

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ ТРИБОСИСТЕМ ЭКСТРУДЕРОВ ЕВ-350 И ЕВ-350М

**Виктор Войтов, Богдан Цымбал**

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
имени Петра Василенко*

*Ул. Алчевских, 44, Харьков, Украина. E-mail: ndch\_khntusg@mail.ru*

**Viktor Voytov, Bogdan Tsymbal**

*Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture  
Str. Alchevskih, 44, Kharkov, Ukraine. E-mail: ndch\_khntusg@mail.ru*

**Аннотация.** Представлены физическое моделирование процессов трения и изнашивания трибосистем экструдера ЕВ-350 и ЕВ-350М.

Модели при физическом моделировании процесса трения и изнашивания имеют особенность – одинаковую природу с натурным объектом (натурой), то есть имеют одинаковые (уменьшенные в масштабе) трибосистемы, материалы, из которых они изготовлены, а так же рабочую среду. Модель отличается от природы, не только своими масштабными размерами, но и искусственно созданными условиями эксплуатации. При лабораторных испытаниях создавались более сложные условия, такие как абразивность, уровень активной кислотности и нагрузки, которые необходимы для уменьшения времени испытаний.

Получены зависимости силы трения и скорости изнашивания для натурной трибосистемы по результатам исследований на модельных трибосистемах в лабораторных условиях. Основными преимуществами использования метода физического моделирования является уменьшение расхода и времени, которые связаны с исследованием трибологических характеристик тех или иных трибосистем.

Получены уравнения и критерии, которые учитывают масштабные коэффициенты и с помощью которых был сделан переход от модельных испытаний в лабораторных условиях к натурным, с последующим расчетом зависимостей силы трения и скорости изнашивания. С помощью критериальных уравнений был спрогнозирован ресурс натурных трибосистем по результатам лабораторных исследований их моделей и исследований влияния абразивной, кислотной, щелочной среды (агрессивной) на трибосистемы и подобраны совместимые материалы.

**Ключевые слова:** трибосистема, физическое моделирование, натура, модель, совместимые материалы, износ, процесс трения, сила трения, скорость изнашивания масштабные коэффициенты, теория подобия, абразивность, кислотность.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При разработке новых конструкций трибосистем экструдеров, исследовании влияния уровня активной кислотности, абразивности растительного сырья, из которого производятся топливные брикеты и нагрузки, возникает необходимость определения триботехнических характеристик натурных трибосистем с целью прогнозирования ресурса.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Методика физического моделирования [1-4], подробно рассмотрена и освещена в работах [5-8].

Изучению механизмов изнашивания шнековых экструдеров посвящены работы [9-12], а фильер [13-16]. Основным достижением ученых стало определение факторов, влияющих на процесс изнашивания, создание классификации основных видов и причин изнашивания, определения негативного влияния изнашивания на изменение основных характеристик работы оборудования.

Благодаря методике физического моделирования и критериям подобия, авторы работы [17] определили ресурс агрегата в целом, а авторами работы [18] было получено критерий подобия эффективности заряда.

Авторами работы [19], были проанализированы основные виды изнашивания.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С помощью физического моделирования, процессов трения и изнашивания – исследовать влияние абразивности и кислотности на скорость изнашивания, силу трения, ресурс натурных трибосистем экструдера ЕВ-350 та ЕВ-350М, а также определить их ресурс.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для того, чтобы рассчитать скорость изнашивания и силу трения натурных трибосистем по результатам лабораторных исследований их уменьшенных моделей, был применён критериальный подход и использованы выражения (4.3) и (4.4), которые были определены автором работы [1].

Для того, чтобы уменьшить количество факторов были объединены в один параметр  $A_{нег}$ ,  $кг^2/м^6$  величины, характеризующие активную кислотность  $Q$  и абразивность  $A_{абр}$ :

$$A_{нег} = Q \cdot A_{абр} \quad (1)$$

Физический смысл величины  $A_{нег}$  является количество негативных факторов в единице объема сырья или продукта.

Перечень параметров и их размерности, которые были использованы при моделировании трения в условиях граничной смазки приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Определяющие параметры трения в условиях граничной смазки и их размерности  
**Table 1.** Defining parameters of friction under the conditions of boundary lubrication and their dimensions

Параметр	Размерность в системе	
	СИ	MLT
Нагрузка, $P$	Н	$M^1 L^1 T^{-2}$
Скорость скольжения, $v$	м/с	$M^0 L^1 T^{-1}$
Масштабный фактор пары трения, $k_\phi$	1/м	$M^0 L^{-1} T^0$
Свойства (структура) соединенных материалов, $\alpha_{см}$	Дб/м	$M L T$
Абразивность сырья или продукта, $a_{абр.}$	кг/м <sup>3</sup>	$M^1 L^{-3} T^0$
Кислотность сырья или продукта, $Q$	кг/м <sup>3</sup>	$M^1 L^{-3} T^0$
Скорость изнашивания, $I$	м/с	$M^0 L^1 T^{-1}$
Сила трения, $F_{тр.}$	Н	$M^1 L^1 T^{-2}$

В соответствии со второй теоремой подобия ( $\pi$ -теоремой) любое уравнение физического процесса, записанное в определенной системе единиц, может быть приведено в виде функциональных зависимостей между критериями подобия [1]:

$$F(\pi_i) = 0, \tag{2}$$

где:  $\pi_i$  – критерии подобия, характеризующие физический процесс.

Причем, число критериев подобия ( $i$ ) меньше числа параметров, характеризующих процесс на число независимых переменных. Число независимых переменных определяется на основе анализа размерностей величин.

В соответствии с правилами получения критериев подобия методом анализа размерностей в количестве единиц измерения выбраны: длина –  $L$ , м; масса –  $M$ , кг время –  $T$ , с. Базисные переменные в выбранной системе единиц измерения можно использовать следующие сочетания параметров процесса:  $W$  – характеризует нагрузки трибосистемы с учетом геометрических размеров, имеет размерность  $кг \cdot м^3 / с^3$ ,  $\alpha_{см}$  – характеризует совместимость материалов в трибосистеме, имеет размерность  $1/м$ ,  $A_{нег.}$   $кг^2 / м^6$ . В число параметров не включаются исходные параметры трибосистем, по которым выполняется моделирование.

