

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина

Кафедра теоретической и прикладной механики

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА ЭЛАСТОМЕРОВ

Выполнила: ст. гр. 4-33 Бритова А.

Руководитель: доц. кафедры ТиПМ, к.т.н. Шилов М.А.

Иваново, 2019

Цель и задачи работы

Цель: анализ трибологических характеристик эластомерных материалов и установление возможности их модификации за счет введения углеродных наночастиц.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи:**

- 1) Разработка конечно-элементной модели контактного взаимодействия пары трения эластомер-асфальтобетон.
- 2) Проведение экспериментальных исследований по изнашиванию эластомерных образцов на модифицированной машине трения СМТ-1.
- 3) Проведение сравнительного анализа результатов моделирования и данных эксперимента.

Постановка задачи

(физико-механические свойства материалов)

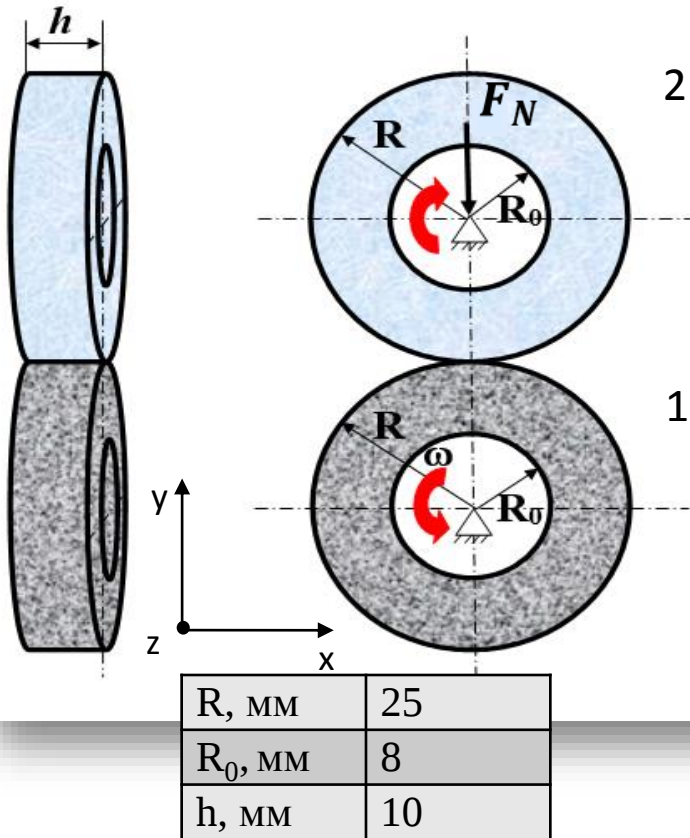


Рис. 1. Схема трения

Таблица 1. Физико-механические свойства материалов

Наименование материала	Модуль упругости E , МПа	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент Пуассона μ
1 диск - плотный асфальтобетон	5000	2350	0,20
2 диск – резина	6	1000	0,49

*Математическая постановка задачи

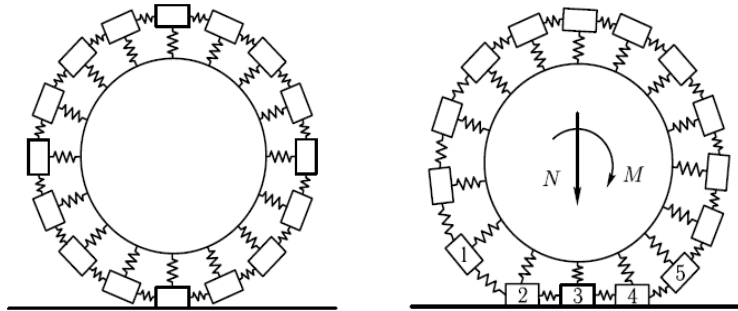


Рис. 2. Простейшая модель катящегося колеса

Коэффициент проскальзывания:

$$s = \frac{v - \omega R}{v} = 1 - \frac{\omega R}{v}$$

$s > 0$ – скольжение, $s < 0$ – пробуксовка

Распределение напряжений катящегося колеса:

$$\tau = \tau^{(1)}(x) + \tau^{(2)}(x)$$

$$\tau^{(1)}(x) = \tau_1 \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^{1/2}$$

$$\tau^{(2)}(x) = -\tau_2 \left(1 - \frac{(x-d)^2}{c^2}\right)^{1/2}$$

a – половина ширины контакта, c – половина ширины области схватывания на передней кромке, $d = a - c$

Распределение нормального давления:

$$p(x) = p_0 \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^{1/2}$$

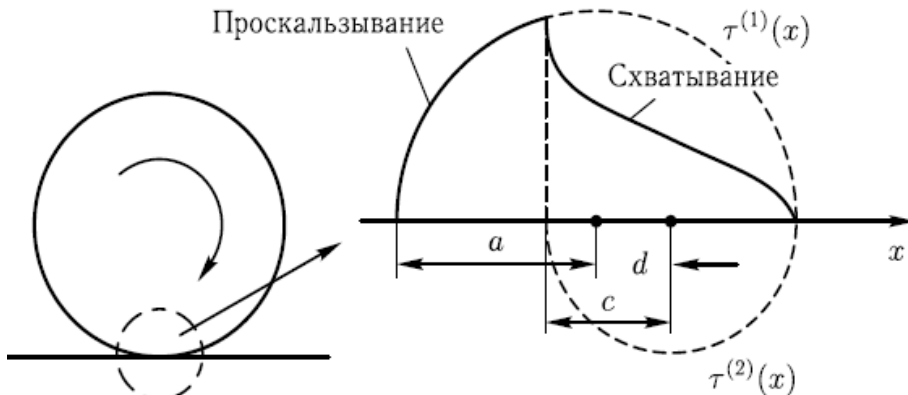


Рис. 3. Распределение касательных напряжений в области контакта упругих тел при качении

*В.Л. Попов. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. – М., 2013. – 352 с.

