

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И. Ленина

Кафедра теоретической и прикладной механики

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛАСТОМЕРОВ**

Выполнила: ст. гр. 2-33м Бритова А.

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

Иваново, 2021

# Цель и задачи работы

**Объект исследования:** эластомерный материал и его модификации с углеродными наноструктурами.

**Предмет исследования:** износ поверхности эластомера.

**Цель:** анализ физико-механических и трибологических характеристик эластомерных материалов, армированных углеродными наноструктурами.

## **Задачи:**

- 1) Литературный обзор.
- 2) Экспериментальные исследования по определению свойств эластомеров, армированных УНТ и ТУ.
- 3) Экспериментальные исследования по изнашиванию эластомерных образцов по возобновляемой поверхности.
- 4) Разработка конечно-элементной модели износа эластомерного образца по возобновляемой поверхности.

# Аналитический обзор

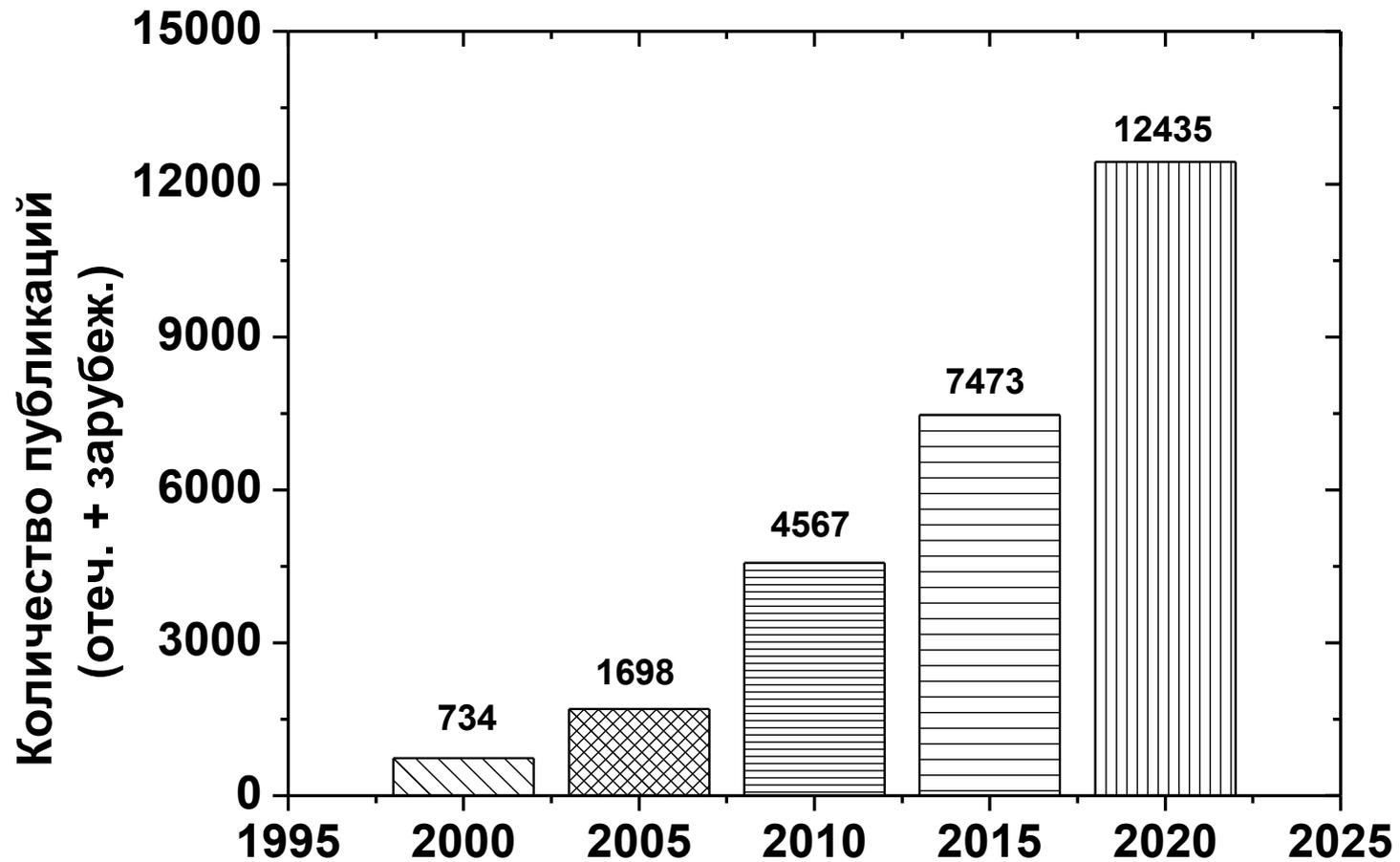
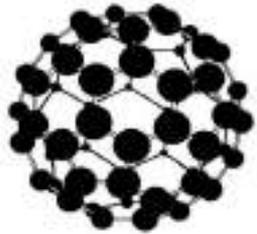


