

VI Международная научно-практическая конференция

ГРАФЕН И РОДСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ: СИНТЕЗ, ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ (GRS-2025)

Россия, г. Тамбов, 24 - 26 сентября 2025 г.

Шилов М.А.^{1,2}, Усольцева Н.В.²

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИСАДОК УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СМАЗОЧНОМ СЛОЕ

^{1,2}Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,

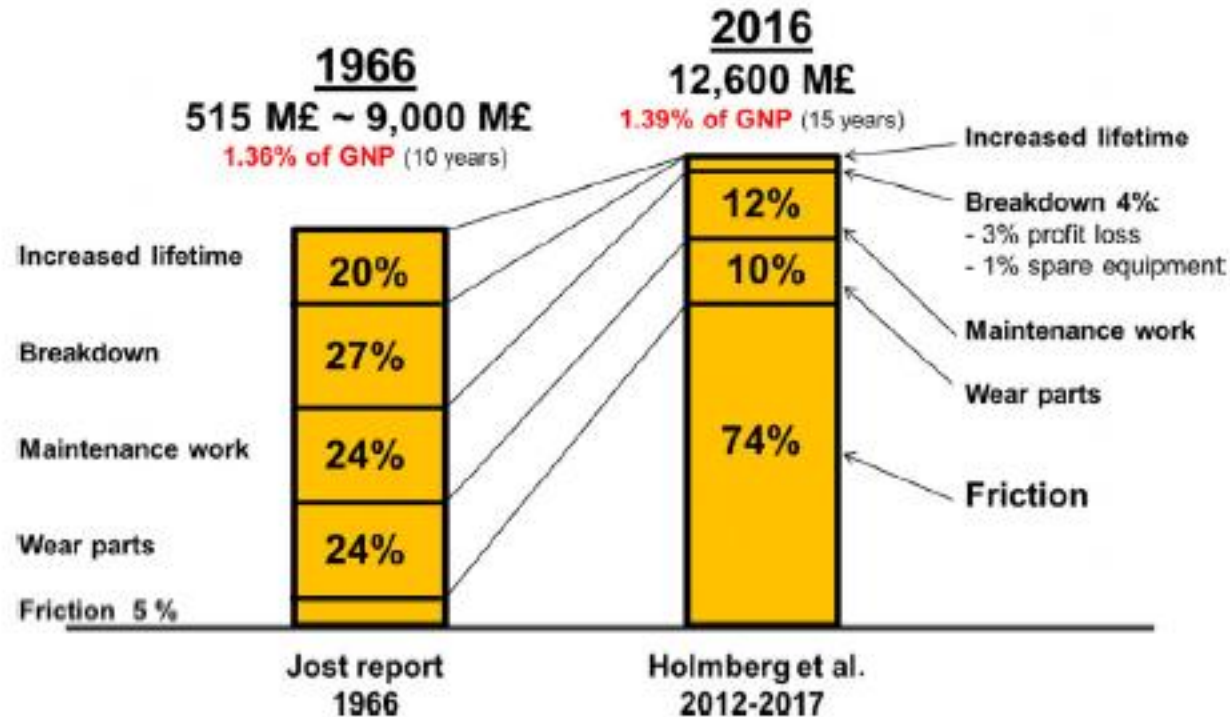
²НИИ наноматериалов, Ивановский государственный университет

Работа поддержана госзаданием Минобрнауки РФ: проект № FZZM-2023-0009 для Ивановского государственного университета, руководитель **Н.В. Усольцева**

Тамбов, 2025

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ РАБОТЫ

РОЛЬ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА В ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭКОНОМИИ СРЕДСТВ



Потенциальная экономия в 1966 и 2016 за счет использования новой трибологии в машинах и оборудовании в Великобритании (515 млн. фунтов в 1966 = 9000 млн. фунтов в 2017)

- Роль снижения процессов трения в экономии средств возросла с 5% до 74%
- Роль снижения процессов износа снизилась с 24% до 10%
- Роль потребления энергии в настоящее время является ведущей: ограниченные ресурсы, высокие цены, выбросы парниковых газов

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ РАБОТЫ

Анализ частотности использования углеродных наноструктур в качестве присадок к СМ

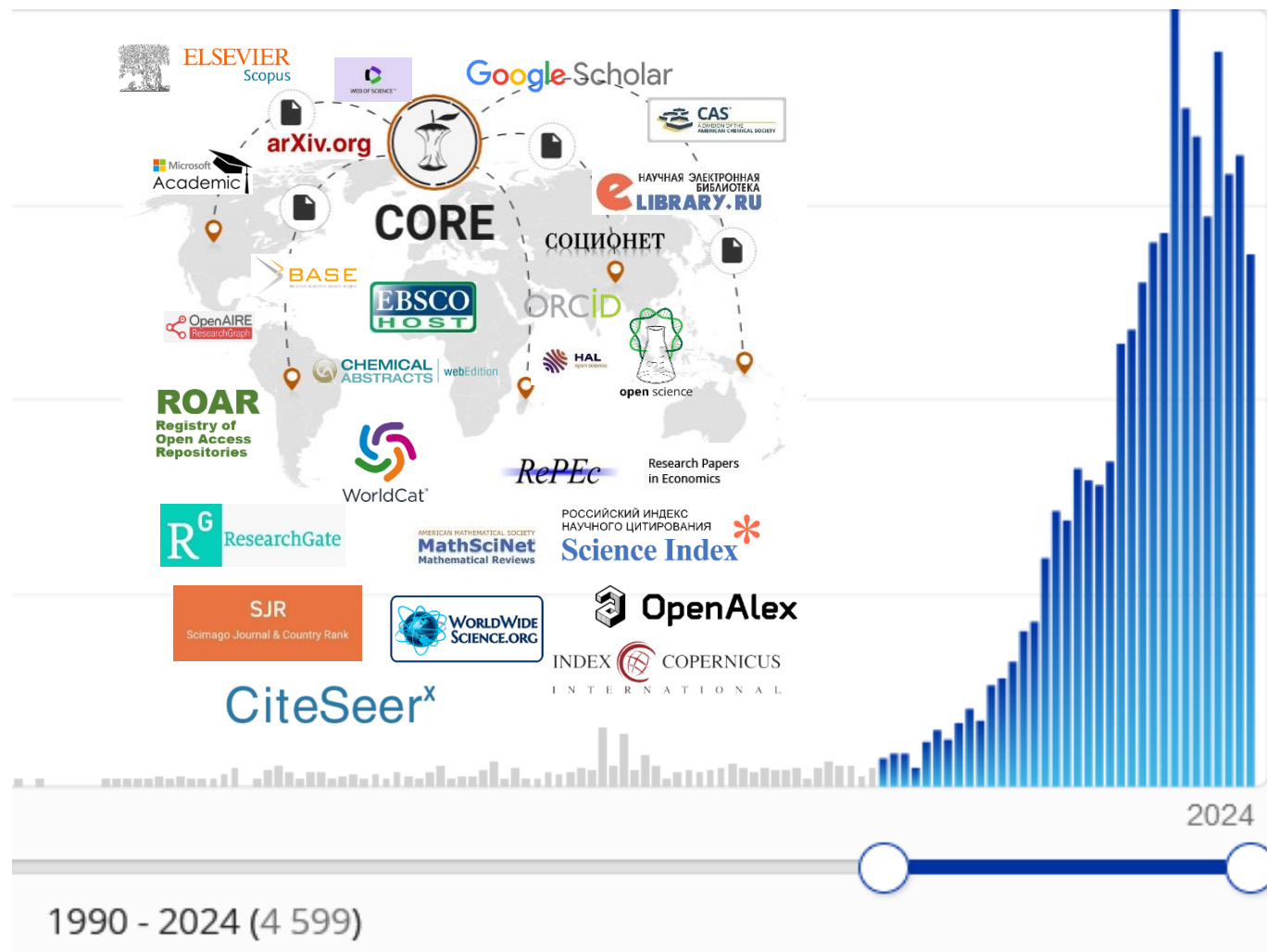
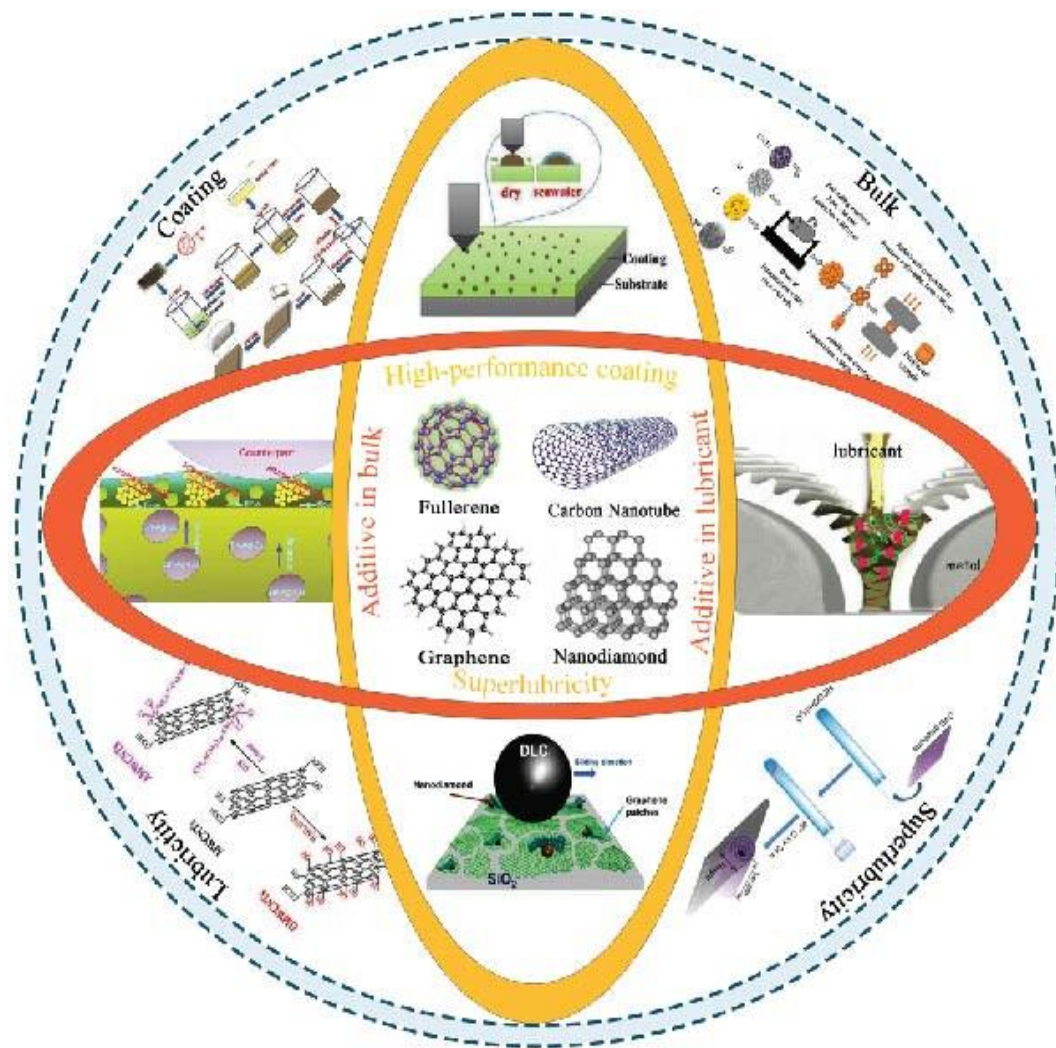


Рис. 1. Диаграмма публикационной активности

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Установление влияния ориентации присадок углеродных наноструктур на теоретические и экспериментальные закономерности трения и изнашивания при использовании смазочных материалов.

ЗАДАЧИ

1. Создать математические модели оценки влияния типа, концентрации и ориентации присадок углеродных наноструктур на величину износа для смазочных материалов в различных режимах смазки;
2. Разработать численные модели оценки влияния типа, концентрации и ориентации присадок углеродных наноструктур на величину износа для смазочных материалов в различных режимах смазки;
3. Доказать влияние пространственной организации и концентрации присадок углеродных наноструктур на процессы внутреннего трения между слоями смазочного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ОБЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

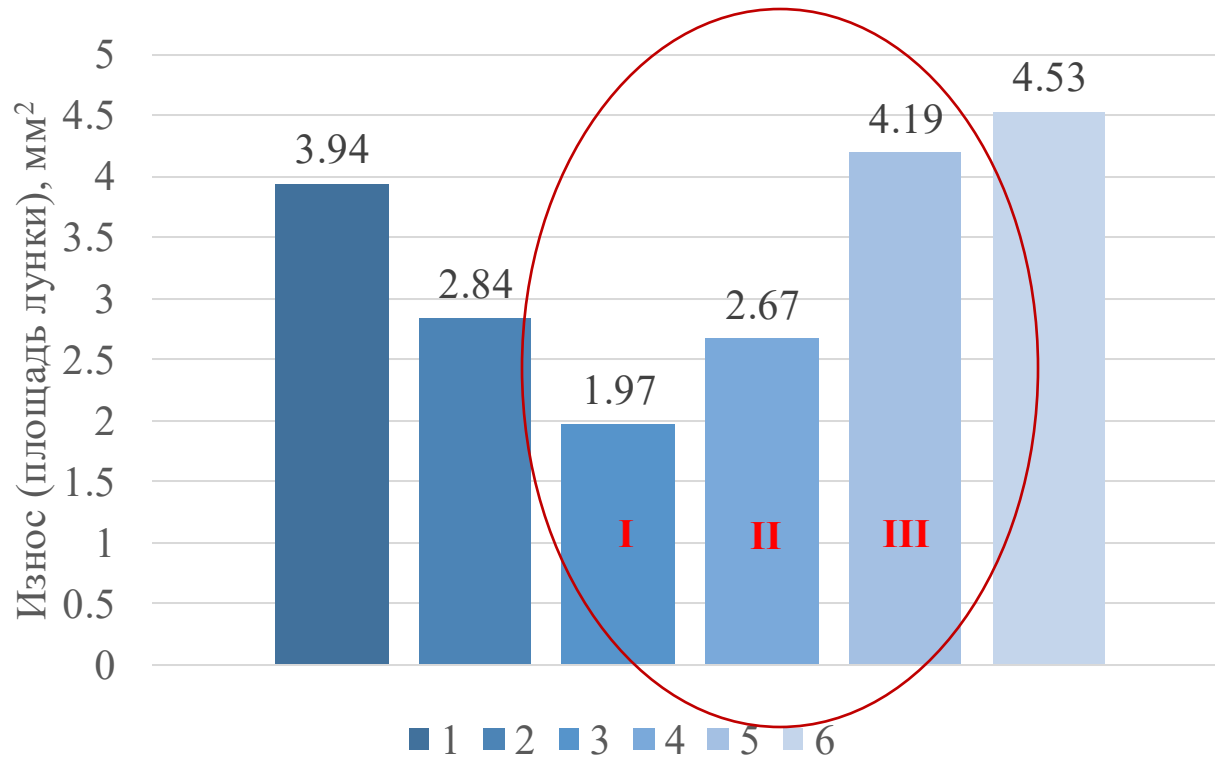
Пластичные смазочные материалы (ПСМ)