Аналитическая модель расчета на износ

Износ материала можно оценить с помощью формулы Арчарда.

$$V = K \frac{F_N}{H} L$$

V – объемный износ материала, K – коэффициент износостойкости, F_N – нормальная нагрузка, H – твердость более мягкого материала, L – путь трения.

В условиях контакта нормальная нагрузка может быть представлена в виде произведения контактного давления P на фактическую площадь контакта A .

$$V = K \frac{PA}{H} L$$

В процессе качения путь трения может быть рассчитан, как

$$L = \dot{\gamma} t$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость скольжения, t – время изнашивания.

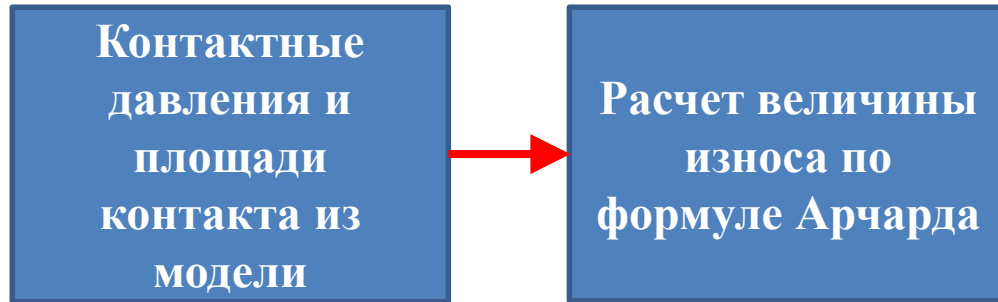
С учетом пути трения

$$V = K \frac{PA}{H} \dot{\gamma} t$$

Скорость изнашивания:

$$\dot{V} = K \frac{PA}{H} \dot{\gamma}$$

Схема построения модели



Модель Marlow (Марлоу):

$$U = U_{dev}(\bar{I}_1) + U_{vol}(I_{el})$$

где U – энергия деформации, отнесенная к единице объема;

U_{dev} – девиаторная часть энергии;

U_{vol} – объемная часть энергии.



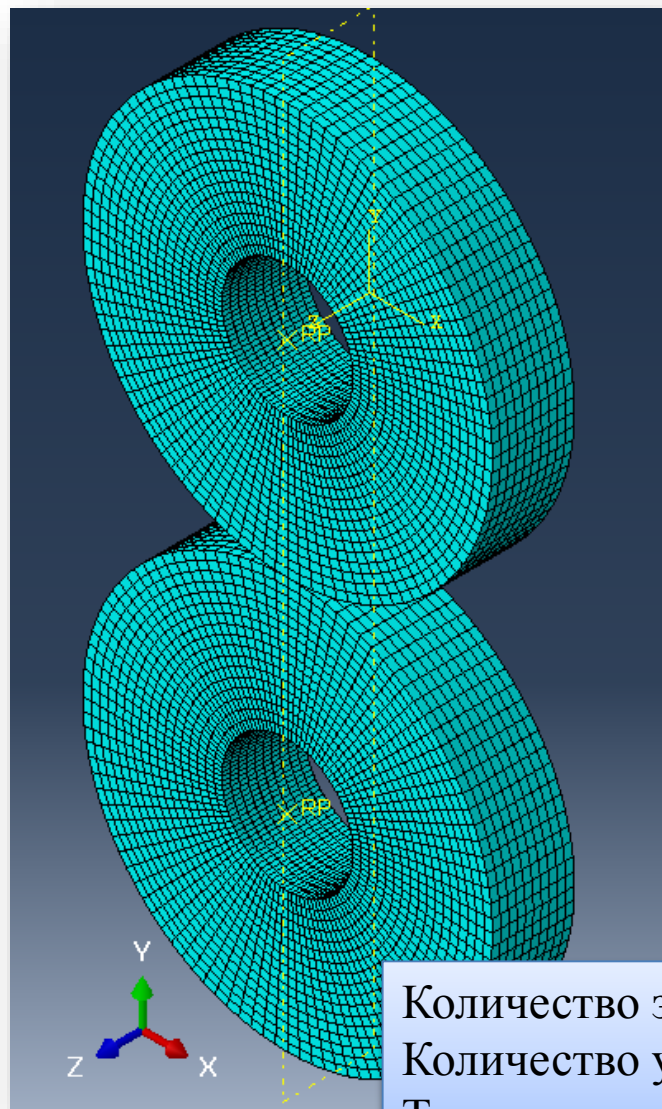
Рис. 4. Схема построения модели

Граничные условия (при создании модели)

