

Обоснование формализованной оценки эффективности технологических и производственных систем

М.И. Сидоров, к.т.н., первый заместитель директора – заместитель директора по научной работе, ФКП «НИИ «Геодезия», г. Красноармейск, Московская область,

М.Е. Ставровский, д.т.н., профессор, зам. директора, ФГАУ «Научно-исследовательский институт Центр экологической промышленной политики», г. Мытищи, Московская область,

В.В. Пирогов, к.т.н., старший научный сотрудник, ФГБУН Институт конструкторско-технологической информатики РАН, г. Москва,

Е.С. Юрцев, начальник сводного отделения центра технологического развития, ФГУП «Научно-производственное объединение «Техномаш», г. Москва

С использованием примера Ван-дер-Поля разработана математическая модель фрикционных автоколебаний при топохимической кинетике. Отмечено качественное соответствие результатов расчета выполненных с ее использованием с экспериментальными данными исследователей.

Фрикционные автоколебания, модель, сила трения, скорость, топохимическая кинетика, схватывание.

The substantiation of the formalized estimation of effectiveness of technological and production systems

M.I. Sidorov, Ph.D., First Deputy Director – Deputy Director for Research, Federal State Enterprise «Scientific Research Institute «Geodesy»

(FKP «Research Institute «Geodesy»), Krasnoarmeysk, Moscow region,

M.E. Stavrovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director, Federal State-Owned Autonomous Institution «Research Institute «Center for Environmental Industrial Policy» (FGAU «SRI «CEPP»), Mytishchi, Moscow region,

V.V. Pirogov, Ph.D., Senior Researcher, FGBUN Institute of Design and Technological Informatics, Russian Academy of Sciences, Moscow,

E.S. Yurtsev, Head of the Integrated Branch of the Center for Technological Development, FSUE «Scientific and Production Association «Technomash», Moscow

Using the example of van der Pol developed a mathematical model of frictional self-oscillations in topochemically kinetics. Marked qualitative correspondence of the results of calculation performed using the experimental data of researchers.

Frictional self-oscillations, model, frictional force, speed, topochemically kinetics, setting.

Модель топохимической кинетики адгезионного схватывания двух взаимодействующих при трении поверхностей сводится к следующему. В зоне контакта образуются зародыши и растущие ядра схватывания. На разрушение этих ядер требуется вполне определенное количество энергии, расходуемой на единицу пути; диссипация которой приводит к особенностям реализации процесса [7]. Образование ядер схватывания на пятнах контакта представляется как топохимическая реакция, которая протекает в двумерном реакторе. При этом регистрируются два процесса и две скорости – скорость перемещения относительно друга двух контактирующих поверхностей и скорость топохимической реакции, или времени «пробегания» и продолжительности топохимической реакции. Соотношения между этими параметрами будут определять особенности процесса. Задача управления процессом взаимодействия материалов сводится к заданию параметров топохимических реакций (констант скоростей) – воздействием на процессы сорбции, тепло- и массопереноса и т.п.

Постоянные импульсные изменения, происходящие на уровне участков поверхностей, микрообъемов и микронеровностей вместе с конкурирующими процессами изнашивания и образования вторичных структур (с возможной регенерацией тонких пленок), обуславливают

широкополосную динамическую нагруженность контакта и микроколебания. Частоты этих микровибровозбуждений соизмеримы с частотами собственных колебаний механической трибосистемы, что предопределяет взаимовлияние динамических процессов в зоне взаимодействия материалов и в механической системе.

В литературе предполагается, что при определенных скоростях скольжения возможно перерастание этого потока микроколебаний в макроколебания, создающие нестабильность трения на макроуровне. Соответственно, возможен переход скольжения из равномерного в неравномерное. Это обстоятельство приводит к необходимости объяснения, каким образом происходит синхронизация микроколебаний, что, в свою очередь, может дать формулировку задач, которые рассмотрены в разделах теории колебаний, в частности к задачам о синхронизации колебаний и затягивании частоты.

