

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕНИЯ В ОПОРАХ КОМБАЙНА С УПРУГИМ ТЯГОВЫМ ОРГАНОМ**

В.Г.Гуляев, докт. техн. наук, проф., К.В.Жуков, научн. сотр.,  
А.А.Артемьева, магистрант,  
Донецкий национальный технический университет

*Рассмотрны методики определения кинетической характеристики трения очистного комбайна с цепным тяговым органом*  
**очистной комбайн, кинетическая характеристика трения, релаксационные автоколебания**

**Актуальность темы.** 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 применением различных методик установления этих закономерностей [3].

**Постановка задач исследования.** 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 достоверной характеристики трения с учетом ее изменчивости на этапах ускоренного и замедленного движения комбайна.

**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 шахте «Октябрьская» ПО «Донецкуголь». Объект исследования - двухдвигательный ОК 1ГШ68. Измеряемые и осциллографируемые величины: мгновенная скорость перемещения ОК и усилие подачи (крутящий момент на валу гидромотора).

Для режима холостого хода ОК расчетная схема приведена на рис. 1.

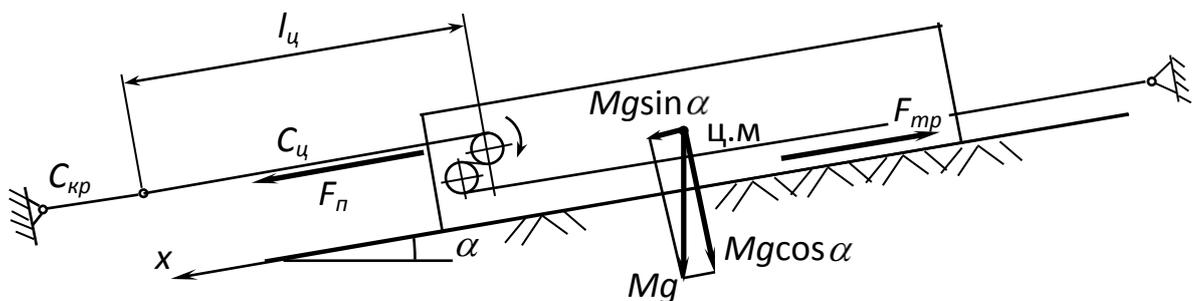


Рисунок 1 – Расчетная схема натурального эксперимента

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

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

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

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

$C$  – коэффициент жесткости последовательно соединенных узлов 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;

$V_0$  – линейная 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 (1):

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

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), что позволило установить следующие особенности изучаемых процессов.

1. В каждом периоде релаксационных колебаний ОК можно выделить участки останова, ускоренного и замедленного движения. Коэффициент трения находится по зависимости:  
при  $\dot{x} = 0$

$$\mu = \begin{cases} [C(V_0t - x)/M \pm g \sin \alpha] / g \cos \alpha, & \text{если } [C(V_0t - x)/M \pm g \sin \alpha] / g \cos < \mu_1(0); \\ \mu_1(\dot{x}), & \text{если } [C(V_0t - x)/M \pm g \sin \alpha] / g \cos \geq \mu_1(0); \end{cases}$$

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

где  $\mu_1(0)$  – свободный член аппроксимирующей зависимости  $\mu_1 = f(\dot{x})$ ;  $\mu_1(\dot{x})$  – кинетический коэффициент трения, соответствующий ускоренному движению ОК;  $\mu_2(\dot{x})$  кинетический коэффициент трения, соответствующий замедленному движению ОК.

2. Более достоверный результат можно получить, воспользовавшись методикой проф. Крагельского, так как, при использовании обратного построения Льенара, погрешности

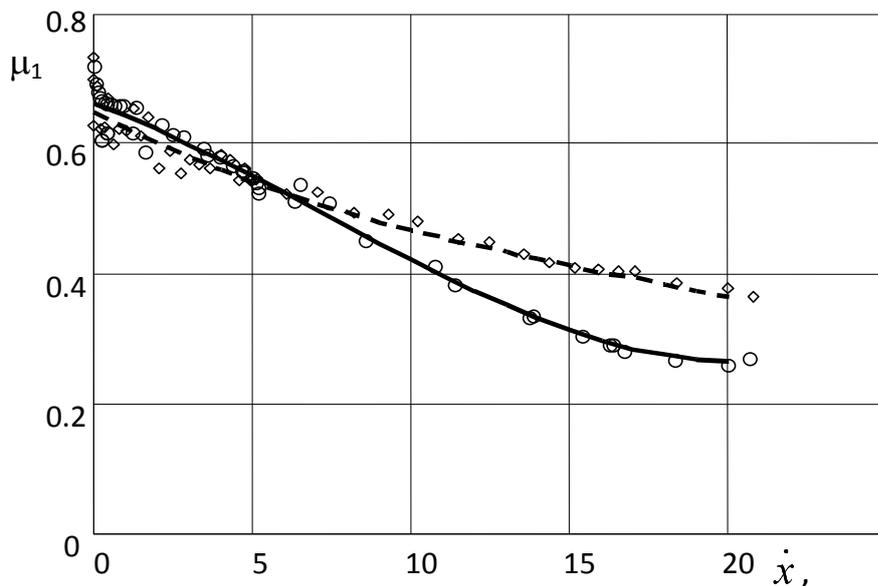


Рисунок 2 – Кинетический коэффициент трения ОК о конвейер для ускоренного движения ОК

появляются при аппроксимации фазовой траектории и при оценке коэффициента жесткости крепления цепи.