I – Claas AGRIGREASE EP2 (ISO 6743-9: L-XBCEB 2)

III – Литол-24 (ГОСТ 21150—2017)

II – Газпромнефть LX EP2 (ТУ КРНС 2 N-50)

VM – Вазелин медицинский (ЛСР-005886/08-230708)



ОБЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ (продолжение)

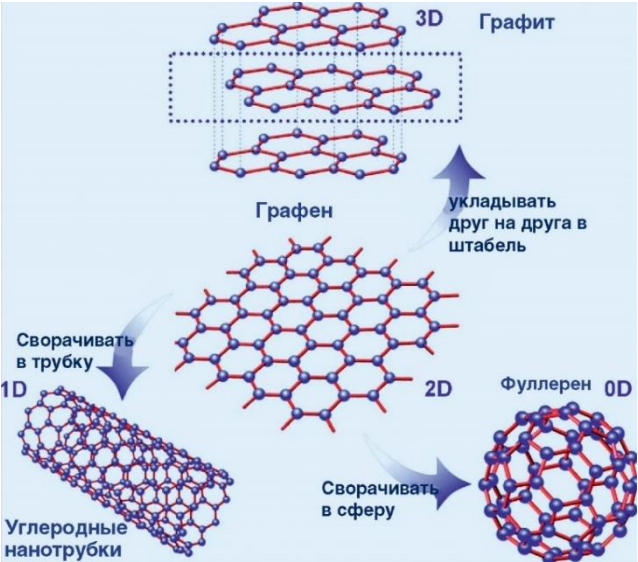
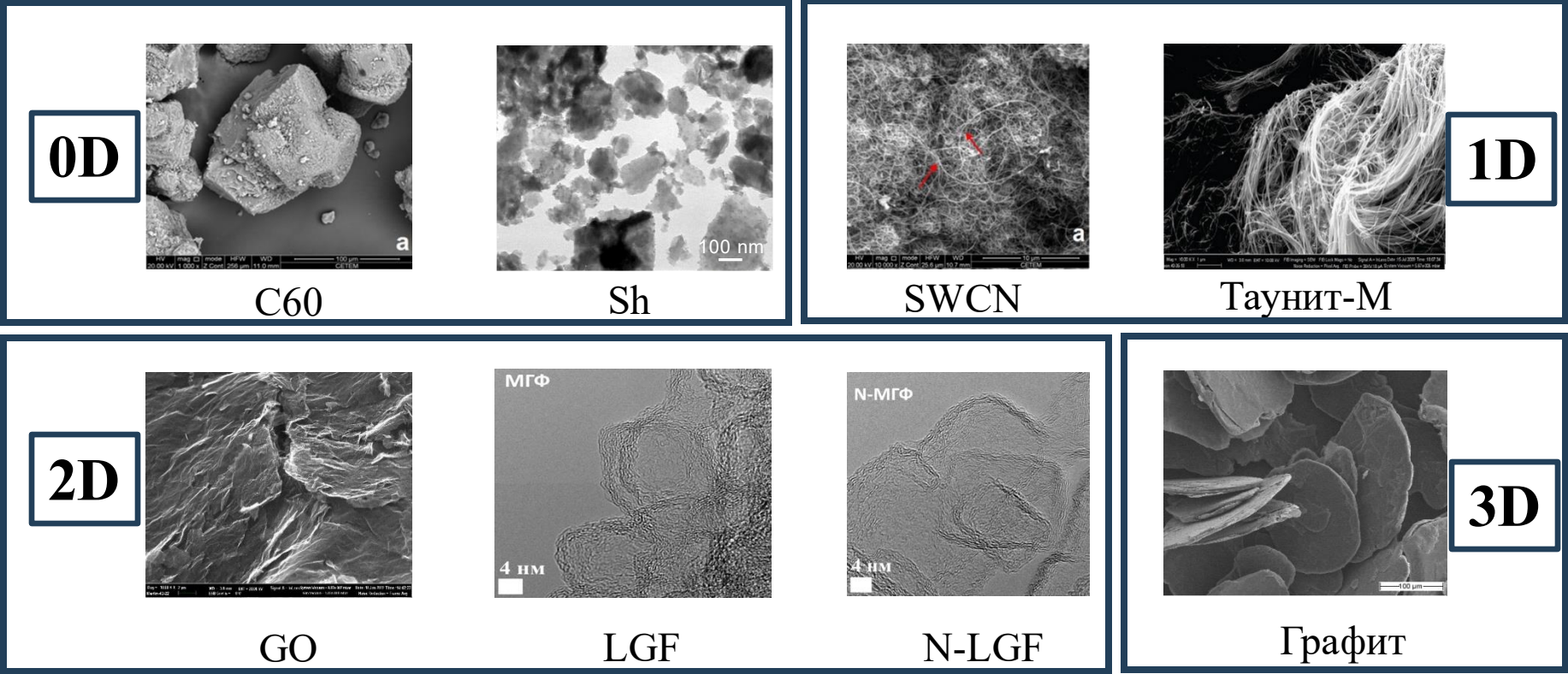


Рис. 2. Аллотропные модификации углерода



УНС	C60	Sh	SWCN	Таунит-М	GO	LGF	N-LGF	Графит
Производитель	Sigma-Aldrich, США	Карельский центр РАН, Петрозаводск	ArryGmbH, Germany	НаноТехЦентр, Тамбов	НаноТехЦентр, Тамбов	МГУ, Москва	МГУ, Москва	Him-trade, Москва
Геометрические характеристики, нм	радиус молекулы (0,357), толщиной сферической оболочки (0,1)	Глобулярные стопки (~6)×(~6)× Толщина трубостратных стопок (1,5-2,5)	диаметр (1-2), длина (2000)	внеш. диаметр (10-30), внутр. диаметр (5-15), длина (200)	толщина пластин (3-5), число слоев (5-10)	толщина пластин (4-7), число слоев (3-5)	толщина пластин (2-5), число слоев (5-7)	толщина пластин (5-8), число слоев (10-20)
Чистота, %	98	98	90	95	95	95	95	90

ОБЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ:

Концентрационный диапазон присадок УНС по данным литературы

№ п/п	СМ	Тип углеродной присадки	Конц-я, мас. %	Российские авторы	Зарубежные авторы
1	Масла	C60, Sh (0D)	0,01 – 3,0	Албагачиев А.Ю., Бреки А.Д., Буяновский И.А., Гинзбург Б.М., Точильников Д.Г., <u>Усольцева Н.В.</u> , Кушч А.И., Ткачев А.Г.,	González I., Ma Q., Li N., Endo M.
2		УНТ (1D)	0,1 – 2,5	Албагачиев А.Ю., <u>Усольцева Н.В.</u> , Ткачев А.Г., Березина Е.В., Годлевский В.А.,	Sopyan I., Zhang Q., Allafi W.,
3		GO и их аналоги (2D)	0,1 – 7,5	Бреки А.Д., Чулкин С.Г., Ткачев А.Г., <u>Усольцева Н.В.</u> , Хопин П.Н., Скотникова М.А.,	Choi H.J., Li J., Mohammad A.,
4	ПСМ	C60, Sh (0D)	0,1 – 4,0	Бреки А.Д., Чулкин С.Г., Ткачев А.Г., <u>Усольцева Н.В.</u> , <u>Шилов М.А.</u>	Miura K., Afsharimoghadam P.
5		УНТ (1D)	0,05 – 3,5	Ткачев А.Г., <u>Усольцева Н.В.</u> , <u>Шилов М.А.</u>	Mohamed A., Zhang Ch., Aswath P.B., Yujun G., Hong H.,
6		GO и их аналоги (2D)	0,01 – 2,0	Кошелев А.В., Ткачев А.Г., <u>Усольцева Н.В.</u> , <u>Шилов М.А.</u>	Afsharimoghadam P.,

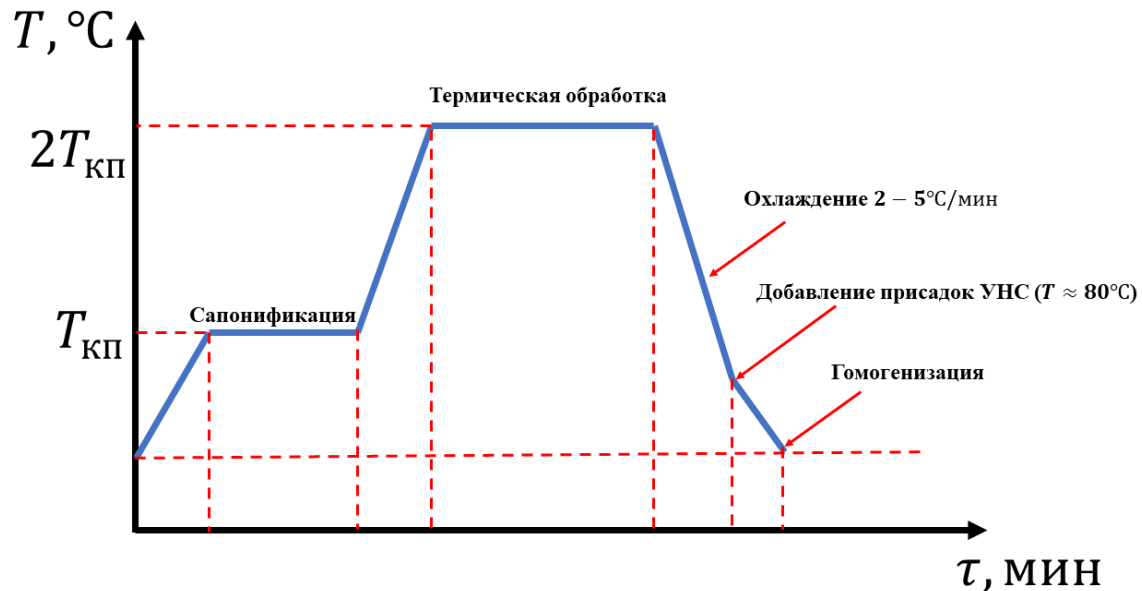
Материалы пар трения

СТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Материал пары трения	Сталь 45	ШХ15	40Х
Шероховатость, Ra, мкм	0,20 – 0,16	1,25	1,25
Твердость по Роквеллу, HRC	≥45	≥60-62	≥60

УСТОЙЧИВЫЕ ДИСПЕРСИИ ПСМ/УНС

1



2

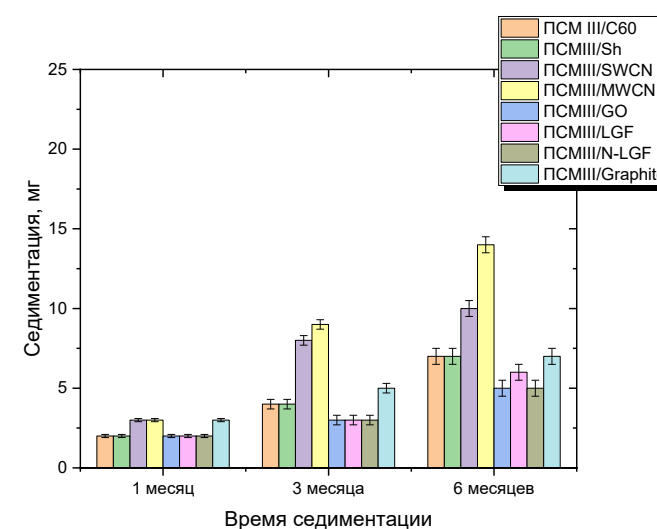
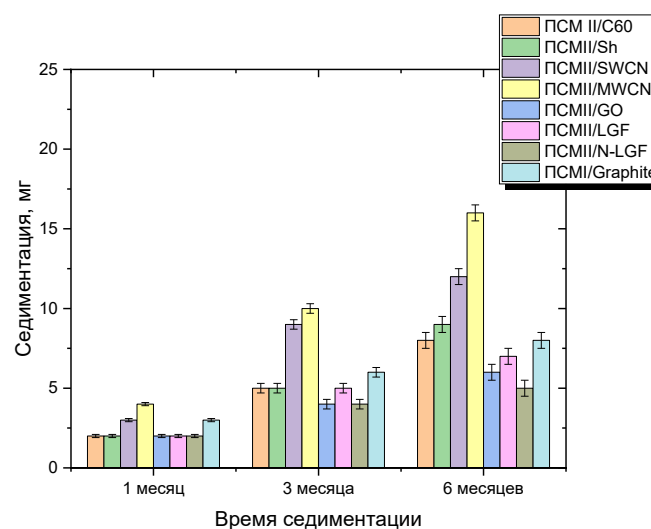
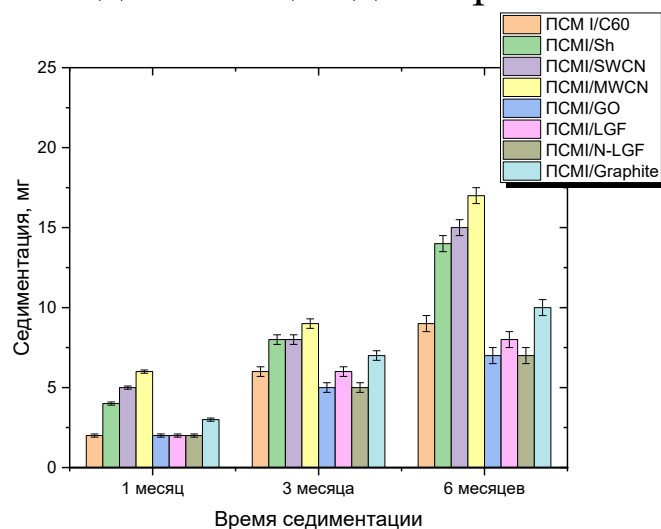
Диспергирование проводили на УЗДН-2Т