Для устранения или допустимого снижения уровня фрикционных автоколебаний применяют разнообразные методы, которые могут быть разделены на две большие группы: методы улучшения триботехнических характеристик узлов трения и методы улучшения упруго-диссипативных характеристик фрикционной системы в целом. Снижение фрикционных автоколебаний достигается методами обеих групп, но полное устранение возможно только методами первой группы.

Методы улучшения триботехнических характеристик путем предотвращения перепада трения на участках фактического касания основываются на снижении уровня трения, например, механической или гидравлической разгрузкой, либо на снижении изменения трения в различных режимах работы, например, синтезом на поверхности пленок, устойчивых к внешним воздействиям. Большинство методов первой группы включают оба фактора и предусматривают четыре пути воздействия: на геометрию и кинематику контакта; на способ смазывания и смазочный материал; на конструкционный материал; на качество рабочих поверхностей.

К методам улучшения упруго-диссипативных характеристик фрикционной системы относится, прежде всего, повышение жесткости механической системы, в особенности последнего звена привода. Повышение жесткости механизмов подачи, например, станков, достигается за счет: сокращения длины цепи подачи; повышения редукции на последнем звене; применения достаточно жестких валов; применения жестких планок для опор ходовых винтов и т.п.; применения предварительного натяга упорных подшипников.

Диссипативные характеристики механических систем определяются конструкционным демпфированием в неподвижных стыках и демпфированием в материалах. Конструкционное демпфирование обусловлено трением покоя при микросмещениях поверхностей, а рассеиваемая при этом энергия пропорциональна квадрату амплитуды, что дает возможность учета в форме линейного вязкого трения. Демпфирование в материалах связано со способностью материалов рассеивать энергию механических колебаний в форме внутреннего трения, которое обусловлено микропластическими деформациями в объеме материала. В кристаллических материалах демпфирование связано с движением дефектов кристаллической решетки, но его удельная мощность (потери энергии за период колебаний) обычно менее 2%. Разработаны специальные полимерные, металлические и композиционные материалы с повышенной демпфирующей способностью. Применяются также дополнительные демпфирующие устройства.

Все это говорит о повышенном интересе к фрикционным колебаниям. Другая сторона проблемы фрикционных автоколебаний связана с износом. При малых скоростях скольжения, особенно в моменты остановок, велико адгезионное схватывание поверхностей фрикционного контакта, что часто приводит к заеданиям и, как следствие, вырыванию и диспергированию поверхностного слоя.

Анализ принципов построения математических моделей фрикционных автоколебаний показал, что для описания колебательных свойств триботехнической системы необходимо отказаться от трактовки сухого трения, как кулоновского трения, когда коэффициент трения не зависит от скорости скольжения, а принять падающую кинетическую характеристику трения, когда, по крайней мере, коэффициент статического трения превышает коэффициент динамического (кинетического) трения.

Анализ экспериментальных работ, посвященных фрикционным автоколебаниям, показал, что возникновение фрикционных автоколебаний обеспечивается только падающей кинетической характеристикой трения. Характер фрикционных автоколебаний зависит от скорости проскальзывания, жесткости системы, нагрузки на контакт, момента инерции движущегося тела, коэффициента трения и смазывающей способности технологической или смазочной жидкости.

Математическая модель фрикционных автоколебаний для того, чтобы быть базовой, например, вибрационной и акустической триботехнической диагностики должна содержать наиболее полную характеристику триботехнической системы, с позиций физико-химической механики, механохимии, физической химии и химической физики, и давать прогностические зависимости, качественно согласующиеся с экспериментальными результатами.

Для возникновения фрикционных автоколебаний кинетическая характеристика трения – зависимость коэффициента трения (или силы трения) от скорости скольжения, должна иметь следующий вид – при увеличении скорости скольжения первоначально должно фиксироваться падение коэффициента трения, а затем наблюдаться его рост. Подобного типа кинетические характеристики трения были предложены в работах [1,3,7], а их верификация частично выполнена в диссертационном исследовании А.Б. Мерзликина [4]. Предложенные кинетические характеристики трения качественно подобны тем, которые требуются для возникновения фрикционных автоколебаний. Задача дальнейших исследований заключается в изучении подобия наблюдаемых в эксперименте закономерностей и закономерностей, получаемых расчетным путем на качественном уровне, т.е. необходимо проследить тенденции, которые наблюдаются при изменении параметров триботехнической системы.

