

УДК 620.179

DOI: 10.12737/article_5ac49dc391a5f0.62517432

Е.А. Лукашев, М.И. Сидоров, М.Е. Ставровский

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРА ФРИКЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ПОВЫШЕНИИ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ

С использованием примера Ван-дер-Поля разработана математическая модель фрикционных автоколебаний при топохимической кинетике. Для решения задач повышения живучести систем исследовано изменение характера фрикционных автоколебаний при варьировании скорости скольже-

ния, определяющее изменение скорости перехода потенциальных зародышей в активно растущие ядра адгезионного схватывания.

Ключевые слова: фрикционные автоколебания, модель, сила трения, скорость скольжения, топохимическая кинетика, схватывание.

E.A. Lukashev, M.I. Sidorov, M.E. Stavrovsky

CHARACTER CHANGES OF FRICTION SELF-OSCILLATIONS AT SLIP VELOCITY INCREASE

To solve problems of engineering system durability increase the investigations of changes in friction self-oscillation character at varying a velocity of interacting materials relative displacement are of considerable scientific and practical interest. As N.A. Kaidanovsky defined experimentally self-oscillations disappear at obtaining a critical speed of relative displacement. The paper reports the analysis of the authors' models of mechanical system self-oscillations under different conditions of loading.

A simulator of friction self-oscillations is formed by the authors by the example of a mechanical system (example of Van der Paul). A function defining

the dependence of friction force upon the velocity relative displacement of interacting materials is specified in the model as a kinetic equation of adhesion setting as topo-chemical kinetics of formation and destruction of "welding bridges" in the area of the material contact.

The procedures of a tribo-technical experiment the results of which are shown at the analysis of friction self-oscillations taking into account the accepted model of materials interaction increase considerably data comprehension, a possibility of their analysis and use.

Key words: friction self-oscillations, model, friction force, slip velocity, topo-chemical kinetics, grip.

Введение

Экспериментальным исследованиям влияния скорости относительного перемещения материалов деталей на фрикционные автоколебания посвящено значительное количество трудов различных авторов [1; 2; 4; 5]. Однако данные в разных источниках часто противоречат друг другу. В большинстве исследований отмечается уменьшение амплитуды автоколебаний с повышением скорости скольжения. Проведенные Б.Г. Лурье, В.А. Кудиновым, Н.М. Лисицыным и С.А. Брокли исследования в более широком интервале скоростей для различных сочетаний материалов уз-

лов трения показали, что увеличение скорости перемещения от нулевых значений сначала приводит к снижению амплитуды фрикционных автоколебаний, однако затем происходит увеличение амплитуды. При этом разрывные автоколебания изменяются на гармонические. Экспериментально Н.А. Кайдановским [1] впервые была установлена критическая скорость относительного перемещения, при достижении которой автоколебания исчезают, что затем было подтверждено другими исследователями.

Математическая модель фрикционных автоколебаний, как правило, строится на примере механической системы (пример Ван-дер-Поля), в которой могут возникать самовозбуждающиеся колебания - автоколебания [4]. Эта механическая система схематично представляется в виде

следующей конструкции. Груз (ползун) находится на шероховатой транспортной ленте, которая движется со скоростью v . Ползун прикреплен к неподвижной точке упругой пружиной, создающей упругую силу, которая изменяется по линейному закону (по закону Гука). Если скорость

ленты v выбрана соответствующим образом, то ползун не будет находиться в покое, а будет совершать прерывистые колебания. Такое поведение ползуна объясняется тем, что сила сухого трения между ползуном и лентой не является постоянной величиной, а изменяется в зависимости от скорости скольжения \dot{x} ползуна относительно ленты: $\varphi(\dot{x})$. Пока ползун находится в покое относительно ленты ($\dot{x} = 0$), сила трения возрастает, оставаясь в каждый момент равной приложенной внешней силе. Когда внешняя сила достигает значения, соответствующего критической величине силы трения, происходит перемещение ползуна относительно ленты. При этом в начальный момент сила трения будет уменьшаться при возрастании $|\dot{x}|$, а потом (при достаточно большом значении $|\dot{x}|$) - увеличиваться. Направления силы трения $\varphi(\dot{x})$ и относительной скорости \dot{x} противоположны.

