

УДК 622.232.72

**В.Г. Гуляев** (д-р техн. наук, проф.)**С.Ю. Харламов** (магистрант)

Донецкий национальный технический университет

## **УСТАНОВЛЕНИЕ ОЦЕНОК КИНЕТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕНИЯ В ОПОРАХ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА**

*Изложены методика и результаты определения оценок кинетической характеристики трения в опорах комбайна с учетом особенностей формирования сил трения при ускоренном и замедленном его движении по конвейеру в режиме релаксационных автоколебаний. Исходными данными служили результаты натурного эксперимента и установленные закономерности исследуемого процесса.*

**Ключевые слова:** очистной комбайн, кинетическая характеристика трения, релаксационные автоколебания, неравномерность скорости перемещения комбайна.

### ***Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.***

В настоящее время весьма актуальной научной и практической задачей оптимального проектирования очистных комбайнов является разработка имитационных моделей, адекватно отражающих главные особенности динамики их рабочих процессов. При разработке математической модели замкнутой динамической системы «забой-очистной комбайн-конвейер» важным этапом является выявление закономерностей формирования и математическое описание силы трения в опорах очистного комбайна (ОК) на конвейер, которая является одной из главных причин возбуждения в системе автоколебаний и высокой неравномерности скорости перемещения комбайна.

***Анализ исследований и публикаций.*** Большинство исследователей [1-6 и др.] отмечают сложный характер процесса трения и нелинейную зависимость силы трения от скорости скольжения и состояния трущихся поверхностей. В технической литературе имеется достаточно много примеров определения кинетических характеристик трения для различных очистных комбайнов. В ряде случаев полученные данные противоречивы, что связано с большой сложностью проявления законов трения в условиях стохастической среды и при-

менением различных методик установления этих закономерностей [3-7].

**Постановка задачи.** Задачами данной работы являются: 1/ определение зависимости силы (коэффициента) трения в опорах комбайна на конвейер на основе данных натурального шахтного эксперимента с использованием известных методик; 2/ установление наиболее достоверных оценок характеристики трения с учетом ее изменчивости на этапах ускоренного и замедленного движения комбайна в режиме разрывных и квазигармонических автоколебаний.

**Изложение материала и результаты.** Представляется целесообразным нахождение интересующей зависимости с использованием данных натурального эксперимента в представительных условиях [1, 2]. Учитывая большую сложность и случайный характер процессов, происходящих в опорно-направляющих устройствах комбайна и конвейера, принимаются следующие допущения:

- коэффициент трения является функцией мгновенной скорости перемещения комбайна только в направлении подачи;
- деформируемым элементом является только цепной тяговый орган (ЦТО), который считается упругой невесомой нитью;
- провисание ЦТО не учитывается, а масса его приводится к массе ОК по методу Релея;
- не учитываются демпфирование в опорах ОК и крутильные колебания ведущей звезды механизма подачи ОК (угловая скорость ведущей звезды считается постоянной).

Обработке подвергались данные натурального эксперимента, выполненного под руководством проф. Гуляева В.Г. сотрудниками кафедры «Горные машины» ДонНТУ на ш. «Октябрьская» ПО «Донецкуголь». Объект исследования – двухдвигательный ОК 1ГШ68. Измеряемые и осциллографируемые величины : мгновенная скорость перемещения ОК и усилие подачи (крутящий момент на валу гидромотора) в режиме холостого хода, рис.1.

В таблице 1 приведены характеристики неравномерности перемещения комбайна 1ГШ-68 и крутящего момента на валу гидромотора ДП510. Здесь  $l_y$  – длина рабочей ветви тягового органа;  $f_{Vn}$  – частота пульсаций скорости перемещения;  $\bar{\tau}$  – оценка математического ожидания сдвига по фазе максимумов скорости относительно момента на валу гидромотора;  $\bar{A}$  – оценка математического ожидания ам-

плитуды крутящего момента на валу гидромотора;  $t_0$  – время остановки комбайна;  $t_d$  – время движения комбайна.