О независимости базисных параметров свидетельствует неравенство нулю базисного определителя, составленного из степеней размерностей указанных величин:

$$D_0 = A_{нег.} \begin{vmatrix} L & M & T \\ W & 3 & 1 & -3 \\ -6 & 2 & 0 \\ \alpha_{см} & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -6. \tag{3}$$

С базовыми параметрами  $W$ ,  $\alpha_{см}$ ,  $A_{нег.}$  связывают другие параметры, которые входят в описание процессов  $I$ ,  $F_{тр.}$ . получив критерии подобия. Для определения формы записи критериев подобия необходимо знать значения определителей:

– для критерия скорости изнашивания  $I$ :

$$\begin{vmatrix} L & M & T \\ I & 1 & 0 & -1 \\ A_{нег.} & -6 & 2 & 0 \\ \alpha_{см} & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -2;$$

$$\begin{vmatrix} L & M & T \\ W & 3 & 1 & -3 \\ I & 1 & 0 & -1 \\ \alpha_{см} & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 1;$$

$$\begin{vmatrix} L & M & T \\ W & 3 & 1 & -3 \\ A_{нег.} & -6 & 2 & 0 \\ I & 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} = -6. \tag{4}$$

– для критерия силы трения  $F_{тр.}$ :

$$\begin{vmatrix} L & M & T \\ F_{тр.} & 1 & 1 & -2 \\ A_{нег.} & -6 & 2 & 0 \\ \alpha_{см} & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -4;$$

$$\begin{vmatrix} L & M & T \\ W & 3 & 1 & -3 \\ A_{нег.} & -6 & 2 & 0 \\ F_{тр.} & -1 & 1 & -2 \end{vmatrix} = 0;$$

$$\begin{vmatrix} L & M & T \\ W & 3 & 1 & -3 \\ F_{тр.} & 1 & 1 & -2 \\ \alpha_{см} & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -1. \tag{5}$$

По правилам записи формул критерия подобия [1] получим:

– критерий скорости изнашивания:

$$\pi_1 = \frac{I \cdot A_{абр.}^{1/6} \cdot Q^{1/6} \cdot k_\phi^{1/3}}{P^{1/3} \cdot v^{1/3} \cdot \alpha_{см}^1}. \tag{6}$$

– критерий силы трения:

$$\pi_{F_{тр.}} = \frac{F_{тр.} \cdot k_\phi^{2/3} \cdot \alpha_{см}^0}{A_{абр.}^{1/6} \cdot P^{2/3} \cdot Q^{1/6} \cdot g^{2/3}}. \tag{7}$$

Первая теорема подобия теории подобия и моделирования определяет равенство критериев подобия в подобных явлениях. В том случае, если приведенный выше вывод критериев подобия физического моделирования трения в условиях граничной смазки были приведены корректно, следует ожидать, выполнение равенств для получения критериев скорости изнашивания и критериев силы трения:

$$(\pi_i)_n = (\pi_i)_m, \tag{8}$$

где: « $n$ » и « $m$ » индексы природы и модели.

Проведём проверку данного предположения. Для этого запишем в обе части допущенных равенств (8) в развернутом виде, причем в правой части каждого уравнения параметры модели выразим через параметры природы:

– для критерия скорости изнашивания:

$$\frac{I_m \cdot A_{абр.м}^{1/6} \cdot Q_m^{1/6} \cdot k_{\phi.м}^{1/3}}{P_m^{1/3} \cdot g_m^{1/3} \cdot \alpha_{см.м}^1} = \frac{I_n \cdot A_{абр.н}^{1/6} \cdot Q_n^{1/6} \cdot k_{\phi.н}^{1/3}}{P_n^{1/3} \cdot g_n^{1/3} \cdot \alpha_{см.н}^1}. \tag{9}$$

– для критерия силы трения:

$$\frac{F_{тр.м} \cdot k_{ф.м}^{2/3} \cdot \alpha_{вт.м}^0}{A_{абр.м}^{1/6} \cdot P_m^{2/3} \cdot Q_m^{1/6} \cdot g_m^{2/3}} = \quad (10)$$

$$= \frac{F_{тр.н} \cdot k_{ф.н}^{2/3} \cdot \alpha_{вт.н}^0}{A_{абр.н}^{1/6} \cdot P_n^{2/3} \cdot Q_n^{1/6} \cdot g_n^{2/3}}$$

Учитывая первую теорему подобия моделирования, когда будут равны определяющие критерии подобия в модели и природы, можно получить параметры натурной трибосистемы с помощью параметров модельной:

– для скорости изнашивания природы:

$$I_n = I_m \left(\frac{P_n}{P_m}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{g_n}{g_m}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{k_{ф.н}}{k_{ф.м}}\right)^{1/3} \times \quad (11)$$

$$\times \left(\frac{\alpha_{вт.м}}{\alpha_{вт.н}}\right)^1 \cdot \left(\frac{A_{абр.м}}{A_{абр.н}}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{Q_m}{Q_n}\right)^{1/6}$$

– для силы трения природы:

$$F_{тр.н} = F_{тр.м} \left(\frac{P_n}{P_m}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{g_n}{g_m}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{k_{ф.н}}{k_{ф.м}}\right)^{2/3} \times \quad (12)$$

$$\times \left(\frac{\alpha_{вт.м}}{\alpha_{вт.н}}\right)^0 \cdot \left(\frac{A_{абр.м}}{A_{абр.н}}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{Q_m}{Q_n}\right)^{1/6}$$

Учитывая, что структуры материалов натуральных и модельных трибосистем являются одинаковыми, то части выражений (11), (12)  $\left(\frac{\alpha_{вт.м}}{\alpha_{вт.н}}\right)$  равны еди-

нице. Тогда выражения для нахождения силы трения и скорости изнашивания главных трибосистем экструдера EB-350 и EB-350M можно получить с помощью выражений:

$$I_n = I_m \cdot K_I; \quad (13)$$

$$F_{тр.н} = F_{тр.м} \cdot K_{F_T}; \quad (14)$$

где:  $I_m$  та  $F_{тр.м}$  – скорость изнашивания и сила трения, полученные экспериментально на модели;  $K$  – коэффициент подобия, учитывающий изменения  $v$ ,  $P$ ,  $k_{ф}$  в модели и натуре.