Предполагается, что положение ползуна определяется расстоянием ξ от него до точки, в которой пружина не растянута

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_0) \exp\{-A_0 k_y t^2 [1 - \exp\{-k_x t\}]\},$$

где α - доля покрытия поверхности пятен фрикционного контакта адгезионными ядрами схватывания; α_0 - минимальное значение параметра α (характерное значение для данной фрикционной пары); k_x - константа скорости перехода двухмерных зародышей ядер схватывания в активно растущие ядра схватывания; k_y - константа роста двухмерного ядра схватывания; $A_0 = \pi x_0 / S_0$ (здесь x_0 - начальная концентрация потенциальных зародышей ядер схватывания на пятнах фрикционного контакта; S_0 - площадь поверхности пятен фрикционного контакта).

В этой модели согласование переменных t и v (v - скорость скольжения) определено соотношением

$$t = z / (v + u_0),$$

где z - характерная длина пробега; u_0 - параметр, физический смысл которого устанавливается из соотношения $u_0 = (z/t) - v$ как скорость «захлопывания»

и не сжата. Тогда скорость скольжения записывается в виде

$$\dot{x} = \dot{\xi} - v.$$

Уравнение движения ползуна принимает вид

$$m\ddot{\xi} + \varphi(\dot{\xi} - v) + k\xi = 0. \quad (1)$$

Далее для удобства вводится новая переменная x_* , которая связана с ξ соотношением

$$x_* = \xi + \frac{1}{k} \varphi(-v).$$

Это соотношение означает, что в данный момент точкой отсчета положения ползуна является точка, в которой он находится в равновесии при одновременном действии упругой силы и силы трения.

Функция, определяющая зависимость силы трения от скорости относительного перемещения (скольжения), задается в разработанной авторами модели [2; 5] в форме кинетического уравнения адгезионного схватывания как топохимической кинетики образования и разрушения «мостиков сваривания» в зоне контакта взаимодействующих материалов:

ювенильных участков контакта после их образования, в результате разрушения (пропорционального v) адгезионных ядер, т.е. скорость смачивания и растекания смазочного материала.

Данная модель принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= -cx_1 - q(\varphi(x_2) - \varphi(0)), \end{aligned} \quad (2)$$

где x_1 - положение тела на ленте относительно точки, в которой тело неподвижно относительно ленты; c - жесткость пружины; q - нагрузка, которую тело оказывает на ленту; x_2 - скорость движения тела относительно ленты.

Трение представлено функцией $\varphi(x_2)$ в форме (1) $\alpha = \alpha(v)$ с учетом изменения направления движения при колебаниях ($\alpha_* = 1 - \alpha_0$; ε - малый параметр; функция $th((x_2 - v)/\varepsilon)$ имеет разрыв при смене знака скорости относительного перемещения ползуна и ленты в примере Ван-дер-Поля).

$$\varphi(x_2) = \left(th \left(\frac{x_2 - v}{\varepsilon} \right) \right) \times$$

$$\times \left[1 - \alpha_* \exp \left\{ \frac{-A_0 k_{0,y}^2 z^2}{\left[(x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v) + u_0 \right]^2} \exp \left\{ \frac{-E_{A,y} + \delta_y (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v)}{E_{T,y} + \rho_y (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v)} \right\} \right\} \right] \times$$

$$\times \left[1 - \exp \left\{ \frac{-k_{0,x} z}{\left[(x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v) + u_0 \right]^2} \exp \left\{ \frac{-E_{A,x} + \delta_x (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v)}{E_{T,y} + \rho_x (x_2 - v) \operatorname{sign}(x_2 - v)} \right\} \right\} \right]. \quad (3)$$

С помощью математических моделей (2) и (3) выполнены вычислительные эксперименты, которые затем на качествен-

ном уровне были сопоставлены с описанными в литературе экспериментами.

Изменение характера фрикционных автоколебаний в моделируемой системе исследовали при варьировании следующих параметров: жесткости возвращающей пружины, нагрузки, массы (момента инерции), параметра, характеризующего антифрикционную способность смазочного материала. Кроме того, изменение характера фрикционных автоколебаний исследовали при варьировании физико-химических показателей конструкционных материалов, заданных в модели в виде начальной концентрации зародышей адгезионного схватывания, активности поверхности фрикционного контакта в отношении скорости перехода зародышей в активно растущие ядра адгезионного схватывания, энергии активации перевода потенциальных зародышей в активные ядра адгезионного схватывания, энергии активации процесса роста ядер адгезионного

схватывания, перераспределения вкладов механохимической и тепловой активации поверхности фрикционного контакта (это перераспределение отражает близость условий к изотермическим или адиабатическим с помощью весовых коэффициентов).