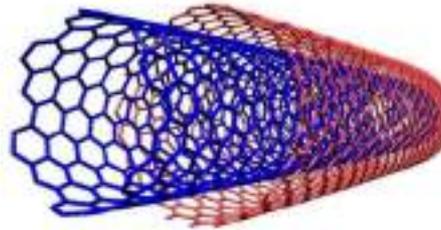
Рис. 1. Анализ публикационной активности использования наночастиц в качестве компонента резин

# Аналитический обзор



Электронно-оптическая область  
Изготовление пластмасс  
Пищевая промышленность  
Медицина  
Косметика

0D Фуллерены

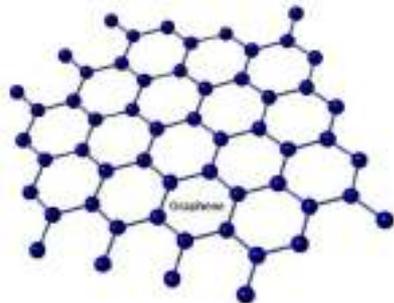


Производство композитов  
Автомобилестроение  
Компьютерные технологии  
Преобразование энергии  
Изготовление датчиков и конденсаторов

1D Углеродные нанотрубки

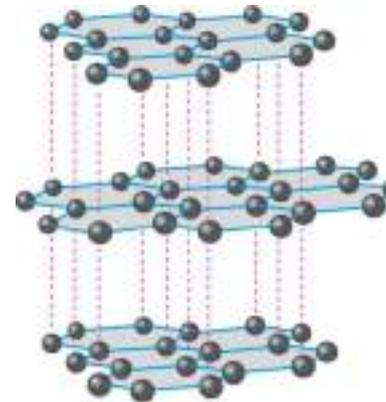
## Углеродные наноструктуры

2D Графен



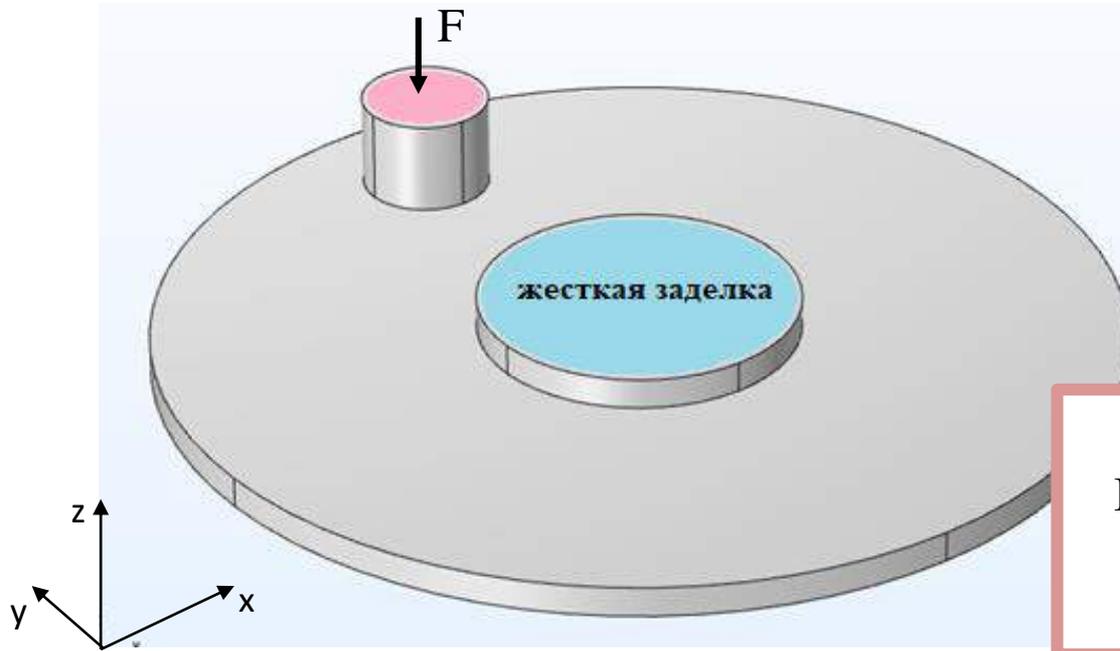
Солнечная энергетика  
Водоочистка, фильтрация воды  
Электроника  
Медицина  
Создание композитов