Таблица 2. Граничные условия

№ шага	Диск	Граничное условие	Примечание
Step1	Нижний	$u_1 = u_2 = u_3 = 0,$ $ur_1 = ur_2 = ur_3 = 0$	Отсутствие линейных и угловых перемещений
	Верхний	$u_1 = u_3 = 0,$ $ur_1 = ur_2 = ur_3 = 0$	Разрешено перемещение вдоль оси у. Задавалась нормальная нагрузка вдоль оси у
Step2	Нижний	$u_1 = u_2 = u_3 = 0,$ $ur_1 = ur_2 = 0,$ $vr_3 = 670$	Угловая скорость 670 рад/с
	Верхний	$u_1 = u_3 = 0,$ $ur_1 = ur_2 = 0$	Разрешено перемещение вдоль оси у. Разрешено вращение относительно оси z

Визуализация модели контактного взаимодействия пары трения



Количество элементов – 5590.
Количество узлов – 8084.
Тип элемента – C3D8R.

Рис. 5. КЭ модель

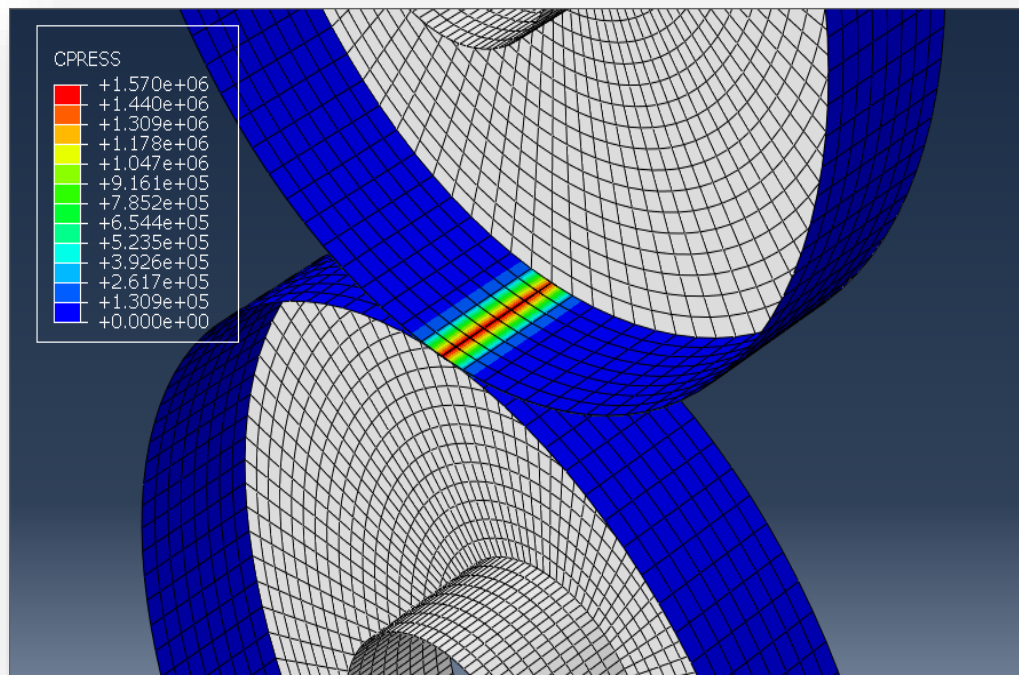


Рис. 6. Контактные давления на динамическом шаге

Результаты КЭ моделирования

Таблица 3. Данные моделирования для расчета износа по модели Арчарда

Коэфф. износостойкости (K)	Твердость по Шору (H), ГПа	Площадь контакта (A), мм ²	Контактное давление (P), МПа	Скорость скольжения ($\dot{\gamma}$), м/с	Путь трения (L), км	Износ (J_m) по модели Арчарда, мг/100км
$1,1 \cdot 10^{-4}$	2	20	2,8	0.2	15	3.73
		28	2,5	0.28	30	6.53
		36	2,2	0.31	45	8.18
		42	1,9	0.37	60	9.83
		48	1,5	0.42	75	10.07
		54	1,3	0.48	90	11.22
		60	1,1	0.58	105	12.75

Средняя скорость объемного износа: $\dot{V} = K \frac{PA}{H} \dot{\gamma}$

$$\dot{V} = 1,11 \cdot 10^{-4} \frac{2,8 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{2 \cdot 10^9 \text{ Па}} \cdot 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 6,21 \cdot 10^{-13} \left(\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right)$$

Массовый износ: $J_m = \dot{V} t \rho$ $J_m = 6,21 \cdot 10^{-13} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot 6000 \text{ с} \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 3,73 \cdot 10^{-6} \text{ (кг)}$