Обзор экспериментальных результатов [2] позволил установить, что характер фрикционных автоколебаний в основном прослеживается по частоте и амплитуде автоколебаний, кроме того, иногда упоминаются характерные времена остановки или скачка.

Основными варьируемыми параметрами для фрикционных автоколебаний являются жесткость привода, скорость скольжения, нагрузка на контактирующие поверхности, момент инерции (масса). Влияние на характер фрикционных автоколебаний смазочных материалов – их характеристик, устанавливается только на качественном уровне путем сравнения конкретных смазочных материалов. Часто вязкость среды используется в качестве характеристики смазочного материала. Однако, как показал Хольм Р. [6], этот параметр не может в полной мере характеризовать смазочный материал.

В связи с этим в рамках исследований трибохимической кинетики внешнего трения была поставлена задача на математической модели фрикционных автоколебаний проследить влияние на характер автоколебаний, прежде всего, перечисленных параметров, а затем перейти к изучению влияния других параметров автоколебательной системы, которые не фиксировались ранее в эксперименте, но влияние которых может быть прослежено на математической модели.

В математических моделях фрикционных автоколебаний, как правило, принимается аппроксимация зависимости силы трения от скорости скольжения кубической параболой:

$$F(u) = q(\text{sign}(u) - \alpha_1 u + \alpha_3 u^3), \quad u = v - \dot{x}; \quad (1)$$

где $\text{sign}(u) = 1$ (сигнатура) при $v > \dot{x}$ и $\text{sign}(u) = -1$ при $v < \dot{x}$;

v – скорость скольжения ленты;

\dot{x} – скорость тела в лабораторной системе координат;

u – скорость тела относительно ленты;

q , α_1 и α_3 – положительные постоянные;

q – множитель, пропорциональный силе нормального давления на ленту;

$q = mgf$ (m – масса тела на ленте, g – ускорение свободного падения, f – коэффициент сухого трения).

В случае относительного покоя, когда тело относительно ленты не движется, т.е. при $v = \dot{x}$ справедливо неравенство $-q \leq F(u) \leq q$.

Однако подобная аппроксимация является формальной, а параметры зависимости не отражают тех процессов, которыми сопровождается трение. Особенно это касается констант α_1 и α_3 , которые собственно и задают характер автоколебаний. В рамках этих моделей результаты эксперимента только отчасти поддаются интерпретации с позиций трибологии и физико-химической механики.

В разрабатываемой математической модели кинетическая характеристика трения определяется топахимической кинетикой при формировании и последующем разрушении

мостиков на контакте взаимодействующих материалов [1, 7]. В математической модели для кинетики образования и роста ядер адгезионного схватывания при трении скольжения предполагается, что кинетика образования и роста этих ядер реализуется в движущейся двумерной среде, а переменная времени в реагирующей системе связана с переменной скорости изменяющейся реакционной системы. Один из вариантов решения задачи кинетики [7]:

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

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 двумерных зародышей ядер схватывания в активно растущие ядра схватывания,

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

Параметр u_0 характеризует материал смазки, растекание которого блокирует разрастание ядер адгезионного схватывания. Процесс растекания должен характеризоваться некоторой кинетикой, который в данном конкретном рассмотрении характеризуется параметром u_0 , постоянным для определенных условий процесса взаимодействия материалов.

При формулировке модели предположено, что взаимодействие материалов происходит в условиях, характеризующихся как промежуточные между изотермическими и адиабатическими. Данные условия вводятся с использованием весовых коэффициентов, характеризующих преобразование механической энергии в тепловую и химическую – в форме активации поверхности пятен контакта.

