

## Учет универсальной зависимости вязкости граничной смазки от температуры и скорости деформаций при описании особенностей stop–start-экспериментов

© Я.А. Ляшенко,<sup>1,2</sup> А.Н. Заскока<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сумский государственный университет,  
40007 Сумы, Украина  
e-mail: nabla04@ukr.net, zaskoka23@ukr.net

<sup>2</sup> Берлинский технический университет,  
10623 Берлин, Германия

(Поступило в Редакцию 10 октября 2014 г.)

Рассмотрена трибологическая система, состоящая из двух блоков с атомарно-гладкими поверхностями, разделенными граничным слоем смазочного материала. К одному из блоков крепится пружина, свободный конец которой приводится в движение. В рамках термодинамической модели изучено влияние универсальной зависимости вязкости неньютоновской смазки от температуры и скорости деформаций на режимы трения. Плавление и затвердевание смазочного слоя представлено как фазовые переходы второго рода. Теоретически описаны особенности широко распространенных stop–start-экспериментов, когда система останавливается на определенное время, а затем вновь продолжает движение. Проведено изучение влияния на поведение системы температуры, скорости сдвига и внешней нагрузки. Определены условия переходов между жидкостным, прерывистым и сухим режимами трения для смазок, состоящих из линейных алканов различной длины.

### Введение

Стремительное развитие электроники и миниатюризация деталей ставят перед инженерами проблему обеспечения устойчивой работы разрабатываемых механизмов. Зачастую трущиеся детали настолько малы, что смазка между ними или отсутствует вовсе, или представляет ультратонкий слой, свойства которого сильно отличаются от свойств объемных смазок [1–3]. Режим трения, когда толщина смазочного материала не превышает несколько атомарных диаметров, получил название граничного. В указанном режиме реализуются жидкоподобные и твердоподобные структуры смазки [3,4]. Причем переходы между указанными структурными состояниями описываются как фазовые превращения первого [4,5] либо второго [6] рода и часто приводят к прерывистому характеру движения (stick–slip motion), который является одной из основных причин преждевременного износа и разрушения трущихся поверхностей. С целью обеспечения устойчивой работы механизмов проводятся многочисленные эксперименты по изучению прерывистого режима [3,4,7,8] с использованием атомно-силовой микроскопии (AFM) [9] и аппарата поверхностных сил (SFA) [4]. С помощью SFA удалось исследовать свойства молекул, зажатых между двумя атомарно-гладкими слюдяными поверхностями [4,7], а также изучить „резонансное трение“ при скоростях сдвига от 5 до 25 m/s [10].

Наряду с экспериментальными исследованиями существует множество работ, где поведение граничных смазок изучают с использованием методов молекулярной динамики [11,12] и на основе феноменологических

моделей [5,6,13]. В работах [6,13] предложена модель, позволяющая описать поведение ультратонкой смазки, зажатой между двумя атомарно-гладкими твердыми поверхностями. Эта модель учитывает термодинамическое и сдвиговое плавление. Переходы между структурными состояниями смазочного материала описываются как фазовые переходы второго рода [14]. Дальнейшее развитие подхода представлено в работах [15–19], где изучение свойств смазочного материала проводится на основе механического аналога трибологической системы, причем при реализации в системе как фазовых переходов первого, так и второго рода. В работах [20,21] проведен учет универсальной зависимости вязкости от температуры и градиента скорости, полученной в [22] в результате молекулярно-динамического моделирования. Предлагаемая работа является логическим продолжением [20,21] и проведена с целью теоретического изучения особенностей stop–start-экспериментов, результаты которых, в частности, представлены в работах [4,23].

### 1. Основные уравнения

Рассмотрим механический аналог трибологической системы, представленный на рис. 1. Система состоит из двух блоков, разграниченных смазочным слоем толщиной  $h$ . Нижний блок зафиксирован, а верхний, масса которого  $M$ , скользит по нему. С помощью пружины с жесткостью  $K$  к нему прикреплен внешний привод, обеспечивающий постоянную скорость движения свободного конца пружины  $V_0$ . При движении между блоками возникает сила трения  $F$ .

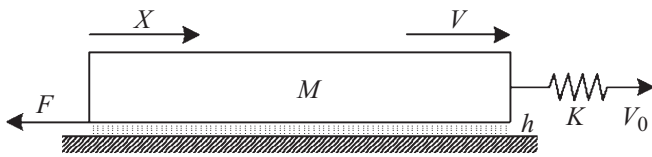


Рис. 1. Схема трибологической системы.

Обозначим координату верхнего блока  $X$ , тогда соответствующее уравнение движения принимает вид [4,6,7]

$$M\ddot{X} = K\Delta X - F, \quad (1)$$

где величина  $\Delta X$  представляет растяжение пружины, определяемое формулой

$$\Delta X = \int_0^t V_0 dt' - X, \quad (2)$$

где  $t$  — время движения свободного конца пружины.

Определим силу трения  $F$  как произведение площади контакта трущихся поверхностей  $A$  на сумму упругой  $\sigma_{el}$  и вязкой  $\sigma_v$  компонент сдвиговых напряжений:

$$F = (\sigma_{el} + \sigma_v)A. \quad (3)$$

В рамках рассматриваемой модели площадь контакта  $A$  представляет реальную площадь контактирующих участков. Поскольку рассматриваются атомарно-гладкие (как правило, слюдяные) поверхности, она стремится к видимой площади контакта. На поверхностях, используемых в промышленности, реализуется порядка  $10^3 - 10^5$  микроконтактов [1,24], поэтому отношение реальной площади к видимой  $A_{real}/A_{visible} \sim 10^{-5}$ . При этом с приложением внешней нагрузки поверхности сближаются, смазка выдавливается и количество точечных контактов увеличивается. В настоящей работе рассматриваются атомарно-гладкие поверхности с фиксированным расстоянием между ними, поэтому внешняя нагрузка в явном виде не учитывается.