$\tau = 25 - 30$ мин,
 $\nu = 44$ кГц

3

Седиментация дисперсий ПСМ/УНС



УСТОЙЧИВЫЕ ДИСПЕРСИИ ПСМ/УНС

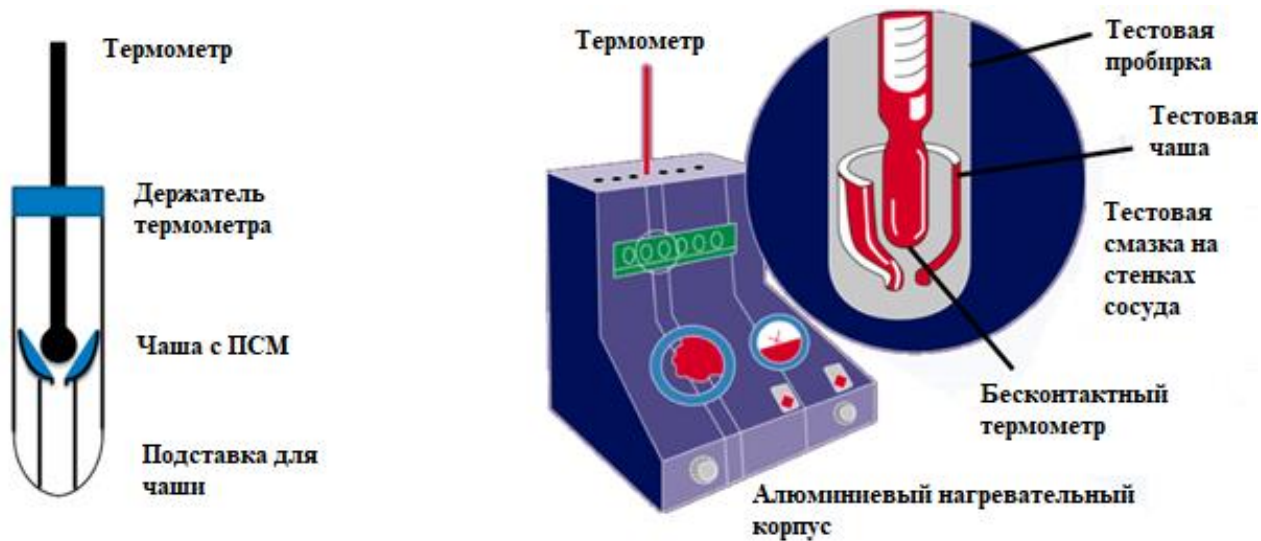


Рис. 5. Схема определения пенетрации ПСМ:
а – общая схема, б – вдавливание конуса пенетromетра

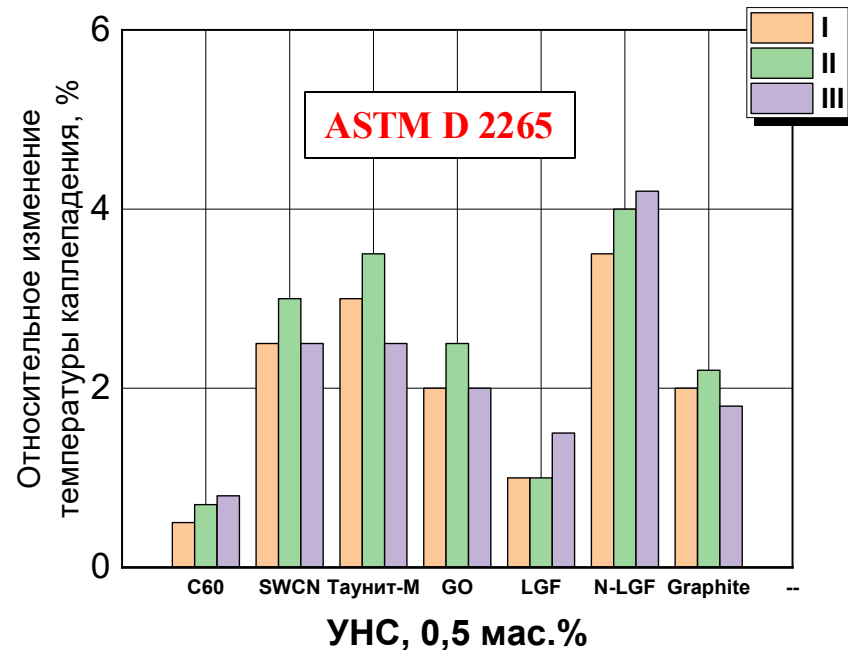


Рис. 4. Относительные значения температуры каплепадения для дисперсий ПСМ/УНС (0,5 мас.%)

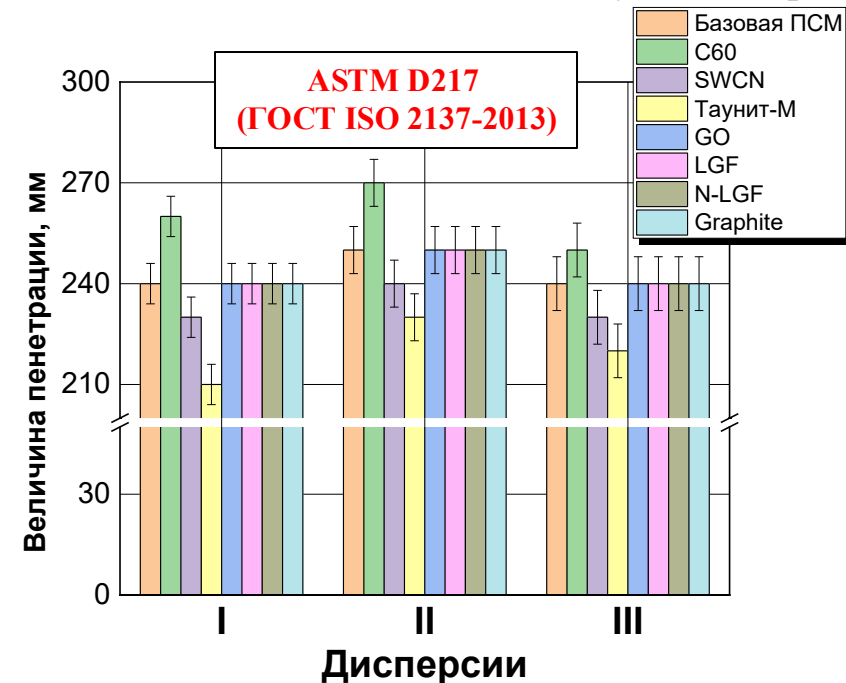


Рис. 6. Результаты измерения пенетрации дисперсий ПСМ/УНС (0,5 мас.%)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗНОСА

МОДЕЛЬ 1 СТАЦИОНАРНОГО КАЧЕНИЯ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6v_{\text{СК}} \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 6\rho h \frac{\partial v_{\text{СК}}}{\partial t} + 12 \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (1)$$

где ρ – плотность СМ, h – толщина СС, p – давление, η – динамическая вязкость, $v_{\text{СК}}$ – суммарная скорость контактирующих поверхностей

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = u_m \frac{\partial(\rho h)}{\partial x}, \quad (2)$$

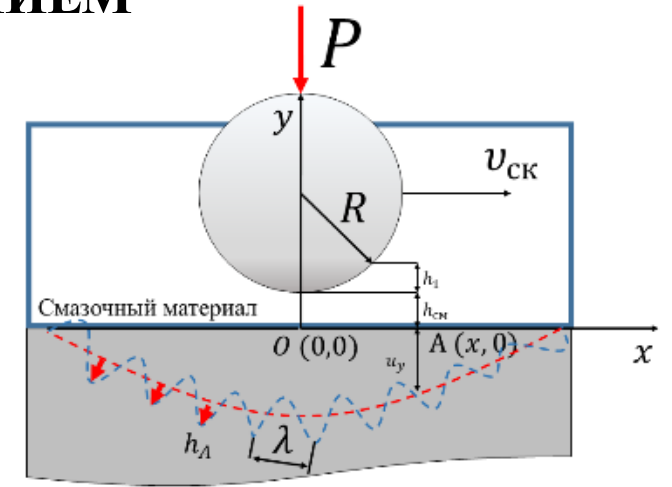
$$v_{\text{СК}} = 2u_m. \quad \text{Граничные условия: } p(x_a) = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x_b} = 0,$$

где x_a, x_b – границы на входе и выходе рассматриваемой области

$$\text{Условие силового равновесия: } P = \int_{x_a}^{x_b} p(x) dx$$

$$h(x) = h_p + h_{\text{СМ}} + h_{\text{упр}} - h_{\text{в}}, \quad (3)$$

где h_p – высота, учитывающая кривизну ролика, $h_{\text{СМ}}$ – толщина смазочного слоя, $h_{\text{упр}}$ – глубина внедрения ролика, $h_{\text{в}}$ – высота шероховатости поверхностей, h_A – математическое ожидание амплитуды шероховатости R_z , λ – математическое ожидание длины волны, E^* – приведенный модуль упругости



$$\rho(p) = \rho_0 \frac{\psi + 1,34p}{\psi + p}, \quad \eta(p) = \eta_0 \cdot \exp(\theta p), \quad (4)$$

где ρ_0 – атмосферная плотность СМ, η_0 – вязкость при атмосферном давлении, $\psi = 0,59 \cdot 10^9$ Па, θ – экспериментальная постоянная, зависящая от СМ, Па^{-1}

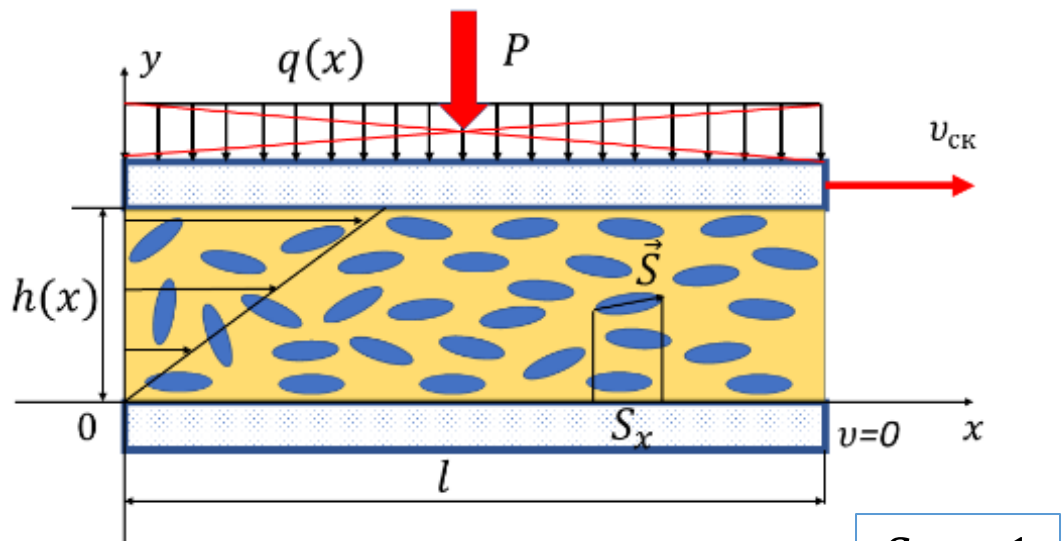
$$h_{\text{в}} = h_A \left(\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + 1 \right) \right),$$

$$h_{\text{в}} = \frac{2h_A}{\pi} \left(\arcsin \left(\sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \right) + \frac{1}{2\pi} \right),$$

$$h_{\text{в}} = h_A \operatorname{sign} \left(\sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \right).$$

МОДЕЛЬ 1 СТАЦИОНАРНОГО КАЧЕНИЯ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ

Постановка задачи



$$\frac{\partial S_x}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} \cdot (1 - S_x) \quad (5)$$

$S_x = 1$
max

где α – коэффициент пропорциональности

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{v_0}{h} \quad (6)$$

Начальное условие

$$S_x(0) = 0$$

$$S_x = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

(7)


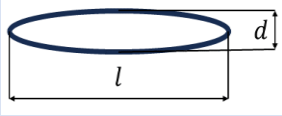
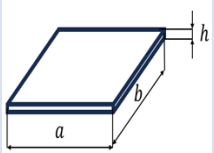
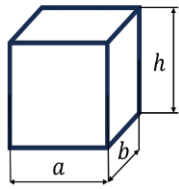
$$\tau = \frac{1}{\alpha \cdot \frac{v_{ск}}{h}}$$

где τ – характерное время релаксации параметра ориентации,
 $t = L_{тр}/v_{ск}$, где $L_{тр}$ – путь трения

$$\alpha = \left(2,5 + \frac{1}{16} AR^2\right) C^* \phi$$

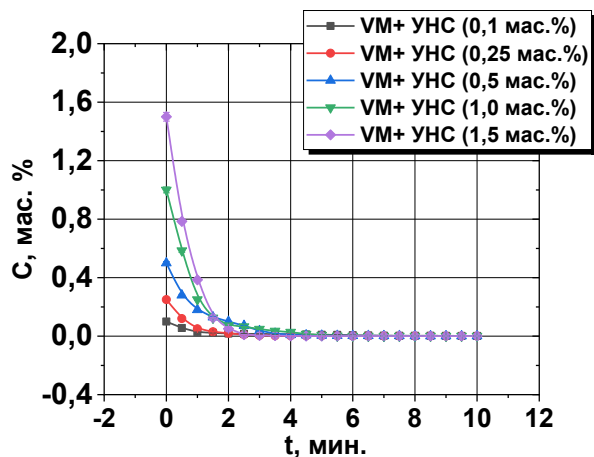
где концентрация (C^*), геометрия УНС и автокорреляционная функция распределения УНС по размерам (ϕ)

Табл. 1. Аспектные отношения (AR) для различных типов УНС

Тип УНС	0D	1D	2D	3D
Величина AR				
	0	l/d	$a/h \cong b/h$	1

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗНОСА

МОДЕЛЬ 1 СТАЦИОНАРНОГО КАЧЕНИЯ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ



$$\frac{\partial C}{\partial t} = -k(C - C_0)$$

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических характеристик (аспектного отношения (AR) и адсорбционной активности конкретного УНС