Для решения задач повышения живучести систем наибольший интерес представляют исследования изменения характера фрикционных автоколебаний при варьировании скорости скольжения, вызывающего изменение скорости перехода потенциальных зародышей в активно растущие ядра адгезионного схватывания.

Вычислительный эксперимент показал (табл. 1, 2), что увеличение скорости скольжения при постоянстве значений всех других параметров модели приводит к росту частоты (рис. 1а) и амплитуды (рис. 3а) фрикционных автоколебаний.

Таблица 1

Изменение характера фрикционных автоколебаний при увеличении скорости скольжения - v ($b = c = q = 1$)

v	t_A	f_A	t^*	t^*/t_A	t_0	t_0/t_A	$-\varphi(0)$
0,05	Автоколебаний нет; затухающие гармонические колебания						1,0000
0,1	37,29	$2,68 \cdot 10^{-2}$	30,51	0,82	6,78	0,18	0,9973
0,2	15,58	$6,42 \cdot 10^{-2}$	10,53	0,68	5,05	0,32	0,8764
0,3	11,16	$8,96 \cdot 10^{-2}$	6,32	0,57	4,84	0,43	0,6681
0,4	9,47	0,106	4,63	0,49	4,84	0,51	0,5124
0,5	8,63	0,116	3,79	0,44	4,84	0,56	0,4124
0,6	8,00	0,125	3,37	0,42	4,63	0,58	0,3480
0,7	7,58	0,132	2,74	0,36	4,84	0,64	0,3051
0,8	7,37	0,136	2,53	0,34	4,84	0,66	0,2756
0,9	7,16	0,140	2,11	0,29	5,05	0,71	0,2546
1,0	6,95	0,144	1,89	0,27	5,06	0,73	0,2392
1,1	6,95	0,144	1,89	0,27	5,06	0,73	0,2279

1,3	6,74	0,148	1,68	0,25	5,06	0,75	0,2128
1,5	6,53	0,153	1,47	0,23	5,06	0,77	0,2041
2,0	6,53	0,153	1,26	0,19	5,27	0,81	0,1964
2,5	Автоколебаний нет; затухающие гармонические колебания						0,1984
3,5	Автоколебаний нет; затухающие гармонические колебания						0,2147

Примечание. v - скорость ленты; t_A - период автоколебаний; f_A - частота автоколебаний; t^* - время одной «ползущей остановки»; t^*/t_A - доля периода, приходящаяся на «ползущую остановку»; t_0 - время одного скачка; t_0/t_A - доля периода, приходящаяся на скачок; $-\varphi(0)$ - значение параметра модели.

Это соответствует тем экспериментам, в которых зафиксирован рост амплитуды [1; 3]. В вычислительном эксперименте [3] также зафиксировано, что при малых скоростях автоколебания отсутствуют, т.е. возбуждение автоколебаний соответствует жесткому режиму.

Рост скорости относительного перемещения обуславливает возбуждение разрывных автоколебаний, которые при дальнейшем увеличении скорости переходят в автоколебания и становятся близкими к гармоническим: доля периода, приходящаяся на проскальзывание, растет (рис. 2а), а доля периода, приходящаяся на «ползущую остановку», снижается (рис. 2б). И наконец, фрикционные автоколебания вырождаются, а скольжение становится устойчивым. Подобные положения, фиксируемые по результатам вычислительного эксперимента, подтверждались в экспериментальных исследованиях, которые проводились в широком диапазоне скоростей.

Вычислительный эксперимент показал, что при увеличении скорости скольжения происходит уменьшение параметра a^* - смещения центра автоколебаний (рис. 3б) относительно положения равновесия (равновесие силы упругости и силы трения).

В то же время следует отметить, что в вычислительном эксперименте не зафиксирована такая тенденция, как уменьшение амплитуды фрикционных автоколебаний при росте скорости скольжения. Возможно, это связано с изменением температуры в зоне контакта взаимодействующих материалов.