Коэффициент подобия для скорости изнашивания:

$$K_I = \left(\frac{P_n}{P_m}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{g_n}{g_m}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{k_{ф.н}}{k_{ф.м}}\right)^{1/3} \times \quad (15)$$

$$\times \left(\frac{\alpha_{вт.м}}{\alpha_{вт.н}}\right)^1 \cdot \left(\frac{A_{абр.м}}{A_{абр.н}}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{Q_m}{Q_n}\right)^{1/6}$$

Коэффициент подобия для силы трения:

$$K_{F_{тр.}} = \left(\frac{P_n}{P_m}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{g_n}{g_m}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{k_{ф.н}}{k_{ф.м}}\right)^{2/3} \times \quad (16)$$

$$\times \left(\frac{\alpha_{вт.м}}{\alpha_{вт.н}}\right)^0 \cdot \left(\frac{A_{абр.м}}{A_{абр.н}}\right)^{1/6} \cdot \left(\frac{Q_m}{Q_n}\right)^{1/6}$$

Значения коэффициентов  $K_I$  для определения скорости изнашивания модельных трибосистем представлены в табл. 2 и коэффициентов  $K_{F_{тр.}}$  для определения силы трения – табл. 3.

**Таблица 2.** Коэффициенты подобия для расчета скорости изнашивания натуральных трибосистем экструдера EB-350 и EB-350M

**Table 2.** Similarity coefficient for calculating wear rate of full-scale tribosystem of extrusion machines EB-350 and EB-350M

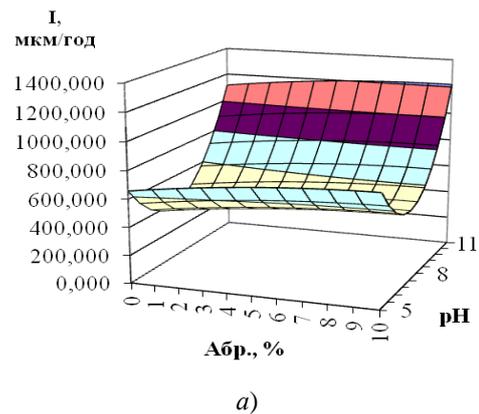
Трибосистемы экструдера EB-350			Трибосистема экструдера EB-350M
«наконечник фильера №5»	«хвостовик фильера №4»	«шнек ма- лый – фильеры №1, 2, 3»	«шнек кони- ческий – фильеры №1, 2, 3»
2,6	3,52	4,29	3,16

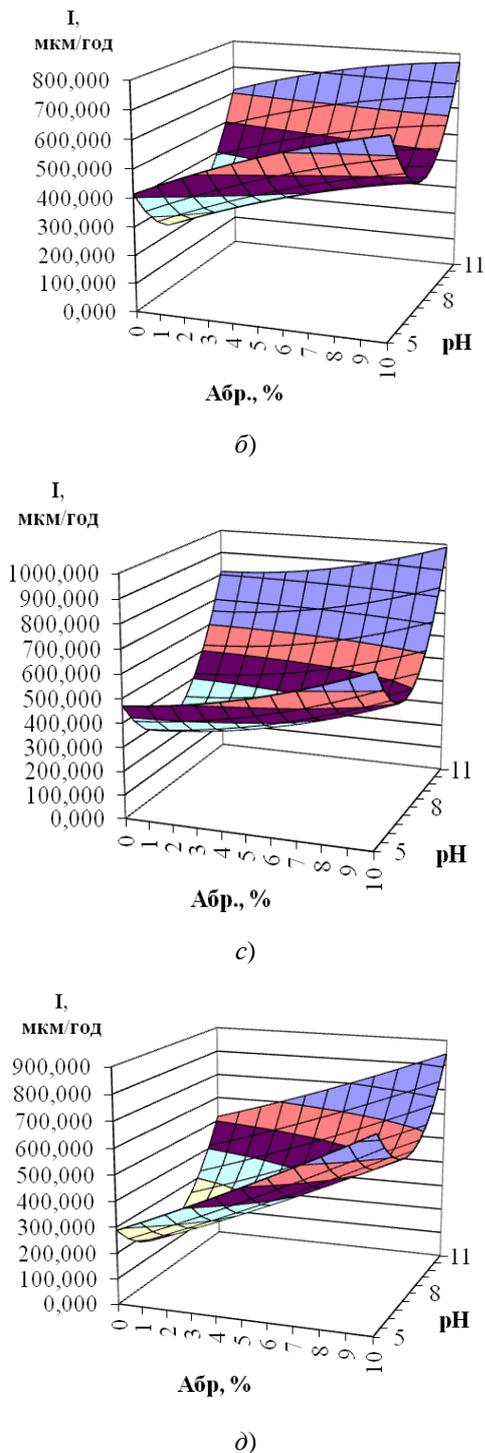
**Таблица 3.** Коэффициент сходства для расчета силы трения натуральных трибосистем экструдера EB-350 и EB-350M

**Table 3.** Similarity coefficient for calculating friction force of full-scale tribosystem of extrusion machines EB-350 and EB-350M

Трибосистемы экструдера EB-350			Трибосистема экструдера EB-350M
«наконечник фильера №5»	«хвостовик фильера №4»	«наконечник фильера №5»	«хвостовик - фильера №4»
6,75	12,37	11,52	10,00

Представленные коэффициенты в табл. 2 и 3, подставив в выражения (13) и (14) получим значение силы трения и скорости изнашивания натуральных трибосистем. Полученные результаты расчета скорости изнашивания и силы трения натуральных трибосистем при эксплуатации на различных видах рабочей среды представлены на рис. 1-3.





**Рис. 1.** Расчетные значения скорости изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350, «наконечник – фильеры №5»: *a* – сталь 40X и чугуны ЧХ22Н2; *b* – сталь 40X и чугуны ЧХ32; *c* – сталь 95X18 и чугуны ЧХ32; *d* – сталь 40X10C2 и чугуны ЧХ32

**Fig. 1.** Calculated values of wear rate of full-scale tribosystem of extrusion machine EB-350, “tip – die No. 5”: *a* – steel 41Cr4 and 22% High-Chromium cast iron; *b* – steel 41Cr4 and 32% High-Chromium cast iron; *c* – steel X102CrMo17 and 32% High-Chromium cast iron; *d* – steel X40CrSiMo10 and 32% High-Chromium cast iron

Анализ полученных зависимостей позволяет определить и спрогнозировать ресурс каждой трибосистемы, и экструдера EB-350 и EB-350M в целом.