Начальные условия $C(t = 0) = C_{max}$

$$C^* = C_{max}e^{-kt} + C_0(1 - e^{-kt}) \quad (8)$$

При стационарном течении, касательные напряжения

$$\tau_{xy} = \eta(S_x, C^*) \cdot \frac{v_0}{h} \quad (9)$$

$\eta(S_x, C^*)$ – коэффициент динамической вязкости, зависящий от проекции параметра порядка S_x УНС, их концентрации C и пластических свойств СМ

$$\eta(S_x, C^*) = \eta_0 + \eta^* \cdot S_x \quad (10)$$

$\eta(0)$ – коэффициент динамической вязкости (для базовой ПСМ), когда $S_x = 0$ (как в нашем случае), η^* – коэффициент пропорциональности коэффициент динамической вязкости для ПСМ и УНС)

$$\eta(p) = \eta_0 \cdot \exp(\theta p + S_x), \quad (11)$$

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗНОСА

МОДЕЛЬ 1 СТАЦИОНАРНОГО КАЧЕНИЯ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\rho'(h')^3}{\eta'} \frac{\partial p'}{\partial x'} \right) = F_1 \frac{\partial(\rho'h')}{\partial x'}, \\ h'(x') = h'_{\text{см}} + F_2 x'^2 + F_3 \int_{x'_a}^{x'_b} p'(S') \ln(x' - S') dS' - F_4 h'_A \sin(\lambda x'), \\ \text{Условие равновесия: } F_5 = \int_{x'_a}^{x'_n} p' dx', \\ \text{Граничные условия: } p(x'_a) = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x'_b} = 0, \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p'(x'_i) = p_0(x'_i) + \Delta p'(x'_i), \\ h'_{\text{см}}(x'_i) = h_0(x'_i) + \Delta h'_{\text{см}}(x'_i). \end{array} \right. \quad (14)$$

Уравнение для толщины СС	Модель
$h_{\text{ц},D} = 4,31(1 - 0,72e^{-0,28k})v_{\text{СК}}^{0,64}(\eta_0 e^{p\theta^*})^{0,64}P^{-0,22}(E^*)^{-0,42}R^{0,8},$	Доусона
$h_{\text{ц}} = 4,31(1 - 0,72e^{-0,28})v_{\text{СК}}^{0,64}(\eta_0 e^{p\theta + S_x})^{0,64}P^{-0,22}(E^*)^{-0,42}R^{0,8}$	с параметром ориентации

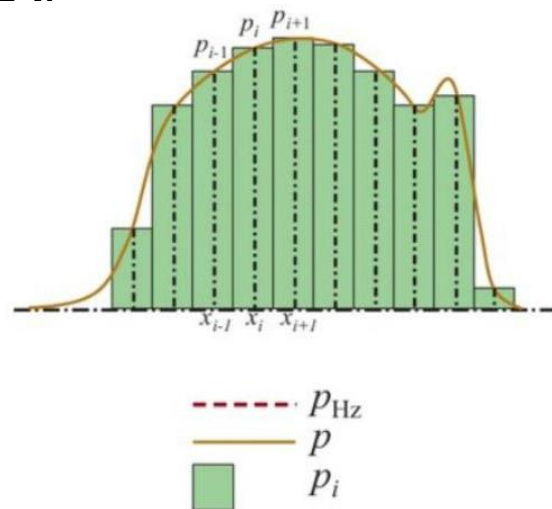
где $F_1 = \frac{3\pi^2 u'}{4p'^2}$, $F_2 = \frac{1}{2}$, $F_3 = -\frac{1}{2\pi}$, $F_4 = 1$, $F_5 = \frac{\pi}{2}$

метод Ньютона-Рафсона

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(p', h'_{\text{см}}) = \frac{d}{dx'} \left(\frac{\rho'(h')^3}{\eta'} \frac{\partial p'}{\partial x'} \right) - F_1 \frac{d(\rho'h')}{dx'} = 0 \\ f_2(p', h'_{\text{см}}) = \int_{x'_a}^{x'_n} p' dx' - F_5. \end{array} \right. \quad (13)$$

где $\eta' = \eta'(p')$, $\rho' = \rho'(p')$ и $h' = h'_{\text{см}} + F_2 x'^2 + F_3 I(p') - F_4 \sin(\lambda x')$,
а $I(p') = \int_{x'_a}^{x'_b} p'(S') \ln(x' - S') dS'$ – интегральный оператор

где $h_{\text{ц}}$ – центральная толщина СС, R – приведенный радиус кривизны,
 $U = \frac{\eta_0 v_{\text{СК}}}{E^* R}$ – безразмерная скорость, E^* – приведенный модуль упругости,
 $W = \frac{P}{E^* R^2}$ – безразмерная нагрузка



МОДЕЛЬ 1 СТАЦИОНАРНОГО КАЧЕНИЯ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ

Увеличение глубины износа:

$$h_i - h_{i-1} = k' \mu_{\text{ср}} p_i \Delta L_i \quad (15)$$

где h_i – глубина износа на i -й итерации, h_{i-1} – глубина износа на предыдущей итерации, k' – постоянная величина в уравнении Арчарда, $\mu_{\text{ср}}$ – средний коэффициент трения, p_i – давление на i -ом шаге, ΔL_i – приращение пути трения

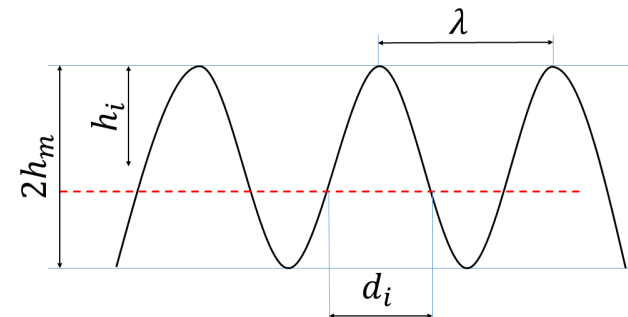


Рис. 7. Схема геометрии микронеровностей

d_i – износ одной микронеровности на i -й итерации, λ – длина волны

$$M_w(S_x) = \rho_m \sum_{i=1}^n \Delta V_i(S_x) = \rho_m \begin{cases} \sum_{i=1}^n (h_i(S_x) - h_{i-1}(S_x)) \left(\frac{2\pi r h_i(S_x)}{2h_m} \right) \left(\frac{2R h_i(S_x)}{2h_m} \right), & \text{при } h_i < 2h_m \\ \sum_{i=1}^n (h_i(S_x) - h_{i-1}(S_x)) (2\pi r) (2R), & \text{при } h_i > 2h_m \end{cases} \quad (16)$$

где $2R$ – длина ролика, $2h_m$ – наибольшая высота неровностей профиля тела и контртела

$$h(x_i, S_x) = h_{\text{ц},i} = \begin{cases} h_p + h_{\text{см}}(S_x) - h_{\text{упр}} - \frac{2h_m - h_i(S_x)}{2} \sin(\lambda x_i), & h_i < 2h_m \\ h_p + h_{\text{см}}(S_x) - h_{\text{упр}}, & h_i > 2h_m \end{cases} \quad (17)$$

$$I_{h_i}(S_x) = \begin{cases} \frac{h_{wi}^0(S_x) - \frac{2h_m - h_i(S_x)}{2} (\sin(\lambda x_i) + 1)}{L_i}, & h_i < 2h_m \\ \frac{h_{wi}^0(S_x)}{L_i}, & h_i > 2h_m \end{cases} \quad (18)$$



Рис. 8. Схема моделирования износа

МОДЕЛЬ 2 ЦИКЛИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ

$$V_{\text{ц}}^w = V_{w1} n_{\Sigma} \quad (19)$$

где V_{w1} – суммарный объем повреждений при микропиттинге за один период контакта, а n_{Σ} – количество периодов контакта за все время испытаний.

$$M_v = 2Rl_c\rho_{\epsilon}, \quad \epsilon = 1,2 \quad (20)$$

где l_c – длина зоны контакта, ρ_1 – поверхностная плотность выступов абсолютно жесткой поверхности, ρ_2 – поверхностная плотность выступов деформируемой поверхности

$$t_c = \frac{l_c}{\omega_{\text{ск}} R}, \quad (21)$$

где t_c – время контакта участка подвижной и неподвижной поверхностей, $\omega_{\text{ск}}$ – угловая скорость скольжения ролика, R – радиус ролика.

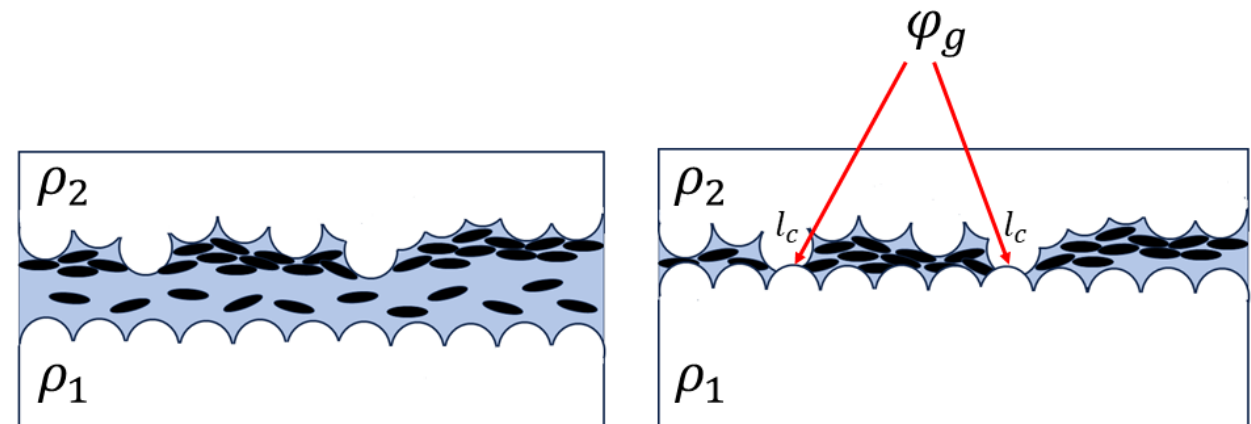
Путь трения ролика по поверхности определим по формуле:

$$L_w = \frac{l_c(\omega_k - \omega_{\text{ск}})}{\omega_{\text{ск}}}, \quad (22)$$

где ω_k – угловая скорость качения. За один период контакта

$$n_1 = \varphi_g \left(M_1 + \frac{L_w}{l_c} \right) = \varphi_g \left(2Rl_c\rho_1 + \frac{(\omega_k - \omega_{\text{ск}})}{\omega_{\text{ск}}} \right), \quad (23)$$

где φ_g – число контактирующих вершин шероховатости поверхностей



МОДЕЛЬ 2 ЦИКЛИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ

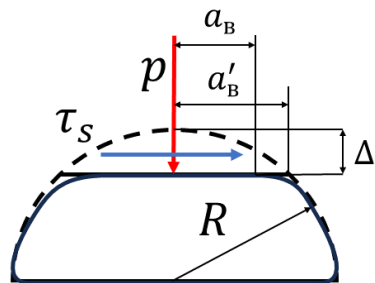
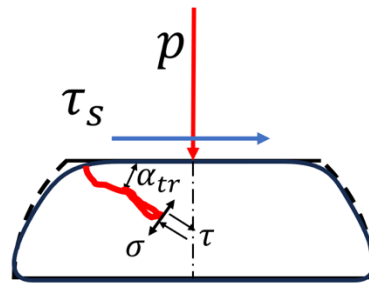
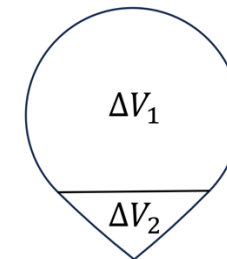


Схема Герцевского контактного взаимодействия вершины шероховатости



Модель разрушения поверхности трения при микропиттинге



Средний объем изношенной единицы неровности

Общий объем износа при качении с проскальзыванием ролика по диску в условиях смешанного режима смазки будет иметь вид:

$$V_{\text{ц}}^w(S_x) = \frac{\bar{V}}{n_f} \cdot n_1(S_x) \cdot n_{\Sigma}, \quad (24) \approx$$

где \bar{V} – средний объем износа одной единицы неровности, n_f – количество циклов, приводящее к разрушению, $n_1(S_x)$ – число микроконтактов за один период контакта, n_{Σ} – количество периодов контакта за все время испытаний.

Модель износа, выведенная И.В. Крагельским:

$$V_{\text{Кр}}^w = \frac{h_{\Delta}}{(\nu + 1)d_r n_f} \cdot \frac{P}{p_r} \cdot L_w = \frac{\bar{V}}{n_f} \cdot \frac{h_{\Delta}}{(\nu + 1)d_r}, \quad (25)$$

где $V_{\text{Кр}}^w$ – объем изношенного материала, мм³, h_{Δ} – внедрение (сближение), мм, P – нормальная нагрузка, Н, L_w – путь трения, м, ν – параметр степенной аппроксимации 1-го участка опорной кривой профиля, d_r – средний диаметр пятна касания микронеровностей, мкм, n_f – число циклов, приводящее к отделению материала, p_r – фактическое давление, Па.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОРЯДКА ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ: ОБОРУДОВАНИЕ И УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ

Оборудование

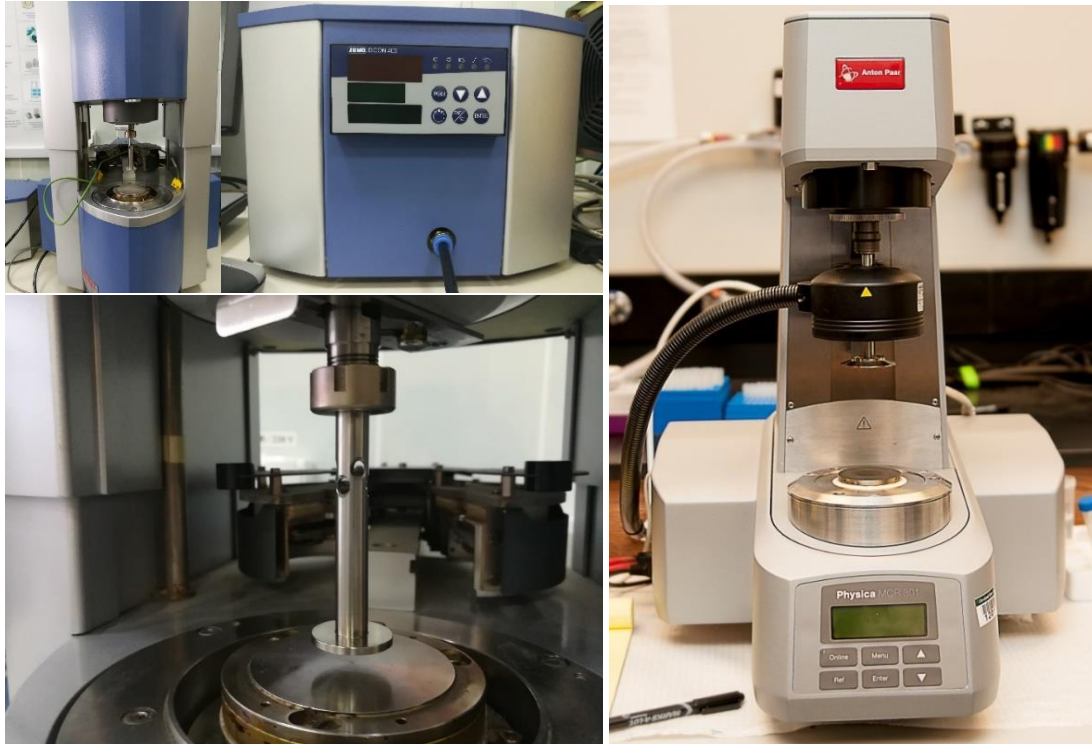


Рис. 9. Схема измерения реологических характеристик на реометре «StressTech» (Reologica, Швеция) и реометре высокого давления Anton Paar Physics MC301

Условия испытаний

Разрушающий тест

Вращение пластины диаметром 20 мм и зазором 0,4 мм осуществляли с постоянной скоростью (стационарный режим, DIN 51810-1).

