

**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 2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

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.

Актуальность проблемы

Исследования данной работы являются продолжением статьи [1] и направлены на разработку математической модели расчета скорости изнашивания и коэффициента трения в трибосистемах, работающих в условиях граничной смазки. Принципиальным отличием такой методики от существующих является то, что полностью исключается эксперимент, лабораторный или стендовый, который имеет цель – определить величины коэффициентов, входящих в расчетные уравнения. В разработанных моделях, которые являются системным обобщением полученных расчетных зависимостей, все необходимые коэффициенты определяются расчетным путем. В моделях учитывается совместимость материалов в трибосистеме между собой и со смазочной средой.

Применение таких моделей позволит на этапе проектирования трибосистем новых машин определять скорость изнашивания и коэффициент трения на установившемся режиме эксплуатации.

Анализ публикаций, посвященных данной проблеме

При разработке моделей по расчету износа и прогнозированию ресурса используют в основном вероятностные подходы [2 - 6]. Построение таких моделей базируется на расчетах характеристик контакта и методах описания шероховатости поверхности [7].

В работе [8] дается анализ современного состояния методов расчета износа и прогнозирования ресурса и делается вывод, что аналитические методы не позволяют учитывать динамику изменения параметров режимов работы контакта, а перспективными представляются численные методы.

В работе [9] предложено описывать износ массивом векторов вероятностей величин износа дискретных точек поверхности, называемых «трибоэлементами». Трибоэлемент моделируется нестационарными случайными функциями марковского типа, а износ оценивается математическим ожиданием вероятности нахождения трибоэлементов в некотором состоянии. Форма изношенной поверхности определяется с помощью кубической сплайн-аппроксимации математических ожиданий износа в точках расположения трибоэлементов.

Авторами работ [10 - 12] разработана методика математического моделирования переходных процессов в трибосистемах, в основу которой положен математический аппарат теории автоматического регулирования и теории идентификации динамических объектов. Авторами указанных выше работ получены дифференциальные уравнения для моделирования скорости изнашивания и силы трения на переходных режимах.

Однако применение полученных дифференциальных уравнений требует проведения параметрической идентификации трибосистемы, которая имеет целью определение коэффициентов, входящих в уравнения. В работах [11, 12] представлены зависимости для их определения, из анализа которых следует, что для выполнения моделирования переходных процессов необходим предварительный лабораторный тестовый эксперимент или испытания на турных образцах.

Как следует из изложенного выше, обязательное наличие тестового эксперимента перед моделированием снижает ценность разработанной методики.

Анализируя накопленный опыт при решении подобных задач можно сделать вывод, что разработка математических моделей и методов расчета скорости изнашивания и коэффициента трения без предварительных тестовых экспериментов является актуальной задачей.

Цель исследований

Разработать математическую модель расчета скорости изнашивания и коэффициента трения в трибосистемах, работающих в условиях граничной смазки, с учетом совместимости материалов, выполнить моделирование и оценить адекватность полученных результатов экспериментальным данным и ошибку моделирования.

Методический подход в проведении исследований

В основу методического подхода при разработке математической модели положена функциональная взаимосвязь между объемной скоростью изнашивания, коэффициентом трения и скоростью работы диссипации в подвижном и неподвижном трибоэлементах, а также в трибосистеме в целом. Расчет скорости работы диссипации представлен в предыдущей статье [1].

Скорость работы диссипации является энергетическим параметром и характеризует скорость процессов превращения механической энергии в тепловую с учетом объема материала каждого из трибоэлементов, участвующего в деформации.

Результаты моделирования

Получение выражения для расчета и последующего моделирования изменения коэффициента трения следует из физического смысла этого параметра, который определяет потери на трение.

Произведение нагрузки N на скорость скольжения $v_{ск}$ определяет мощность, которая «подводит-ся» к трибосистеме:

$$W = N \cdot v_{ск}, \text{ Н}\cdot\text{м/с} = \text{Вт}. \quad (1)$$

Расчет скорости работы диссипации для подвижного W_n и неподвижного W_n трибоэлементов представлен в предыдущей статье [1], что позволяет определить мощность, которая «рассеивается» трибосистемой и переходит в другие виды энергии (тепло), W_{TP} .