Таблица 2

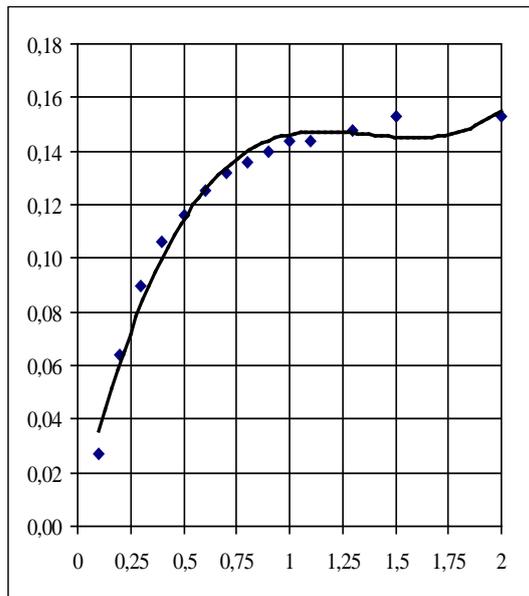
Изменение характера фрикционных автоколебаний при увеличении скорости относительного перемещения материалов - v ($b = c = q = 1$)

v	A	a^*	S^*	b_{\max}	b_{\min}	B	b^*
0,05	Автоколебаний нет; затухающие гармонические колебания						
0,1	$0,44 \pm 0,14$	1,39	1,83	$0,58 \pm 0,09$	$0,01 \pm 0,09$	0,30	0,29
0,2	$0,68 \pm 0,12$	1,16	1,84	$0,80 \pm 0,11$	$0,10 \pm 0,11$	0,45	0,35
0,3	$0,76 \pm 0,14$	0,90	1,66	$0,96 \pm 0,11$	$0,24 \pm 0,11$	0,60	0,36
0,4	$0,94 \pm 0,11$	0,73	1,67	$1,04 \pm 0,11$	$0,35 \pm 0,11$	0,69	0,34
0,5	$1,06 \pm 0,10$	0,63	1,69	$1,12 \pm 0,11$	$0,48 \pm 0,11$	0,80	0,32
0,6	$1,13 \pm 0,10$	0,56	1,69	$1,23 \pm 0,10$	$0,59 \pm 0,10$	0,91	0,32
0,7	$1,20 \pm 0,08$	0,50	1,70	$1,31 \pm 0,10$	$0,67 \pm 0,10$	0,99	0,32
0,8	$1,30 \pm 0,09$	0,48	1,78	$1,41 \pm 0,10$	$0,76 \pm 0,10$	1,08	0,32
0,9	$1,38 \pm 0,09$	0,46	1,84	$1,52 \pm 0,09$	$0,90 \pm 0,09$	1,21	0,31
1,0	$1,46 \pm 0,09$	0,42	1,85	$1,52 \pm 0,09$	$0,99 \pm 0,09$	1,25	0,31
1,1	$1,56 \pm 0,09$	0,45	2,01	$1,59 \pm 0,09$	$1,11 \pm 0,09$	1,35	0,28
1,3	$1,72 \pm 0,10$	0,41	2,13	$1,84 \pm 0,09$	$1,29 \pm 0,09$	1,56	0,28
1,5	$1,98 \pm 0,08$	0,40	2,38	$1,91 \pm 0,09$	$1,50 \pm 0,09$	1,70	0,25
2,0	$2,32 \pm 0,09$	0,46	2,78	$2,34 \pm 0,09$	$2,00 \pm 0,09$	2,17	0,21
2,5	Автоколебаний нет; затухающие гармонические колебания						
3,5	Автоколебаний нет; затухающие гармонические колебания						

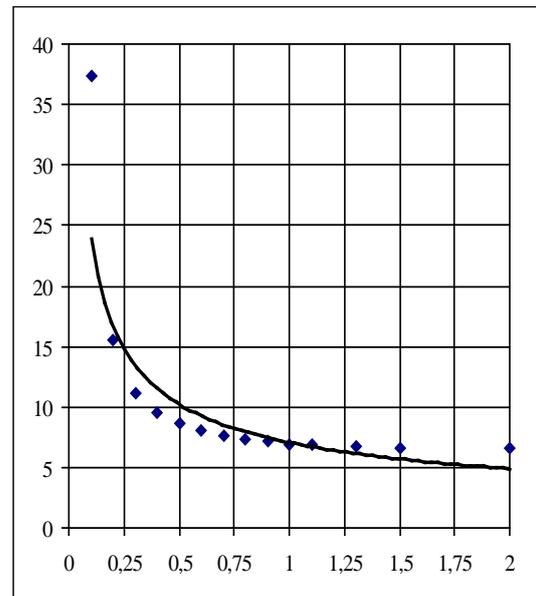
Примечание. v - скорость ленты; A - амплитуда автоколебаний; a^* - смещение центра автоколебаний; S^* - сумма параметров A и a^* ; b_{\max} - максимальная скорость при скачке; b_{\min} - скорость при «ползущей остановке»; V - средняя скорость при автоколебании; b^* - смещение центра амплитуды изменения скорости при автоколебании.

