,99	0,012	4,892
М-10ДМ	CD	0,35	1568	3087	49	5,82	0,9	0,11	6,830
Schell-Rimula D	CF/CD	0,35	1568	3087	48	5,82	0,908	0,104	6,832
ESSO ULTRON	SL/CF	0,35	1568	4900	63	5,82	0,950	0,095	6,865
Schell-Rimula X	CF-4	0,32	1235	4900	63	7,62	0,85	0,014	8,484
ESSO ULTRA Turbo Diesel	CF-4	0,31	1568	4900	64	8,39	1,005	0,016	9,411

Таблица 5

**Трибологические свойства трансмиссионных масел**

Тип масла	Классификация по API	$D_u$ , мм	$P_k$ , Н	$P_c$ , Н	$I_z$ , Н	$E_1 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_2 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_3 \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>	$E_y \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>
ТСп-10	GL-4	0,45	1235	6174	76	2,73	0,79	0,12	3,64
ТАп-15В	GL-4	0,45	1235	6174	76	2,73	0,8	0,13	3,66
ТСп-15к	GL-4	0,40	1568	6174	82	3,89	0,795	0,13	4,815
ТСп-14гип	GL-4	0,40	1235	6174	82	3,89	0,802	0,14	4,832
ТАД-17и	GL-5	0,36	1568	7840	89	5,34	0,885	0,114	6,369
Shell-Spirax-AX	GL-5	0,35	1568	7840	92	5,82	0,906	0,200	6,926
Shell-Spirax-GSX	GL-4	0,35	1568	6174	86	5,82	0,945	0,200	6,965
VALVOLIN E	GL-5	0,34	1235	6174	90	6,34	0,937	0,207	7,484
Shell-Spirax-ASX	GL-5	0,32	1568	7840	94	7,62	0,960	0,210	8,79

Как следует из приведенных таблиц, интегральный параметр  $E_y$  изменяется для топлив в пределах  $(0,413 \dots 0,684) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, для гидравлических масел в пределах  $(1,886 \dots 3,26) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, для моторных масел  $(3,209 \dots 9,411) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, для трансмиссионных масел  $(3,64 \dots 8,79) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>.

В табл. 2 - 5 также представлены трибологические характеристики согласно ГОСТ 9490: показатель износа  $D_u$ ; критическая нагрузка  $P_k$ ; нагрузка сваривания  $P_c$  и индекс задира  $I_z$ . Анализ указанных характеристик для моторных масел (табл. 4) показывает, что в зависимости от классификации по API показатель износа  $D_u$  отличается на 31%, критическая нагрузка на  $P_k$  на 37,5 %, нагрузка сваривания на 50 %, индекс задира на 52 %. При этом интегральный показатель трибологических свойств масел отличается на 65%, что подтверждает большую чувствительность  $E_y$  по сравнению с показателями согласно ГОСТ 9490.

Для решения поставленной задачи был спланирован трехфакторный эксперимент.

Первый фактор – трибологические свойства смазочной среды, варьировался на пяти уровнях:

- дизельное топливо,  $E_y = 0,684 \cdot 10^{14}$ , Дж/м<sup>3</sup>;
- гидравлическое масло МГП-10,  $E_y = 1,886 \cdot 10^{14}$ , Дж/м<sup>3</sup>;
- моторное масло М-10Г<sub>2к</sub>,  $E_y = 3,209 \cdot 10^{14}$ , Дж/м<sup>3</sup>;
- моторное масло М-10ДМ,  $E_y = 6,83 \cdot 10^{14}$ , Дж/м<sup>3</sup>;
- моторное масло ESSO ULTRA TURBO Diesel,  $E_y = 9,411 \cdot 10^{14}$ , Дж/м<sup>3</sup>.

Второй фактор – коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в материале подвижного трибоэлемента, варьировался на пяти уровнях:

- сталь 20Х,  $\delta_n = 1945$ ;
- сталь 40Х,  $\delta_n = 2644$ ;
- сталь 38Х2МЮА,  $\delta_n = 2810$ ;
- чугун ВЧ-70,  $\delta_n = 3270$ ;
- чугун СЧ,  $\delta_n = 3315$ .