Образование ядер схватывания в определенные периоды приводит к их разрушению при скольжении поверхностей. Данное разрушение будет создавать другую поверхность (в энергетическом отношении) в большей степени насыщенную дефектами – активными центрами. Этот процесс отражен тем, что принята следующая закономерность: снижение энергии активации (зарождения зародышей) пропорционально скорости относительного перемещения поверхностей или функции от скорости ($k_x = k_x(v)$).

Аналогичная закономерность предполагается для константы скорости роста ядер схватывания ($k_y = k_y(v)$), поскольку места разрушения ядер должны обладать повышенной поверхностной энергией, которая кинетически должна реализовываться в большей скорости распространения зоны реакции при росте вновь образующихся ядер.

Процесс диссипации механической энергии будет приводить к повышению температуры поверхностей за счет необратимости процесса образования и роста ядер схватывания и их разрушения. Данный процесс отразится как локальное повышение температуры в зоне реакции ($T = T(v)$).

Константа скорости химической реакции в обобщенном виде представлена уравнением Аррениуса:

$$k_x = k_{0,x} \exp \left\{ - \frac{h_x [E_{A,x} - \delta_x g(v)]}{E_{t,x} + \rho_x g(v)} \right\};$$

$$k_y = k_{0,y} \exp \left\{ - \frac{h_y [E_{A,y} - \delta_y g(v)]}{E_{t,y} + \rho_y g(v)} \right\} \quad (3)$$

В представлении (3) $E_{A,x}$ – энергия активации перехода зародыша в активно растущее ядро (для случая первоначальной, т.е. исходной поверхности), $E_{T,x}$ – тепловой потенциал (аналог RT в уравнении состояния идеального газа), $g(v)$ – функция преобразования энергии: $\delta_x g(v)$ – преобразование механической энергии в поверхностную энергию дефектов, $\rho_x g(v)$ – преобразование механической энергии в тепловую энергию. Для целей качественного исследования первоначально было принято $\delta_x + \rho_x = 1$ и $g(v) = av + b$ ($a, b - const$). Коэффициенты δ_x и ρ_x отражают близость условий зоны реакции (контакта поверхностей) к изотермическим или адиабатическим. Для условий близких к изотермическим (хороший теплоотвод и высокая теплопроводность материала) предполагается $\rho_x \approx 0$ и $\delta_x \approx 1$; для условий близких к адиабатическим (плохой теплоотвод и низкая теплопроводность материала), соответственно, $\rho_x \approx 1$ и $\delta_x \approx 0$ $\delta_x \cong 0$. Во втором выражении (3) аналогичные величины имеют тот же физико-химический смысл.

В этом случае все характерные зависимости коэффициента трения от скорости скольжения представляются в форме единых закономерностей.

Верификация математической модели сопоставлением результатов расчета и эксперимента показала, что модель позволяет описывать сложные зависимости коэффициента трения от скорости скольжения, на которых регистрируется падение коэффициента трения с ростом скорости скольжения, экстремумы коэффициента трения, и при совместном наличии на характеристике трения максимума и минимума. Результаты верификации математической модели по экспериментальным данным зависимости коэффициента трения от скорости скольжения при различных давлениях и вариациях других факторов показали, что оценить вклад отдельных трибохимических процессов в общую последовательность возможно с учетом близости условий взаимодействия материалов к изотермическим или адиабатическим.

Математическая модель фрикционных автоколебаний, как правило, строится на примере механической системы («пример Ван-дер-Поля»), в которой могут возникать самовозбуждающиеся колебания – автоколебания [5]. 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 пружины, создающей силу, изменяющуюся по линейному закону. Если скорость ленты v выбрана соответствующим образом, то, ползун не будет находиться в покое, а будет совершать колебания.

Поведение ползуна обусловлено тем, что сила сухого трения между ползуном и лентой будет изменяться при изменении 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 определенного критического значения силы трения, происходит движение ползуна относительно ленты, причем сила трения будет уменьшаться при возрастании $|\dot{x}|$, а при достаточно большом значении $|\dot{x}|$ – увеличиваться. Направления силы трения $\varphi(\dot{x})$ и относительной скорости \dot{x} противоположны.