Зависимости, представленные на рис. 1, описывают уравнения (17)-(20).

Индекс уравнения также является номером поверхности, которую она описывает:

$$I_1 = 53,2129 pH_1^2 - 1,19457 A_{абр1}^2 - 0,53343 pH_1 \cdot A_{абр1} - 775,479 pH_1 + 28,12637 A_{абр1} + 3204,565 \quad (17)$$

$$I_2 = 31,42648 pH_2^2 - 1,03738 A_{абр2}^2 - 1,87677 pH_2 \cdot A_{абр2} - 469,987 pH_2 + 46,78397 A_{абр2} + 1978,423 \quad (18)$$

$$I_3 = 28,70051 pH_3^2 - 1,183823 A_{абр3}^2 - 0,76223 pH_3 \cdot A_{абр3} - 416,753 pH_3 + 9,410483 A_{абр3} + 1712,457 \quad (19)$$

$$I_4 = 25,69787 pH_4^2 - 0,534213 A_{абр4}^2 - 1,92703 pH_4 \cdot A_{абр4} - 372,965 pH_4 + 48,74393 A_{абр4} + 1509,914 \quad (20)$$

Из полученных уравнений (17)-(20) видно, что расчетная скорость изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350, «наконечник – фильера №5» является нелинейной. При увеличении уровня pH от 5 до 7,4 происходит уменьшение скорости изнашивания и при дальнейшем увеличении pH от 7,4 до 11 происходит обратный процесс, скорость изнашивания стремительно растет. Это свидетельствует о том, что эксплуатация приведенной трибосистемы при использовании сырья с слабокислой и сильнощелочной средой значительно уменьшает ее ресурс.

Значение скорости изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350, «наконечник – фильеры №5» в слабокислой, базовой среде в зависимости от типа сырья и трибосистемы приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Значение скорости изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350, «наконечник – фильера №5» в слабокислой, базовой среде в зависимости от типа сырья и трибосистемы

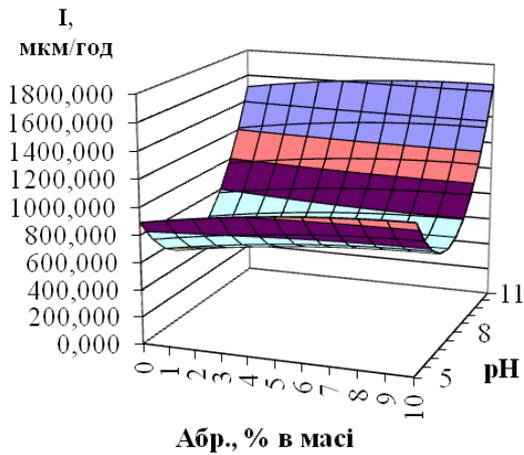
**Table 4.** Values of wear rate of full-scale tribosystem of extrusion machine EB-350, “die No. 5” in weak acid, base environment depending on the type of raw material and tribosystem

Тип сырья	Скорость изнашивания, мкм/ч			
	Сталь 40X и чугуны ЧХ22Н2	Сталь 40X и чугуны ЧХ32	Сталь 95X18 и чугуны ЧХ32	Сталь 40X10C2 и чугуны ЧХ32
Солома ячменя	567,91	530,21	223,35	692,80
Древесные остатки	563,13	440,30	331,40	351,56
Лузга	636,43	522,05	273,99	500,62
Прелая лузга	989,57	762,06	459,66	684,27

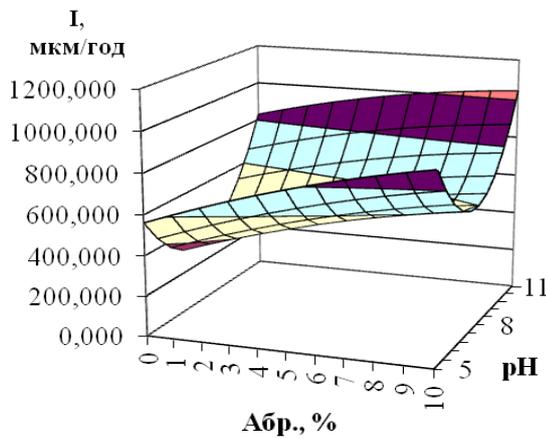
Из табл. 4 видно, что наименьшее значение скорости изнашивания имеет трибосистема сталь 95X18 и чугуны ЧХ32.

Скорость изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350, «хвостовик – фильера №4», которая изображена в виде зависимостей на рис. 2,

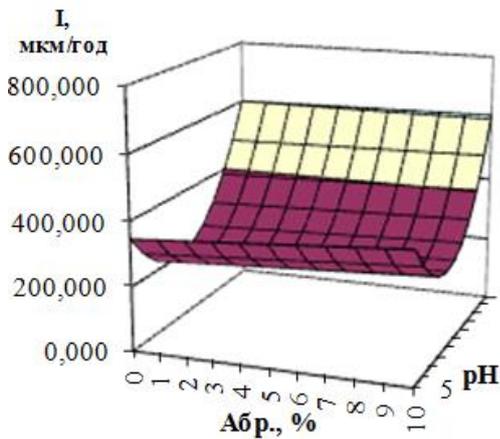
имеет нелинейную форму и незначительно отличается от трибосистемы «наконечник - фильера №5».