Проведение экспериментальных исследований

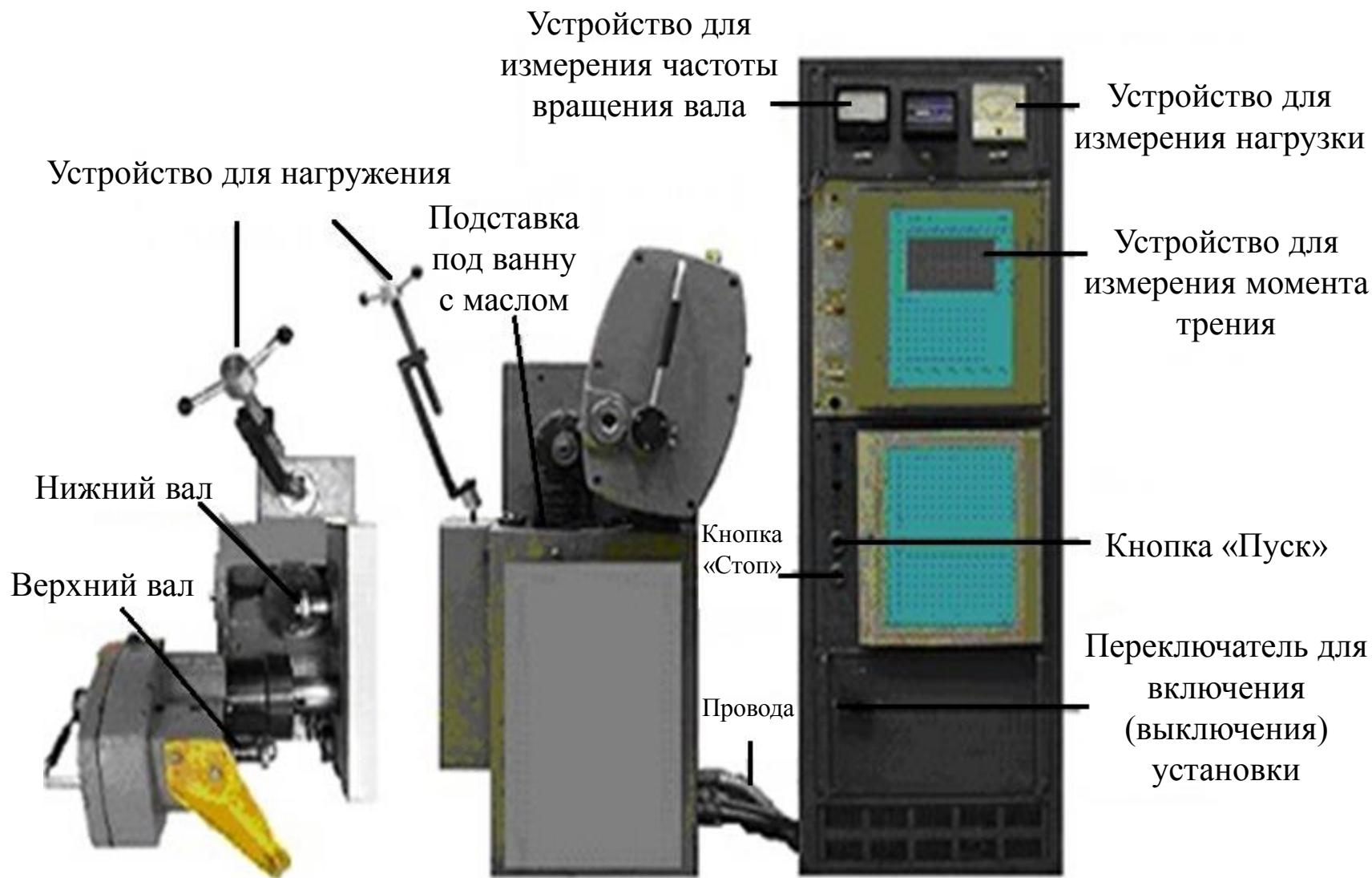


Рис. 7. Модифицированная машина трения СМТ-1

Условия экспериментальных испытаний

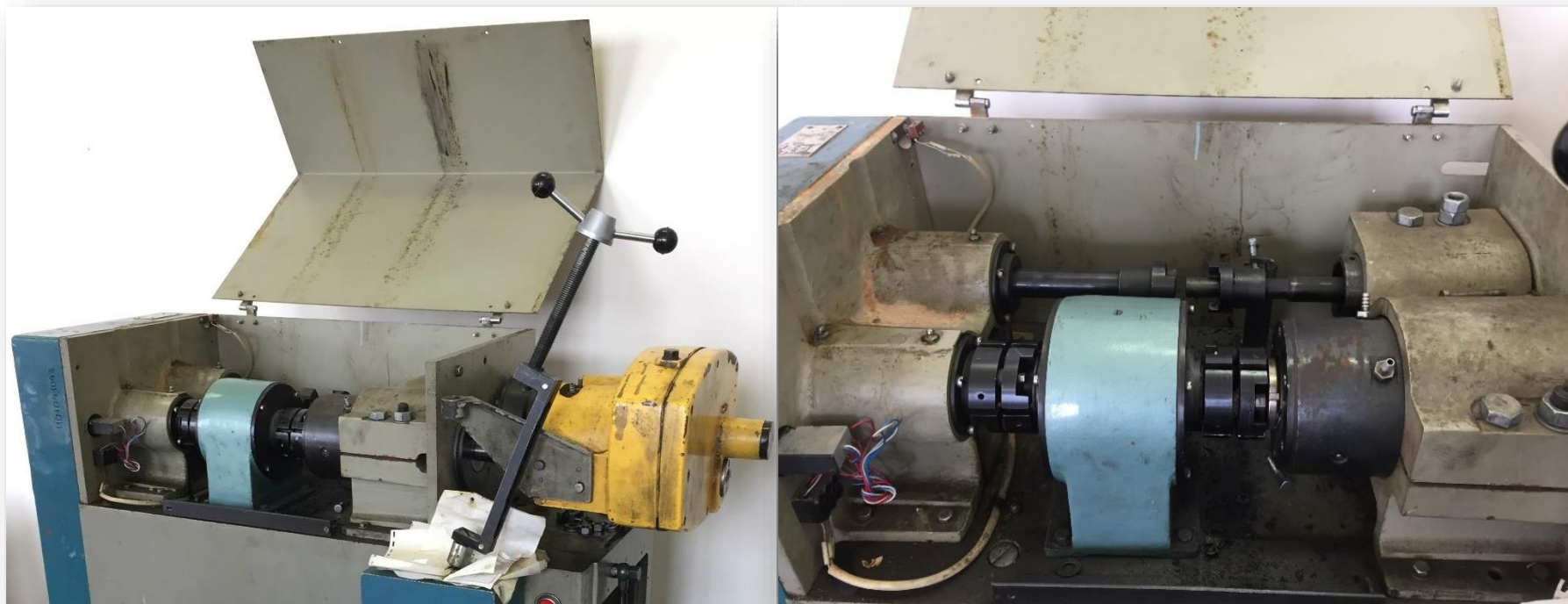


Рис. 8. Модифицированная машина трения СМТ-1

Нагрузка варьировалась от 3,0 до 3,5 кН с шагом 0,1 кН.

Образцы истирали при скоростях 60 – 80 км/ч.

Испытывались два вида эластомеров: стандартный и наноструктурированный.