Предполагается, что положение ползуна определяется его расстоянием ξ от точки, в которой пружина не растянута и не сжата. Тогда скорость скольжения записывается в виде

$$\dot{x} = \dot{\xi} - v \quad (4)$$

Уравнение движения ползуна принимает вид

$$m\ddot{\xi} + \varphi(\dot{\xi} - v) + k\xi = 0 \quad (5)$$

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

$$x_* = \xi + \frac{1}{k} \varphi(-v). \quad (6)$$

Это соотношение определяет то, что положение ползуна отсчитывается от точки, в которой он находится в равновесии при одновременном действии упругой силы и силы трения, так как согласно (5), равенство (7) характеризует положение равновесия:

$$\varphi(-v) + k\xi = 0 \quad (7)$$

Дифференциальное уравнение для x_* примет вид:

$$m\ddot{x}_* + [\varphi(\dot{x}_* - v) - \varphi(-v)] + kx_* \quad (8)$$

или

$$m\ddot{x}_* + F(\dot{x}_*) + kx_*, \quad (9)$$

где

$$F(\dot{x}_*) = \varphi(\dot{x}_* - v) - \varphi(-v). \quad (10)$$

Предполагается, что функция $\varphi(\dot{x})$ имеет следующий вид: при росте $|\dot{x}|$ она сначала убывает, а потом возрастает. Тогда существенным является то, что производная функции $F(\dot{x}_*)$ должна иметь отрицательное значение при $\dot{x}_* = 0$. (Здесь x – координата тела на ленте, где за начало координат принята точка, в которой пружина и не растянута, и не сжата; x_* – координата тела на ленте, где за начало координат принята точка, в которой сила трения и натяжения пружины уравниваются друг друга). Это требование будет выполняться, если скорость v такова, что абсолютная величина трения между ползуном и лентой будет уменьшаться при возрастании v . Автоколебания могут иметь место в том случае, если сила затухания ведет себя упомянутым образом при малых значениях \dot{x}_* .

Для решения поставленной задачи математическая модель фрикционных автоколебаний строится в соответствии с «примером Ван-дер-Поля». При этом функция, определяющая зависимость силы трения от скорости скольжения, задается в форме кинетического уравнения адгезионного схватывания как топохимической кинетики образования и разрушения «мостиков сваривания» в зоне контакта взаимодействующих поверхностей (2).

Эта модель имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= -cx_1 - q(\varphi(x_2) - \varphi(0)), \end{aligned} \quad (11)$$

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 (2) $\alpha = \alpha(v)$ с учетом изменения направления движения при колебаниях ($\alpha_* = 1 - \alpha_0$; ε – малый параметр; функция $th((x_2 - v)/\varepsilon)$ задает разрыв при смене знака скорости относительного движения ползуна и ленты в «примере Ван-дер-Поля»)

$$\begin{aligned} \varphi(x_2) &= \left(th\left(\frac{x_2 - v}{\varepsilon}\right) \right) \times \\ &\times \left[1 - \alpha_* \exp \left\{ \frac{-A_0 k_{0,y}^2 z^2}{[(x_2 - v) \text{sign}(x_2 - v) + u_0]^2} \exp \left\{ \frac{-E_{A,y} + \delta_y (x_2 - v) \text{sign}(x_2 - v)}{E_{T,y} + \rho_y (x_2 - v) \text{sign}(x_2 - v)} \right\} \right\} \right] \times \\ &\times \left[1 - \exp \left\{ \frac{-k_{0,x} z}{[(x_2 - v) \text{sign}(x_2 - v) + u_0]^2} \exp \left\{ \frac{-E_{A,x} + \delta_x (x_2 - v) \text{sign}(x_2 - v)}{E_{T,y} + \rho_x (x_2 - v) \text{sign}(x_2 - v)} \right\} \right\} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

С помощью математических моделей (11), (12) выполнены вычислительные эксперименты, которые затем на качественном уровне были сопоставлены с результатами экспериментов, имеющимися в литературе.