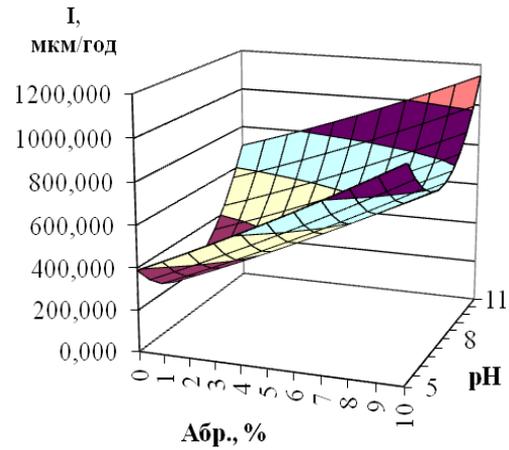
a)



b)



c)



d)

**Рис. 2.** Расчетные значения скорости изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350, «хвостовик – фильера №4»: 1 – сталь 40X и чугуи ЧХ22Н2; 2 – сталь 40X и чугуи ЧХ32; 3 – сталь 95X18 и чугуи ЧХ32; 4 – сталь 40X10С2 и чугуи ЧХ32

**Fig. 2.** Calculated values of wear rate of full-scale tribosystem of extrusion machine EB-350, “shank – die No. 4”: 1 – steel 41Cr4 and 22% High-Chromium cast iron; 2 – steel 41Cr4 and 32% High-Chromium cast iron; 3 – steel X102CrMo17 and 32% High-Chromium cast iron; 4 – steel X40CrSiMo10 and 32% High-Chromium cast iron

Значение скорости изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350, «хвостовик - фильера №4» в слабокислой, базовой среде в зависимости от типа сырья и трибосистемы приведены в табл. 5.

**Таблица 5.** Значения скорости изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350, «наконечник - фильеры №5» в слабокислой, базовой среде в зависимости от типа сырья и трибосистемы

**Table 5.** Values of wear rate of full-scale tribosystem of extrusion machine EB-350, “tip - die No. 5” in weak acid, base environment depending on the type of raw material and tribosystem

Тип сырья	Скорость изнашивания, мкм/ч			
	Сталь 40X и чугуи ЧХ22Н2	Сталь 40X и чугуи ЧХ32	Сталь 40X и чугуи ЧХ22Н2	Сталь 40X10С2 и чугуи ЧХ32
Солома ячменя	768,86	717,82	302,38	937,94
Древесные остатки	762,39	596,10	448,66	475,96
Лузга	861,63	706,78	370,94	677,76
Прелая лузга	1339,73	1031,7	622,31	926,40

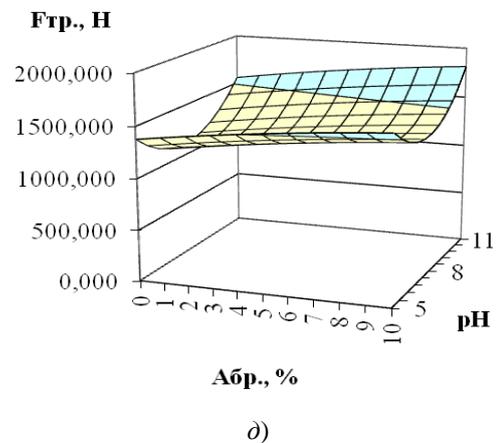
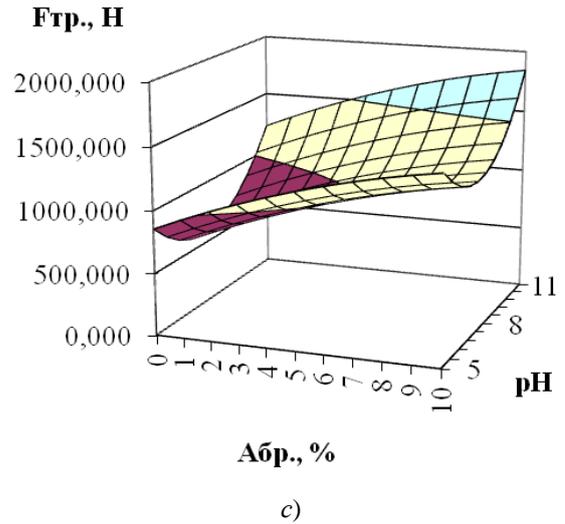
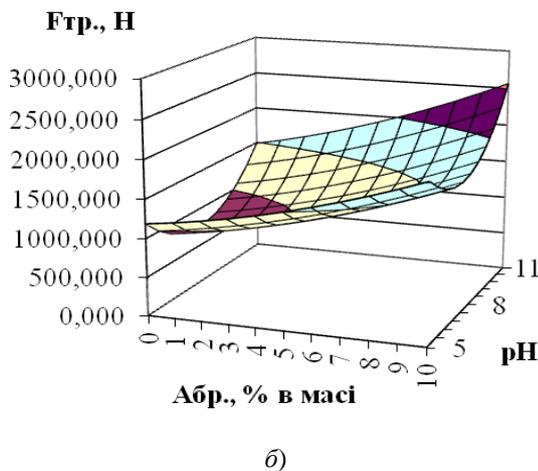
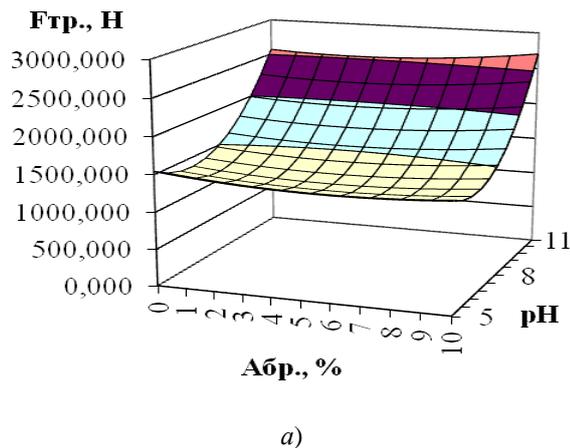
В интервале активной кислотности от 5 до 7,4 pH скорость изнашивания уменьшается, а при дальнейшем увеличении до pH 11 - растет. Значение скорости изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350, «шнec конический - фильера №1, 2

и 3» в слабокислой, базовой среде в зависимости от типа сырья и трибосистемы приведены в табл. 6.

