

**Войтов В.А.,  
Бекиров А.Ш.,  
Войтов А.В.**

Харьковский национальный технический  
университет с/х им. П. Василенко,  
г. Харьков, Украина  
**E-mail:** vavoitovva@gmail.com

## КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ДОБРОТНОСТИ ТРИБОСИСТЕМ И ЕГО СВЯЗЬ С ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

*УДК 621.891*

Получило дальнейшее развитие определение добротности трибосистемы, которое в отличие от известного учитывает геометрические размеры и кинематическую схему трибосистемы, температуропроводность материалов и скорость распространения деформации в поверхностных слоях материалов трибоземлентов в процессе их контактного взаимодействия. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлена взаимосвязь между величиной добротности, скоростью изнашивания и коэффициентом трения в процессе приработки. Показано, что увеличение добротности снижает указанные выше параметры, а сам критерий является мерой потенциальной возможности трибосистемы приспосабливаться (адаптироваться) к условиям эксплуатации.

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

### **Актуальность проблемы**

Понятие добротности трибосистемы было введено авторами работы [1] и определено как способность сопрягаемых материалов в трибосистеме (смазочная среда и реологические свойства структуры материалов подвижного и неподвижного трибоземлентов) превращать работу сил трения в тепловую энергию, тем самым препятствовать запасам энергии в поверхностных и подповерхностных слоях трибоземлентов, 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.

Как следует из приведенного определения на добротность трибосистемы оказывают влияние процессы формирования поверхностных слоев при трении, трибологические свойства смазочной среды, а также конструкция трибосистемы, реологические свойства структуры сопряженных материалов и характер прикладываемой нагрузки к трибосистеме.

Для прогнозирования износостойкости трибосистем, а также для расчета скорости изнашивания и потерь на трение, необходимо иметь количественный параметр оценки добротности трибосистемы, который является многопараметрической функцией процессов, протекающих в поверхностных и подповерхностных слоях материалов и зависит от характера прикладываемой нагрузки.

### **Анализ публикаций, посвященных данной проблеме**

Проблеме совместимости материалов, принадлежат работы [2 - 4]. В данных работах определено понятие совместимости материалов, которое заключается в способности контактирующих материалов приспосабливаться 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 [5], 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 [6, 7]. Внутреннее трение характеризует способность структуры материала к рассеянию энергии колебаний, связанной с плотностью, концентрацией и подвижностью дислокаций и точечных дефектов.

В работах, выполненных под руководством В.В. Шевели [8 - 10], 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 [11]. В данной работе приводится параметр – коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в структуре материала, который характеризует величину внутреннего трения и методика его измерения.

Авторами работы [1] вводится параметр для количественной оценки добротности трибосистем:

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

где  $E_y$  – трибологические свойства смазочной среды, Дж/м<sup>3</sup>, определяются согласно работы [1];

$\delta_n$ ,  $\delta_n$  – коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в структуре материала подвижного и неподвижного трибоэлементов, безразмерные величины, определяются согласно работы [1].

Как следует из формулы (1) добротность трибосистемы – это размерная величина, которая учитывает трибологические свойства смазочной среды (наличие поверхностно-активных и химически-активных веществ в смазочной среде), а также внутреннее трение структуры материалов, из которых изготовлены подвижный и неподвижный трибоэлемент. При этом, формула (1) не учитывает геометрические размеры (конструкцию) трибосистемы, теплопроводность материалов из которых изготовлены трибоэлементы и условия нагружения.

Анализируя представленный материал, можно сделать вывод, что разработка критерия, который бы более полно учитывал перечисленные выше факторы, является актуальной задачей.

### Цель исследований

Разработать критерий оценки добротности трибосистемы и оценить его влияние на скорость изнашивания, коэффициент трения и время приработки.

### Методический подход в проведении исследований

В основу методического подхода при дополнении критерия добротности трибосистемы используем параметры, которые учитывают конструкцию трибосистемы, теплопроводность материалов и условия нагружения.