Триботехнические испытания являются сложными и многофакторными: при изменении одного параметра, например режима нагружения или скорости перемещения, другие параметры, а соответственно и параметры модели, также будут изменяться. Это относится и к температуре в зоне контакта взаимодействующих мате-

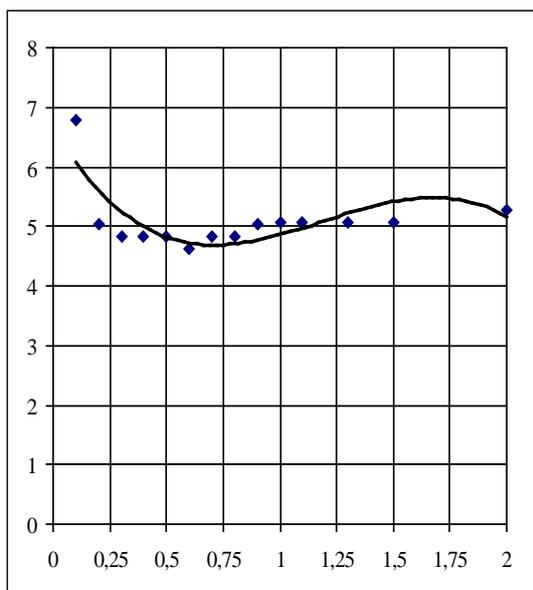
риалов, энергии механохимической активации поверхностей и изменению гидродинамических условий. При изменении скорости скольжения эти изменения будут вносить свой вклад в изменение параметров фрикционных автоколебаний.



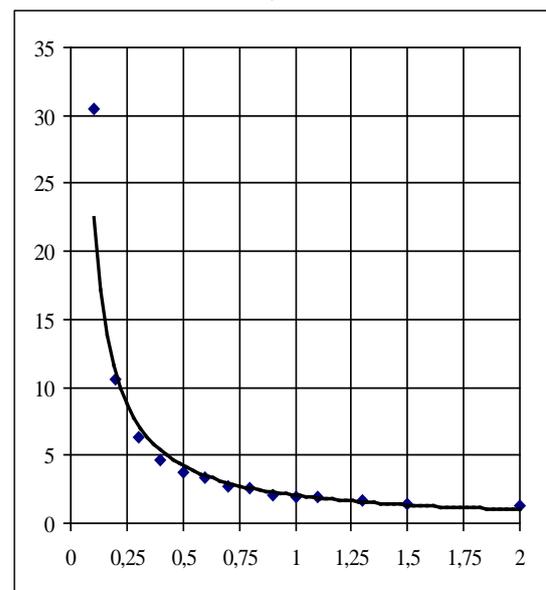
а)



б)



в)

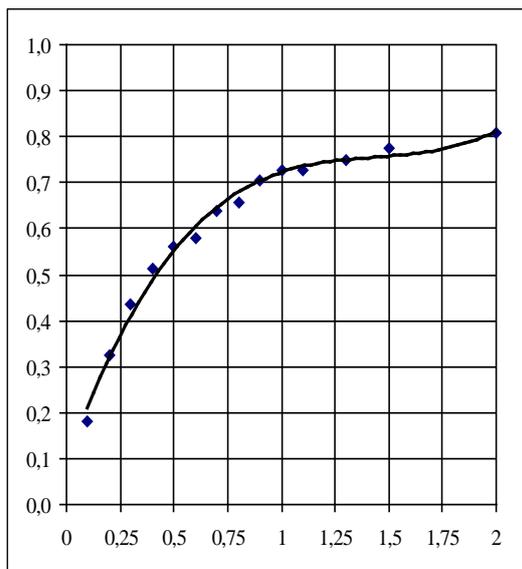


г)