Коэффициент трения  $\mu_1(\dot{x})$ , вычисленный по обеим методикам, аппроксимировался полиномами третьей степени методом

наименьших квадратов. На рис. 2 приведены результаты обработки экспериментальных данных и регрессионные кривые. Сплошной линией обозначена зависимость, полученная по методике обратного построения Льенара:

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

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

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

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

3. Кинетический коэффициент трения  $\mu_2$  (при отрицательных значениях ускорения) зависит от максимальной мгновенной скорости

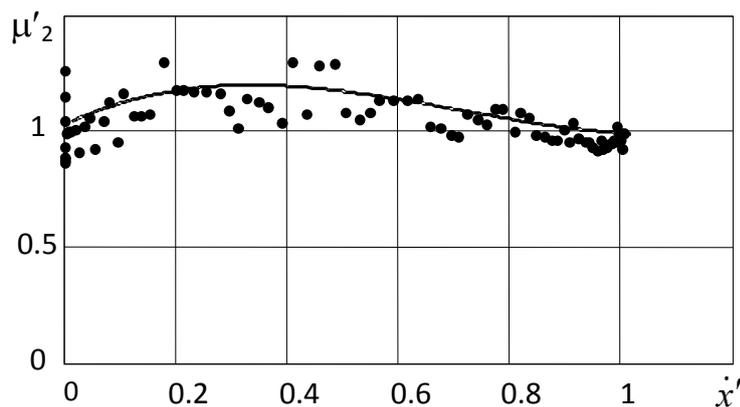


Рисунок 3 – Кинетический коэффициент трения ОК о конвейер для замедленного движения

подачи. На рис. 3 приведены результаты опытных данных, обработанных по методике проф. Крагельского, и аппроксимирующая зависимость (10) в относительных единицах. За базисные величины приняты максимальная мгновенная скорость пульса подачи и

соответствующее ей значение  $\mu_1$ .

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

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

Совместное решение уравнений (1), (2), (6), (8), (9), (10) позволяет определять параметры автоколебательного процесса перемещения в направлении подачи и тяговое усилие (нагрузку на механизм подачи) на холостом ходу ОК. Некоторые результаты моделирования для ОК 1ГШ68 приведены на рис. 4, 5.

На рис. 5 результаты моделирования изображены сплошными линиями, результаты обработки экспериментальных данных – штриховыми. Сила трения обозначена более тонкими линиями. 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, учитывая непрерывность 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 исследований натурального объекта и модели позволяет сделать следующие выводы:

# 1. Впервые предложена и реализована методика определения

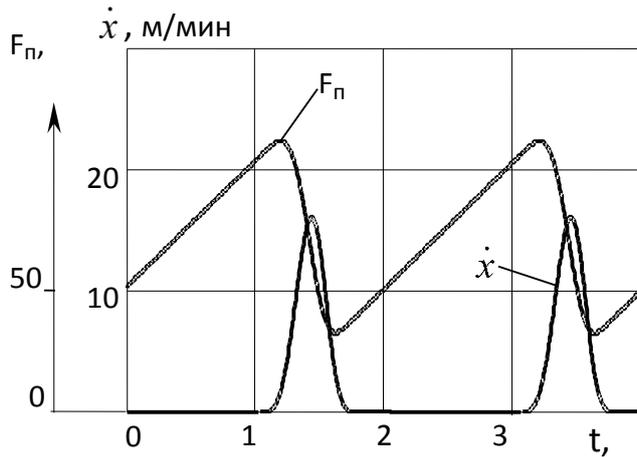


Рисунок 4 – Скорость и усилие подачи при холостом ходе ОК

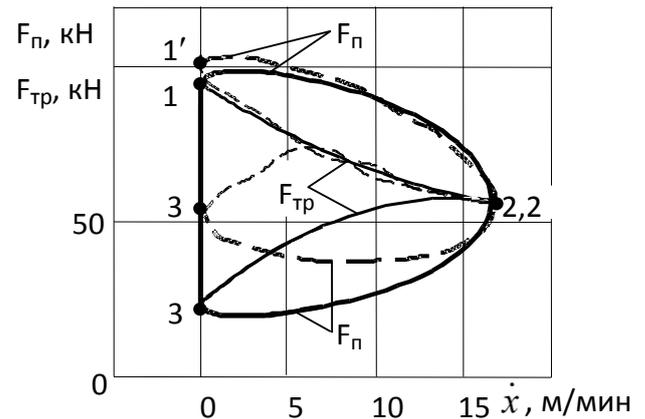


Рисунок 5 – Усилие подачи и сила трения в зависимости от скорости

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, адекватную в главном реальному объекту.

3. При дальнейших исследованиях в математической модели динамики рабочих процессов ОК должны учитываться зависимость продольной жесткости ЦТО от провисания рабочей ветви и взаимодействие силовых подсистем ОК, обусловленное связями в системе «забой-очистной комбайн-конвейер».

Список источников.

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