Изученные смазочные материалы

Промышленно выпускаемые PCM (I, II, III), модельные (VM)

Присадки и их концентрации в СМ:

0D (Sh, C60), 1D (SWCN, MWCN), 2D (GO, LGF, N-LGF), 3D (Graphite)
0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 мас. %

ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ. РАЗРУШАЮЩИЙ ТЕСТ

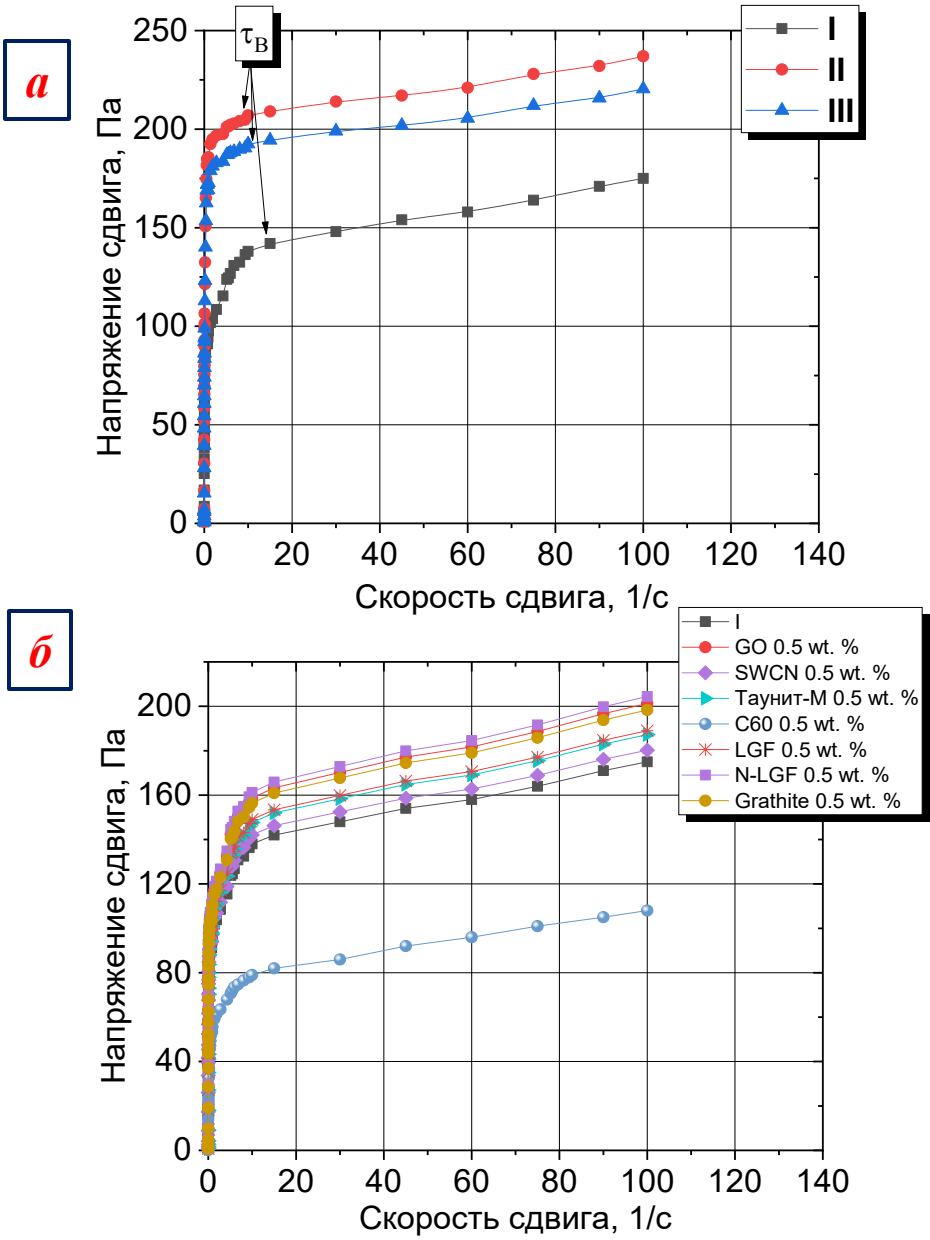


Рис. 10. Сдвиговые характеристики ПСМ (а) и их СК с УНС (б)

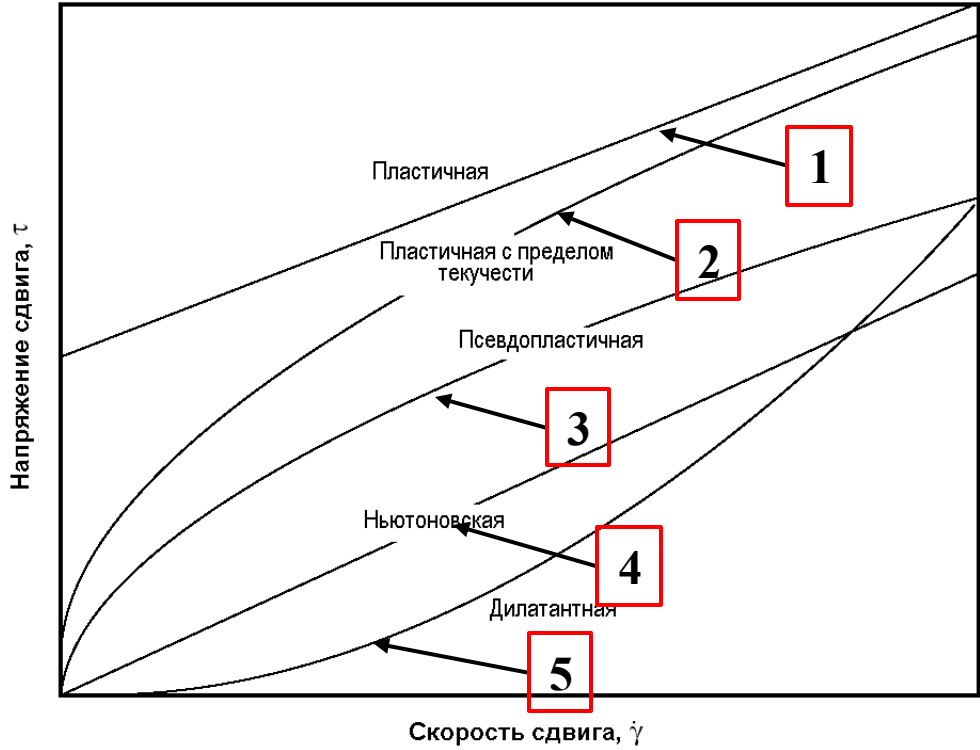


Рис. 11. Модели течений

№ п/п	Реологическая модель	Автор
1	$\tau = \tau_B \text{sign}(\dot{\gamma}) + k \cdot (\dot{\gamma})^n, n = 1, \tau_B > 0$	Закон Бингама-Шведова
2	$\tau = \tau_B + k \cdot (\dot{\gamma})^n, n < 1$	Закон Гершеля-Балкли
3	$\tau = k \cdot (\dot{\gamma})^n, n < 1$	Закон Освальда де-Виле
4	$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$	Закон Ньютона
5	$\tau = k \cdot \dot{\gamma} ^{n-1} \dot{\gamma}, n > 1$	Закон Рейнера

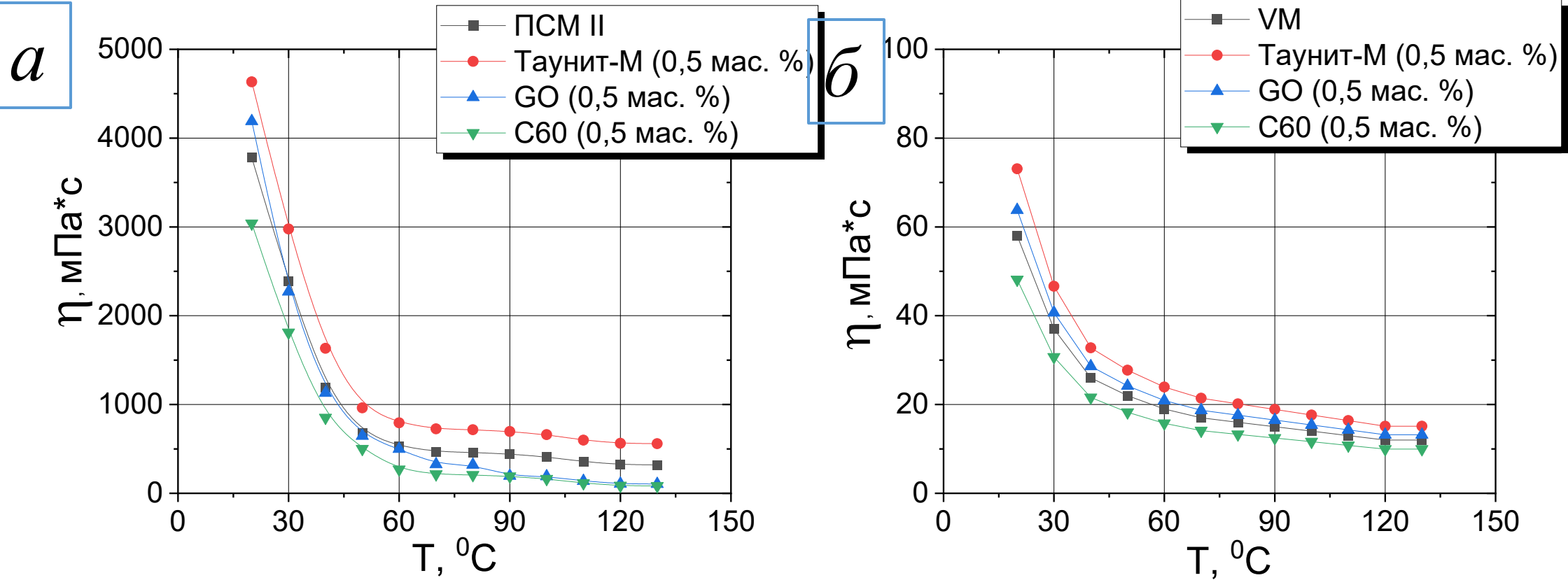


Рис. 12. Зависимость динамической вязкости от температуры в дисперсиях:
 a – ПСМ II и ПСМ II/УНС, b – VM и VM/УНС

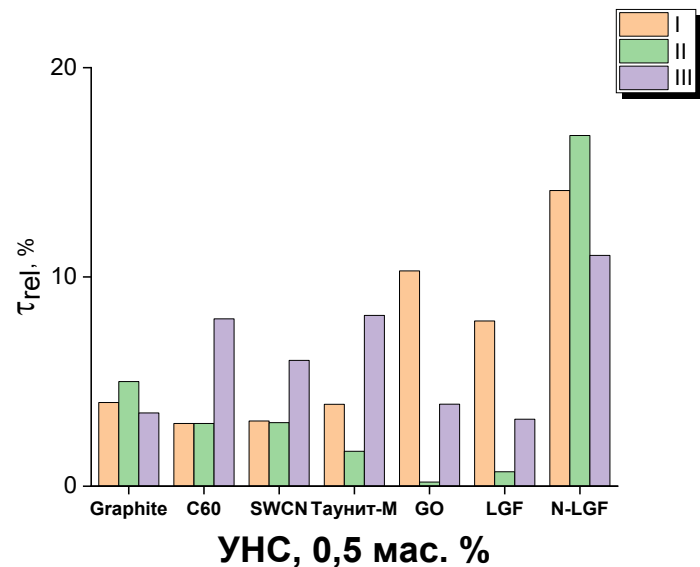


Рис. 13. Относительные величины предельного напряжения сдвига (τ_{rel}) для дисперсий ПСМ I–III / УНС (0,5 мас. %)