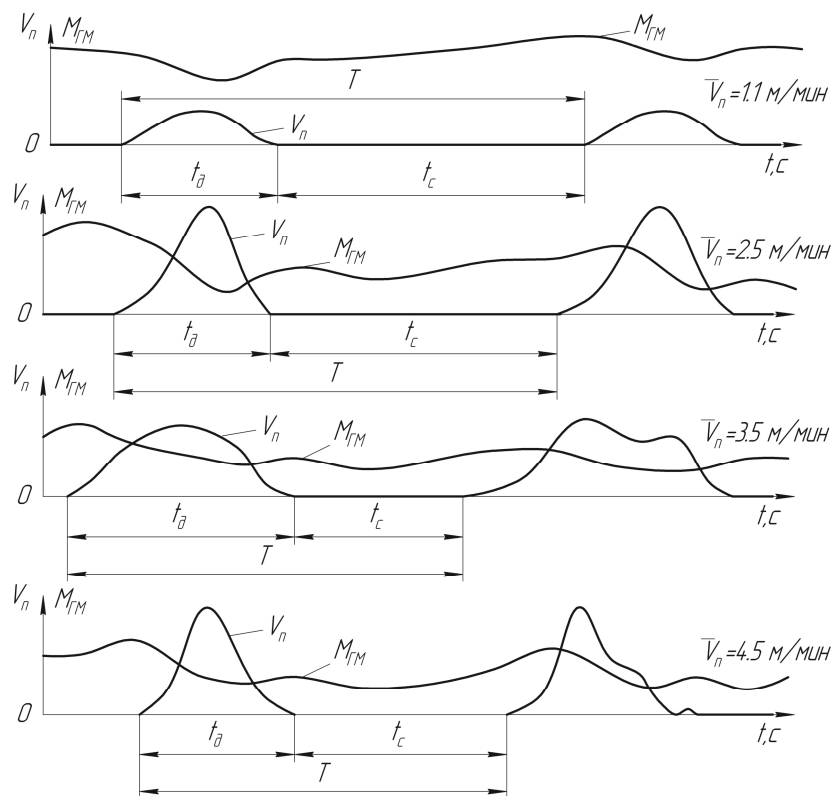


Рис. 1 – Фрагмент осциллографической записи мгновенных значений скорости подачи и крутящего момента на валу гидромотора

Таблица 1 – Характеристики неравномерности перемещения комбайна 1ГШ-68 и крутящего момента на валу гидромотора ДП510

Средняя скорость подачи, $\bar{V}_n$ , м/мин	Движение вверх ( $l_u = 5...10$ м)					Движение вниз ( $l_u = 30...35$ м)				
	$l_{ч,м}$	$f_{V_n}$ , Гц	$\bar{\tau}$ , с	$\frac{V_{n,max}}{V_n}$	$\frac{\bar{A}}{M_{ГМ}}$	$l_{ч,м}$	$f_{V_n}$ , Гц	$\bar{\tau}$ , с	$\frac{V_{n,max}}{V_n}$	$\frac{t_0}{t_d}$
1,1	10	2,26	0,14	2,71	0,13	35	0,46	0,27	4,0	3,74
2,5	7	2,55	0,115	2,42	0,22	34	0,49	0,25	5,8	2,24
3,5	6	2,70	0,112	2,14	0,34	33	0,61	0,28	3,0	0,8
4,5	5	3,03	0,10	2,18	0,44	30	0,60	0,22	4,7	1,0

В результате обработки осциллограмм установлены следующие закономерности исследуемого процесса:

1) движение комбайна с  $V_n = 2,5 - 4,5$  м/мин при длине рабочей ветви цепи 8–12 м происходит без остановок в режиме квазигармонических автоколебаний;  $V_n(t)$  и  $M_{ГМ}(t)$  изменяются практически по

синусоидальному закону со сдвигом по фазе  $0,1-0,4$  с, причем  $M_{ГМ}(t)$  опережает  $V_n(t)$ ;

2) с уменьшением длины рабочего участка цепи и повышением средней скорости подачи возрастают частота автоколебаний и динамическая составляющая  $M_{ГМ}(t)$ , а коэффициент неравномерности скорости  $K_n = V_{n_{max}} / V_{n_{cp}}$  снижается от 2,71 до 2,18;

3) при повышении длины рабочей ветви цепи свыше 20 м (и ее упругой податливости) квазигармонические автоколебания переходят в релаксационные при средних скоростях подачи  $1,1-4,5$  м/мин (см. рис. 1)

4) неравномерность перемещения комбайна в режиме разрывных автоколебаний скорости подачи резко возрастает и характеризуется коэффициентом  $K_n = 4,0-5,8$ , а сдвиг во времени между максимальными значениями  $M_{ГМ}(t)$  и  $V_n(t)$  составляет  $0,22-0,28$  с при изменении  $V_{n_{cp}}$  в диапазоне от 1,1 до 4,5 м/мин (см. табл. 1).