Следовательно, коэффициент трения, который определяет потери на трение в трибосистеме, можно рассчитать по следующей зависимости:

$$f = \frac{W_{TP}}{W} = \frac{W_n + W_n}{N \cdot v_{ск}}. \quad (2)$$

Результаты моделирования изменения коэффициента трения от различных параметров представлены на рис. 1 - 4.

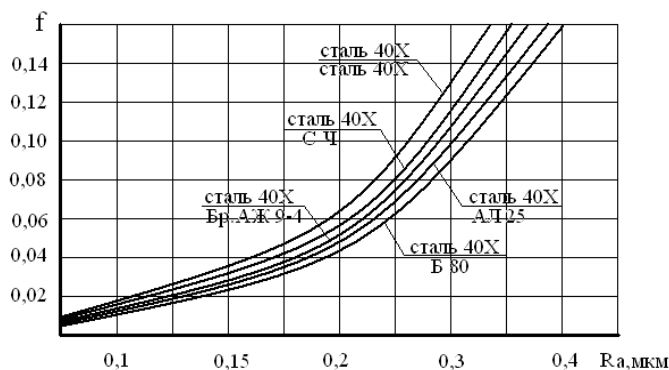


Рис. 1 – Зависимости изменения коэффициента трения от шероховатости поверхностей трения Ra для различных сочетаний материалов в трибосистеме

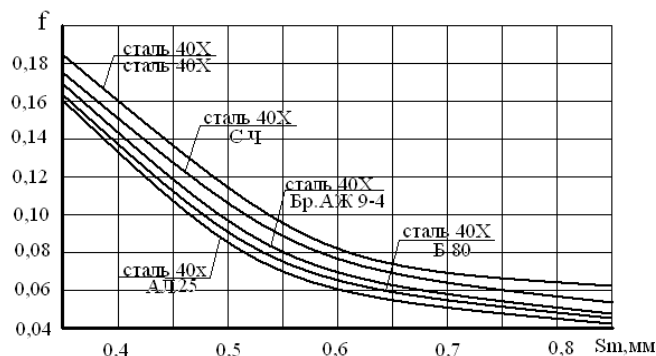


Рис. 2 – Зависимости изменения коэффициента трения от величины шага неровности поверхностей трения Sm для различных сочетаний материалов в трибосистеме

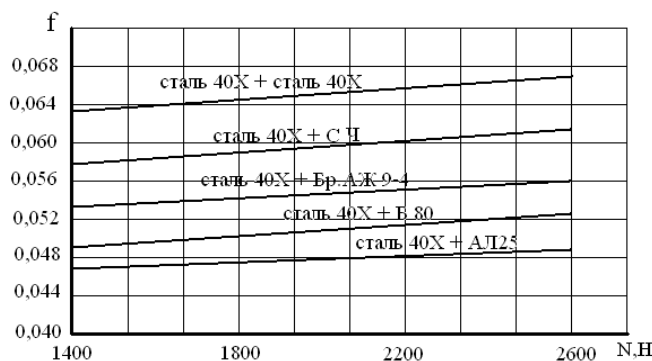


Рис. 3 – Зависимости изменения коэффициента трения от нагрузки для различных сочетаний материалов в трибосистеме

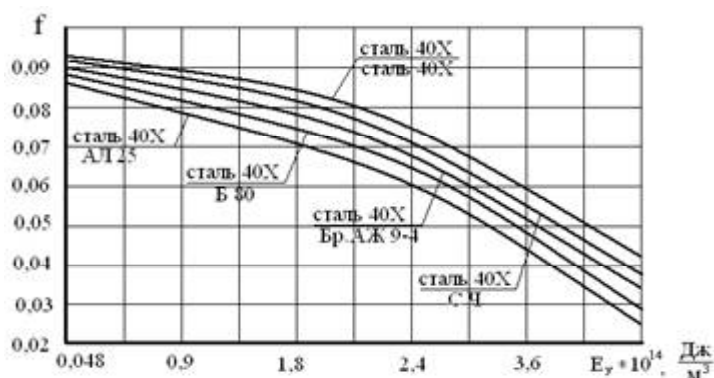


Рис. 4 – Зависимости изменения коэффициента трения от трибологических свойств смазочной среды для различных сочетаний материалов в трибосистеме