Для вычислительного эксперимента сравнения (эталонного эксперимента) была выбрана кинетическая характеристика со значениями входящих в нее параметров, которые даны в таблице 1.

Эта характеристика представлена на рисунке 1. Значение $\varphi(0)$ в уравнении (11) для этой характеристики равно $\varphi(0) = -0,6681$.

Таблица 1 – Значения безразмерных параметров кинетической кривой трения в вычислительном эксперименте сравнения

ε	ν	u_0	α_*	$A_0 k_{0,y}^2 z_0^2$	$k_{0,x} z_0$	$E_{A,y}$	$E_{A,x}$	$E_{T,y}$	$E_{T,x}$	δ_y	δ_x	ρ_y	ρ_x
10^{-3}	0,3	0,05	0,9	1	2	2	2	1	1	0,9	0,9	0,1	0,1

Изменение характера фрикционных автоколебаний в модельной системе исследовали при варьировании параметров: жесткости возвращающей пружины, нагрузки, массы (момента инерции), параметра, характеризующего противоизносные свойства смазочного материала.

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 перехода 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 технических систем из этих исследований наибольший интерес представляют: изменение характеристик фрикционных автоколебаний при варьировании, прежде всего, скорости взаимного перемещения контактирующих поверхностей и их температуры, вызывающее изменение скорости перехода потенциальных зародышей в активно растущие ядра адгезионного схватывания, температуры, вызывающей изменение скорости роста ядер адгезионного схватывания, температуры, вызывающей совместное изменение скоростей перехода зародышей в ядра и роста этих ядер.

В вычислительном эксперименте зафиксировано, что при малых скоростях автоколебания отсутствуют, т.е. возбуждение автоколебаний соответствует жесткому режиму. Рост скорости относительного перемещения поверхностей приводит к возбуждению разрывных автоколебаний, которые затем при дальнейшем росте скорости переходят к автоколебаниям, которые становятся все более близкими к гармоническим: доля периода, приходящаяся на проскальзывание (скачок) растет, а доля периода, приходящаяся на «ползущую остановку», снижается.

В вычислительном эксперименте также была получена информация об изменении характера фрикционных автоколебаний при варьировании кинетического параметра $E_{T,x}$, который задает температурные условия работы взаимодействующих материалов. Этот параметр характеризует влияние температуры и с его помощью можно задавать температуру внешней среды. С другой стороны, он зависит от восприимчивости системы (реакции перехода потенциальных зародышей в активно растущие ядра схватывания) к изменениям температуры.