**Таблица 6.** Значения скорости изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350, «шнек конический - фильера №1, 2 и 3» в слабокислой, базовой среде в зависимости от типа сырья и трибосистемы

**Table 6.** Values of wear rate of full-scale tribosystem of extrusion machine EB-350, “screw - die No. 1, 2 and 3” in weak acid, base environment depending on the type of raw material and tribosystem

Тип сырья	Скорость изнашивания, мкм/ч			
	Сталь 40X и чугун ЧХ22Н2	Сталь 40X и чугун ЧХ32	Сталь 40X и чугун ЧХ22Н2	Сталь 40X10С2 и чугун ЧХ32
Солома ячменя	768,86	717,82	302,38	937,94
Древесные остатки	762,39	596,10	448,66	475,96
Лузга	861,63	706,78	370,94	677,76
Прелая лузга	1339,73	1031,7	622,31	926,40



**Рис. 3.** Розрахункові значення сили тертя натурної трибосистеми екструдера EB-350, «наконечник - фильера №5»: 1 – сталь 40X и чугун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40X и чугун ЧХ32; 3 – сталь 95X18 и чугун ЧХ32; 4 – сталь 40X10С2 и чугун ЧХ32

**Fig. 3.** Calculated values of friction force of full-scale tribosystem of extrusion machine EB-350, “tip - die No. 5”: 1 – steel 41Cr4 and 22% High-Chromium cast iron; 2 – steel 41Cr4 and 32% High-Chromium cast iron; 3 – steel X102CrMo17 and 32% High-Chromium cast iron; 4 – steel X40CrSiMo10 and 32% High-Chromium cast iron

Значение скорости изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350M, «шнек конический - фильеры №1, 2 и 3» в слабокислой, базовой среде в зависимости от типа сырья и трибосистемы приведены в табл. 7.

На величину скорости изнашивания в трибосистемах в первую очередь наибольшее влияние имеет среда, в которой она эксплуатируется и материалы, из которых они изготовлены. Из результатов расчета скорости изнашивания видно, что слабощелочная рабочая среда, значительно лучше, чем слабокислая и сильнощелочная.

**Таблица 7.** Значение скорости изнашивания натурной трибосистемы экструдера EB-350M, «шнек конический - фильеры №1, 2 и 3» в слабокислой, базовой среде в зависимости от типа сырья и трибосистемы

**Table 7.** Values of wear rate of full-scale tribosystem of extrusion machine EB-350M, “screw - die No. 1, 2 and 3” in weak acid, base environment depending on the type of raw material and tribosystem

Тип сырья	Скорость изнашивания, мкм/ч			
	Сталь 40X и чугун ЧХ22Н2	Сталь 40X и чугун ЧХ32	Сталь 40X и чугун ЧХ22Н2	Сталь 40X10 С2 и чугун ЧХ32
Солома ячменя	690,23	644,41	271,46	842,02
Древесные остатки	684,42	535,13	402,78	427,28
Лузга	773,51	634,49	333,00	608,45
Прелая лузга	1202,71	926,20	558,66	831,65

Силы трения при использовании различных рабочих сред и материалов для натурной трибосистемы экструдера EB-350, «наконечник - фильера №5» представлены на рис. 3 и описываются зависимостями:

$$F_{тр.1} = 64,09219 pH_1^2 + 3,645337 A_{абр.1}^2 + 3,412125 pH_1 \quad (21)$$

$$A_{абр.1} - 855,485 pH_1 - 60,1577 A_{абр.1} + 4219,418$$

$$F_{тр.2} = 63,72028 pH_2^2 + 4,303351 A_{абр.2}^2 + 4,0743 pH_2 \quad (22)$$

$$A_{абр.2} - 970,069 pH_2 + 19,67984 A_{абр.2} + 4447,097$$

$$F_{тр.3} = 82,27874 pH_3^2 - 3,15727 A_{абр.3}^2 + 0,05446 pH_3 \quad (23)$$

$$A_{абр.3} - 3210,014 pH_3 + 93,99336 A_{абр.3} + 3210,014$$

$$F_{тр.4} = 38,87023 pH_4^2 - 0,94434 A_{абр.4}^2 + 0,351934 pH_4 \quad (24)$$

$$A_{абр.4} - 592,323 pH_4 + 31,3933 A_{абр.4} + 3367,067$$

На величину силы трения в трибосистемах в первую очередь наибольшее влияние имеет рабочая среда, на котором они эксплуатируются. Из результатов, представленных на рис. 3 видно, что использование слабощелочной среды значительно лучшим, чем слабокислой и сильнощелочной. Это показывает, то что на преодоление силы трения при использовании слабощелочной среды по сравнению с слабокислой и сильнощелочную необходимо меньше энергии, а соответственно, и меньше электроэнергии.

Также весомыми факторами, от которых зависит величина силы трения, является совместимость материалов, из которых изготовлены трибосистемы, и их конструктивные особенности. К конструктивным особенностям можно отнести соотношение площадей трения, геометрических размеров трибосистем. Наименьшее значение силы трения наблюдается в трибосистеме экструдера EB-350M, «шнек конический - фильера №1, 2 и 3» и в трибосистеме экструдера EB-350, «шнек конический - фильеры №1, 2 и 3».

Для прогнозирования и расчетов ресурса экструдера EB-350 и EB-350M была определена граничная величина износа трибосистем  $\Delta$ , которая для определенных трибосистем, после эксплуатации и их демонтажа, была выбрана на основании данных статистического анализа предприятий, которые их изготавливают и эксплуатируют:

- натурные трибосистемы экструдера EB-350;
- «наконечник - фильеры №5» - 6000 мкм;
- «хвостовик - фильеры №4» - 10000 мкм;
- «шнек конический - фильера №1, 2 и 3» - 50000 мкм;

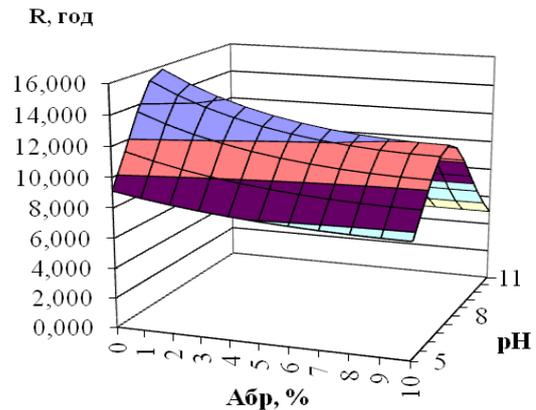
- натурная трибосистема экструдера EB-350M, «шнек конический - фильера №1, 2 и 3» - 25000 мкм.