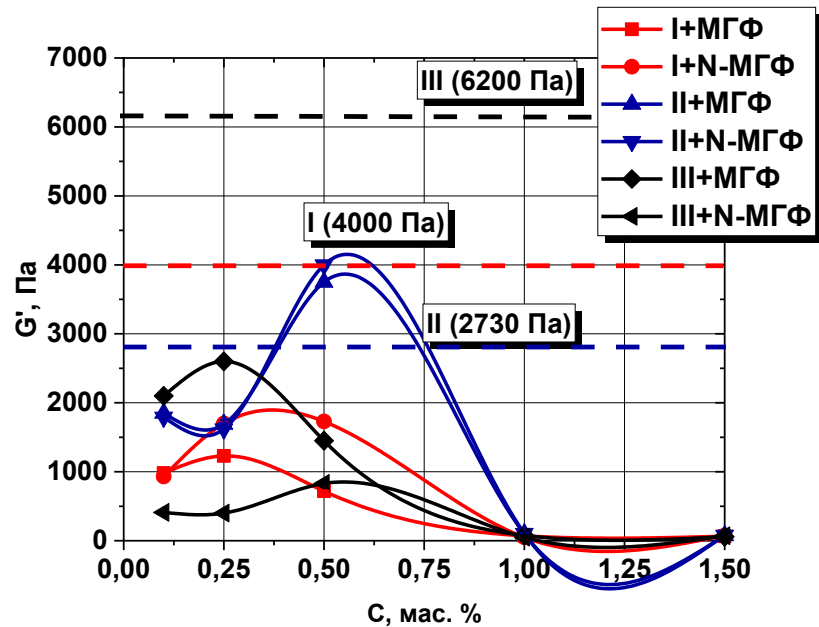
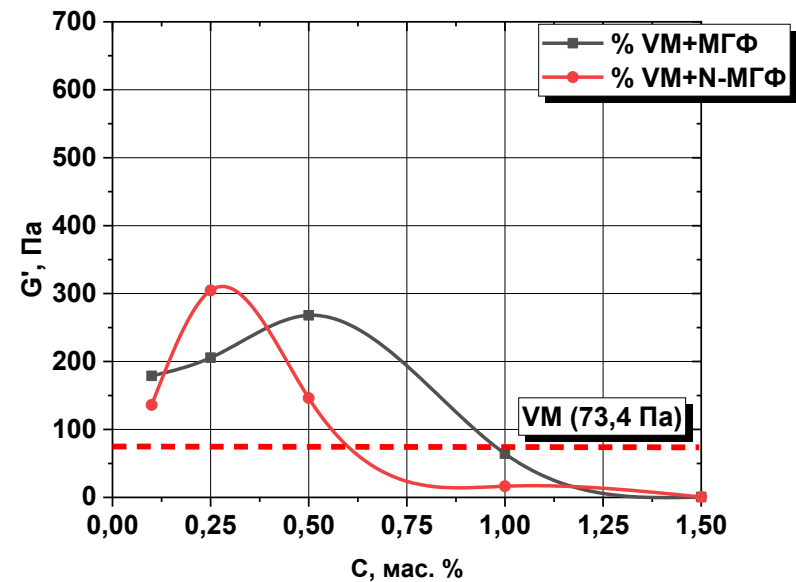


Рис. 14. Зависимости модуля накопления G' от концентрации присадок УНС. Штриховыми линиями обозначены значения G' для соответствующих ПСМ (а) и VM (б). Частота колебаний 1 Гц



ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ УЧЕТОМ ПАРАМЕТРА ОРИЕНТАЦИИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЬЕЗОВЯЗКОСТИ

$$\theta_{\text{танг}}(p) = \frac{\partial \ln(p)}{\partial p}$$

$$\theta_{\text{сек}}(p) = \frac{\ln(\eta(p)) - \ln(\eta_0(p))}{p}$$

$$\eta = \eta_0 \exp(\theta p + S_x)$$

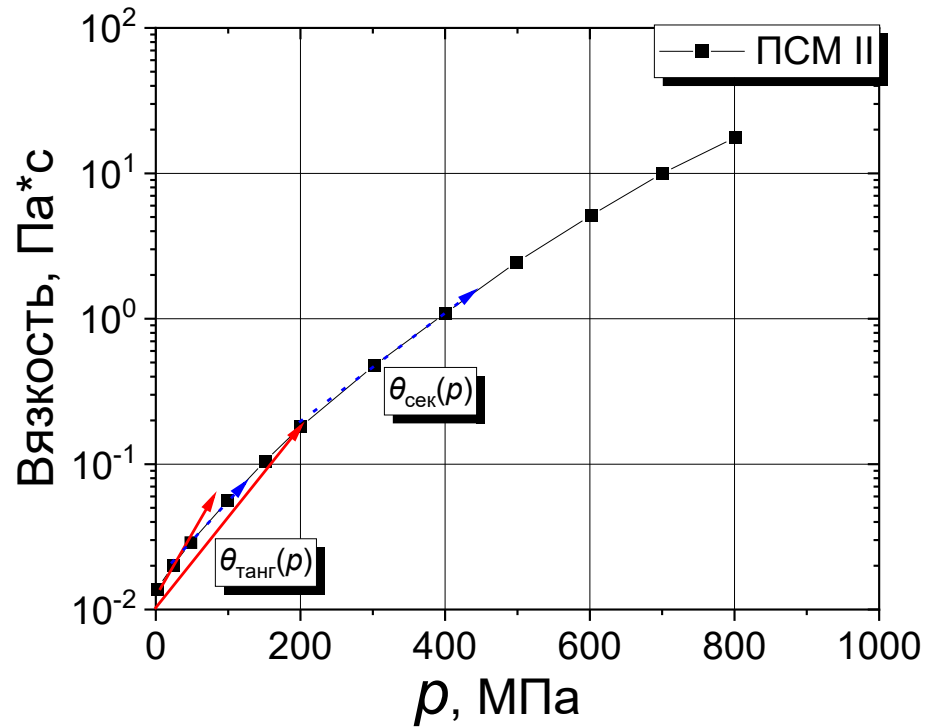


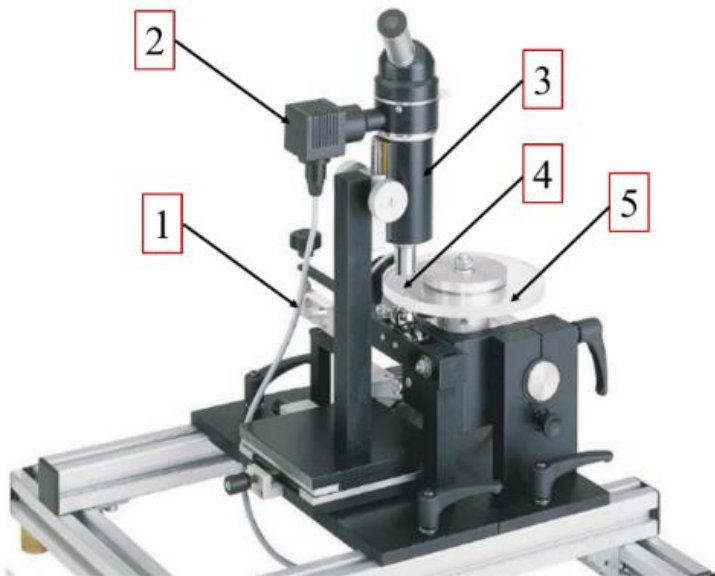
Рис. 15. Зависимость вязкости от давления:
 $T = 22^\circ\text{C}$, $v = 1 \text{ м/с}$

Табл. 1. Коэффициент пьезовязкости ($T = 22^\circ\text{C}$, $p = 200 \text{ МПа}$, $S_x = 0,5$)

PCM/ УНС	$\theta_{\text{эксп}}$	$\theta_{\text{сек}}$	$\theta_{\text{танг}}$	$\theta_{\text{мод}}(p, S_x)$
PCM I	2,57	2,50	2,83	2,53
C60	2,33	2,43	2,87	2,37
SWCN	2,36	2,49	2,88	2,38
Таунит-М	2,21	2,06	2,75	2,25
GO	2,09	2,20	2,57	2,07
N-LGF	2,46	2,38	3,55	-
Graphite	2,57	2,50	2,83	2,83

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРИКЦИОННЫХ И ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ОБОРУДОВАНИЕ И УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ

Оборудование



Условия испытаний

МТУ-01: 0 – 250 Н, пара трения «кольцо-диск», скорость скольжения 0,1... 0,5 м/с.

Трибометр с функций интерферометрии: 250 – 600 Н, пара трения «ролик-плоскость», скорость скольжения 0,01...0,06 м/с

СМТ-1: 600 – 2000 Н, пары трения «ролик-диск», «диск – частичный вкладыш», скорость скольжения 0,5..1,0 м/с

Изученные смазочные материалы

Промышленно выпускаемые ПСМ (I, II, III), модельные (VM)
Лиотропные ЖК (на основе ПАВ1, ПАВ2, ПАВ3, ПАВ4)

Присадки и их концентрации в СМ:

0D (Sh, C60), **1D** (SWCN, MWCN), **2D** (GO, LGF, N-LGF), **3D** (Graphite)
0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 мас. %

Рис. 16. Машины трения: а – МТУ-01, б – трибометр с функцией интерферометрии, в – СМТ-1

РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВАЗЕЛИН/УНС В ГРАНИЧНОМ РЕЖИМЕ СМАЗКИ: противоизносные характеристики

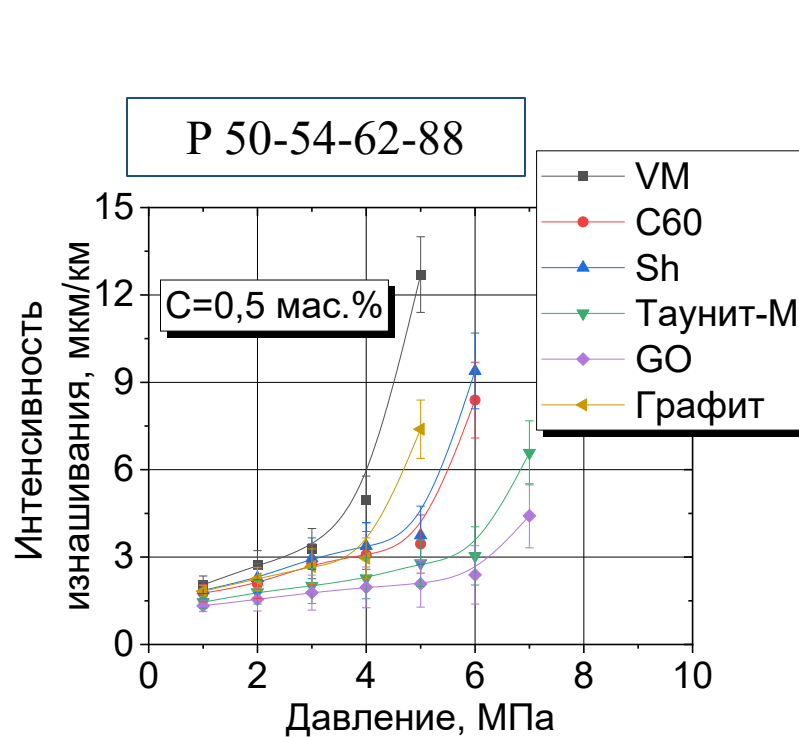
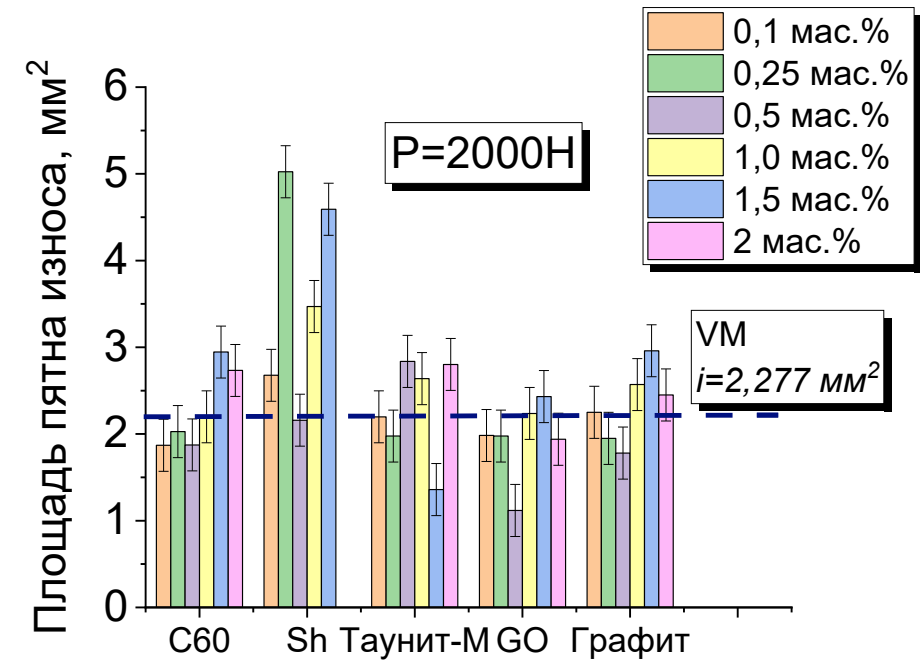
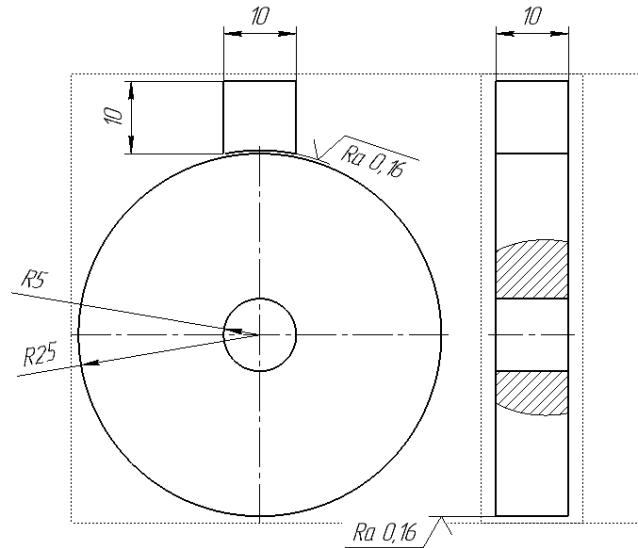