Анализ степени влияния параметров шероховатости Ra и Sm на коэффициент трения f для различных сочетаний материалов в трибосистеме, рис. 1 и 2, позволяет утверждать, что средний шаг неровностей Sm приводит к большему изменению коэффициента трения, чем параметра Ra . Сравнивая характер зависимостей и величины изменения коэффициента трения для одних и тех же условий моделирования, можно сделать вывод, что параметры шероховатостей поверхностей трения влияют на изменения коэффициента трения в первую очередь ($f = 0,02 \dots 0,18$), рис. 1 - 2, затем трибологические свойства смазочной среды ($f = 0,02 \dots 0,09$), рис. 4, и в последнюю очередь нагрузка ($f = 0,046 \dots 0,067$), рис. 3.

Как следует из выражения (2) входными факторами для моделирования изменения коэффициента трения являются следующие параметры:

- значения шероховатости поверхностей трения по движного и неподвижного трибоэлементов Ra и Sm ;

- физико-механические свойства материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов: E_n , E_n , ν_n , ν_n ;

- трибологические свойства смазочной среды E_s ;

- особенности конструкции трибосистемы, меньшая площадь трения одного из трибоэлементов, F_{\min} ;

- нагрузка на трибосистему N и скорость скольжения $\nu_{ск}$.

Зависимость для расчета и последующего моделирования изменения скорости изнашивания I получим на основании функциональной зависимости между I и W_{TR} :

$$I = Q^{-1} W_{TR}, \quad (3)$$

где Q^{-1} – коэффициент пропорциональности.

Запишем выражение (3) 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_{TR} 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. Например, в работе [13] обратную величину внутреннего трения структуры материалов принято называть механической добротностью.

По аналогии с терминами, применяемыми в электротехнике, добротность колебательного контура Q , из последовательно соединенных элементов сопротивления R , индуктивности L и емкости C выражается зависимостью:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4)$$

Добротность электрического контура показывает, во сколько раз запасы энергии в контуре больше, чем потери энергии за один период колебаний. Чем выше запасы энергии и меньше потери, тем выше добротность электрического колебательного контура.

По аналогии с добротностью электрического контура можно записать выражение для определения добротности трибосистемы:

$$Q^{-1} = \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_n \cdot \delta_n)}}, \text{ м}^3/\text{Дж}, \quad (5)$$

где δ_n и δ_n – логарифмический 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 (5) коэффициент пропорциональности Q^{-1} между скоростью изнашивания и скоростью работы диссипации в трибосистеме обратно пропорционален трибологическим свойствам смазочной среды и производству внутреннего трения структуры материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов. Чем выше значение E_y , δ_n и δ_n , тем меньше значение Q^{-1} , а, следовательно, и меньше скорость изнашивания, формула (3).

На основании формулы (5) можно получить выражение для оценки добротности трибосистемы:

$$Q = E_y \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}}, \text{ Дж/м}^3. \quad (6)$$

Как следует из формулы (6) 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 также 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 (6) присутствует в первой степени, а внутреннее трение структуры материалов в степени 1/2.

Физический смысл добротности для трибосистемы имеет противоположный смысл, чем для колебательного контура в электротехнике.

На основании большого массива экспериментальных исследований различных конструкций трибосистем с различным сочетанием материалов в трибосистеме и смазочной среды, методом наименьших квадратов получена следующая зависимость:

$$I = 6 \cdot 10^{-10} \exp \left(0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_n \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right), \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (7)$$

Выражение (7) является конечной формулой для моделирования изменения объемной скорости изнашивания в зависимости от следующих входных факторов:

- шероховатости поверхностей трения Ra и Sm подвижного и неподвижного трибоэлементов;

- физико - механических свойств материалов, из которых изготовлены трибоэлементы (модуль упругости и коэффициент Пуассона);
 - трибологических свойств смазочной среды E_y ;
 - особенности конструкции трибосистемы, меньшая площадь трения одного из трибоэлементов,
 F_{\min} ;

- нагрузки на трибосистему N и скорости скольжения $v_{ск}$;
 - реологических свойств структуры сопряженных материалов в трибосистеме, которые учитываются логарифмическим коэффициентом затухания ультразвуковых колебаний в материале.