Ресурс трибосистем экструдера EB-350 и EB-350M рассчитывается с помощью выражения:

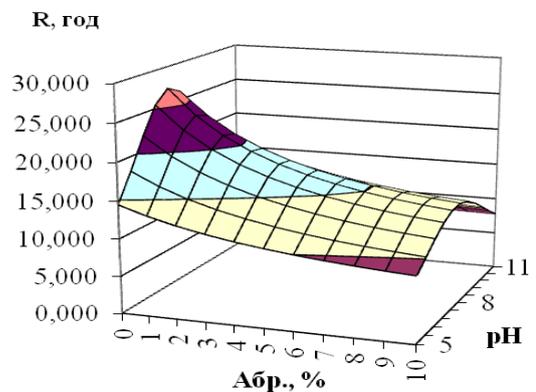
$$R = \frac{\Delta}{I_n(pH; A_{абр.})}, \quad (25)$$

где:  $R$  – ресурс, часы;  $\Delta$  – граничная величина изнашивания трибосистемы, мкм;  $I_n$  – скорость изнашивания натурной трибосистемы, которая является функцией от абразивности и кислотности, мкм/ч.

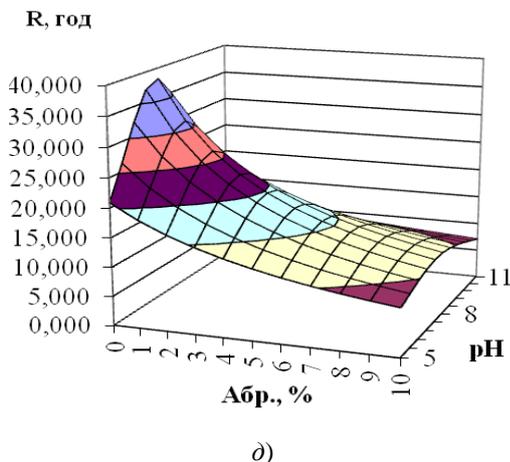
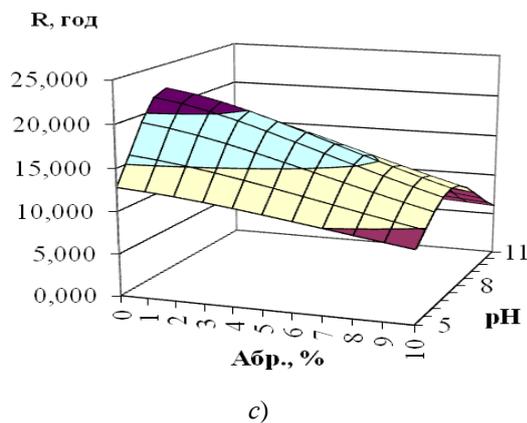
Ресурс натурной трибосистемы экструдера EB-350, «наконечник - фильеры №5» при использовании различных рабочих сред и материалов представлен рис. 4



а)



б)



**Рис. 4.** Расчетные значения ресурса натурной трибосистемы экструдера EB-350, «наконечник - фильера №5»: 1 – сталь 40X и чугун ЧХ22Н2; 2 – сталь 40X и чугун ЧХ32; 3 – сталь 95X18 и чугун ЧХ32; 4 – сталь 40X10C2 и чугун ЧХ32

**Fig. 4.** Calculated values of lifetime for full-scale tribosystem of extrusion machine EB-350, “tip - die No. 5”: 1 – steel 41Cr4 and 22% High-Chromium cast iron; 2 – steel 41Cr4 and 32% High-Chromium cast iron; 3 – steel X102CrMo17 and 32% High-Chromium cast iron; 4 – steel X40CrSiMo10 and 32% High-Chromium cast iron

Аналогичные зависимости были получены для трибосистемы экструдера EB-350, «хвостовик - фильера №4», для трибосистемы экструдера EB-350, «шнек конический - фильера №1, 2 и 3, для трибосистемы экструдера EB-350M, «шнек конический - фильера №1, 2 и 3».

Подставив значения скорости изнашивания в выражение (25), которые описывают изменение скорости изнашивания натуральных трибосистем от нагрузки, получим значение ресурса каждой трибосистемы экструдера EB-350 и EB-350M при применении различных рабочих сред.

Ресурс экструдера EB-350 в целом будет определять трибосистемы с минимальным расчетным ресурсом. Максимальный ресурс является характерным для трибосистемы экструдера EB-350 «шнек конический - фильера №1, 2 и 3», который составляет 160 часов. На втором месте - трибосистема «наконечник - фильера №5» - 45 часов, а минимальный ресурс характерен для натурной трибосистемы «хвостовик - фильера №4» - 37 часов. Износ приве-

денной трибосистемы существенно влияет на производительность экструдера EB-350.

По данным нормативно-технической документации завода-изготовителя ООО «ЧеркаскыЭлеваторМаш» гарантийное наработки хвостовика и наконечника экструдера EB-350 – 8 часов, других частей - 150 часов [20]. Средняя наработка шнека конического экструдера EB-350M – 24 часа, других частей - 150 часов [21]. Было проведено экспертный опрос инженеров предприятий производителей топливных брикетов, который показал, что ресурс деталей, кроме хвостовика и наконечника экструдера EB-350 не превышает 100 часов, кроме конического шнека экструдера EB-350M - 120 часов. Это обусловлено условиями, режимами эксплуатации и рабочей средой.

## ВЫВОДЫ

На скорость изнашивания, силу трения и ресурс натурной трибосистемы экструдера EB-350 и EB-350M наиболее влияет рабочая среда в которой они эксплуатируются и совместимость материалов из которых они изготовлены. Наибольшим ресурсом экструдер EB-350 и EB-350M будет иметь трибосистема сталь 95X18 и чугун ЧХ32 при эксплуатации в слабощелочной среде, близкой к нейтральной.