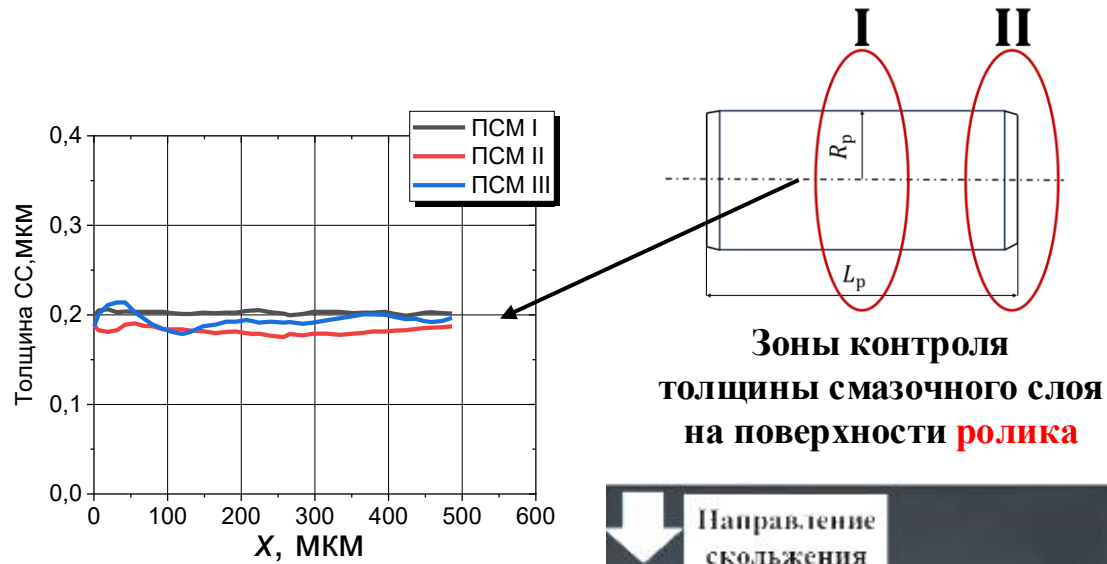
Схема трения



Наилучшие противоизносные характеристики проявляет модельная система **VM/GO**

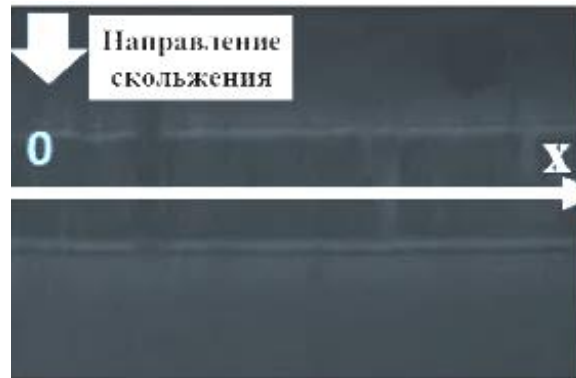
Влияние концентрации присадок УНС
GO (0,5 мас. %) – максимальное уменьшение площади пятна износа
Sh – максимальное повышение площади пятна износа

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДИСПЕРСИЙ ПСМ/УНС В СМЕШАННОМ РЕЖИМЕ СМАЗКИ: толщина смазочного слоя



Условия испытаний:

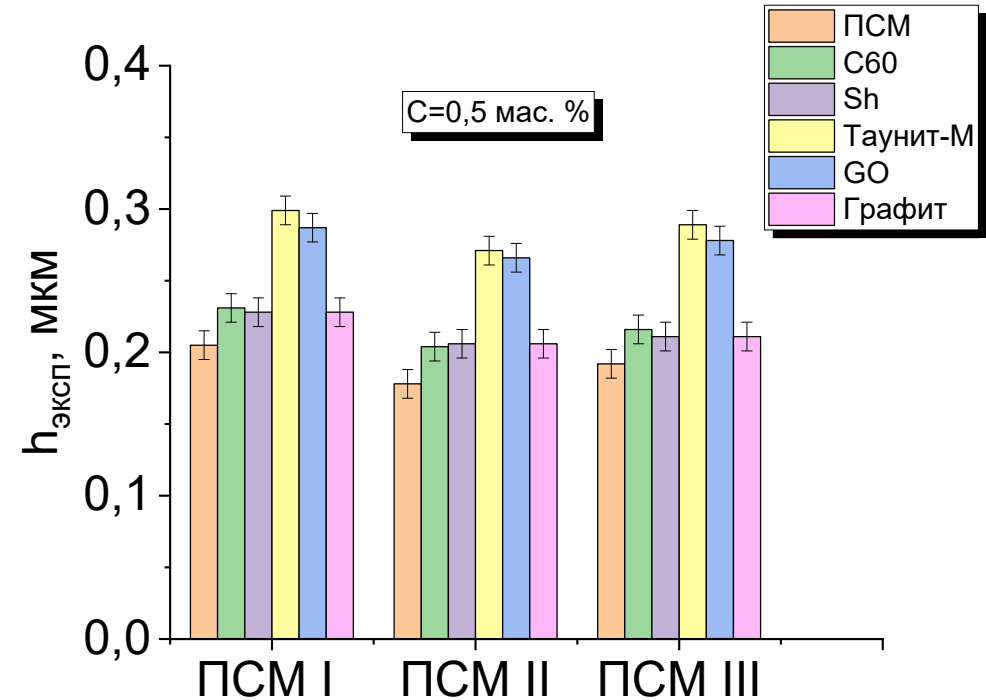
$$v_{\text{ск}} = 20 \frac{\text{мм}}{\text{с}}, p_{\text{max}} = 570 \text{ МПа}$$



Расчетная формула:

$$h_{\text{эксп}} = \frac{\lambda_{\text{св}}}{2n} (N - \Delta\phi)$$

где $\lambda_{\text{св}}$ – длина волны видимого света в воздухе (600 нм), n – показатель преломления базового масла (1,5), N – порядок интерференционной полосы ($N = 1, 2, 3, \dots$ для светлых полос; $N = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ для темных полос), $\Delta\phi$ – фазовая постоянная (0,1).



Влияние типа присадок УНС

Таунит-М и GO – увеличивают толщину смазочного слоя на 20-25%

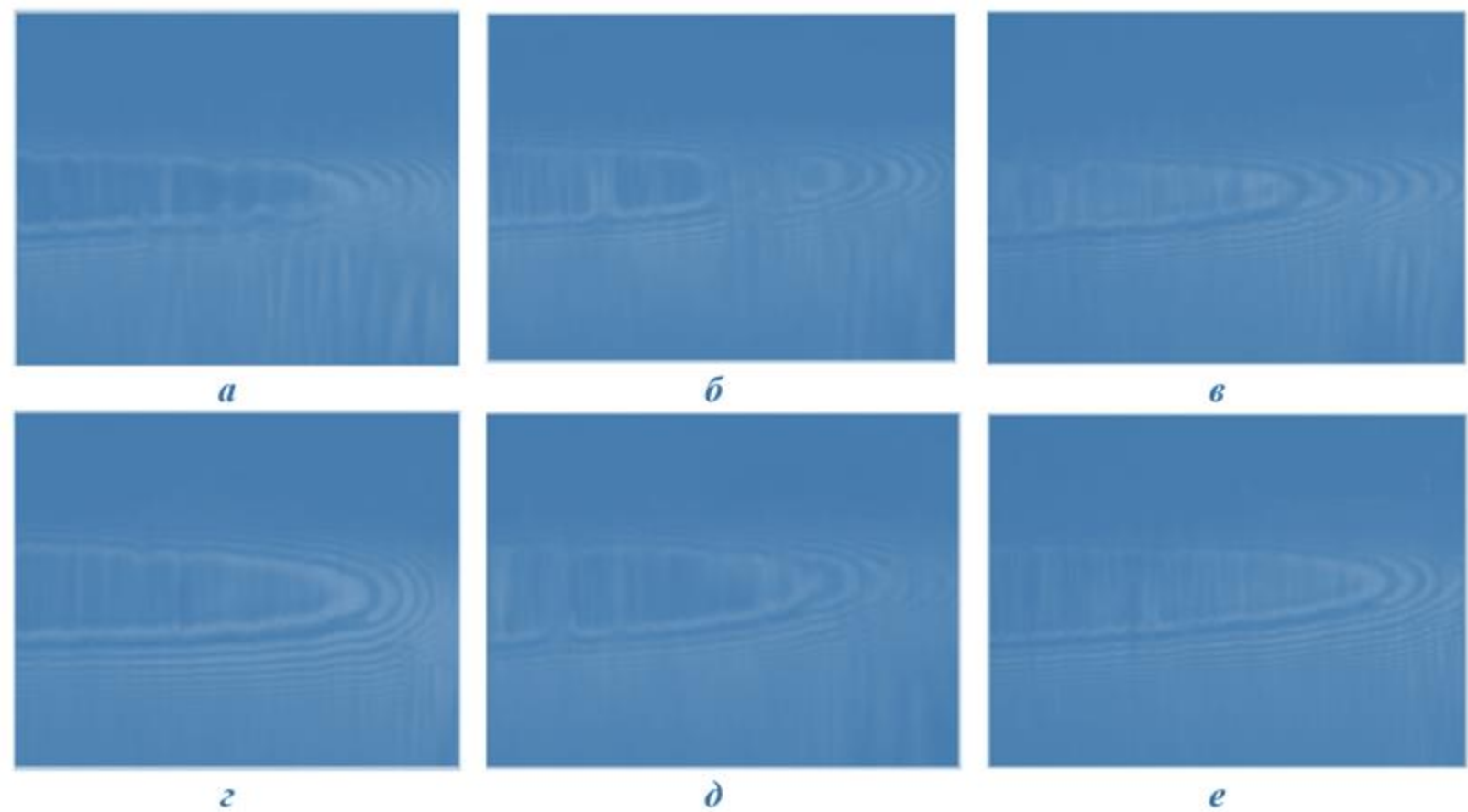


Рис. 20. Интерференционные картины зависимости толщины СС от удельной нагрузки для ПСМ II/УНС при $v_{ск} = 20 \frac{мм}{с}$:
а – (GO) 350 МПа, *б* – (GO) 435 МПа, *в* – (GO) 510 МПа,
г – (Таунит-М) 350 МПа, *д* – (Таунит-М) 435 МПа, *е* – (Таунит-М) 510 МПа

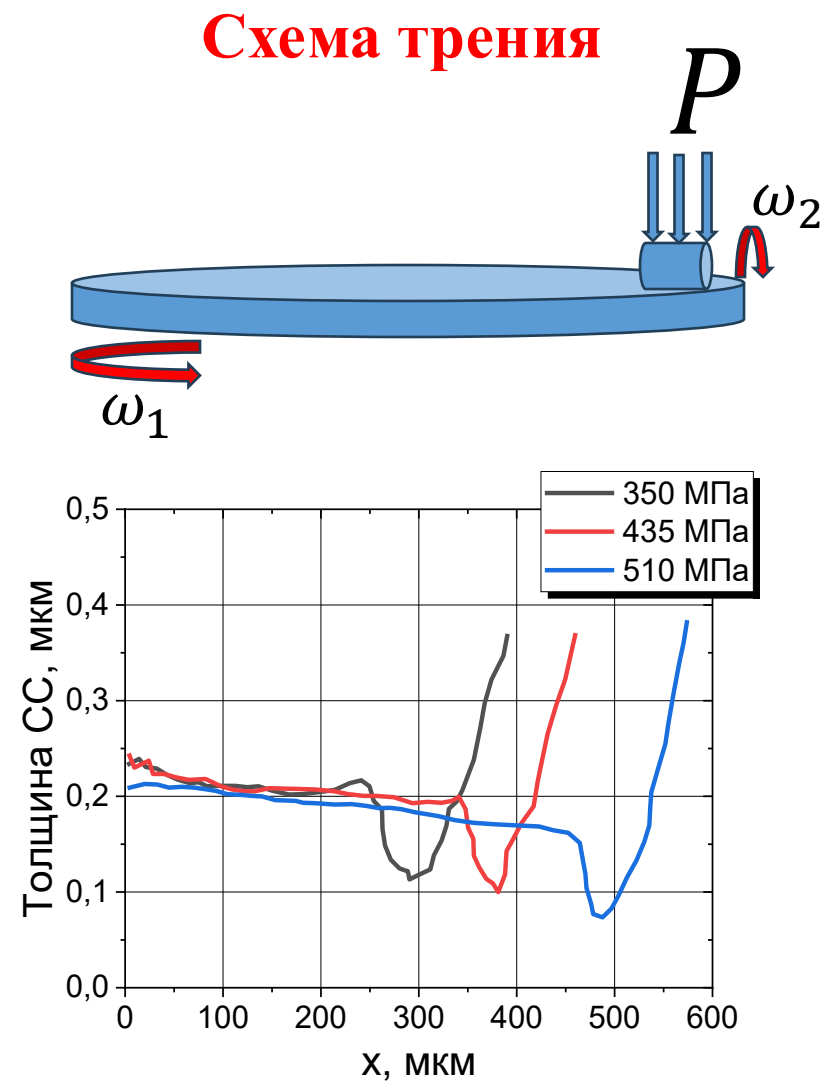


Рис. 21. Зависимость толщины СС от удельного давления при $v_{ск} = 20 \frac{мм}{с}$

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ИЗМЕРЕННОГО МАССОВОГО ИЗНОСА И ДАННЫХ РАСЧЕТА С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРА ОРИЕНТАЦИИ

Верификация математической модели 1 СТАЦИОНАРНОГО КАЧЕНИЯ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ

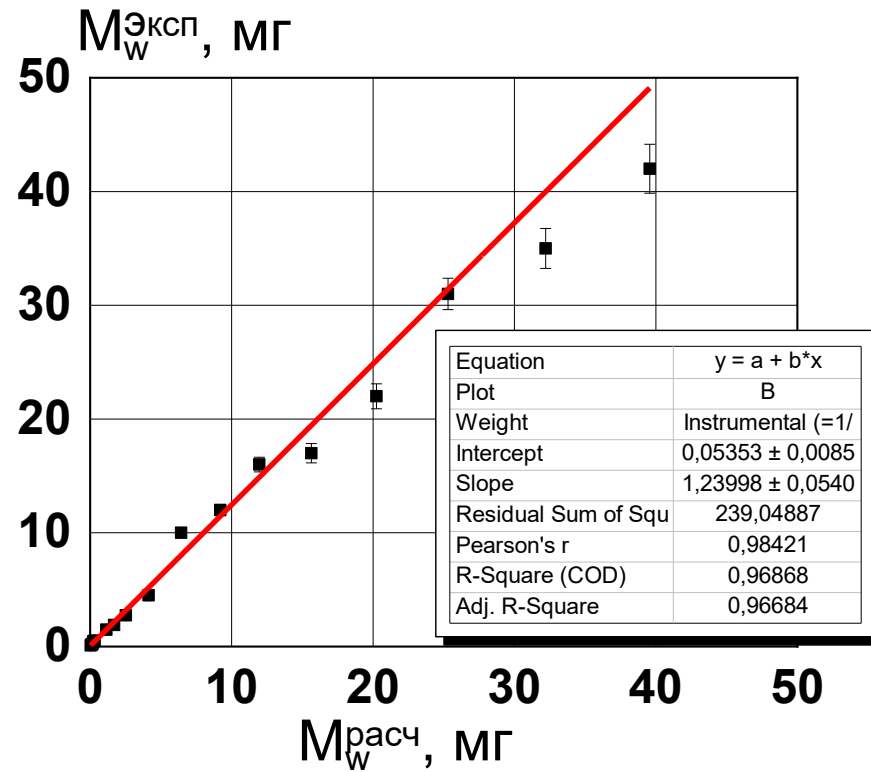


Рис. 22. Корреляционные зависимости между экспериментальными значениями массового износа и расчетными данными для ПСМ