Третий фактор – коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в материале неподвижного трибоэлемента, также варьировался на пяти уровнях:

- чугун ВЧ-70,  $\delta_n = 3270$ ;
- чугун СЧ,  $\delta_n = 3315$ ;
- бронза Бр. ОЦС 6-6-4,  $\delta_n = 3440$ ;
- бронза Бр. АЖ 9-4,  $\delta_n = 3494$ ;
- латунь ЛМцСКА 58-2-2-1-1,  $\delta_n = 3810$ .

Экспериментальные исследования проводились при фиксированной и постоянной от опыта к опыту шероховатости поверхностей трения обоих трибоэлементов, которая составила:  $Ra = 0,2$  мкм;  $Sm = 0,4$  мм, нагрузка  $N = 1600$  Н, скорость скольжения  $v = 0,5$  м/с. При испытаниях применялась кинематическая схема «кольцо-кольцо» с коэффициентом взаимного перекрытия 0,5, при этом величина меньшей площади трения составила  $F_{mp} = 0,00015$  м<sup>2</sup>.

В качестве функций отклика выбраны два параметра: среднеарифметическое значение скорости изнашивания  $\bar{I}_z$ , м<sup>3</sup>/ч; среднеарифметическое значение коэффициента трения  $\bar{f}_z$ , которые были получены экспериментально по результатам трех повторов в зависимости от значений добротности трибосистемы  $Q$ , которое было получено расчетным путем по выражению (3).

Экспериментальные и расчетные значения перечисленных функций отклика позволили с помощью метода наименьших квадратов получить следующие зависимости:

- для скорости изнашивания:

$$I = 60 \cdot 10^{-10} \exp\left(-\frac{Q}{50 \cdot 10^{16}}\right), \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (5)$$

- для коэффициента трения:

$$f = 0,11 \exp\left(-\frac{Q}{110 \cdot 10^{16}}\right). \quad (6)$$

Графическая интерпретация полученных зависимостей (5) и (6) представлена на рис. 1 и 2.

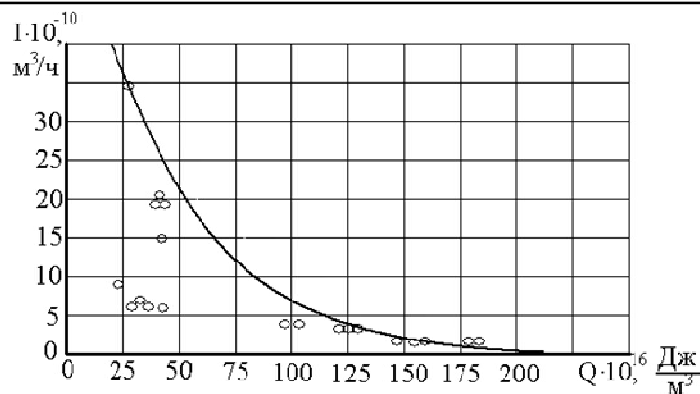


Рис. 1 – Зависимость скорости изнашивания от функции добротности трибосистем  $Q$

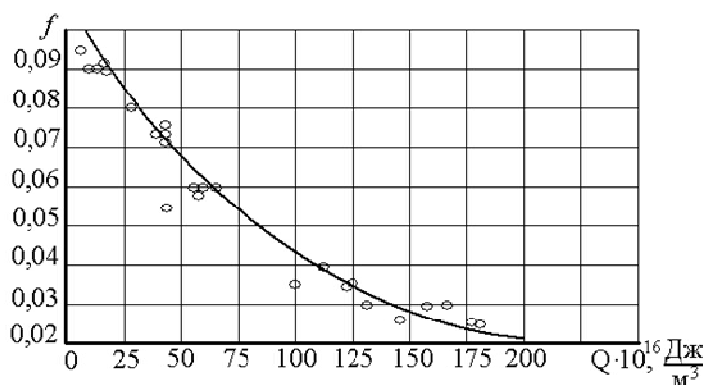


Рис. 2 – Зависимость коэффициента трения от функции добротности трибосистемы  $Q$

Коэффициент корреляции между скоростью изнашивания  $I$  и добротностью трибосистемы  $Q$  составил  $r = 0,88$ , а между коэффициентом трения  $f$  и  $Q$ ,  $r = 0,90$ .