Установление закономерности изменений  $V_n(t)$  и параметры автоколебаний служили основой для теоретического метода определения характеристик трения.

**Теоретический подход к определению зависимости для коэффициента трения в опорно-направляющих устройствах.**

Для режима холостого хода ОК расчетная схема приведена на рис.2.

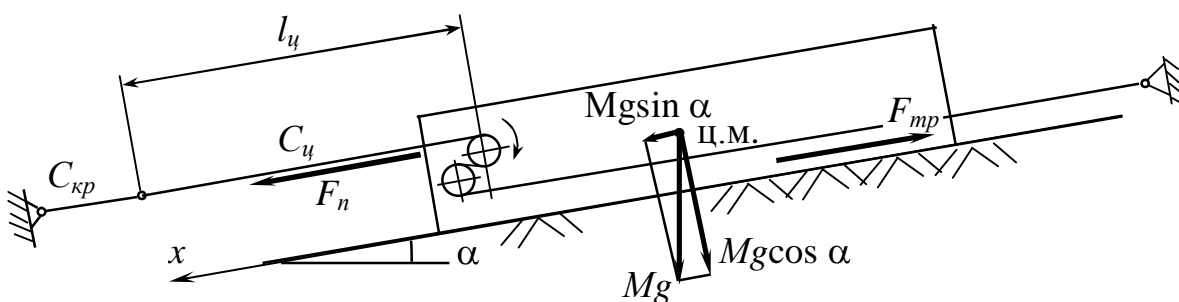


Рис. 2 – Схема сил, действующих на комбайн в режиме холостого хода

На основании принятых допущений запишем уравнение движения комбайна в режиме холостого хода:

$$M \ddot{x} = F_n \pm Mg \sin \alpha - F_{mp} = C(V_0 t - x) \pm Mg \sin \alpha - \mu(\dot{x})Mg \cos \alpha; \quad (1)$$

где  $M$  – масса комбайна с приведенной массой тяговой цепи;

$F_n, F_{тр}$  – усилие подачи и сила трения соответственно;

$C$  – коэффициент жесткости последовательно соединенных узла крепления цепи и ЦТО.

$$C = \frac{C_{кр} E}{C_{кр} l_{ц} + E}; \quad (2)$$

$C_{кр}$  – коэффициент жесткости крепления цепи, который является величиной, нуждающейся в идентификации. Для нахождения его величины были обработаны осциллограммы с квазигармоническими колебаниями скорости подачи и найдены собственные частоты колебаний  $\omega_0$  для коротких длин рабочей ветви ЦТО ( $l_{ц} = 8-12$ ) м.

$$\omega_0 = \sqrt{C/M}; \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) было найдено среднее значение  $C_{кр}$  для нескольких опытов;

$\alpha$  – угол падения пласта;

$V_0$  – окружная скорость вращения звезды (принимается равной средней скорости подачи ОК);

$E$  – продольная жесткость ЦТО;

$\mu(\dot{x})$  – коэффициент трения опор ОК о конвейер.

Для определения функциональной зависимости коэффициента трения от мгновенной скорости подачи ОК можно воспользоваться обратным построением Льенара или методикой проф. Крагельского [3, 4]. Исходными данными для обеих методик служат зависимости мгновенных значений усилия подачи и скорости движения ОК от времени, представленные в виде числовых массивов.

Нахождение кинетической характеристики трения обратным построением Льенара подробно описано в работе [6].

Метод проф. Крагельского заключается в нахождении коэффициента трения из уравнения движения комбайна (1):

$$\mu(\dot{x}_i) = \frac{M \ddot{x}_i - F n_i \pm Mg \sin \alpha}{Mg \cos \alpha}; \quad (4)$$

Ускорение ОК находится методом графического дифференцирования:

$$\ddot{x}_i = (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) / (t_i - t_{i-1}); \quad (5)$$

По данным методикам были обработаны осциллографические записи релаксационных колебаний, свойственных ОК с упругим тяговым органом (объем обработанных данных - 12 пульсов подачи ОК

для каждой из четырех средних скоростей: 1,5; 2,5; 3,5; 4,5 м/мин), что позволило установить следующие особенности изучаемых процессов.