Параметр, который учитывает геометрические размеры трибосистемы, коэффициент формы  $K_\phi$ , согласно работы [12] рассчитывается по формуле:

$$K_\phi = \frac{F_{\min}}{V_n + \frac{V_n \cdot F_{\max}}{F_{\min}}}, \quad 1/\text{м} \quad (2)$$

где  $F_{\min}$  – площадь трения неподвижного трибоэлемента, м<sup>2</sup>;

$V_n$  – объем материала, находящийся под площадью трения подвижного трибоэлемента, м<sup>3</sup>;

$V_n$  – объем материала, находящийся под площадью трения неподвижного трибоэлемента, м<sup>3</sup>;

$F_{\max}$  – площадь трения подвижного трибоэлемента, м<sup>2</sup>.

Значимыми параметрами также являются: теплопроводность материалов трибоэлементов  $a$ , м<sup>2</sup>/с и скорость деформации в данных материалах  $\dot{\epsilon}$ , 1/с.

Учитывая то, что в трибосистеме одновременно участвуют в работе подвижный и неподвижный трибоэлемент, используем понятия приведенных значений.

Приведенный коэффициент теплопроводности материалов трибосистемы определим по выражению:

$$a_{np} = \frac{2a_n \cdot a_n}{a_n + a_n}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (3)$$

где  $a_n$  и  $a_n$  – коэффициенты теплопроводности материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов, справочная величина, м<sup>2</sup>/с.

Приведенную скорость деформации в подповерхностных слоях материалов трибосистемы, которая зависит от условий нагружения, определим по выражению:

$$\dot{\varepsilon}_{np} = \frac{2\dot{\varepsilon}_n \cdot \dot{\varepsilon}_n}{\dot{\varepsilon}_n + \dot{\varepsilon}_n}, 1/c \quad (4)$$

где  $\dot{\varepsilon}_n$  и  $\dot{\varepsilon}_n$  – скорость деформации материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов, 1/с.

На основании работы [13]:

$$\dot{\varepsilon}_n = 75(1 + \mu_n)(0,86 - 1,05\mu_n) \frac{\sigma_{фнк} \cdot v_{скл}}{E_n \cdot d_{фнк}}, \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_n = 75(1 + \mu_n)(0,86 - 1,05\mu_n) \frac{\sigma_{фнк} \cdot v_{скл}}{E_n \cdot d_{фнк}}, \quad )$$

где  $\mu_n$  и  $\mu_n$  – коэффициенты Пуассона материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов, справочная величина;

$\sigma_{фнк}$  – напряжение на фактическом пятне контакта, рассчитывается по формуле представленной в работе [13], Па;

$v_{скл}$  – скорость скольжения, м/с;

$E_n$  и  $E_n$  модуль упругости материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов, справочная величина, Па;

$d_{фнк}$  – диаметр фактического пятна контакта, м<sup>2</sup>, рассчитывается по формуле представленной в работе [13], Па.

С учетом изложенных дополнений добротность трибосистемы можно оценить по выражению:

$$Q = \frac{K_\phi^2 \cdot a_{np} \cdot E_y}{\dot{\varepsilon}_{np}} \cdot \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}}, \text{ Дж/м}^3 \quad (7)$$

Приведенное выражение добротности трибосистемы, в отличие от известного (1), учитывает:

- геометрические размеры трибосистемы, которые влияют на время приработки;
- температуропроводность материалов трибоэлементов, которая влияет на уровень температурных напряжений в поверхностных слоях;
- скорость распространения деформации в поверхностных слоях материала трибоэлементов, которая зависит от условий нагружения.

Перечисленные отличия оказывают влияние на время приработки трибосистем, а следовательно, на динамику переходных процессов в трибосистемах.