Определение зависимости массового износа от скорости качения

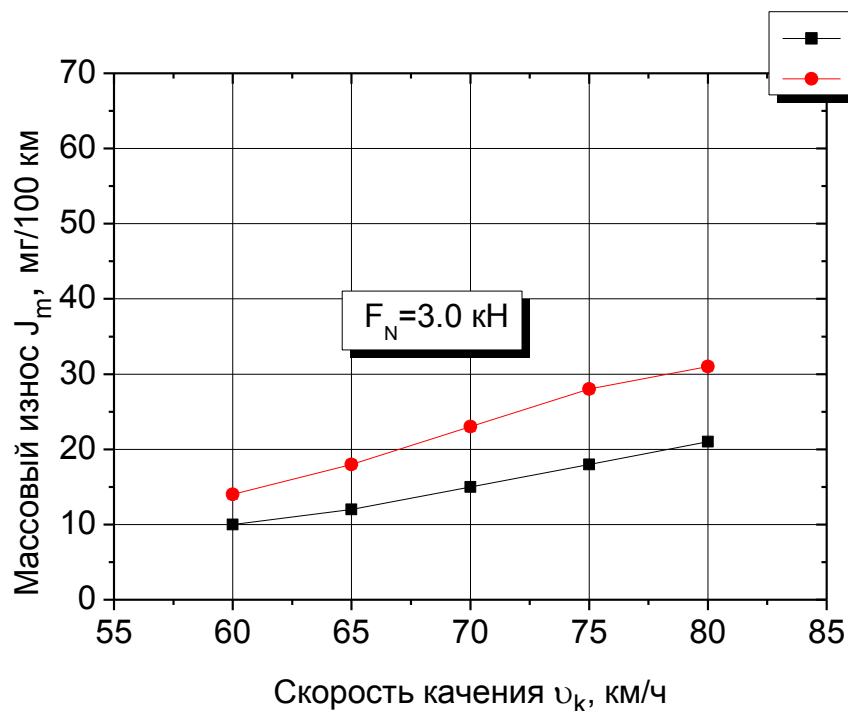


Рис. 9. Зависимость массового износа от скорости качения при нагрузке 3,0 кН

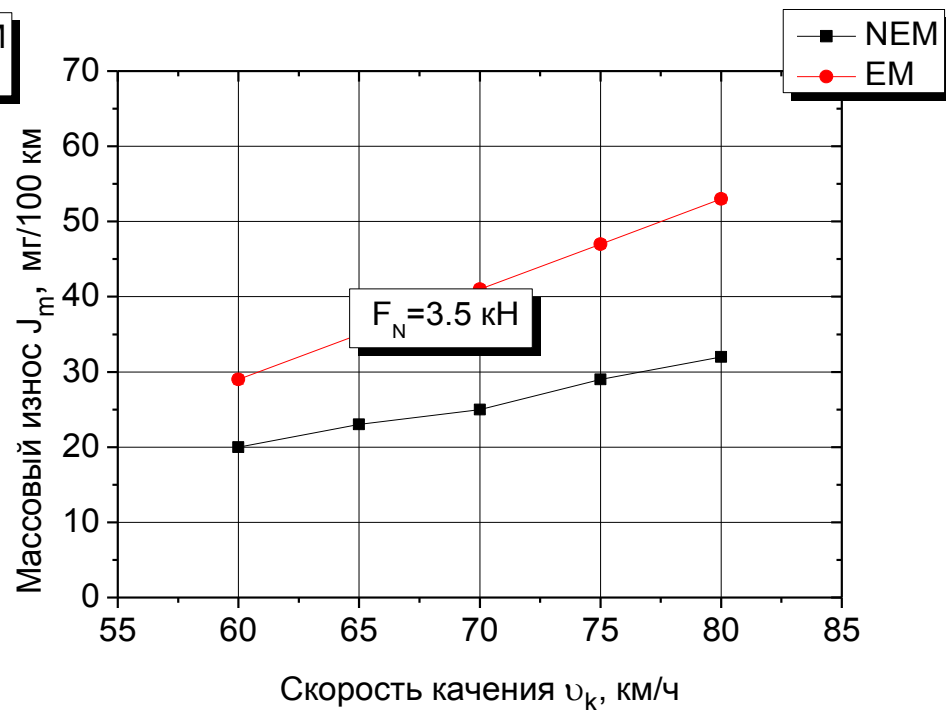


Рис. 10. Зависимость массового износа от скорости качения при нагрузке 3,5 кН

Определение зависимости массового износа от нагрузки*

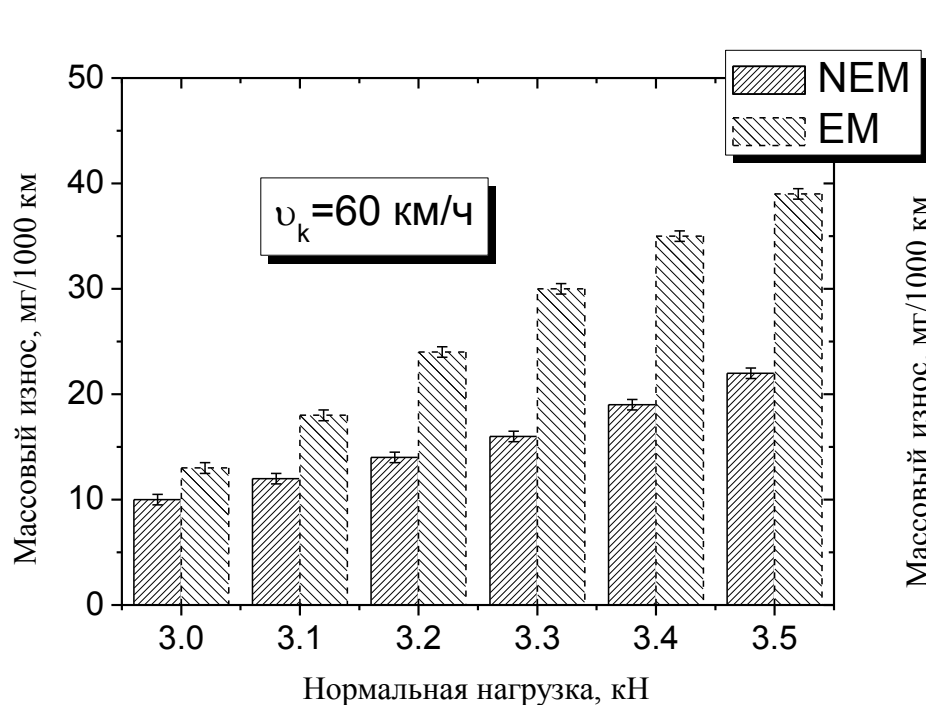