Использование слабощелочной рабочей среды pH 7,4 приводит к увеличению ресурса экструдера EB-350 при прессовании соломы в 1,41 раза, древесных остатков - 2,33 раза, лузги семян подсолнечника в 13,16 раза, прелой лузги в 10,23 раза. При изменении материалов на сталь 95X18 и чугун ЧХ32 происходит увеличение ресурса экструдера EB-350 при прессовании соломы в 2,76 раза, древесных остатков - 4,56 раза, лузги семян подсолнечника в 25,76 раза, прелой лузги в 20,02 раза.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Войтов В.А. 1997.** Конструктивная износостойкость узлов трения гидромашин. Часть 2. Методология моделирования предельного смазки в гидромашинках / Х. Центр Леся Курбаса, 154.
2. **Седов Л.И. 1981.** Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Мир, 448.
3. **Веников В.А., Веников Г.В. 1991.** Теория подобия и моделирования / М.: Высш. Школа, 419.
4. **Хорофас Дмитрис Н. 1967.** Системы и моделирования / М.: Мир, 419.
5. **Гухман А.А. 1973.** Введение в теорию подобия / М.: Высш. Школа, 295.
6. **Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. 1982.** Моделирование трение и изнашивания в машинах / М.: Машиностроение, 191.
7. **Чичинадзе А.В. 1970.** О модернизации трения и износа / под ред. А.В. Чичинадзе]. – М.: НИИМАШ, 318.

8. **Браун Э. Д. 1968.** Об учёте масштабного фактора при лабораторных испытаниях на трение / В кн.: Научные принципы и новые методы испытаний материалов для узлов трения. Наука, 182-192.
9. **Стамбурский Е.А., Бейль А. И., Карливан В.П., Беспалов Ю. А. 1985.** Износ оборудования при переработке пластмасс / М.: Химия, 208.
10. **Ястреба С.П. 2012.** Повышение эффективности работы и долговечности масляных прессов: Автореф. дис. на получение наук. степени канд. тех. наук: спец. 05.18.12 «Процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств» / С.П. Ястреба. – Киев, 19.
11. **Гончар В.А. 2014.** Повышение износостойкости и долговечности экструдеров для переработки фуражного зерна с примесями минералов: автореф. дис. на получение наук. степени канд. тех. наук: спец. 05.02.04 - «Трение и износ в машинах» / В.А. Гончар. - Хмельницкий, 20.
12. **Деркач В.В. 2000.** Повышение износостойкости цилиндра экструдера методом термодиффузионного биметализации: Автореф. дис. на получение наук. степени канд. тех. наук: спец. 05.02.04 – «Трение и износ в машинах» / В.В. Деркач. – Киев, 20.
13. **Матвишин П.В. 2012.** Повышение износостойкости узла пластикации термотермопластавтоматив при переработке наполненных полимеров: Автореф. дис. на получение наук. степени канд. тех. наук: спец. 05.02.04 - «Трение и износ в машинах» / Хмельницкий, 21.
14. **Васильков В.В., Радик Д.Л. 2010.** Виды износа спиралей винтовых рабочих органов / Вестник ХНТУСГ. – Харьков: ХНТУСГ. Вып. 100, 197-202.
15. **Луцак Д.Л., Луцак А.Я., Присяжнюк П.В. 2009.** Повышение износостойкости шнеков оборудования для производства кирпича / Д. Луцак, Я. Криль, П. Присяжнюк // Повышение надежности машин и оборудования: III Всеукраинская научно-практическая. конф., 15 апреля 2009 г.: тезисы докладов студентов, магистрантов и аспирантов. – Кировоград: КНТУ. 16-20.
16. **Беркович И.И. 1966.** Исследование внешнего трения торфа и фактической площади контакта применительно к процессам прессования: автореф. дис. на соискание наук. степени канд. техн. наук / И.И. Беркович. – Калинин, 18.
17. **Войтов В.А., Кравцов А.Г., Сисенко И.И. 2013.** Перспективы использования растительных масел для изготовления смазочных материалов и рабочих жидкостей. Motrol. Lublin, Vol. 15. №7. 56-62.
18. **Белименко С.С. 2014.** Исследование температурных полей твердотельного теплового аккумулятора. Motrol. Lublin, Vol. 16. №7. 98-105.
19. **Ружило З., Кюрчев С., Роговский Л, Мельник В. 2013.** Определение ресурса восстановленных деталей автотранспортных средств. Motrol. Lublin. Vol. 15. No 3. 377-383.
20. **2009.** Руководство по эксплуатации EB-350PЭ. Экструдер для брикетирования отходов EB-350. – Черкассы: ООО Черкассы Элеватор-Маш», 27.
21. **2013.** Руководство по эксплуатации EB-350PЭ. Экструдер для брикетирования отходов EB-350M. – Черкассы: ООО ЧеркассыЭлеватор-Маш», 33.

PHYSICAL SIMULATION OF FRICTION AND WEAR PROCESSES OF TRIBOSYSTEMS OF EXTRUSION MACHINES EB-350 AND EB-350M

**Summary.** Physical simulation of friction and wear processes of tribosystems of extrusion machines EB-350 and EB-350M is demonstrated.

Physical simulation means simulation of similar processes on devices (simulators) which retain the physical nature of phenomena and processes, but reflect them on a different scale, such as geometric or physical.

Upon physical simulation of friction and wear processes simulators have one peculiarity – they have identical nature with the full-scale object (model), meaning that the same (reduced in scale) tribosystems, materials they were made of and work environment were used. Simulator differs from model not only by its large-scale but also by artificially created conditions for use. More difficult conditions such as abrasive ability, active acidity level and capacity which are necessary for reduction of testing time were created during laboratory testing.

Dependence of the friction force and wear rate for full-scale tribosystem were obtained based on the results of research on the simulative tribosystems in the laboratory conditions. The main benefits of using method of physical simulation are reduction of money and time wasting which are associated with research of tribological characteristics of any given tribosystem.

Dependence of the equations with criteria, which take into account the scale coefficients and with the help of which the transition from simulative tests in the laboratory to the full-scale tests was made, followed by the subsequent calculation of dependences of the friction force and wear rate were established. Lifetime of simulative tribosystems was predicted with help of criteria equations based on the results of laboratory research of its stimulators, research of the influence of abrasive, acid, alkaline environment (aggressive) on tribosystems and also compatible materials were selected.

**Key words:** tribosystem, physical simulation, model, simulator, compatible materials, wear, friction process, friction force, wear rate, scale coefficients, theory of similarity, abrasive ability, acidity.