### Результаты исследования

Зависимости изменения величины добротности от изменения коэффициента формы трибосистемы  $K_\phi$ , реологических свойств структуры сопряженных материалов  $\delta_n$   $\delta_n$  их температуропроводности  $a_{np}$  и трибологических свойств смазочной среды  $E_y$ , представлены на рис. 1. Это параметры, увеличение которых прямо пропорционально влияет на величину добротности, за исключением коэффициента формы.

Как следует из анализа кривых, наибольшее влияние на добротность оказывает конструкция трибосистемы, формула (2), которая учитывает величины площадей трения у неподвижного и подвижного трибоэлементов их отношение и величины объемов материала, расположенными под площадями трения. Далее, по степени убывания, трибологические свойства смазочной среды, температуропроводность материалов трибоэлементов и реологические свойства структуры материалов.

Величина скорости деформации в поверхностных слоях материалов трибоэлементов  $\dot{\varepsilon}_{np}$ , формула (4), обратно пропорциональна величине добротности. Параметры, которые входят в выражения скорости деформации материалов неподвижного и подвижного трибоэлементов, определяются выражениями (5) и (6), влияние которых представлено на рис. 2.

Как следует из анализа полученных зависимостей, наибольшее влияние на добротность трибосистемы оказывает величина скорости скольжения, а затем, по степени убывания шероховатость поверхностей трения и нагрузка.

Проведенные теоретические исследования позволяют выполнить рейтинг влияния указанных выше параметров на добротность трибосистем. При этом, диапазон изменения параметров выбран в пределах функционирования трибосистем в режимах нормального изнашивания, т.е. без повреждаемости. Отношение максимального значения добротности к минимальному, при изменении одного из параметров, позволяет определить во сколько раз изменяется показатель добротности в заданных пределах моделирования.

Максимальное влияние на добротность оказывают два параметра: коэффициент формы и скорость скольжения. При этом коэффициент формы стоит на первом месте – 9,28 раз, а скорость скольжения на втором – 9,23 раза.

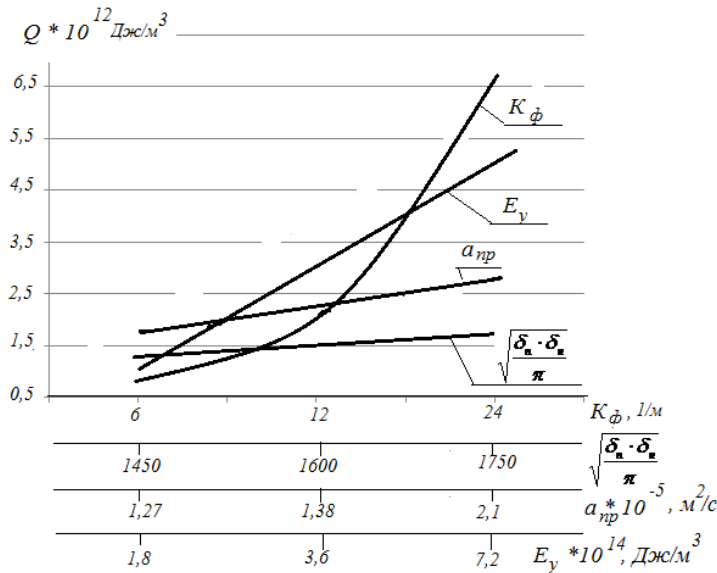


Рис. 1 – Зависимости изменения величины добротности трибосистем от изменения коэффициента формы, реологических свойств материалов трибоэлементов их температуропроводности и трибологических свойств смазочной среды