В каждом периоде релаксационных колебаний ОК можно выделить участки останова, ускоренного и замедленного движения. Коэффициент трения находится по зависимости:

при  $\dot{x} = 0$ ,

$$\mu = \begin{cases} [C(V_0 t - x)/M \pm g \sin \alpha] / g \cos \alpha, & \text{если } [C(V_0 t - x)/M \pm g \sin \alpha] / g \cos < \mu_1(0); \\ \mu_1(\dot{x}), & \text{если } [C(V_0 t - x)/M \pm g \sin \alpha] / g \cos \geq \mu_1(0); \end{cases}$$

при  $\dot{x} > 0$ ,

$$\mu = \begin{cases} \mu_1(\dot{x}), & \text{если } \ddot{x} \geq 0; \\ \mu_2(\dot{x}), & \text{если } \ddot{x} < 0; \end{cases} \quad (6)$$

где  $\mu_1(0)$  - свободный член аппроксимирующей зависимости

$$\mu_1 = f(\dot{x});$$

$\mu_1(\dot{x})$  - оценка кинетического коэффициента трения, соответствующая ускоренному движению ОК;

$\mu_2(\dot{x})$  - оценка кинетического коэффициента трения, соответствующая замедленному движению ОК.

Более достоверный результат можно получить, воспользовавшись методикой проф. Крагельского, так как, при использовании обратного построения Льенара, погрешности появляются при аппроксимации фазовой траектории и при оценке коэффициента жесткости узла крепления цепи.

Оценки коэффициента  $\mu_1(\dot{x})$ , вычисленные по обеим методикам, аппроксимировались полиномами третьей степени методом наименьших квадратов.

На рис. 3 приведены результаты обработки экспериментальных данных и регрессионные кривые. Сплошной линией обозначена зависимость, полученная по методике обратного построения Льенара:

$$\mu_{1L}(\dot{x}) = 0,663 - 1,086\dot{x} - 4,021(\dot{x})^2 + 11,042(\dot{x})^3; \quad (7)$$

Штриховой линией обозначена зависимость, полученная по методике проф. Крагельского:

$$\mu_{1K}(\dot{x}) = 0,651 - 1,547\dot{x} + 3,384(\dot{x})^2 - 3,828(\dot{x})^3; \quad (8)$$

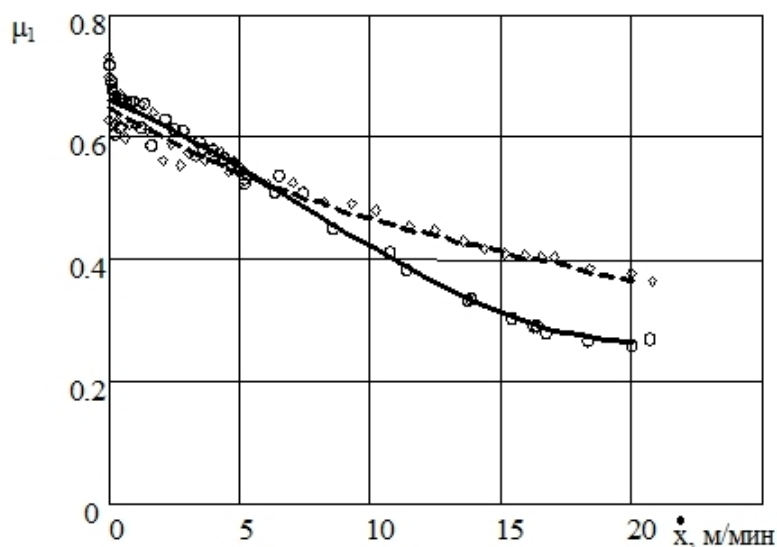


Рис. 3 – Кинетические характеристики трения для ускоренного движения ОК

мирующая зависимость (10) в относительных единицах. За базисные величины приняты максимальная мгновенная скорость пульса подачи и соответствующее ей значение  $\mu_1$ .

$$\dot{x}_B = \dot{x}_{max}; \mu_B = \mu_1(\dot{x}_{max}); \mu'_2 = \mu_2(\dot{x}) / \mu_1(\dot{x}_{max}); \quad \dot{x}' = \dot{x} / \dot{x}_{max}; \quad (9)$$

$$\mu_2(\dot{x}) = [1,031 + 1,071\dot{x}' - 2,158(\dot{x}')^2 + 1,032(\dot{x}')^3] \mu_B; \quad (10)$$