На основании полученного выражения (7), с учетом неравномерности загрузки трибоэлементов в некоторых конструкциях трибосистем, на основании полученных значений скорости работы диссипации для подвижного трибоэлемента W_n и неподвижного трибоэлемента $W_{н}$, которые приведены в предыдущей работе [1], можно записать выражения для моделирования скорости изнашивания:

- подвижного трибоэлемента:

$$I_n = \left[6 \cdot 10^{-10} \exp \left(0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_n \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right) \right] \frac{W_n}{W_{TP}}, \text{ м}^3/\text{ч}; \quad (8)$$

- для неподвижного трибоэлемента:

$$I_n = \left[6 \cdot 10^{-10} \exp \left(0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{(\delta_n \cdot \delta_n)}} \cdot W_{TP} \right) \right] \frac{W_{н}}{W_{TP}}, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (9)$$

Используя выражение (7) проведено моделирование изменения скорости изнашивания трибосистем от различных входных факторов, рис. 5 - 10.

Результаты моделирования при изменении нагрузки N и параметров шероховатости Ra и Sm представлены на рис. 5 и 6. Из зависимостей следует, что увеличение Ra более 0,4 мкм и уменьшение Sm менее чем 0,6 мм приводит к нелинейному увеличению скорости изнашивания. Это позволяет сделать вывод, что при проведении лабораторных испытаний, а также при изготовлении трибоэлементов машин и механизмов контролю шероховатости поверхности трения необходимо уделять особое внимание.

Разница в параметрах шероховатости поверхности трения от опыта к опыту или при изготовлении деталей приведет к разбросу результатов испытаний или времени приработки, а, следовательно, и ресурса.

Анализ величины скорости изнашивания при одной и той же нагрузке позволяет утверждать, что Ra и Sm являются весомыми факторами, влияющими на скорость изнашивания, при этом влияние Sm больше, чем влияние Ra .

Степень влияния трибологических свойств смазочной среды на скорость изнашивания при изменении нагрузки и скорости скольжения представлена на рис. 7 и 8. Анализ величин скорости изнашивания и их сравнение с предыдущими (при изменении Ra и Sm) позволяет сделать вывод, что смазочная среда также является весомым фактором, как и параметры шероховатости поверхностей трения. Уменьшение трибологических свойств смазочной среды со значений $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$ Дж/м³ до значений $E_y = 0,9 \cdot 10^{14}$ Дж/м³ увеличивает скорость изнашивания в 3 и более раз.

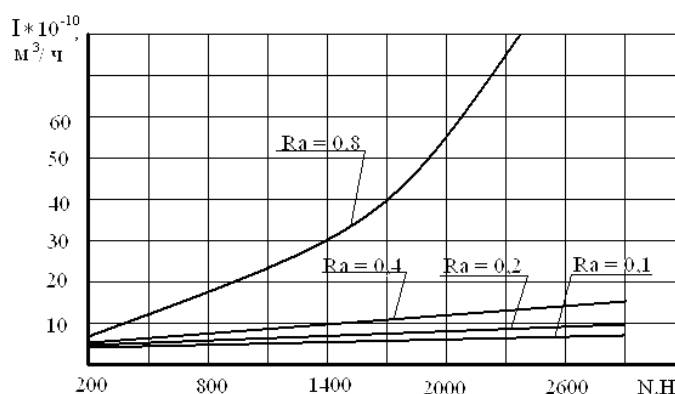


Рис. 5 – Зависимости скорости изнашивания от нагрузки и параметра шероховатости поверхности Ra

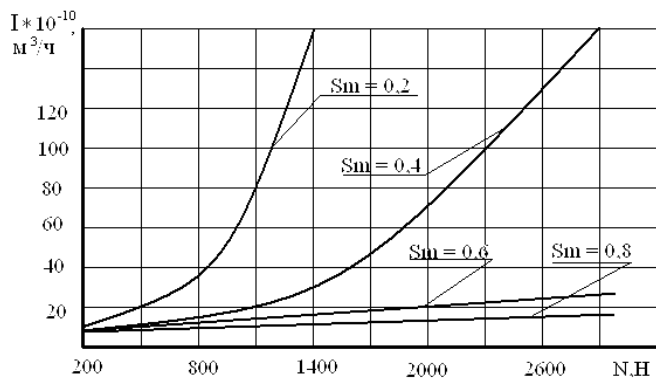


Рис. 6 – Зависимости скорости изнашивания от нагрузки и параметра шероховатости поверхности S_m