Рис. 11. Зависимость массового износа от нагрузки при скорости качения 60 км/ч

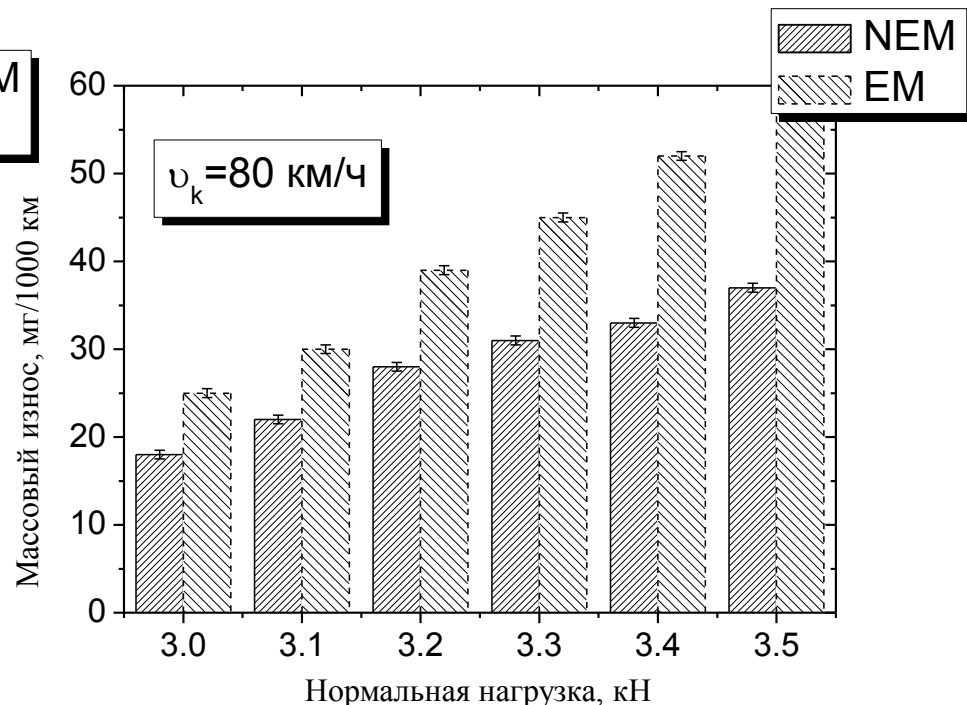


Рис. 12. Зависимость массового износа от нагрузки при скорости качения 80 км/ч

*Shilov M.A., Korolev P.V., Fomin S.V., Maslov L.B. Rolling wear of nanostructured elastomers for pneumatic-tire / Liquid crystals and their application. 2019. Vol. 19 (2). pp. 85-90.