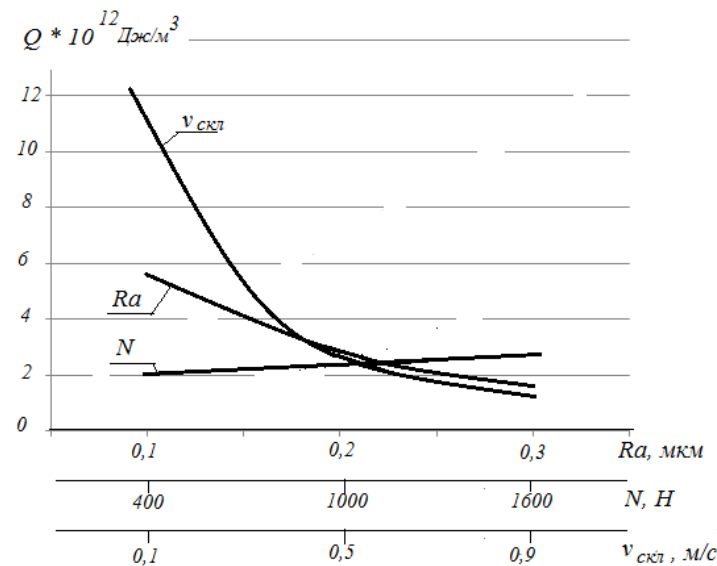


Рис. 2 – Зависимости изменения величины добротности трибосистем от изменения шероховатости поверхностей трения, нагрузки и скорости скольжения

На третьем месте трибологические свойства смазочной среды – 5,55 раз, на четвертом – шероховатость поверхностей, 4,83 раза, на пятом – температуропроводность материалов трибоэлементов – 1,55 раз. На шестом месте по значимости, стоит нагрузка – 1,5 раза, и на последнем, седьмом месте, реологические свойства структуры сопряженных материалов – 1,28 раза.

На основании выполненного рейтинга можно обосновать параметры, которые влияют на добротность, а следовательно, и на время переходного процесса в трибосистемах. Это скорость скольжения, шероховатость поверхностей трения и смазочная среда. Коэффициент формы трибосистемы в процессе приработки не изменяется. Это величина, которая определяется при проектировании и является константой в процессе приработки и эксплуатации трибосистемы.

Величина шероховатости также формируется в процессе изготовления трибосистем, однако в процессе приработки и эксплуатации изменяется и приходит к равновесной величине.

Трибологические свойства смазочной среды также не изменяются в процессе приработки, однако изменяются в процессе эксплуатации.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что процессом приработки можно управлять, изменяя  $\dot{\epsilon}_{np}$ , формула (4), в сторону уменьшения. Для этого необходимо уменьшить скорость скольжения  $v_{скл}$  и нагрузку  $N$ . Анализ зависимостей представленных на рис. 2 позволяет утверждать, что изменение нагрузки  $N$  незначительно влияет на величину добротности, а скорость скольжения  $v_{скл}$  является эффективным параметром, изменяя который можно управлять процессом приработки.

Моделирование изменения скорости изнашивания и коэффициента трения для различных трибосистем позволило получить теоретические зависимости изменения указанных параметров от величины добротности  $Q$ .

На рис.3 представлены теоретические кривые (сплошные линии) изменения максимального значения скорости изнашивания во время приработки  $I_{max}$  и установившегося значения скорости изнашивания после завершения приработки  $I_{уст}$  для трибосистем с различной добротностью. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что увеличение добротности трибосистемы снижает величины скорости изнашивания, как в процессе приработки, так и после завершения приработки на установившемся режиме.