Совместное решение уравнений (1), (2), (6), (8), (9), (10) позволяет определять параметры автоколебательного процесса перемеще-

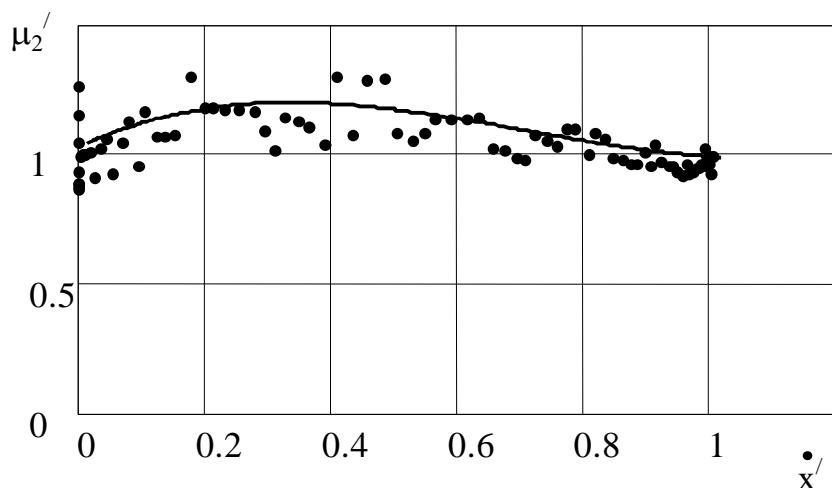


Рис. 4 – Оценка кинетического коэффициента трения для замедленного движения

вания изображены сплошными линиями, результаты обработки экспериментальных данных - штриховыми. Сила трения обозначена более тонкими линиями.

В зависимостях (7), (8) скорость подачи комбайна приведена в м/с.

Оценки кинетического коэффициента трения  $\mu_2$  (при отрицательных значениях ускорения) зависят от максимальной мгновенной скорости подачи.

На рис. 4 приведены результаты опытных данных, обработанных по методике проф. Крагельского, и аппроксимирующие

результаты моделирования в направлении подачи и тяговое усилие (нагрузку на механизм подачи) на холостом ходу ОК. Некоторые результаты моделирования исследуемого процесса для ОК 1ГШ68 приведены на рис. 5, 6

На рис. 5 результаты моделирования

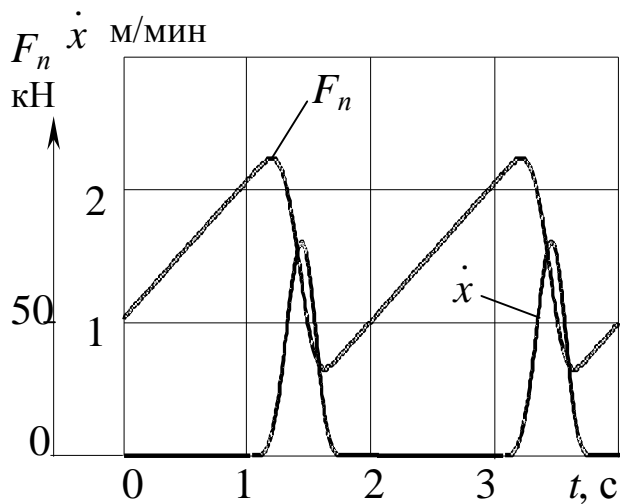


Рис. 5 – Скорость и усилие подачи при холостом ходе ОК

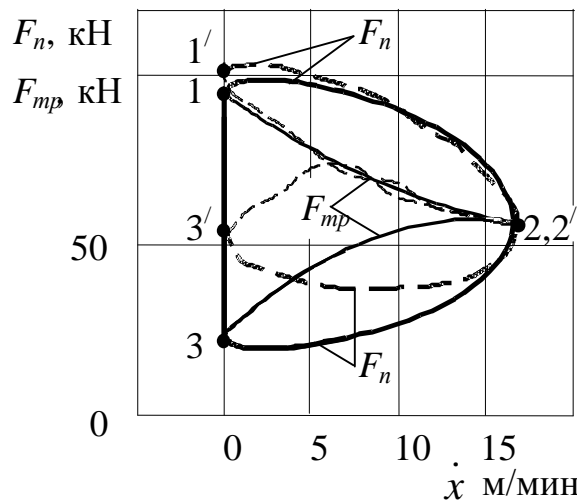


Рис. 6 – Усилие подачи и сила трения в зависимости от скорости

Участок 1-2 соответствует ускоренному движению ОК, 2-3 – замедленному движению, 3-1 – остановке комбайна. Кинетический коэффициент трения на участке 2-3 при моделировании определялся с учетом непрерывности ускорения ОК. Несовпадение кривых на участке 2-3 объясняется принятыми допущениями, что подтверждает анализ результатов обработки данных эксперимента.