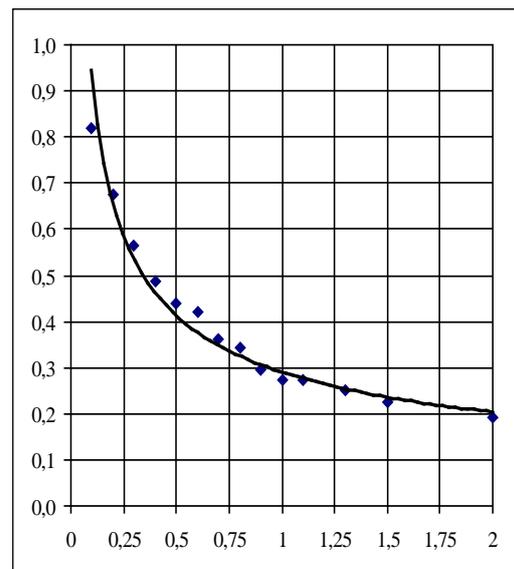
Рис. 1. Изменение частоты f_A (а), периода автоколебаний t_A (б), времени скачка t_0 (в) и времени «ползущей остановки» t^* (г) при увеличении скорости скольжения

Триботехнический эксперимент в его классической постановке не позволяет выделить вклад каждого из факторов, влияющих на протекающие процессы, а также обеспечить условия, когда значения этих факторов не будут изменяться. Ф.П.Боуден указывал на существенный вклад увеличения скорости скольжения в изменение гидродинамики смазывающего слоя.

В рамках исследуемой разработанной модели параметр, характеризующий смазывающую способность материалов (u_0), принят постоянным, а в предлагаемую модель введена зависимость $u_0 = u_0(v)$, которая позволяет описать экспериментальные результаты.



а)



б)

Рис. 2. Изменение долей скачка t_0/t_A (а) и «ползущей остановки» t^*/t_A (б) в периоде автоколебаний при увеличении скорости скольжения

Еще одна тенденция, которая наблюдается по результатам вычислительного эксперимента, может быть рассмотрена по поведению параметра S^* при увеличении скорости скольжения (рис. 3в). Этот параметр рассматривается как сумма A и a^* , как максимальное отклонение ползуна на движущейся ленте при фрикционных автоколебаниях. Отмечается, что зависимость S^* от скорости относительного перемещения (скольжения) имеет минимальное значение, т.е. в начальный момент (в лабораторной системе координат) с ростом скорости максимальное отклонение уменьшается, а затем наблюдается его

рост. Эта тенденция соответствует моменту, который наблюдается экспериментально для амплитуды автоколебаний. Результаты вычислительного эксперимента, приведенные в статье, показывают, что если они будут сопоставлены с экспериментальными результатами в соответствии с подходом, который был использован при проведении верификации математической модели топохимической кинетики адгезионного схватывания, т.е. для анализа многопараметрических систем, то они могут дать богатую информацию о поведении конструкционных и смазочных материалов при трении и реализации автоколебаний.