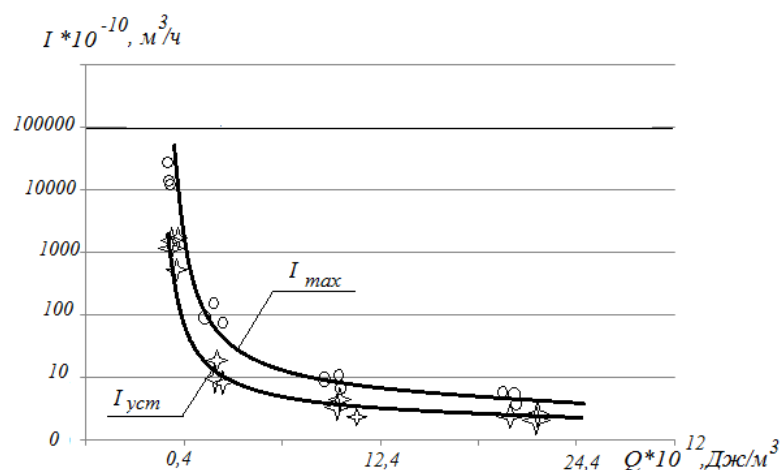


Рис. 3 – Зависимость изменения максимального значения скорости изнашивания в процессе приработки и установившегося, после завершения приработки, от величины добротности трибосистем

Аналогичные исследования были выполнены для коэффициента трения, рис. 4, что также позволяет сделать вывод о наличии функциональной связи между максимальными и установившимися значениями коэффициента трения в процессе приработки и величиной добротности трибосистем.

Полученные теоретические кривые были проверены экспериментально. На рис.3 и рис.4 нанесены экспериментальные точки для трибосистем с различными значениями добротности. Например, для высших кинематических пар, где контакт осуществляется по линии с коэффициентом взаимного перекрытия меньше 0,1 и сочетании материалов: сталь 40X + сталь 40X, добротность трибосистемы  $Q \leq 0,4 \cdot 10^{12}$  Дж/м<sup>3</sup>. Для низших кинематических пар, где контакт осуществляется по площади с коэффициентом взаимного перекрытия больше 0,5 и сочетании материалов: сталь 40X + Бр.АЖ 9-4, добротность трибосистемы  $Q = (12 \dots 24) \cdot 10^{12}$  Дж/м<sup>3</sup>.

Расчет относительной ошибки моделирования между теоретическими и экспериментальными значениями скорости изнашивания позволяет утверждать, что относительная ошибка составила:

$e_t = 7,2 \dots 8,3 \%$ ,  $e_f = 7,9 \dots 9,3 \%$ , что является удовлетворительным результатом при моделировании процессов трения и изнашивания.

Результаты моделирования и их экспериментальная проверка функциональной связи между временем приработки  $t_{np}$  и добротностью трибосистемы  $Q$  представлена на рис. 5.

Трибосистема с значениями  $Q \leq 0,4 \cdot 10^{12}$  Дж/м<sup>3</sup>, а это в основном высшие кинематические пары, имеют минимальное время приработки по коэффициенту трения и одновременно, максимальное время по скорости изнашивания. При переходе к низшим кинематическим парам  $Q > 0,4 \cdot 10^{12}$  Дж/м<sup>3</sup>, где контакт осуществляется по площади, меньшее время приработки соответствует параметру скорости изнашивания, а большее – коэффициенту трения. При увеличении добротности трибосистем время приработки по параметру коэффициента трения значительно уменьшается, однако при этом незначительно увеличивается время приработки по параметру скорости изнашивания.

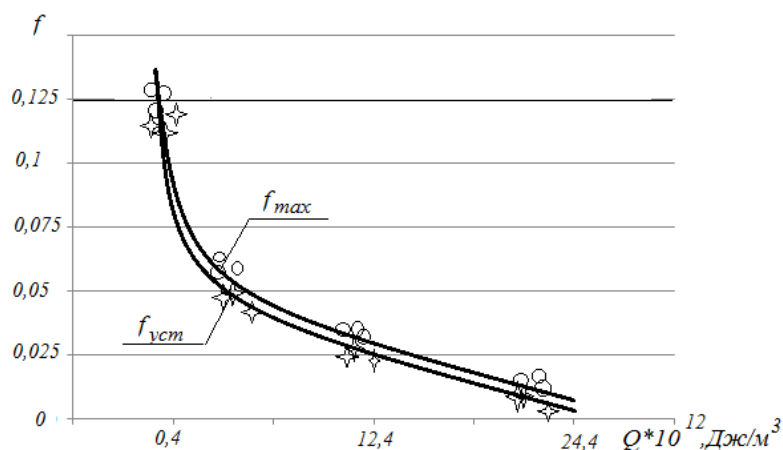


Рис. 4 – Зависимость изменения максимального значения коэффициента трения в процессе приработки и установившегося, после завершения приработки, от величины добротности трибосистем