### **Выводы и направления дальнейших исследований.**

Сравнительный анализ результатов выполненных исследований натурального объекта и модели позволяет сделать следующие выводы:

1. Впервые предложена и реализована методика определения оценок кинетической характеристики трения в режиме релаксационных автоколебаний с учетом особенностей формирования силы трения при ускоренном и замедленном движении очистного комбайна на основе данных натурального эксперимента.

2. Использование полученной характеристики трения позволяет разработать математическую модель движения комбайна в режиме холостого хода и прогнозировать характеристики трения модели, адекватной в главном рабочему процессу реального объекта.

3. Характеристики неравномерности перемещения комбайна с ЦТО разной длины (табл. 1) можно использовать для моделирования и установления на качественном уровне закономерностей изменения параметров и вида автоколебаний  $V_n$  при применении ЖТО.

4. При дальнейших исследованиях в математической модели динамики рабочих процессов ОК должны учитываться зависимость продольной жесткости тягового органа от длины его рабочей ветви и



взаимодействие силовых подсистем ОК, обусловленное связями в системе «забой-очистной комбайн-конвейер».

Список литературы

1. Гуляев В.Г. Исследование влияния некоторых факторов на динамику перемещения очистного комбайна / В.Г. Гуляев, Н.Н.Мотин. – Донецк, 1984.– 10 с.– Деп. в ЦНИЭИУголь, №2764. Оpubл. в сб. ВИНТИ «Депонированные рукописи»: М., 1984, №3(149).
2. Гуляев В.Г. Определение кинетической характеристики трения очистного комбайна с цепным тяговым органом / В.Г. Гуляев, К.В. Жуков // Наук. Вісник нац. гірн. академії України. – 1999. – №2. – С. 54-57.
3. Гуляев В.Г. Влияние характеристик трения опор комбайна о конвейер на адекватность математической модели двухдвигательного очистного комбайна / В.Г. Гуляев, К.В. Жуков // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромехнічна. – 2001. – Вип. 27.– С. 170-176.
4. Динамические процессы горных машин / Докукин А.В., Красников Ю.Д., Хургин З.Я. и др. – М.: Наука, 1972. – 150 с.
5. Бойко Н.Г. Динамика очистных комбайнов [монография] / Н.Г. Бойко.– Донецк: РВА ДонНТУ, 2004. – 206 с.
6. Нечаевский В.М. Об использовании обратного построения Льенара для определения кинетической характеристики трения между угольным комбайном и конвейером / В.М. Нечаевский // Научные сообщения ИГД им. Скопинского. – 1972. – Вып. 93 – С. 134-139.
7. Справочник по триботехнике – в 3 т. / под общей ред. М. Хебды и А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 1. Теоретические основы. – 400 с.: илл.

Стаття надійшла до редакції 01.10.2012

**В.Г. Гуляев, С.Ю. Харламов. Донецький національний технічний університет**

**Встановлення оцінок кінетичних характеристик тертя в опорах очисного комбайна**

*Викладено методику і результати визначення оцінок кінетичної характеристики тертя в опорах комбайну при прискореному та уповільненому його русі по конвеєру в режимі релаксаційних автоколивань. У якості вихідних даних використані результати натурного експерименту і встановлені закономірності досліджуваного процесу.*

**Ключові слова:** очисний комбайн, кінетична характеристика тертя, релаксаційні автоколивання, нерівномірність швидкості переміщення комбайну.

**V. Gulyaev, S. Kharlamov. Donetsk National Technical University**

**Estimating Kinetic Characteristics of Friction in Shearer Supports.**

*The paper provides the methods and results of estimating kinetic characteristics of friction in shearer supports taking into account the friction force, which appears in the process of the shearer's accelerated and decelerated motion along the conveyor in the mode of relaxation self-excited oscillations. Using experimental results as output data we defined the regularities of the process under consideration.*

**Keywords:** shearer, kinetic friction characteristics, relaxation oscillations.