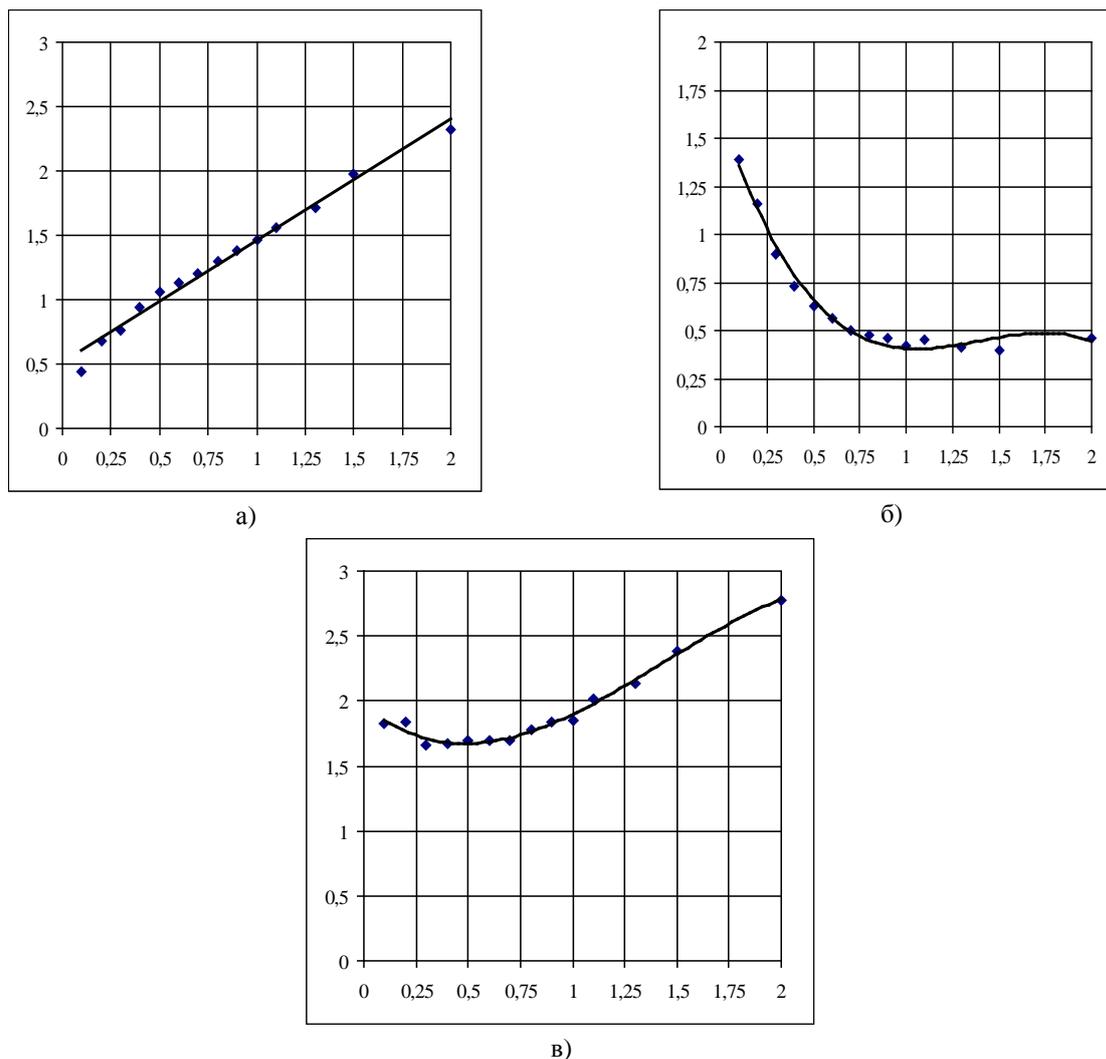


Рис. 3. Изменение амплитуды фрикционных автоколебаний (а), смещения центра (б) и суммы параметров (в) при увеличении скорости скольжения

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что информативность методик триботехнического эксперимента, результаты которых могут быть представлены при анализе характера фрикционных автоколебаний (с учетом принятой модели взаимодействия материалов), будет значительно

превышать информативность, которую дают классические триботехнические исследования, что позволит исследователям существенно повысить объем представляемых данных, их достоверность и возможности аналитики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кайдановский, Н.Л. Природа механических автоколебаний, возникающих при сухом трении / Н.Л. Кайдановский // ЖТФ. - 1949. - Т. 19. - Вып. 9. - С. 985-996.
2. Лукашев, Е.А. Топохимическая кинетика адгезионного взаимодействия двух твердых тел в процессе трения скольжения / Е.А. Лукашев // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. - 2003. - № 2 (7). - С. 13-22.
3. Мерзликин, А.Б. Математическое моделирование фрикционных автоколебаний при топохимической кинетике адгезионного схватывания в режиме трения скольжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Б. Мерзликин. - М., 2010. - 19 с.
4. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. - М.: Физматлит, 2007. - 368 с.

5. Юдин, В.М. Трибохимия водородного износа: монография / В.М. Юдин, Е.А. Лукашев, М.Е. Ставровский. - М.: МГУС, 2004. - 282 с.
6. Современная трибология. Итоги и перспективы / отв. ред. К.В. Фролов. - М.: ЛКИ, 2008. - 480 с.
7. Гаркунов, Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности при трении. Водородное изнашивание металлов / Д.Н. Гаркунов. - М.: Изд-во МСХА, 2004. - 384 с.
8. Хайнике, Г. Трибохимия / Г. Хайнике. - М.: Мир, 1987. - 582 с.
9. Юркин, Ю.А. Верификация математических моделей механохимической кинетики внешнего трения и накопления повреждений в конструкционных материалах при разрушении: автореф.

дис. ... канд. техн. наук / Ю.А. Юркин. - М., 2007. - 27 с.