На основании больших значений коэффициентов корреляции можно сделать вывод, что между функцией добротности трибосистемы и аргументами: скоростью изнашивания и коэффициентом трения, существует функциональная связь, которая подчиняется экспоненциальному закону распределения, формулы (5) и (6).

Необходимо отметить, что функция добротности всегда положительное число и теряет физический смысл при  $Q = 0$ , т.е. при  $Q = 0$  трибосистема не существует.

При положительных значениях добротности трибосистемы наибольшее влияние на скорость изнашивания и коэффициент трения характерно для малых значений  $Q$ . При  $Q > 100 \cdot 10^{16}$  Дж/м<sup>3</sup> увеличение значений добротности уже не оказывает большого влияния на скорость изнашивания и коэффициент трения трибосистемы.

Следовательно, проведенный анализ функции добротности трибосистемы позволяет установить границу значения  $Q \geq 100 \cdot 10^{16}$  Дж/м<sup>3</sup>, при превышении которой направления снижения скорости изнашивания и коэффициента трения подбором материалов в трибосистему и смазочной среды к ним становится неэффективным. При таких значениях добротности необходимо разрабатывать и применять другие способы повышения износостойкости и снижения потерь на трение, например, изменение конструкции или технологий изготовления и т. д.

## Выводы

Исследована функция добротности трибосистемы и её влияние на объемную скорость изнашивания и коэффициент трения. На основании анализа большой гаммы конструкционных материалов применяемых в трибосистемах установлено, что величина добротности обратно пропорциональна объемной скорости изнашивания и коэффициенту трения, а функция добротности имеет экспоненциальный характер. Установлено, что при превышении значения добротности более  $100 \cdot 10^{16}$  Дж/м<sup>3</sup> снижение скорости изнашивания и коэффициента трения трибосистемы подбором материалов в трибосистему и смазочной среды к ним становится мало эффективным.

---

**Литература**

1. Войтов В.А., Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистеме. // Проблемы трибологии. – 2015. – № 1. – С. 49 - 57.
2. Войтов В.А., Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 2. Результаты моделирования. // Проблемы трибологии. – 2015. – № 2. – С. 36 - 45.
3. Алексеев Н.М. Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. I. Подповерхностные процессы // Н.М. Алексеев, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, № 5. – С. 773 - 783.
4. Алексеев Н.М. Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. II. Подповерхностные процессы // Н.М. Алексеев, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, № 5. – С. 965 - 974.
5. Алексеев Н.М. Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. III. Микропроцессы механической фрикционной приспособляемости // Н.М. Алексеев, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, № 5. – С. 197 - 205.
6. Буше Н.А. Решенные и переменные задачи по совместимости трибосистем / Н.А. Буше // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 1. – С. 25 - 34.
7. Криштал М.А., Пигузов Ю.В., Головин С.А. Внутреннее трение в металлах и сплавах. – М. : Металлургия, 1964. – 245 с.
8. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. – М. : Металлургия, 1974. – 352 с.
9. Шевеля В.В. Реология износостойкости и совместимости пар трения // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 1. – С. 48 - 63.
10. Шевеля В.В., Трытек А. Реология вязкоупругого фрикционного контакта // Проблемы трибологии. – 2010. – № 4. – С. 6 - 16.
11. Шевеля В.В., Александренко В.П. Трибохимия и реология износостойкости. – Хмельницкий: ХНУ, 2006. – 278 с.
12. Шевеля В.В., Войтов В.А., Суханов М.И., Исаков Д.И. Закономерности изменения внутреннего трения в процессе работы трибосистемы и его учет при выборе совместимых материалов // Трение и износ. – 1995. – Т. 16, №4. – С. 734 - 744.
13. Войтов В.А., Левченко А.В. Интегральный критерий оценки трибологических свойств смазочных материалов на четырехшариковой машине // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 4. – С. 441 - 447.
14. Войтов В. А., Сысенко И.И., Кравцов А.Г. Трибологические свойства моторных масел для двухтактных двигателей внутреннего сгорания на растительной основе // Проблемы трибологии. – 2014. – № 1. – С. 27 - 38.