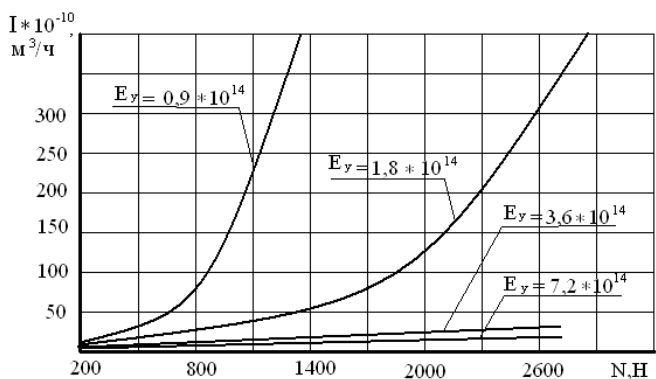


Рис. 7 – Зависимости скорости изнашивания от нагрузки и трибологических свойств смазочной среды E_y

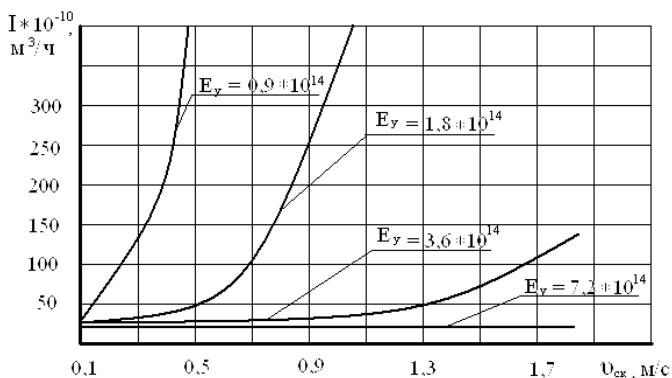


Рис. 8 – Зависимости скорости изнашивания от скорости скольжения и трибологических свойств смазочной среды E_y

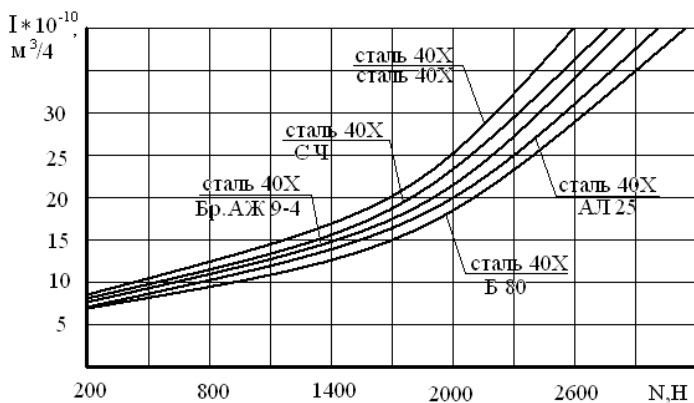


Рис. 9 – Зависимость скорости изнашивания от нагрузки для различных материалов в трибосистеме

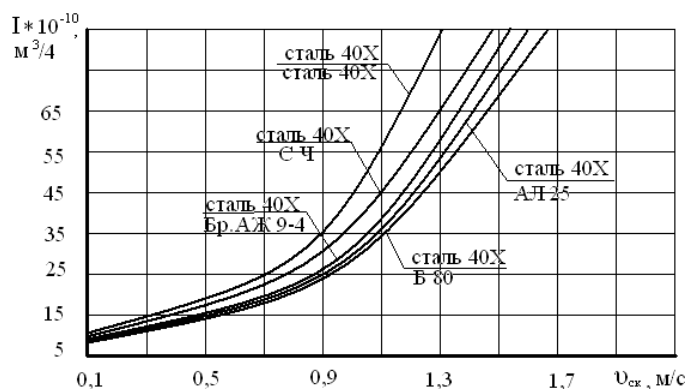


Рис. 10 – Зависимости скорости изнашивания от скорости скольжения для различных материалов в трибосистеме

Зависимости, представленные на рис. 5 - 8, построены для трибосистемы сталь 40X+Бр.АЖ 9-4.