Для описания состояния смазочного материала запишем разложение свободной энергии в ряд по степеням параметра порядка  $\varphi$  в виде [6,13,20]

$$f = \alpha(T - T_c)\varphi^2 + \frac{a}{2}\varphi^2\varepsilon_{el}^2 + \frac{b}{4}\varphi^4, \quad (4)$$

где  $T$  — температура смазки,  $T_c$  — критическая температура,  $\varepsilon_{el}$  — сдвиговая компонента упругой деформации,  $\alpha, a, b$  — положительные постоянные,  $\varphi$  — параметр порядка, представляющий амплитуду периодической части микроскопической функции плотности среды [6,13]. Такой вид разложения соответствует модели фазового перехода второго рода [14,25]. При этом в твердоподобной фазе смазка упорядочена и параметр порядка принимает ненулевые значения. В жидкоподобной фазе устанавливается стационарное значение  $\varphi_0 = 0$ .

Определим упругие напряжения как  $\sigma_{el} = \partial f / \partial \varepsilon_{el}$  [6,26]:

$$\sigma_{el} = a\varphi^2\varepsilon_{el} = \mu\varepsilon_{el}, \quad (5)$$

где введен модуль сдвига смазочного материала  $\mu$ , равный нулю в жидкоподобном состоянии.

Ненулевые значения модуля сдвига определим из условия  $\partial f / \partial \varphi = 0$  [6]:

$$\mu = \frac{a}{b}(2\alpha(T_c - T) - a\varepsilon_{el}^2). \quad (6)$$

В предыдущих работах [15,17] получена зависимость между скоростью сдвига  $V$  и стационарной упругой деформацией  $\varepsilon_{el}^0$  в виде

$$\varepsilon_{el}^0 = \frac{V\tau_\varepsilon}{h}, \quad (7)$$

где введены толщина смазки  $h$  и время релаксации внутренних напряжений  $\tau_\varepsilon$ . Анализ выражения (6) с учетом (7) позволяет выделить критическую температуру. Если температура меньше величины

$$T_{c0} = T_c - \frac{a}{2\alpha} \left( \frac{\tau_\varepsilon V}{h} \right)^2, \quad (8)$$

смазка твердоподобна, поскольку реализуется ненулевое стационарное значение параметра порядка  $\varphi_0$ . При превышении температурой  $T$  критического значения  $T_{c0}$  смазка плавится, а параметр порядка при этом становится нулевым. С дальнейшим повышением температуры смазка остается жидкоподобной.

Аналогично можно получить выражение для критической скорости плавления  $V_{c0}$ :

$$V_{c0} = \frac{h}{\tau_\varepsilon} \sqrt{\frac{2\alpha(T_c - T)}{a}}. \quad (9)$$

## 2. Учет температурной зависимости вязкости

Вязкие напряжения  $\sigma_v$ , возникающие в смазочном слое, зависят от скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$  [22,27]

$$\sigma_v = \eta_{eff}\dot{\varepsilon}, \quad (10)$$

где  $\eta_{eff}$  — эффективная вязкость.

Для определения эффективной вязкости будем использовать универсальную зависимость, полученную в работе [22]:

$$\log \eta_{eff} = C - n \log \dot{\varepsilon}, \quad (11)$$

где параметры  $C(n)$  и  $n$  зависят от температуры  $T$ .

Зависимость (11) описывает вязкость псевдопластических полимерных ультратонких смазочных слоев, состоящих из цепных молекул углеводородов  $C_nH_{2n+2}$ , имеющих в составе от 20 до 1400 атомов углерода [22]. Установлено, что величина  $n$  в формуле (11)

изменяет значение от  $n = 0$  (жидкоподобное состояние) при больших температурах до  $n = 1$  (твердоподобное состояние) при низких температурах. Для описания этой особенности авторами [22] предложено выражение вида

$$n = \frac{1}{1 + (T/T_k)^\beta}, \quad (12)$$

где параметры  $T_k$  и  $\beta$  зависят от типа используемого полимера  $C_nH_{2n+2}$ . При этом зависимость  $C(n)$  выражается приближенным равенством [22]:

$$C \approx 10.9n - 3.8. \quad (13)$$

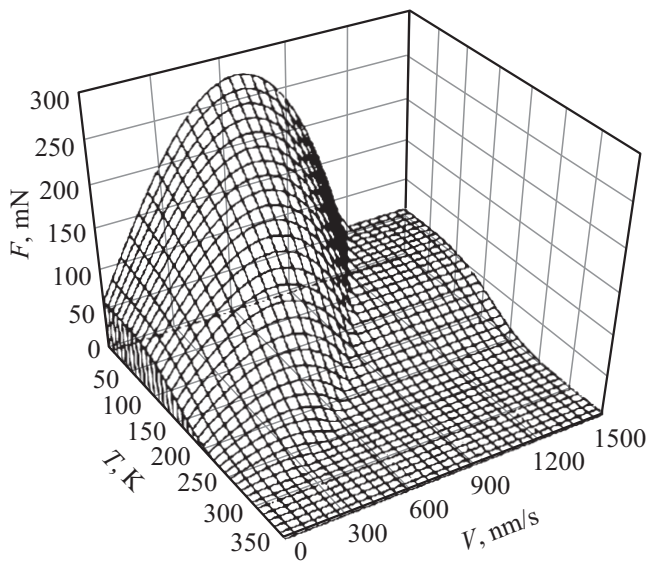
Комбинируя соотношения (3), (5), (7), (10)–(13), получим окончательное выражение для определения силы трения [20]

$$F = \left[ \frac{a\phi^2 V \tau_\epsilon}{h} + \operatorname{sgn}(V) 10^{10.9n-3.8} \left( \frac{|V|}{h} \right)^{1-n} \right] A, \quad (14)$$