Зависимость относительного массового износа от скорости качения при постоянной нагрузке для наноструктурированных материалов

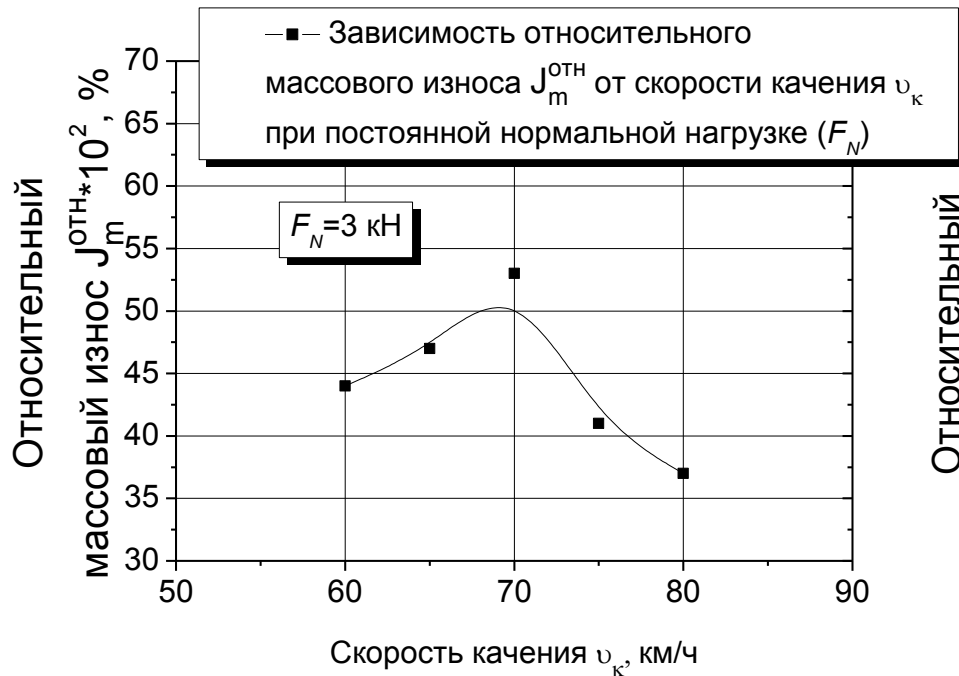


Рис. 13. Относительный массовый износ от скорости качения при нагрузке 3,0 кН

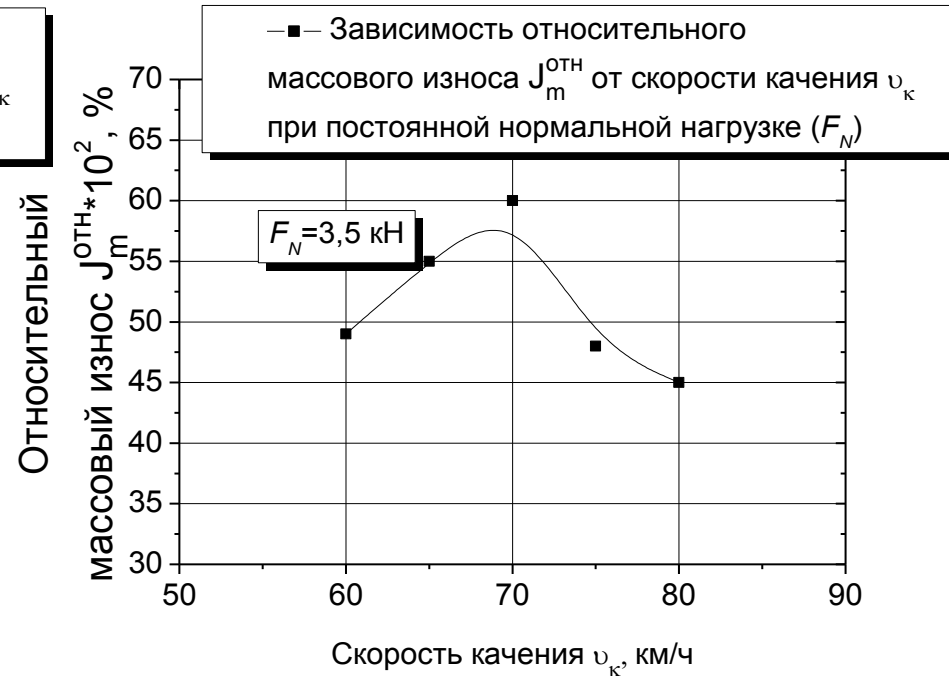


Рис. 14. Относительный массовый износ от скорости качения при нагрузке 3,5 кН

Сравнительный анализ результатов эксперимента и моделирования

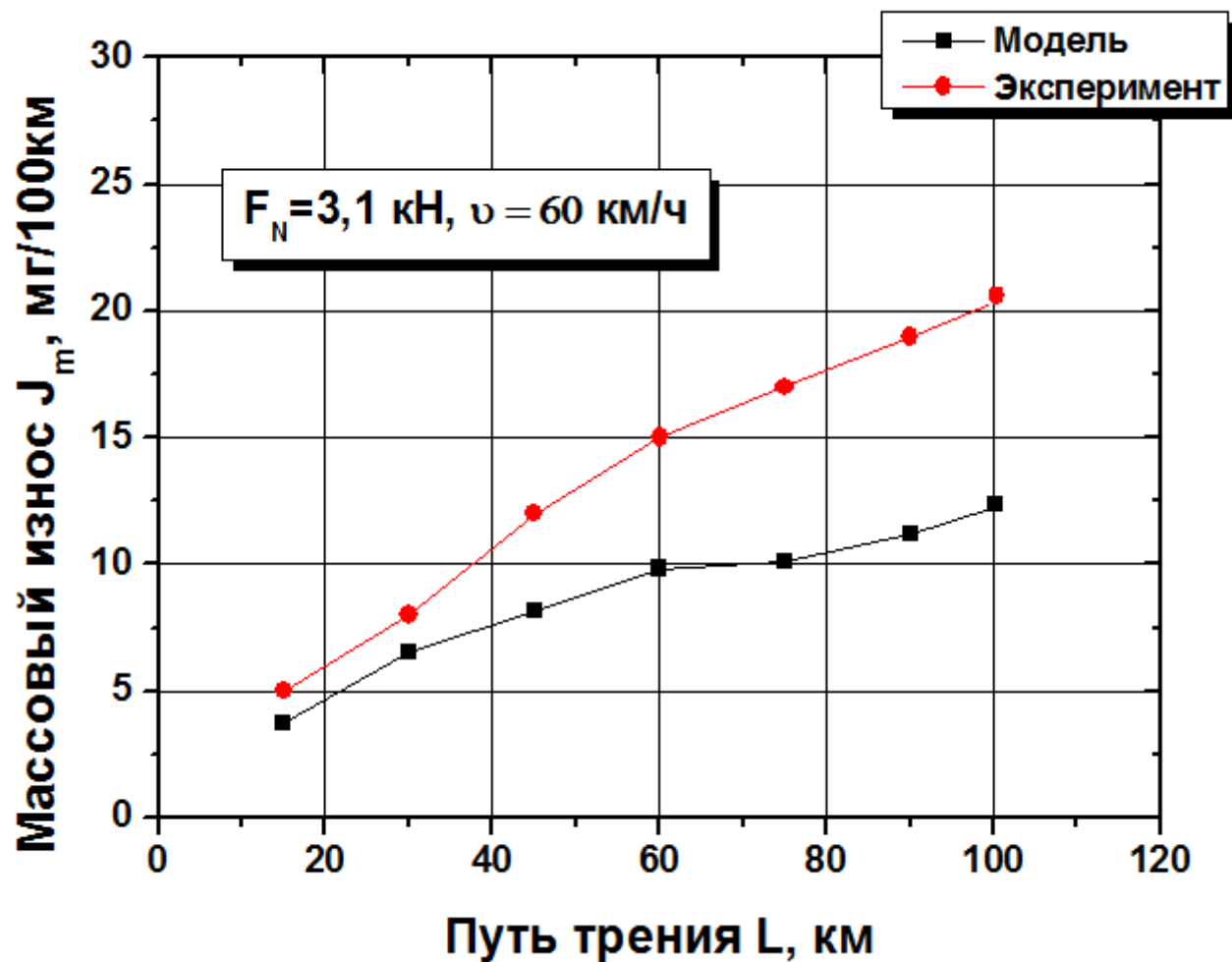


Рис. 15. Зависимость массового износа от пути трения

Выводы по работе

- 1) Получена конечно-элементная модель контактного взаимодействия пары трения. Методом КЭ определены контактные давления и площади контакта дисков. Рассчитан массовый износ образца эластомера. Показано, что МКЭ и аналитическая модель дополняют друг друга. Моделирование дает возможность получения детальной информации о контактном взаимодействии материалов.
- 2) Проведенные эксперименты показали, что:
 - зависимость массового износа от скорости качения не меняет свой характер при варьировании нормальной нагрузки. Максимальная разница величины массового износа J_m при испытаниях со скоростью 80 км/ч и нагрузке 3.5 кН для стандартного эластомера и наноструктурированного достигает 2 раз;
 - использование наночастиц в структуре эластомерных материалов приводит к снижению величины массового износа почти на 40 %. Это объясняется упрочнением каркаса эластомера связями с нанотрубками. Также их использование позволит повысить износостойкость эластомеров и даст возможность применять их в области высоких скоростей (75 км/ч и более).
- 3) Сравнительный анализ результатов моделирования и данных эксперимента показал адекватность разработанной модели.