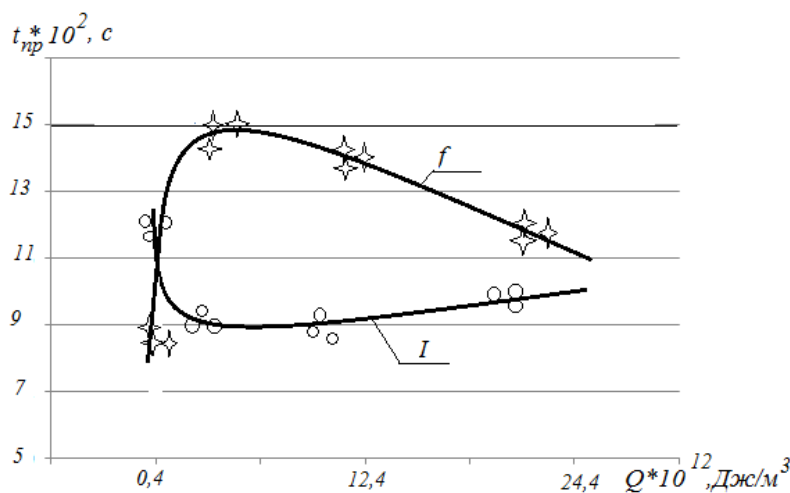


Рис. 5 – Зависимости изменения времени приработки по параметрам скорости изнашивания и коэффициента трения от величины добротности трибосистем

Как следует из полученных результатов, при определенном значении добротности  $Q = 30 \cdot 10^{12}$  Дж/м<sup>3</sup> время приработки по двум параметрам будет одинаковым.

Расчет относительной ошибки моделирования времени приработки позволяет утверждать, что  $e_t = 8,2 \dots 9,4 \%$ .

Представленные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать вывод, что величина добротности трибосистем  $Q$  может выступать мерою потенциальной возможности трибосистемы приспосабливаться (адаптироваться) к условиям эксплуатации обеспечивая максимальный ресурс.

### Выводы

1. Получило дальнейшее развитие определение добротности трибосистемы, которое в отличие от известного учитывает геометрические размеры и кинематическую схему трибосистемы, температуропроводность материалов и скорость распространения деформации в поверхностных слоях материалов трибоземленов в процессе их контактного взаимодействия. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлена взаимосвязь между величиною добротности, скоростью изнашивания и коэффициентом трения в процессе приработки. Показано, что увеличение добротности снижает указанные выше параметры, а сам критерий  $Q$  является мерою потенциальной возможности трибосистемы приспосабливаться (адаптироваться) к условиям эксплуатации.

2. Установлена взаимосвязь между временем приработки и величиною добротности. Показано, что процессом приработки можно управлять. Для уменьшения времени приработки необходимо уменьшать скорость скольжения во время переходного процесса и увеличивать трибологические свойства смазочной среды.

### Литература

1. Войтов В.А., Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 3. Добротность трибосистемы // Проблемы трибології. – 2015. – № 3. – С. 45-53.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Буше Н.А. Решенные и переменные задачи по совместимости трибосистем / Н.А. Буше // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 1. – С. 25 - 34.
6. Кристалл М.А., Пигузов Ю.В., Головин С.А. Внутреннее трение в металлах и сплавах. – М. : Металлургия, 1964. – 245 с.
7. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. – М. : Металлургия, 1974. – 352 с.
8. Шевеля В.В. Реология износостойкости и совместимости пар трения // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 1. – С. 48-63.
9. Шевеля В.В., Трытек А. Реология визкоупругого фрикционного контакта // Проблемы трибології. – 2010. – № 4. – С. 6-16.
10. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохимия и реология износостойкости. – Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278 с.
11. 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.
12. Войтов В.А. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин / В.А. Войтов, О.М. Яхно, Ф.Х. Аби Сааб. – К.: Нац. техн. ун-т «Киев. политехн. ин-т», 1999. – 190 с.
13. 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 трибології. – 2015. – № 1. – С. 49-57.