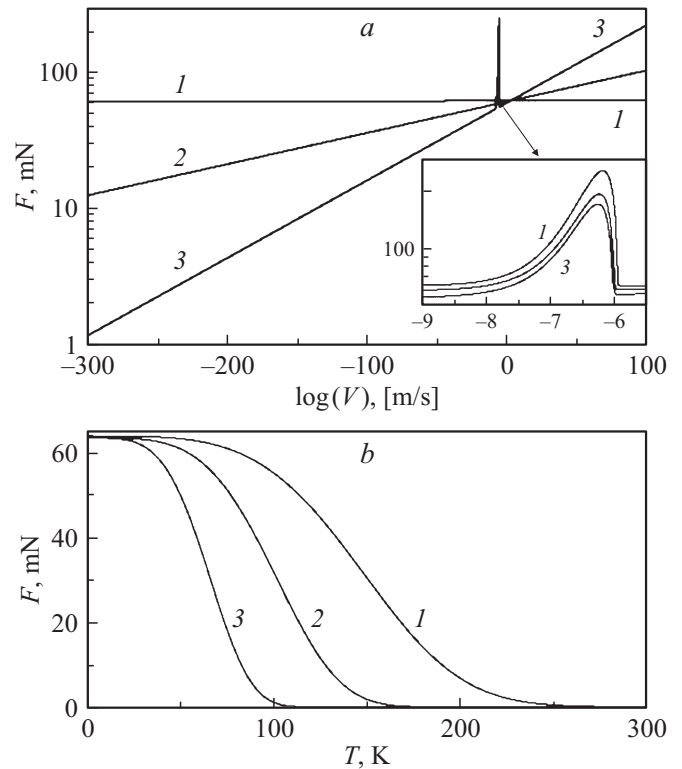
где для учета направления движения блока введена знаковая функция  $\operatorname{sgn}(V)$ .

Трехмерная зависимость силы трения  $F$  (14) от температуры смазки  $T$  и относительной скорости сдвига поверхностей  $V$  представлена на рис. 2. Из рисунка следует, что при увеличении скорости сдвига сила трения сначала увеличивается за счет роста обоих компонент напряжений  $\sigma_{el}$  и  $\sigma_v$ , достигает своего максимального значения, а затем убывает и при превышении критического значения  $V > V_{c0}$  смазка плавится. Дальнейший рост  $F$  происходит за счет увеличения вязких напряжений  $\sigma_v$  [18]. При увеличении температуры  $T$  сила трения  $F$  всегда уменьшается.

На рис. 3, *a* представлена зависимость силы трения  $F$  от относительной скорости сдвига поверхностей  $V$  в двойных логарифмических координатах. Из соотношения (14) следует, что при выполнении условий



**Рис. 2.** Зависимость силы трения  $F(T, V)$  при параметрах  $\alpha = 0.95 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}/\text{m}^3$ ,  $T_c = 290 \text{ K}$ ,  $a = 4 \cdot 10^{12} \text{ Pa}$ ,  $b = 230 \text{ J}/\text{m}^3$ ,  $T_k = 353 \text{ K}$ ,  $\beta = 4.09$ ,  $A = 5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ ,  $\tau_\epsilon = 10^{-8} \text{ s}$ ,  $h = 10^{-9} \text{ m}$ .



**Рис. 3.** Зависимости силы трения  $F$  от температуры  $T$  и скорости сдвига  $V$  при параметрах рис. 2. *a* — кривые 1–3 соответствуют температурам  $T = 20, 80, 100 \text{ K}$ ; *b* — кривые 1–3 построены при скоростях сдвига  $V = 10^{-9}, 10^{-50}, 10^{-300} \text{ m/s}$ .

$V \rightarrow 0, T \neq 0$  значение силы трения  $F \rightarrow 0$ . На рисунке показаны зависимости  $F(V)$  при трех фиксированных значениях температуры  $T$  для широкого диапазона скоростей сдвига  $V = 10^{-300} - 10^{100} \text{ m/s}$ . Причем значение температуры растет от кривой 1 до 3. Вид кривых говорит о том, что при криотемпературах сила трения имеет существенно отличное от нуля значение при практически нулевых скоростях сдвига  $V = 10^{-300} \text{ m/s}$ . Описываемая ситуация аналогична наличию в системе сил статического трения, когда при  $V = 0$  сила трения  $F \neq 0$ . Однако в нашем случае, согласно выражению (14), при  $V = 0$  сила трения  $F = 0$ . Поэтому будем называть конечную силу трения  $F \neq 0$  при  $V \ll 1 \text{ nm/s}$  квазистатической. Такая ситуация позволяет описать эффекты памяти, когда после длительной остановки трущихся поверхностей и последующего возобновления их движения продолжается реализация установившегося до этого режима трения, минуя начальный переходной режим. Эффект наблюдается за счет того, что во время остановки системы напряжения в слое смазки не релаксируют, поскольку молекулы смазочного материала остаются плотно зажаты между рельефами трущихся поверхностей в том состоянии, в котором они были до остановки. В диапазоне скоростей  $V = 10^{-9} - 10^{-6} \text{ m/s}$  на всех кривых на рис. 3, *a* просматриваются пики, как это хорошо видно на увеличенном фрагменте рисунка

ка. Более подробно такое поведение представлено на трехмерном рис. 2, где меньшему значению температуры соответствует большее значение  $F$ . В этом диапазоне (до плавления) существенный вклад в силу трения вносят упругие напряжения  $\sigma_{el}$ . При  $V > 10^{-6}$  м/с ( $V > V_{c0}$ ) смазка жидкоподобна и напряжения  $\sigma_{el} = 0$ . При  $V < 10^{-9}$  м/с вклад  $\sigma_{el}$  нивелируется, поскольку, согласно (5) и (7),  $\sigma_{el} \propto V$ . Снижение силы трения при скоростях  $V < 1$  нм/с происходит настолько стремительно, что на рис. 2 зависимость  $F(V)$  в этом диапазоне визуально выглядит как вертикальная поверхность.