Характер изменения скорости изнашивания при изменении структуры сопряженных материалов в трибосистеме представлены на рис. 9 и 10.

Зависимости также носят нелинейный характер. Из анализа величины скорости изнашивания при одинаковой нагрузке и скорости скольжения следует, что сочетания материалов в трибосистеме приводит к изменению скорости изнашивания в 1,3 - 1,6 раз, что ставит данный фактор на третье место по значимости.

Экспериментальные исследования скорости изнашивания I , м³/ч и коэффициента трения f проводили в виде трехфакторного эксперимента. Целью данных исследований явилось подтвердить адекватность результатов математического моделирования экспериментальным данным с расчетом ошибки моделирования.

План-матрица охватывает различные конструкции трибосистем: высшие кинематические схемы контакта «диск-диск», $K\phi = 0,5$ 1/м, и низшие кинематические схемы «диск-колодка», $K\phi = 1,52$ 1/м и «кольцо - кольцо», $K\phi = 1,52 \dots 16,3$ 1/м.

Для трибосистемы «диск - диск» с коэффициентом формы $K\phi = 0,5$ 1/м меньшая площадь трения составила $F_{min} = 0,0000204$ м². Для трибосистемы «диск-колодка», для которой $K\phi = 1,52$ 1/м, $F_{min} = 0,000196$ м². Для трибосистемы «кольцо - кольцо», при значениях $K\phi = 8,18$ 1/м, $F_{min} = 0,00015$ м², при значениях $K\phi = 16,31$ 1/м, $F_{min} = 0,00024$ м².

Нагрузочно - скоростной фактор учитывали параметром $\frac{N \cdot V}{K\phi}$, где: нагрузка N , Н; скорость скольжения V , м/с и коэффициент формы трибосистемы $K\phi$; 1/м. Фактор характеризует мощность, подведенную к трибосистеме, отнесенную к геометрическим размерам трибосистемы, Дж · м/с.

Поверхности трения подвижных и неподвижных трибоэлементов перед испытаниями имели одинаковую шероховатость: $Ra = 0,4$ мкм; $Sm = 0,6$ мм, которая воспроизводилась шлифованием перед каждым опытом.

Сочетание материалов в указанных выше трибосистемах определялось следующими вариантами: сталь 40X+сталь 40X, $(\delta_n \cdot \delta_n) = 6990736$; сталь 40X+серый чугун, $(\delta_n \cdot \delta_n) = 8764860$; сталь 40X+Бр.АЖ 9-4, $(\delta_n \cdot \delta_n) = 9238136$; СЧ+СЧ, $(\delta_n \cdot \delta_n) = 10989225$; СЧ+Бр.АЖ 9-4, $(\delta_n \cdot \delta_n) = 11582610$.

В качестве смазочных материалов выбраны следующие рабочие жидкости и масла: дизельное топливо ДТ, $E_y = 0,684 \cdot 10^{14}$ Дж/м³; гидравлическая жидкость МГП-10, $E_y = 1,886 \cdot 10^{14}$ Дж/м³; масло для гидростатических приводов МГЕ-46В, $E_y = 3,219 \cdot 10^{14}$ Дж/м³; трансмиссионное масло ТАД-17и, $E_y = 6,369 \cdot 10^{14}$ Дж/м³; моторное масло ESSO CF-4, $E_y = 9,411 \cdot 10^{14}$ Дж/м³.

В процессе проведения эксперимента методом искусственных баз регистрировали суммарный линейный износ подвижного и неподвижного трибоэлементов и с учетом площади трения рассчитывали объемную скорость изнашивания I_{Σ} , м³/ч.

Коэффициент трения f рассчитывали по измеренным значениям момента трения на установленном режиме (после завершения приработки).