Поступила в редакцию 04.08.2015



Vojtov V.A., Zaharchenko M.B. **Modeling of processes of friction and wear in tribosystems in the conditions boundary lubrication. Part 3. The quality factor of tribosystem.**

A mathematical model for calculating the wear rate and friction coefficient tribosystems operating under boundary lubrication, which allows you to define resource and mechanical friction losses projected tribosystems without prior experiment was developed. The model takes into account the property of the material compatibility in tribosystem which received definition as Q-factor tribosystem. The results of modeling the wear rate and friction coefficient of various designs tribosystems with the assessment of the adequacy and modeling errors are shown.

**Keywords:** tribosystem, modeling, wear rate, friction force, boundary lubrication, material compatibility, quality factor of tribosystem, the criterion of merit the tribosystem.

### References

1. Vojtov V.A., Zaharchenko M.B. Modelirovanie processov trenija i iznashivaniya v tribosistemah v uslovijah granichnoj smazki. Chast' 1. Raschet skorosti raboty dissipacii v tribosisteme. Problemi tribologii. 2015. № 1. S. 49-57.
2. Vojtov V.A., Zaharchenko M.B. Modelirovanie processov trenija i iznashivaniya v tribosistemah v uslovijah granichnoj smazki. Chast' 2. Rezul'taty modelirovaniya. Problemi tribologii. 2015. № 2. S. 36-45.
3. Alekseev N.M., Bushe N.A. Nekotorye aspekty sovmestimosti materialov pri trenii. I. Podpoverhnostnye processy. Trenie i iznos. 1985. T. 6, № 5. S. 773 – 783.
4. Alekseev N.M., Bushe N.A. Nekotorye aspekty sovmestimosti materialov pri trenii. II. Podpoverhnostnye processy. Trenie i iznos. 1985. T. 6, № 5. S. 965 – 974.
5. Alekseev N.M., Bushe N.A. Nekotorye aspekty sovmestimosti materialov pri trenii. III. Mikroprocessy mehanicheskoy frikcionnoj prisposoblivaemosti. Trenie i iznos. 1987. T. 8, № 5. S. 197 – 205.
6. Bushe N.A. Reshennye i peremennye zadachi po sovmestimosti tribosistem. Trenie i iznos. 1993. T. 14, № 1.– S. 25 – 34.
7. Krishtal M.A., Piguzov Ju.V., Golovin S.A. Vnutrennee trenie v metallah i splavah. M. Metallurgija, 1964. 245 s.
8. Postnikov V.S. Vnutrennee trenie v metallah. M. Metallurgija, 1974. 352 s.
9. Shevelja V.V. Reologija iznosostojkosti i sovmestimosti par trenija. Trenie i iznos. 1993. T. 14, № 1. S. 48-63.
10. Shevelja V.V., Trytek A. Reologija vizkoupругogo frikcionnogo kontakta. Problemy tribologii. 2010. № 4. S.6-16.
11. Shevelja V.V., Oleksandrenko V.P. Tribohimija i reologija iznosostojkosti. Hmel'nickij HNU, 2006. 278 s.
12. Shevelja V.V., Vojtov V.A., Suhanov M.I., Isakov D.I. Zakonomernosti izmenenija vnutrennego trenija v processe raboty tribosistemy i ego uchet pri vybore sovmestimyh materialov. Trenie i iznos. 1995. T. 16, №4. S. 734-744.
13. Vojtov V.A., Levchenko A.V. Integral'nyj kriterij ocenki tribologicheskikh svojstv smazocznyh materialov na chetyrehsharikovoj mashine. Trenie i iznos. 2001. T. 22, №4. S. 441-447.
14. Vojtov V. A., Sysenko I.I., Kravcov A.G. Tribologicheskie svojstva motornyh masel dlja dvuh'taknyh dvigatelej vnutrennego sgoranija na rastitel'noj osnove. Problemi tribologii. 2014. № 1. S. 27 – 38.