На рис. 3, *b* представлена зависимость  $F(T)$  при малых скоростях сдвига (скорость  $V$  уменьшается от кривой 1 до 3). Из рисунка видно, что снижение скорости приводит к уменьшению силы трения, однако при нулевой температуре  $T = 0$  сила трения  $F$  при любых скоростях  $V < 1$  нм/с принимает одно и то же фиксированное значение. Анализ выражения (14) позволяет установить следующую зависимость:

$$\lim_{V \rightarrow 0; T \rightarrow 0} F(V, T) = 10^{7.1} A, \quad (15)$$

откуда следует, что при сверхнизких температурах и скоростях сдвига зависимость  $F(V, T)$  подобна  $\delta$ -функции, которая в нуле принимает конечное значение, определяемое выражением (15), а в окрестности нулевых температур и скоростей  $F(V, T) = 0$ .

Для изучения кинетики плавления используем уравнение Ланжевена [18]

$$\frac{1}{\delta} \dot{\varphi} = -\frac{\partial f}{\partial \varphi} + \xi(t), \quad (16)$$

где  $\delta$  — кинетический коэффициент, характеризующий инерционные свойства системы, а случайный процесс  $\xi(t)$  представляет малые аддитивные флуктуации типа белого шума с моментами [28]

$$\langle \xi(t) \rangle = 0; \quad \langle \xi(t) \xi(t') \rangle = 2D\delta(t - t'). \quad (17)$$

Здесь  $D$  — интенсивность стохастического источника, которая выбирается настолько малой, что не в состоянии повлиять на детерминистический процесс. Однако введение в рассмотрение шума связано с особенностями дальнейшего численного счета [15]. С учетом разложения (4) уравнение (16) запишется в явном виде

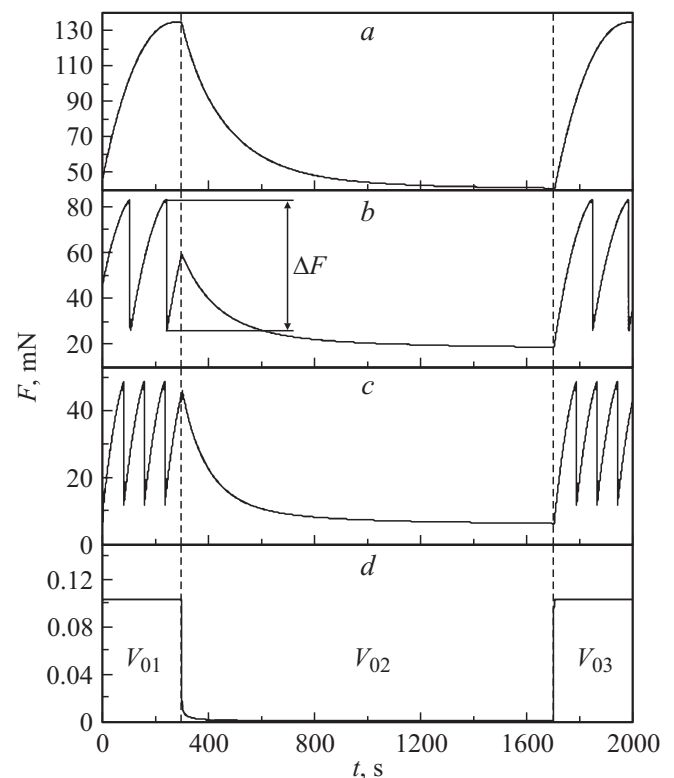
$$\dot{\varphi} = -\delta (2\alpha(T - T_c)\varphi + a\varphi\epsilon_{el}^2 + b\varphi^3) + \delta\xi(t). \quad (18)$$

### 3. Скольжение после длительной остановки внешнего привода

В работах [4,23] проводится экспериментальное изучение поведения системы, показанной на рис. 1, когда после установки стационарного режима движения внешний привод останавливается на фиксированное время, а затем движение продолжается снова. Установлено, что в зависимости от скорости движения, температуры

смазки, а также приложенной внешней нагрузки возможна реализация различных режимов работы после остановки и последующего возобновления движения. Например, в [4] после остановки привода наблюдался переход от прерывистого режима ( $SS$ ) к режиму скольжения ( $SF$ ). В работе показано, что после остановки длительностью  $t_s \sim 60$  с и последующим движением в системе устанавливается прерывистый режим, причем первый пик на зависимости силы трения  $F(t)$  „stiction spike“ имеет большую высоту, чем аналогичные пики в стационарном режиме [4,23]. При скорости сдвига выше критической  $V_c$ , необходимой для плавления, после включения внешнего привода наблюдался единственный пик, после чего система продолжала функционировать в режиме  $SF$  [23]. Выяснено, что высота этого пика зависит от времени остановки  $t_s$  [23]. Подобное поведение получено и в рамках рассматриваемой модели [15], однако без учета температурной зависимости вязкости и квазистатической силы трения. В частности, в [15] показано, что после остановки внешнего привода в режиме  $SF$  системе необходимо время, чтобы смазка перешла в твердоподобное состояние, при переходе в которое реализуется пик на зависимости  $\sigma_{el}(t)$ , причем пик на зависимости  $F(t)$  при этом отсутствует.