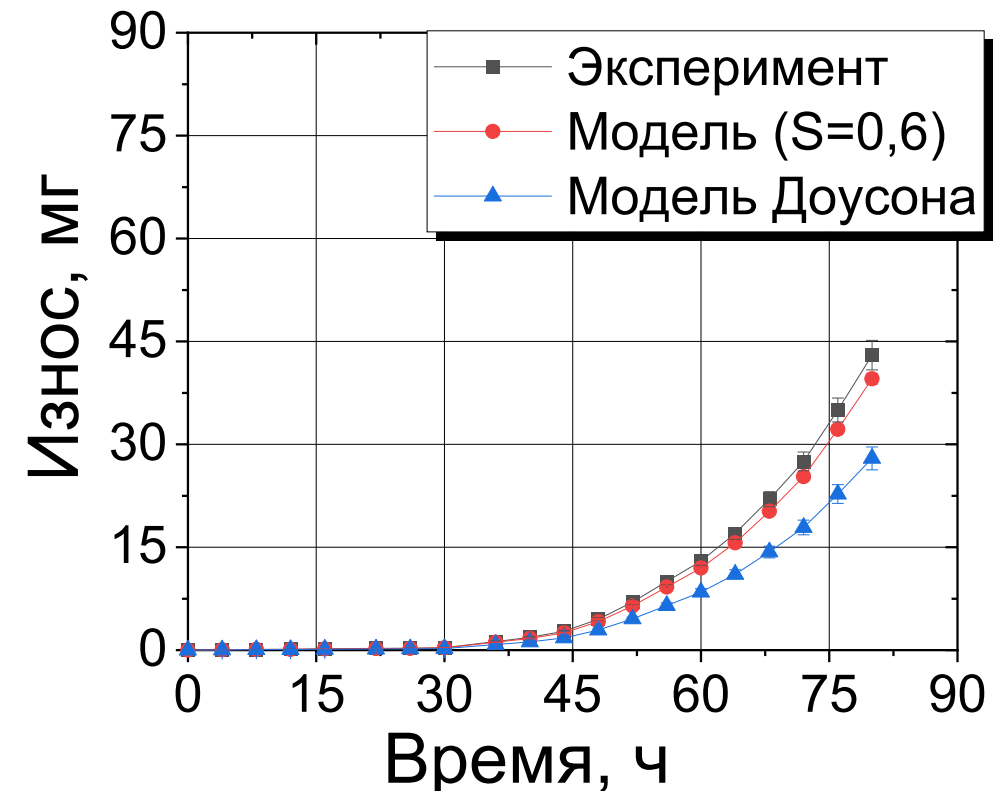
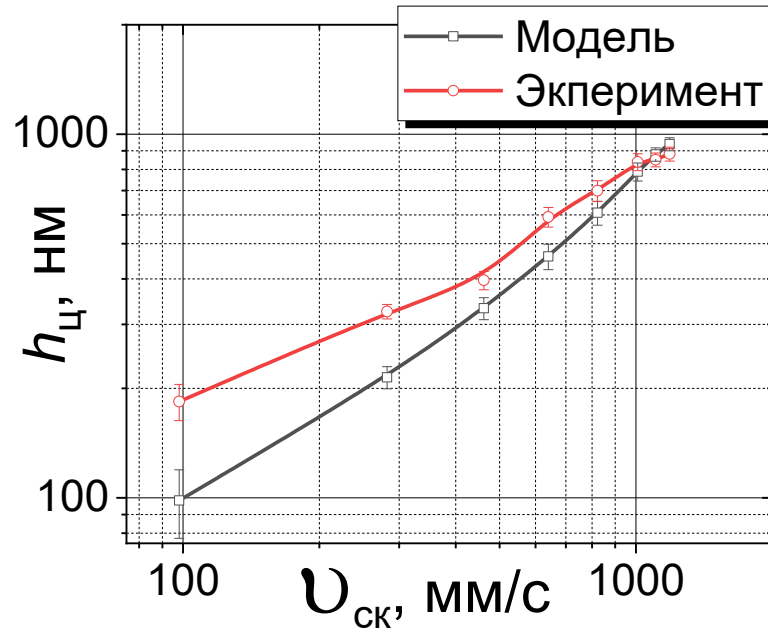


Рис. 23. Зависимость потери массы ролика от времени для СМ для ПСМ II

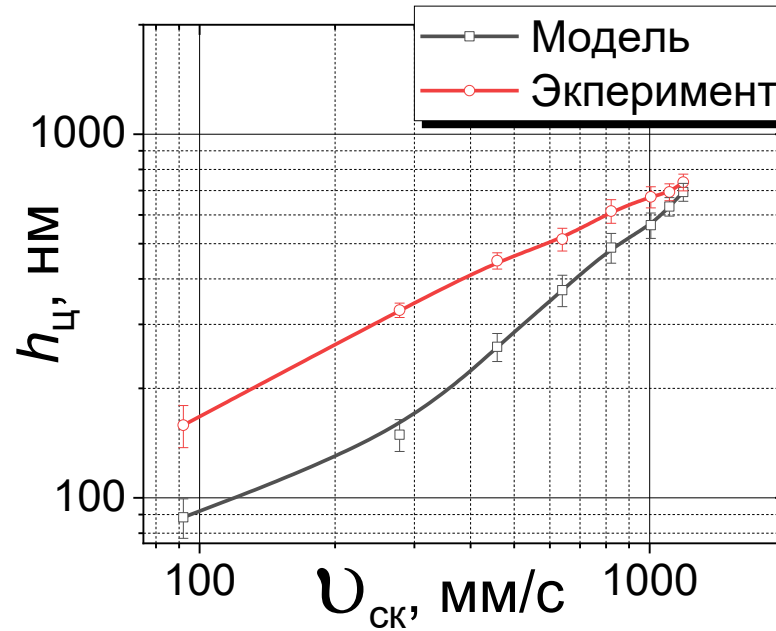
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ЦЕНТРАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЕ СС ПСМ/УНС С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРА ОРИЕНТАЦИИ

GO



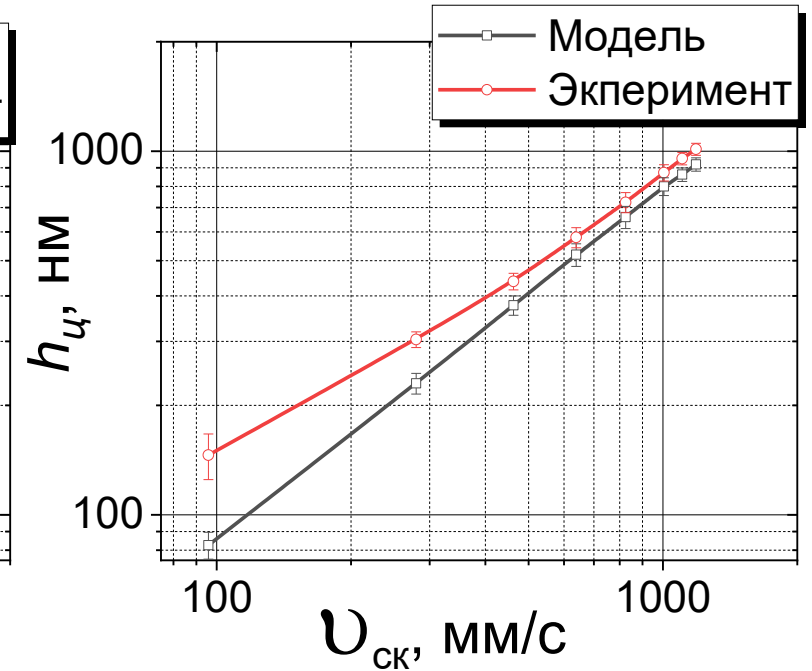
a

LGF



б

N-LGF



в

Верификация обобщенной модели Доусона для толщины центрального смазочного слоя при фрикционном взаимодействии с учетом параметра порядка

$$h(x_i, S_x) = h_{ц.i} = \begin{cases} h_p + h_{см}(S_x) - h_{упр} - \frac{2h_m - h_i(S_x)}{2} \sin(\lambda x_i), & h_i < 2h_m. \\ h_p + h_{см}(S_x) - h_{упр}, & h_i > 2h_m \end{cases}$$

$$h_{эксп} = \frac{\lambda_{св}}{2n} (N - \Delta\phi)$$

Рис. 24. Сравнение толщины центральной пленки между экспериментальным измерением и численным моделированием для дисперсий ПСМ II (0,5 мас. %), $p_H = 0,7$ ГПа, $S_x = 0,5$, $T = 22^\circ\text{C}$: **a** – **GO**; **б** – **LGF**; **в** – **N-LGF**

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПСМ/УНС С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРА ОРИЕНТАЦИИ

Верификация математической модели 2. УСТАЛОСТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

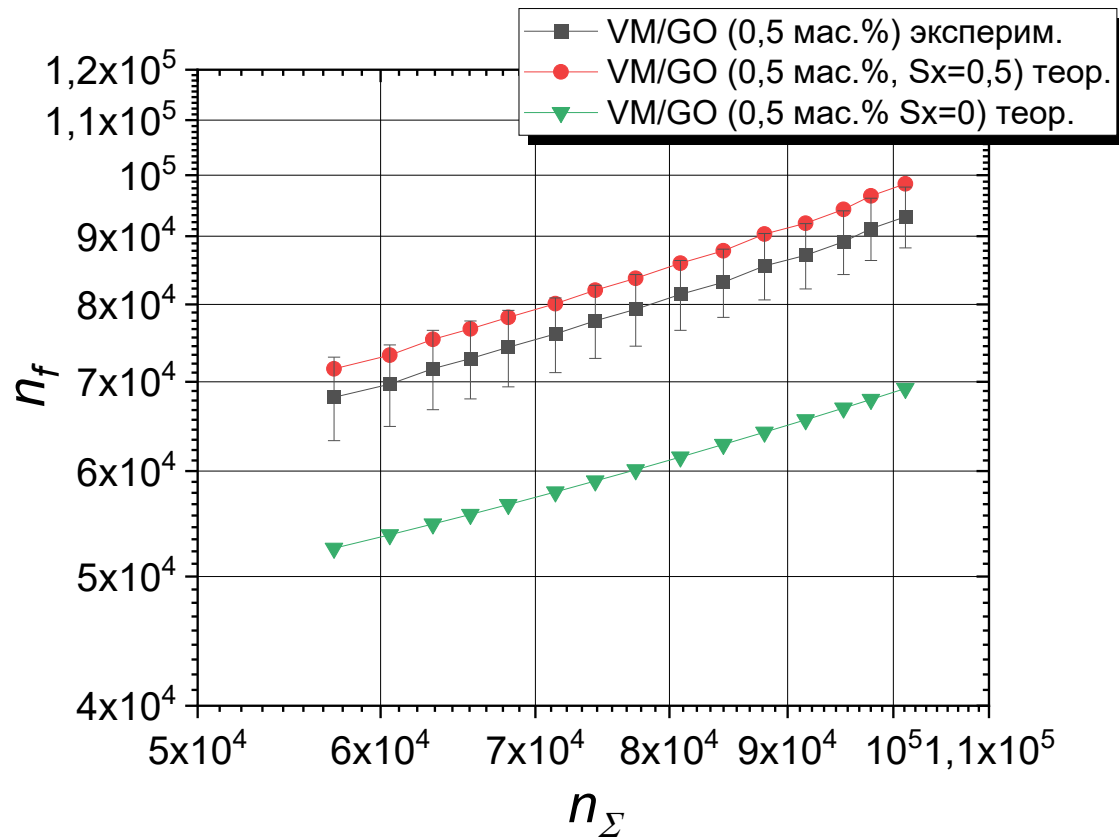


Рис. 25. Зависимость количества циклов, приводящее к разрушению от n_Σ – количества периодов контакта за все время испытаний



Рис. 26. Микрофотография питтинговых пятен ролика из стали 40ХН, $\times 10$

ОБЩИЕ ВЫВОодЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

По результатам работы сформулированы следующие выводы.

1. Разработаны новые математические модели износа ролика при его качении с проскальзыванием по диску для смазочных материалов, позволяющие прогнозировать величины интенсивности изнашивания, распределения давления и толщины смазочного слоя в зависимости от типа, концентрации и ориентации присадок углеродных наноструктур.

2. Путем численного анализа для ПСМ получены численные данные зависимостей толщины смазочного слоя, распределения давления и интенсивности изнашивания от типа, ориентации и концентрации присадок углеродных наноструктур.

3. Доказано, что ключевую роль в реологических свойствах смазочных материалов, наряду с характеристиками загустителя, играют тип, ориентация и концентрация присадок углеродных наноструктур с высокой насыпной плотностью. Их применение позволило создать стабильные (с точки зрения тиксотропии) реологические жидкости при концентрации присадки 0,5 мас.%. Смазочные материалы обладают равновесным седиментационным отношением 98%, а также расширенными рабочими диапазонами температур и скоростей сдвига при сохранении реологических характеристик.

- Применение *разрушающего сдвигового теста* позволило выявить общую тенденцию влияния пространственной организации УНС на величину значений напряжения сдвига, которую можно представить следующим рядом: 2D (GO, LGF, N-LGF) > 1D (Таунит-М, SWCN) > 3D (Graphite) > 0D (C60).
- Использование *параметра ориентации* компонентов смазочного материала позволило объяснить влияния УНС на коэффициент пьезовязкости пластичных смазочных материалов (для ПСМ/УНС наблюдается снижение коэффициента пьезовязкости).

VI Международная научно-практическая конференция

ГРАФЕН И РОДСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ: СИНТЕЗ, ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ (GRS-2025)

Россия, г. Тамбов, 24 - 26 сентября 2025 г.

Шилов М.А.^{1,2}, Усольцева Н.В.²

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИСАДОК УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СМАЗОЧНОМ СЛОЕ

^{1,2}Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,

²НИИ наноматериалов, Ивановский государственный университет

Работа поддержана госзаданием Минобрнауки РФ: проект № FZZM-2023-0009 для Ивановского государственного университета, руководитель **Н.В. Усольцева**

Тамбов, 2025