Анализ теоретических и экспериментальных поверхностей отклика при различных значениях исследуемых факторов: $\frac{N \cdot V}{K_f}$; $(\delta_n \cdot \delta_H)$; E_y , позволяет сделать вывод, что при больших значениях

скорости изнашивания, а также коэффициента трения теоретические (расчетные) значения меньше экспериментальных. При малых значениях скорости изнашивания и коэффициента трения, наоборот, теоретически полученные значения больше, чем экспериментальные. При этом ошибка моделирования скорости изнашивания не превышает 14,03 %, что можно признать удовлетворительным при моделировании процессов трения и изнашивания. Ошибка моделирования коэффициента трения не превышает 12,8 %.

Ошибку моделирования, т.е. разницу между расчетным (I_T, f_T) и среднеарифметическим экспериментальным (I_3, f_3) значениями в каждой серии экспериментов определяли как приведенную погрешность, отнесенную к экспериментальному значению:

$$\Delta_I = \left| \frac{I_3 - I_T}{I_3} \right| \cdot 100\%, \quad (10)$$

$$\Delta_f = \left| \frac{f_3 - f_T}{f_3} \right| \cdot 100\% \quad (11)$$

Адекватность теоретических кривых полученных по выражениям (2) и (7) экспериментальным данным была проверена по F-критерию Фишера. Для этого были рассчитаны дисперсии адекватности и воспроизводимости.

Сравнения расчетного значения F и табличного $F_{табл}$ позволяет сделать вывод, что полученные теоретические зависимости (2) и (7) адекватно отображают изменение скорости изнашивания и коэффициента трения трибосистем в условиях граничной смазки и учитывают, в отличие от полученных ранее, структуру сопряженных материалов и трибологические свойства смазочной (рабочей) среды.

Выводы

1. Разработана математическая модель расчета коэффициента трения трибосистемы, работающей в условиях граничной смазки. Теоретическим путем установлено, что на величину коэффициента трения наибольшее влияние оказывают параметры шероховатости поверхностей трения, затем трибологические свойства смазочной среды и в последнюю очередь – физико-механические свойства материалов и эксплуатационные параметры.

2. Разработана математическая модель расчета скорости изнашивания подвижного и неподвижного трибоэлементов и трибосистемы в целом, работающей в условиях граничной смазки. Входными параметрами для расчета являются: шероховатость поверхностей трения; физико-механические свойства материалов трибоэлементов; трибологические свойства смазочной среды; особенности конструкции трибосистемы (величина меньшей площади трения); реологические свойства структуры сопряженных материалов; эксплуатационные параметры – нагрузка и скорость скольжения. Теоретическим путем установлена степень влияния перечисленных выше параметров на скорость изнашивания. Параметры шероховатости поверхностей трения являются самыми весомыми факторами, затем, по степени убывания, трибологические свойства смазочной среды и в последнюю очередь – сочетание материалов и эксплуатационные параметры.

3. Получило дальнейшее развитие понятие совместимости материалов в трибосистеме – добротность трибосистемы. Добротность трибосистемы – это размерная величина Дж/м³, которая характеризует способность сопряженных 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. Величина добротности обратно пропорциональна величине скорости изнашивания и коэффициенту трения трибосистемы.

4. Выполнена экспериментальная оценка адекватности разработанных математических моделей результатам эксперимента. С помощью критерия Фишера выполнена оценка адекватности результатов математического моделирования экспериментальным данным, показано, что результаты моделирования скорости изнашивания и коэффициента трения адекватны результатам эксперимента с доверительной ве-

роятностью 0,9. Рассчитана ошибка моделирования по каждой серии экспериментов, показано, что при моделировании скорости изнашивания ошибка не превышает 14,03 %, при моделировании коэффициента трения – 12,8 %, что можно признать удовлетворительным при исследовании процессов трения и изнашивания.