На рис. 4 показана зависимость силы трения  $F(t)$  (14) при различных значениях температуры смазки  $T$ . Здесь на начальном отрезке времени  $t < 300$  с внешний при-



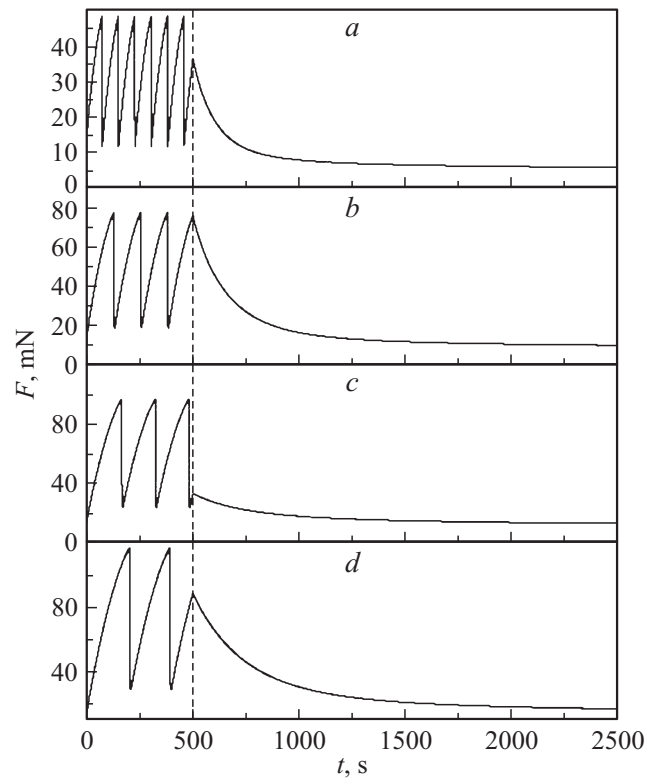
**Рис. 4.** Зависимость силы трения  $F$  от времени  $t$  при параметрах рис. 2 и  $\delta = 100 \text{ J}^{-1} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ,  $M = 0.4 \text{ kg}$ ,  $K = 3000 \text{ N/m}$  и  $V_{01} = 500 \text{ nm/s}$ ,  $V_{02} = 0 \text{ nm/s}$ ,  $V_{03} = 500 \text{ nm/s}$ . Панели *a–d* соответствуют температурам  $T = 130, 170, 200, 300 \text{ K}$ .

вод движется со скоростью  $V_0 = 500 \text{ nm/s}$ , последующие  $t_s = 1400 \text{ s}$ , свободный конец пружины неподвижен, после чего снова приводится в движение со скоростью  $V_0 = 500 \text{ nm/s}$ . Для всех зависимостей на рисунке выбраны начальные условия  $X_0 = 0 \mu\text{m}$ ,  $\Delta X_0 = 15 \mu\text{m}$ ,  $V_0 = 1 \text{ nm/s}$ ,  $\varphi_0 = 0.4$ . Зависимость  $F(t)$  на рис. 4, *a* построена при температуре  $T_1 = 130 \text{ K}$ . В данном случае в системе устанавливается режим сухого трения *DF*. При  $t > 0$  внешний привод начинает движение, натяжение пружины  $\Delta X$  увеличивается, растет скорость  $V$ , соответственно увеличиваются как упругие  $\sigma_{el}$ , так и вязкие  $\sigma_v$  напряжения, система выходит на стационарный режим и сила трения  $F$  принимает постоянное значение. Через время  $t = 300 \text{ s}$  внешний привод останавливается, однако верхний трущийся блок (рис. 1) продолжает движение за счет растянутой пружины  $\Delta X > 0$ . Со временем  $\Delta X$  уменьшается, при этом наблюдается релаксация силы трения  $F$ , а скорость блока  $V$  снижается, но остается ненулевой за счет растянутой пружины. Поскольку температура  $T > 0$ , как это указано выше, сила трения  $F \rightarrow 0$  при  $V \rightarrow 0$ , однако скорость релаксирует достаточно медленно. При этом времена  $t$ , на которых сила трения  $F = 0$ , превышают все возможности экспериментального наблюдения, поскольку в зависимости от параметров системы они могут исчисляться годами. Однако стоит понимать, что в рассматриваемом случае при  $t \rightarrow \infty$  сила трения  $F = 0$ . Таким образом, релаксация напряжений в зажатом при остановке смазочном слое все же происходит до нулевого значения, но медленность этого процесса позволяет наблюдать особенности stop-start экспериментов [4,23]. Другими словами, полученный нами результат предлагает механизм описания особенностей экспериментального поведения нанотрибологических систем, которое не укладывается в рамках классических представлений трибологической науки.

Рис. 4, *b* построен при большем значении температуры  $T_2 = 170 \text{ K}$ . Здесь наблюдается стационарный прерывистый режим движения stick-slip. После остановки внешнего привода смазочный слой затвердевает, поэтому сила трения  $F$  содержит вклады от вязких и упругих напряжений, которые медленно релаксируют, как и в случае, описанном выше. Однако минимальное значение силы трения здесь меньше, чем на рис. 4, *a*, поскольку рис. 4, *b* построен при большем значении температуры  $T_2 > T_1$ . После включения внешнего привода в системе снова устанавливается stick-slip-режим движения, как и до остановки блока. Рис. 4, *c* построен при температуре  $T_3 = 200 \text{ K}$ . Поведение системы здесь аналогично показанному на рис. 4, *b*, но большее значение температуры  $T$  способствует увеличению частоты фазовых переходов и уменьшению  $\Delta F$  [15]. Дальнейшее увеличение температуры до значения  $T_4 = 300 \text{ K}$  (рис. 4, *d*) приводит к установлению режима жидкостного трения *SF*. Здесь в начале движения при  $t < 300 \text{ s}$  смазка жидкоподобна, поскольку  $T_4 > T_{c0}$  (8), поэтому сила трения  $F$  имеет

только вязкую составляющую. После остановки внешнего привода при  $t > 300 \text{ s}$  сила трения уменьшается почти до нулевого значения, поскольку до остановки пружина практически не была растянута, так как реализовался режим скольжения *SF*. После включения внешнего привода сила трения снова увеличивается до стационарного значения, соответствующего заданной скорости и температуре смазки. Отметим, что на рис. 4 в случаях, когда реализуется прерывистый и сухой режимы (панели *a, b, c*), все ситуации имеют одну общую черту. В начале движения смазка твердоподобна и, как это описано ранее, при таких температурах реализуется квазистатическая сила трения  $F$ . Поэтому уже в начале движения при  $V > 0$ , как видно из рисунка, для всех рассматриваемых температур реализуется квазистатическая сила  $F \approx 15\text{--}45 \text{ mN}$ , зависящая от температуры.