10. Кориули, И.П. Применение закономерностей трения при постоянном контактировании к прерывистому трению / И.П. Кориули, С.Б. Ратнер // Трение и износ. - 1984. - Т. 5. - № 5. - С. 833-840.
11. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов, Л.И. Бершадский; под ред. Б.И. Костецкого. - Киев: Техника, 1976. - 292 с.
12. Vagin, A.V. Improving the life of artillery systems / A.V. Vagin, M.I. Sidorov, A.Y. Albagachiev, M.E. Stavrovskii // Russian Engineering Research. - 2017. - Т. 37. - № 3. - С. 211-217.

1. Kaidanovsky, N.L. *Nature of Mechanical Self-oscillations Arising at Dry Friction* / N.L. Kaidanovsky // JTF. - 1949. - Vol. 19. - Ed.9. - pp. 985-996.
2. Lukashov, E.A. Topo-chemical kinetics of adhesion interaction of two solid during sliding friction / E.A. Lukashov // *Theoretical and Applied problems of Service*. - 2003. - No.2(7). - pp. 13-22.
3. Merzlikin, A.B. Simulation of friction self-oscillations at topo-chemical kinetics of adhesion setting at sliding friction: *author's abstract of the Can. Eng. Degree thesis* / A.B. Merzlikin. - М., 2010. - pp. 19.
4. Myshkin, N.K. *Friction, Lubrication, Wear. Physical Fundamentals and Tribology Technical Applications* / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. - М.: Physmathlit, 2007, 2007. - pp. 368.
5. Yudin, V.M. *Tribo-chemistry of Hydrogen Wear: monograph* / V.M. Yudin, E.A. Lukashov, M.E. Stavrovsky. - М.: MSUS, 2004. - pp. 282.
6. *Modern Tribology. Summary and Outlooks* / responsible editor K.V. Frolov. - М.: LKI, 2008. - pp. 480.

7. Garkunov, D.N. *Scientific Discoveries in Tribotechnology. Effect of Wearlessness at Friction. Metal Hydrogen Wear* / D.N. Garkunov. - М.: Publishing House of MAA, 2004. - pp. 384.
8. Heinike, G. *Tribo-chemistry* / G. Heinike. - М.: World, 1987. - pp. 582.
9. Yurkin, Yu.A. *Verification of Simulators of Mechanical Chemical Kinetics of External Friction and Damages Accumulations in Structural Materials at Destruction: author's abstract of Can. Eng. degree* / Yu.A. Yurkin. - М., 2007. - pp. 27.
10. Koriuly, I.P. Application of friction regularities at constant contact with interrupted friction / I.P. Korioly, S.B. Ratner // *Friction and Wear*. - 1984. - Vol.5. - No.5. - pp. 833-840.
11. Kostetsky, B.I. *Material Surface Strength at Friction* / B.I. Kostetsky, I.G. Nosovsky, A.G. Karaulov, L.I. Bershsky: under the editorship of B.I. Kostetsky. - Kiev: Engineering, 1976. - pp. 292.
12. Vagin, A.V. Improving the life of artillery systems / A.V. Vagin, M.I. Sidorov, A.Y. Albagachiev, M.E. Stavrovskii // Russian Engineering Research. - 2017. - Т. 37. - № 3. - С. 211-217.

Статья поступила в редколлегию 13.03.18.
Рецензент: д.т.н., профессор Цырков А.В.

Сведения об авторах:

Лукашев Евгений Алексеевич, д.т.н., профессор, науч. сотрудник НИИ «Геодезия», e-mail: lukashov@yandex.ru.

Сидоров Михаил Игоревич, к.т.н., первый зам. директора - зам. директора по науч. работе НИИ «Геодезия», e-mail: info@niigeo.ru.

Lukashov Yevgeny Alexeevich, D. Eng., Prof., Research assistant of RI "Geodesy", e-mail: lukashov@yandex.ru.

Sidorov Michael Igorevich, Can. Eng., First Deputy Director-Deputy Director for Scientific Work of RI "Geodesy", e-mail: info@niigeo.ru.

Ставровский Михаил Евгеньевич, д.т.н., профессор, зам. директора НИИ «Центр экологической промышленной политики», e-mail: m.stavrovsky@eipc.center.

Stavrovsky Michael Yevgenievich, D. Eng., Deputy Director of RI "Center for Ecological Industrial Policy", e-mail: m.stavrovsky@eipc.center.