Надійшла в редакцію 31.05.2018

---

**Vojtov V.A., Bekirov A.SH., Voitov A.V. Criteria for evaluation of tribosystem practices and its communication with tribological characteristics.**

The definition of the quality factor of the tribosystem was further developed, which, unlike the known, takes into account the geometric dimensions and kinematic scheme of the tribosystem, the thermal diffusivity of materials and the rate of propagation of deformation in the surface layers of the triboelement materials in the course of their contact interaction. Theoretical and experimental studies have established a relationship between the Q-factor, the wear rate and the friction coefficient in the process of running-in. It is shown that an increase in the quality factor reduces the above parameters, and the criterion itself is a measure of the potential ability of a tribosystem to adapt (adapt) to operating conditions.

**Key words:** tribosystem, modeling, wear rate, frictional force, material compatibility, the quality of the tribosystem, the criterion for the quality factor of the tribosystem.

**References**

1. Vojtov V.A., Zakharchenko M.B. Modelirovaniye protsessov treniya i iznashivaniya v tribosistemakh v usloviyakh granichnoy smazki. Chast' 3. Dobrotnost' tribosistemy. Problemi tribologii. 2015. - № 3. S. 45-53.
2. Nekotorye aspekty sovmestimosti materialov pri trenii. I. Podpoverhnostnyye processy. N.M. Alekseev, N.A. Bushe. Trenie i iznos. 1985. T. 6, № 5. S. 773 – 783.
3. Nekotorye aspekty sovmestimosti materialov pri trenii. II. Podpoverhnostnyye processy. N.M. Alekseev, N.A. Bushe. Trenie i iznos. 1985. T. 6, № 5. S. 965 – 974.
4. Nekotorye aspekty sovmestimosti materialov pri trenii. III. Mikroprocessy mehanicheskoy frikcionnoj prisposablivaemosti. N.M. Alekseev, N.A. Bushe. Trenie i iznos. 1987. T. 8, № 5. S. 197 – 205.
5. Bushe N.A. Reshennyye i peremennyye zadachi po sovmestimosti tribosistem. Trenie i iznos. 1993. T. 14, № 1. S. 25 – 34.
6. Krishtal M.A., Piguzov Ju.V., Golovin S.A. Vnutrennee trenie v metallah i splavah. M. Metallurgiya, 1964. 245 s.
7. Postnikov V.S. Vnutrennee trenie v metallah. M. Metallurgiya, 1974. 352 s.
8. Shevelja V.V. Reologiya iznosostojkosti i sovmestimosti par trenija. Trenie i iznos. 1993. T. 14, № 1. S. 48-63.
9. Shevelja V.V., Trytek A. Reologiya vizkouprugogo frikcionnogo kontakta. Problemy tribologii. 2010. № 4. S.6-16.
10. Shevelja V.V., Oleksandrenko V.P. Tribohimija i reologija iznosostojkosti. Hmel'nickij: HNU, 2006. 278 s.
11. 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.
12. Printsipy konstruktivnoy iznosostojkosti uzlov treniya gidromashin. V.A. Voytov, O.M. Yakhno, F.KH. Abi Saab. K. Nats. tekhn. un-t «Kiyev. politekhn. in-t», 1999. 190 s.
13. Vojtov V.A., Zakharchenko M.B. Modelirovaniye protsessov treniya iznashivaniya v tribosistemakh v usloviyakh granichnoy smazki. Chast' 1. Raschet skorosti raboty dissipatsii v tribosistemakh. Problemi tribologii. 2015. № 1. S. 49-57.