Как отмечалось выше, мы рассматриваем атомарно-гладкие поверхности, поэтому считается, что они полностью соприкасаются через смазку и внешняя нагрузка явно не учитывается. Если в реальных условиях прикладывать внешнюю нагрузку  $L$ , то поверхности сближаются, поскольку происходит выдавливание смазки и площадь прямого контакта все же увеличивается. Поведение системы при увеличении площади контакта  $A$  и неизменных остальных параметрах, что можно условно считать как увеличение внешней нагрузки  $L$ , показано на



**Рис. 5.** Зависимость силы трения  $F$  от времени  $t$  при различных площадях контакта  $A$  при параметрах рис. 4 и  $T = 200 \text{ K}$ . До штриховой линии  $V_0 = 500 \text{ nm/s}$ , после —  $V_0 = 0 \text{ nm/s}$ . Панели *a–d* соответствуют площадям контакта  $A = 5 \cdot 10^{-9}$ ,  $8 \cdot 10^{-9}$ ,  $10 \cdot 10^{-9}$ ,  $12 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ .

рис. 5. Панели *a–d* этого рисунка построены при постепенном увеличении площади контакта  $A$ . Как показано в экспериментальных работах [4], рост нагрузки  $L$  приводит к уменьшению частоты фазовых переходов и увеличению максимального значения силы трения  $F$ . При этом увеличивается и амплитуда  $\Delta F$ . После остановки внешнего привода в системе наблюдается релаксация силы трения  $F$  до стационарного значения. При этом для больших значений внешней нагрузки  $L$  наблюдается большее значение силы трения  $F$  [4,27], поскольку она пропорциональна площади контакта  $A$  (14). Указанные особенности реализуются и в рамках нашей модели (рис. 5). Для всех зависимостей на рисунке выбраны начальные условия  $X_0 = 0 \mu\text{m}$ ,  $\Delta X_0 = 5 \mu\text{m}$ ,  $V_0 = 1 \text{ nm/s}$ ,  $\varphi_0 = 0.4$ .

#### 4. Влияние длины молекул смазки на характер режима трения

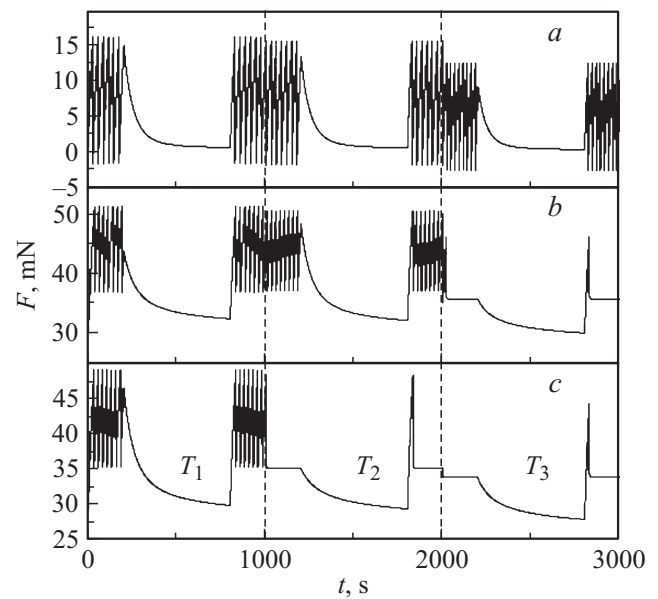
Рассмотрим условия перехода от прерывистого движения к режиму непрерывного скольжения для различных углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$  при постепенном увеличении температуры смазки  $T$ . В работе [22] показано, что вязкость для нанометровых пленок высокомолекулярных алканов  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$  описывается уравнениями (11)–(13), причем для каждого конкретного полимера существуют свои значения  $T_k$  и  $\beta$  (см. таблицу).

На рис. 6 представлены временные зависимости  $F(t)$  для трех полимеров, параметры  $T_k$  и  $\beta$  для которых выбраны из таблицы. Панели *a–c* рисунка построены для веществ с последовательно увеличиваемым атомным весом от рисунка к рисунку. Временной интервал разбит на три участка, для каждого из которых увеличивается температура  $T$ . Для всех зависимостей выбраны начальные условия  $\Delta X_0 = 10 \mu\text{m}$ ,  $V_0 = 1 \text{ nm/s}$ ,  $\varphi_0 = 0.6$ . На временах  $t < 200 \text{ s}$  производится сдвиг внешнего привода со скоростью  $V_0 = 500 \text{ nm/s}$ , далее на интервале времени  $200 < t_s < 800 \text{ s}$  свободный конец пружины остается неподвижным и последующие  $t = 200 \text{ s}$  внешний привод снова сдвигается со скоростью  $V_0$ . В сумме все эти манипуляции занимают время  $t = 1000 \text{ s}$ . После каждых таких  $1000 \text{ s}$  температура  $T$  повышается и описанный процесс повторяется снова.

Для первого значения температуры  $T_1$  для всех алканов поведение системы подобно описанному на рис. 4, *b, c* — прерывистый режим сменяет участок, на котором сила трения  $F$  релаксирует, после чего снова наблюдается режим *SS*.