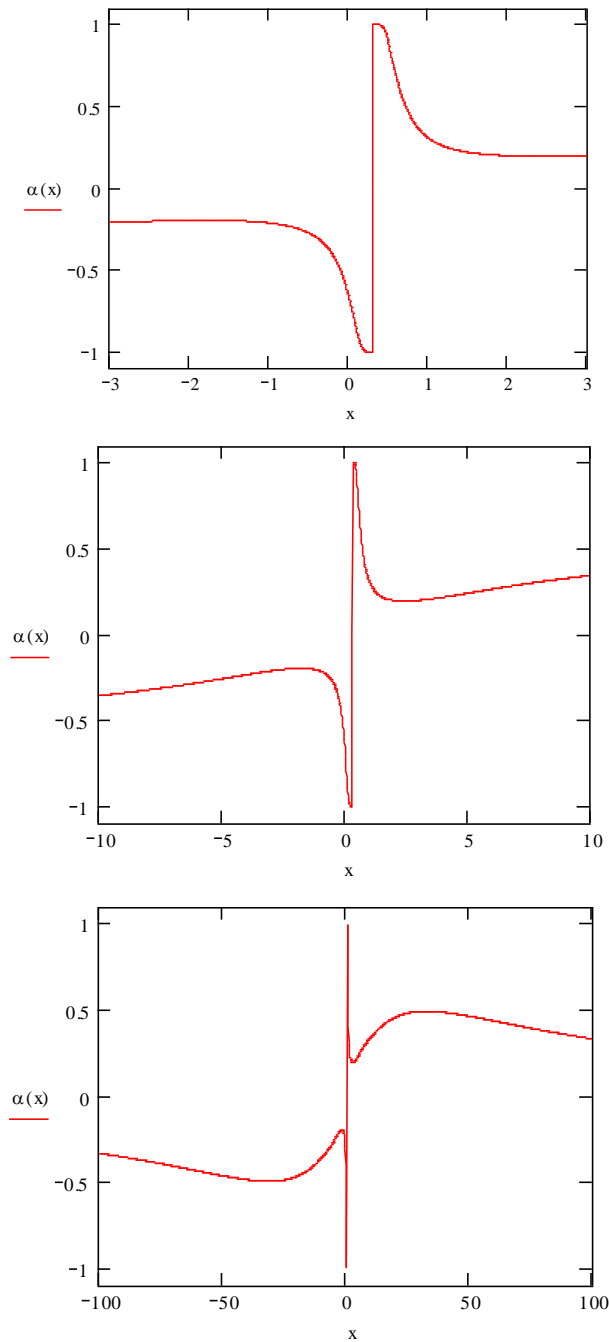


Рисунок 1 – Кинетическая характеристика трения при значениях параметров, приведенных в таблице 1 (здесь координата x соответствует x_2)

Увеличение температуры, которое в модели может быть задано параметром $E_{T,x}$, сначала приводит к тому, что затухающие колебания, определяемые собственными колебаниями механической системы, переходят в разряд практически гармонических фрикционных автоколебаний, а затем – разрывных. Доля периода, приходящаяся на «ползущую остановку», растет от нуля до определенного значения и далее практически не меняется. При этом частота падает, затем выходит на постоянное значение, после чего наблюдается незначительный рост. Амплитуда растет, достигает максимума, а затем снижается.

Выход параметров фрикционных автоколебаний на устойчивое значение свидетельствует, что потенциальные возможности рассматриваемой стадии процесса осуществлять вклад в рост интенсивности адгезионного схватывания исчерпываются. Соответственно, при такой скорости рассматриваемой стадии (высокой скорости) процесс взаимодействия поверхностей и адгезионного схватывания в поведении фрикционной автоколебательной системы будет определяться другими, т.е. более медленными стадиями суммарного процесса.

Разработанная математическая модель фрикционных колебаний при сопоставлении результатов расчетов, выполненных с ее использованием с экспериментальными данными независимых исследователей, показала их качественное соответствие.

Необходимо также отметить, что данная модель позволяет существенно повысить количество и качество получаемой в процессе исследований информации, поскольку существенно повышает вариативность используемой для анализа исходной информации, получаемых зависимостей между параметрами при различных моделируемых условиях и т.д.

Литература

1. Албагачиев А.Ю., Лукашев Е.А., Сидоров М.И., Ставровский М.Е. Сопоставление трибохимической кинетики «внешнего» трения и основных положений адгезионной и молекулярно-механической теории трения // Вестник машиностроения. 2017. № 5. С. 47-55.
 2. Крагельский И.В., Гитис Н.В. Фрикционные автоколебания // М.: Наука. 1987. 183 с.
 3. Лукашев Е.А. Топохимическая кинетика адгезионного взаимодействия двух твердых тел в процессе трения скольжения // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. 2003. № 2 (7). С. 13-22.
 4. Мерзликин А.Б. Математическое моделирование фрикционных автоколебаний при топохимической кинетике адгезионного схватывания в режиме трения скольжения. Дис. канд. технических наук // М.: МГУС. 2010. 19 с.
 5. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 368 с.
 6. Хольм Р. Электрические контакты // М.: Иностранная литература. 1961. 464 с.
- Юдин В.М., Лукашев Е.А., Ставровский М.Е. Трибохимия водородного износа // М.: МГУС. 2004. 282 с.