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. Кузьменко А.Г. Влияние статистической неоднородности, размеров и кинематических условий на износ поверхностей трения // Трение и износ. – 1985. – Т.6, № 3. – С. 432-441.
3. Тартаковский И.Б. Корреляционное уравнение износа // Вестник машиностроения. – 1968. – № 2. – С. 17-24.
4. Бендерский А.М. Вероятностная модель износа детали // Надежность и контроль качества. – 1970. – № 5. – С. 13-24.
5. Костецкий Б.И., Стрельников В.П., Таций В.Г. Марковская модель износа и прогнозирование долговечности изнашиваемых деталей // Проблемы трения и изнашивания. – 1976. – № 10. – С. 10-15.
6. Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
7. Семенюк Н.Ф. Средняя высота микровыступов шероховатой поверхности и плотность пятен контакта при контактировании шероховатой поверхности с гладкой // Трение и износ. – 1986. – Т.7, №1. – С. 85-91.
8. Сорокатый Р.В. Анализ современного состояния методов расчета износа и прогнозирования ресурса // Проблемы трибологии. – 2007. – №1. – С. 23-36.
9. Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов. – Хмельницкий: ХНУ, 2009. – 242 с.
10. Войтов В.А., Исаков Д.И. Моделирование граничного трения в трибосистемах. III. Математическое моделирование нестационарных процессов при граничном трении // Трение и износ. – 1996. – Т.17, №5. – С. 598-605.
11. Войтов В.А., Козырь А. Г. Моделирование переходных процессов в трибосистемах. Часть 1. Критерии оценки переходных процессов // Проблемы трибологии. – 2013. – № 3. – С. 114 – 122.
12. Войтов В.А., Козырь А. Г., Сысенко И.И. Моделирование переходных процессов в трибосистемах. Часть 2. Методика моделирования переходных процессов // Проблемы трибологии. – 2013. – № 4. – С. 25 – 32
13. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. – М.: Металлургия, 1974. – 352 с.

Поступила в редакцию 09.04.2015

Vojtov V.A., Zaharchenko M.B. Modeling of processes of friction and wear in tribosystems in the conditions boundary lubrication. Part 2. The simulation results.

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 експеримента 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.

Key words: tribosystem, modeling, wear rate, friction force, boundary lubrication, material compatibility, quality factor 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. Kuz'menko A.G. Vlijanie statisticheskoj neodnorodnosti, razmerov i kinematicheskikh uslovij na iznos poverhnostej trenija. Trenie i iznos. 1985. T.6, № 3. S. 432-441.
3. Tartakovskij I.B. Korreljacionnoe uravnenie iznosa. Vestnik mashinostroenija. 1968. № 2. S. 17-24.
4. Benderskij A.M. Verojatnostnaja model' iznosa detali. Nadezhnost' i kontrol' kachestva. 1970. № 5. S. 13-24.
5. Kosteckij B.I., Strel'nikov V.P., Tacij V.G. Markovskaja model' iznosa i prognozirovanie dolgovechnosti iznashivaemyh detalej. Problemy trenija i iznashivaniya. 1976. № 10. S. 10-15.
6. Bogdanoff Dzh., Kozin F. Verojatnostnye modeli nakoplenija povrezhdenij: Per. s angl. M.: Mir, 1989. 344 s.
7. Semenjuk N.F. Srednjaja vysota mikrovystupov sherohovatoj poverhnosti i plotnost' pjaten kontakta pri kontaktirovanii sherohovatoj poverhnosti s gladkoj. Trenie i iznos. 1986. T.7, №1. S. 85-91.
8. Sorokatyj R.V. Analiz sovremennogo sostojanija metodov rascheta iznosa i prognozirovanija resursa. Problemi tribologii. 2007. №1. S. 23-36.
9. Sorokatyj R.V. Metod triboelementov. Hmel'nickij: HNU, 2009. 242 s.
10. Vojtov V.A., Isakov D.I. Modelirovanie granichnogo trenija v tribosistemah. III. Matematicheskoe modelirovanie nestacionarnykh processov pri granichnom trenii. Trenie i iznos. 1996. T.17, №5. S. 598-605.
11. Vojtov V.A., Kozyr' A. G. Modelirovanie perehodnykh processov v tribosistemah. Chast' 1. Kriterii ocenki perehodnykh processov. Problemi tribologii. 2013. № 3. S. 114– 122.
12. Vojtov V.A., Kozyr' A. G., Sysenko I.I. Modelirovanie perehodnykh processov v tribosistemah. Chast' 2. Metodika modelirovanija perehodnykh processov. Problemi tribologii. 2013. № 4. S. 25 – 32
13. Postnikov V.S. Vnutrennee trenie v metallah. M.: Metallurgija, 1974. 352 s.