Таблица значений  $T_k$  и  $\beta$  в уравнении (12) для различных полимеров [22]

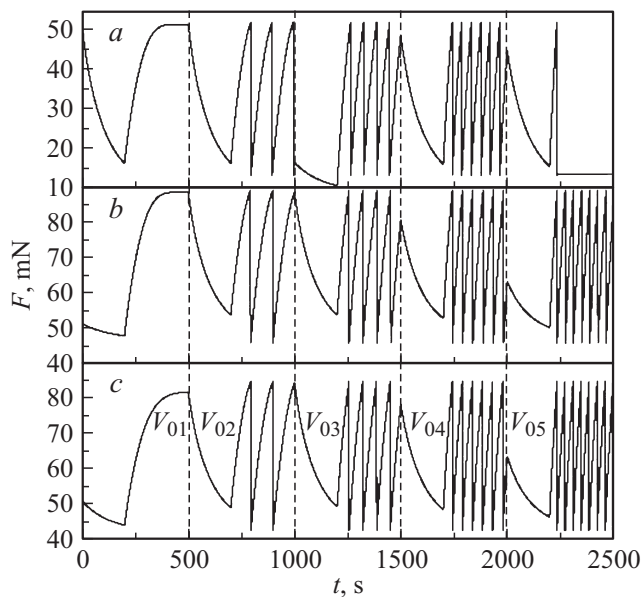
	$\text{C}_{20}\text{H}_{42}$	$\text{C}_{100}\text{H}_{202}$	$\text{C}_{1400}\text{H}_{2802}$
$T_k$ (К)	$353 \pm 28$	$642 \pm 22$	$840 \pm 30$
$\beta$ (–)	$4.09 \pm 1.24$	$3.68 \pm 0.46$	$2.79 \pm 0.30$



**Рис. 6.** Зависимость силы трения  $F$  от времени  $t$  для различных алканов при параметрах рис. 4 и  $V_0 = 500 \text{ nm/s}$  до и после остановки. Участки  $T_1–T_3$  соответствуют температурам 243, 244, 250 К. *a* —  $T_k = 353 \text{ K}$ ,  $\beta = 4.09$ ; *b* —  $T_k = 642 \text{ K}$ ,  $\beta = 3.68$ ; *c* —  $T_k = 840 \text{ K}$ ,  $\beta = 2.79$ .

С повышением температуры  $T$  на панелях *a* и *b* ситуация остается аналогичной, но уменьшаются максимальное значение силы трения  $F$  и разность  $\Delta F$ . Такую особенность показывает также и рис. 4. Поведение системы на рис. 6, *c* со смазкой, молекулы которой имеют наибольшую длину среди представленных, в области  $T = T_2$  демонстрирует несколько иное поведение. При выбранных условиях смазка в области  $T_2$  в начале движения жидкоподобна. После остановки внешнего привода при  $t > 1200 \text{ s}$  смазка затвердевает и на протяжении  $t = 600 \text{ s}$  происходит релаксация силы трения  $F$ . При  $t = 1800 \text{ s}$  свободный конец пружины начинает движение со скоростью  $V_0 = 500 \text{ nm/s}$ , натяжение пружины растет, соответственно резко увеличивается сила трения  $F$ , после чего смазка снова плавится. При этом на рисунке реализуется пик на зависимости  $F(t)$ . После плавления смазка остается жидкоподобной.

С повышением температуры описанное поведение наблюдается также и для более коротких молекул алканов (рис. 6, *b* при  $T_3 = 250 \text{ K}$ ). На панели *a* ситуация для всех трех температур подобна. Режим жидкостного трения для параметров  $\text{C}_{20}\text{H}_{42}$  устанавливается при значении температуры, близком к  $T_{c0}$ . Для представленных температур после плавления скорость блока  $V < V_{c0}$ , поэтому смазка затвердевает. Этим и объясняется реализующийся прерывистый режим. Из рис. 6, *c* видно, что с повышением температуры высота пика  $F(t)$ , который предшествует переходу системы в режим жидкостного трения, уменьшается. Этот факт подтвержден экспериментально [4].



**Рис. 7.** Зависимость силы трения  $F$  от времени  $t$  при постепенном увеличении скорости сдвига при параметрах рис. 4 и  $T = 197$  К.  $a$  —  $T_k = 353$  К,  $\beta = 4.09$ ;  $b$  —  $T_k = 642$  К,  $\beta = 3.68$ ;  $c$  —  $T_k = 840$  К,  $\beta = 2.79$ . Скорости  $V_{01} - V_{05} = 300, 450, 600, 750, 900$  nm/s.

Зависимости  $F(t)$  для различных алканов при постепенном увеличении скорости сдвига внешнего привода  $V_0$  представлены на рис. 7. Здесь выбираются начальные условия  $X_0 = 0 \mu\text{m}$ ,  $\Delta X_0 = 17 \mu\text{m}$ ,  $V_0 = 5$  nm/s,  $\varphi_0 = 0.87$ . На протяжении  $t_s = 200$  s внешний привод неподвижен, после чего он в течение времени  $t = 300$  s движется со скоростью  $V_0$ . При низких скоростях сдвига  $V_0 = V_{01}$  в системе устанавливается режим сухого трения. С повышением  $V_0$  устанавливается прерывистый режим, где большему значению скорости  $V_0$  отвечает большая частота фазовых переходов [4,8]. Несмотря на то, что скорость  $V_{04} > V_{c0} \approx 664$  nm/s, для всех трех типов смазок наблюдается прерывистое движение, в котором после плавления скорость блока сначала увеличивается, за счет чего пружина сжимается, уменьшается упругая движущая сила  $K\Delta X$ , и в результате скорость  $V$  становится меньше критического значения  $V_{c0}$ , при котором смазка затвердевает. Далее за счет того, что сила трения увеличивается, пружина натягивается и скорость растет, при выполнении условия  $V > V_{c0}$  смазка снова плавится и т.д. Таким образом, устанавливается прерывистый stick-slip-режим. Подробно этот процесс рассматривается в работе [19].

При параметрах рис. 7,  $a$  при скорости  $V_{05} = 900$  nm/s после плавления смазка остается жидкоподобной и устанавливается режим скольжения. Для более длинных молекул такой переход происходит при еще больших скоростях. Наблюдаемое поведение объясняется тем, что на рис. 7,  $a$  для  $V_{05}$  после плавления скорость блока остается больше критической  $V_{c0}$ , поэтому затвердевания не

происходит. На двух других панелях, несмотря на то что  $V_{05} > V_{c0} \approx 664$  nm/s, пружина сжимается настолько, что скорость блока становится ниже  $V_{c0}$ , поэтому смазка затвердевает и продолжается прерывистое движение.

## Заключение

В предлагаемой работе рассматривается поведение трибологической системы, работающей в режиме граничного трения. Свойства ультратонкого слоя смазочного материала, зажато между двумя атомарно-гладкими твердыми поверхностями, изучаются на основе дальнейшего развития термодинамической модели плавления, которая учитывает зависимость вязкости смазки от температуры и скорости сдвига. На основе модели изучены особенности зависимостей силы трения от времени при скоростях сдвига, близких к нулевым. Показано, что при низких температурах смазки при этом реализуется квазистатическая сила трения, позволяющая частично объяснить экспериментально наблюдаемые эффекты памяти. Построена зависимость силы трения от времени при длительной остановке внешнего привода и установлено, что переходы между режимами сухого, прерывистого и жидкостного трения происходят при превышении скоростью сдвига и температурой смазки определенных критических значений. Изучено поведение системы при различных площадях области контакта, что позволяет качественно установить характер влияния внешнего нагружения. Построены зависимости для параметров вязкости, соответствующих смазкам, состоящим из молекул высокомолекулярных алканов различной длины. Продемонстрированы и объяснены особенности для разных типов смазок.

Работа выполнена при поддержке МОН Украины в рамках проектов „Моделирование трения металлических наночастиц и граничных пленок жидкостей, взаимодействующих с атомарно-гладкими поверхностями“, № 0112U001380 и „Неравновесная термодинамика фрагментации металлов и трения пространственно-неоднородных граничных смазок между поверхностями с наноразмерными неровностями“, № 0115U000692.

## Список литературы

- [1] *Persson B.N.J.* Sliding friction. Physical principles and applications. NY: Springer-Verlag, 2000. 515 p.
- [2] *Понов В.Л.* Механика контактного взаимодействия и физика трения: От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.
- [3] *Israelachvili J.* // Surf. Sci. Rep. 1992. Vol. 14. N 3. P. 109–159.
- [4] *Yoshizawa H., Israelachvili J.* // J. Phys. Chem. 1993. Vol. 97. N 43. P. 11 300–11 313.
- [5] *Filippov A.E., Klafter J., Urbakh M.* // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92. N 13. P. 135 503 (4).
- [6] *Понов В. Л.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 5. С. 100–110.

- [7] *Berman A.D., Ducker W.A., Israelachvili J.N.* // *Langmuir*. 1996. Vol. 12. N 19. P. 4559–4563.
- [8] *Yang C.-R., Chiou Y.-C., Lee R.-T.* // *Tribol. Int.* 1999. Vol. 32. N 8. P. 443–453.
- [9] *Gnecco E., Bennewitz R., Gyalog T., Loppacher Ch., Bammerlin M., Meyer E., Güntherodt H.-J.* // *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 84. N 6. P. 1172 (4).
- [10] *Banquy X., Lowrey D.D., Belman N., Min Y., Mordukhovich G., Israelachvili J.N.* // *Tribol. Lett.* 2011. Vol. 43. N 2. P. 185–195.
- [11] *Sivebaek I.M., Samoilov V.N., Persson B.N.J.* // *Langmuir*. 2010. Vol. 26. N 11. P. 8721–8728.
- [12] *Aichele M., Müser M.H.* // *Phys. Rev. E*. 2003. Vol. 68. N 1. P. 016 125 (14).
- [13] *Попов В.Л.* // *Sol. Stat. Commun.* 2000. Vol. 115. N 7. P. 369–373.
- [14] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. Ч. 1. М.: Наука, 1995. 605 с.
- [15] *Ляшенко Я.А.* // *ЖТФ*. 2012. Т. 82. Вып. 1. С. 19–28.
- [16] *Ляшенко Я.А.* // *ЖТФ*. 2011. Т. 81. Вып. 5. С. 115–121.
- [17] *Lyashenko I.A., Zaskoka A.M.* // *Ukr. J. Phys.* 2013. Vol. 58. N 1. P. 91–102.
- [18] *Lyashenko I.A., Zaskoka A.M.* // *J. Phys. Stud.* 2013. Vol. 17. N 1. P. 1002 (7).
- [19] *Lyashenko I.A., Khomenko A.V., Zaskoka A.M.* // *Tribol. Trans.* 2013. Vol. 56. N 6. P. 1019–1026.
- [20] *Ляшенко Я.А.* // *ЖТФ*. 2013. Т. 83. Вып. 7. С. 87–95.
- [21] *Заскока А.Н., Ляшенко Я.А.* // *Физ. мезомех.* 2014. Т. 17. № 2. С. 93–100.
- [22] *Sivebaek I.M., Samoilov V.N., Persson B.N.J.* // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108. N 3. P. 036 102 (4).
- [23] *Yamada S.* // *Langmuir*. 2005. Vol. 21. N 19. P. 8724–8732.
- [24] *Persson B.N.J.* // *Surf. Sci. Rep.* 1999. Vol. 33. N 3. P. 83–119.
- [25] *Попов В.Л.* // *Письма в ЖТФ*. 1999. Т. 25. Вып. 20. С. 31–38.
- [26] *Погребняк А.Д., Братушка С.Н., Береснев В.М., Levintant-Zayonts N.* // *Успехи химии*. 2013. Т. 82. Вып. 12. С. 1135–1159.
- [27] *Luengo G., Israelachvili J., Granick S.* // *Wear*. 1996. Vol. 200. N 1–2. P. 328–335.
- [28] *Khomenko A.V., Lyashenko I.A.* // *Fluct. Noise Lett.* 2007. Vol. 7. N 2. P. L111–L133.