3D Фуллериты, графит



Фармакология  
Молекулярная электроника  
Ядерная промышленность  
Получение алмазов  
Производство пластмасс

# Постановка задачи



Радиус диска	150 мм
Высота диска	10 мм
Радиус образца	10 мм
Высота образца	30 мм

Контактные  
давления

Расчет величины  
износа по  
формуле Арчарда

1 ЭТАП. Контактная задача об одноосном сжатии твердой поверхности и гиперупругого образца

2 ЭТАП. Определение износа  $\dot{h}_{wear} = k_{wear} \left( \frac{T_n}{T_{n,ref}} \right)^n \|v_{slip}\|$

Экспериментальные данные  
по истиранию

Экспериментальные данные по  
определению твердости резины

# Постановка задачи

## 1 этап – контактная задача

Открытое множество  $S \subset XOY$  – внутренняя область контакта

$$S = \{(x, y) | \sigma_z(x, y, 0) \neq 0\}.$$

Функцию внутри области контакта можно определить как

$$S = \{(x, y) | u_z(x, y, 0) \neq 0\}.$$

Т.к. в области контакта  $\sigma_z(x, y, 0) \neq 0$   
возникают только в точках, где  $(u_z(x, y, 0) \neq 0)$ .

Форма недеформируемого резинового образца описывается гладкой функцией  $f(x, y)$

Точка  $0,0,0$  – начальная точка касания образца с плоскостью  $XOY$ .

Краевые условия по перемещениям:

$$u_z(x, y, 0) = \begin{cases} f(x, y) + \delta, & (x, y) \in \bar{S} \\ 0, & (x, y) \notin \bar{S} \end{cases}$$

где  $\delta$  – глубина максимального вдавливания образца,  $\bar{S}$  – область контакта.

# Постановка задачи

Область контакта резинового образца с поверхностью:

$$w(x, y) = D + f(x, y), (x, y) \in \Omega$$
 где  $D$  – сближение тел за счёт деформирования

Тангенциальные напряжения отсутствуют, нормальные удовлетворяют условию:

$$p(x, y) = 0, (x, y) \notin \Omega$$

На границе области выполняется граничное условие:  $p(x, y)|_{\Gamma_\Omega} = 0$

Контактные давления удовлетворяют условию равновесия:

$$\iint_{\Omega} p(x, y) dx dy = P$$

где  $P$  – нормальная нагрузка, действующая на поверхность

**2 этап**

$$\tau(x, y) \neq 0$$

# Определение физико-механических характеристик

Резиновые смеси на основе каучуков бутадиен-стирольного (СКС-30-АРКМ-15) и изопренового (СКИ-3). Армирующий элемент – ТУ, УНТ.

- 1) Эластичность на упругомере УМР-2 типа Шоба (ГОСТ 27110-86)
- 2) Твердость по методу Шора А на твердомере ТМ-2 (ГОСТ 263-75)
- 3) Условная прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве (ГОСТ 270-75)

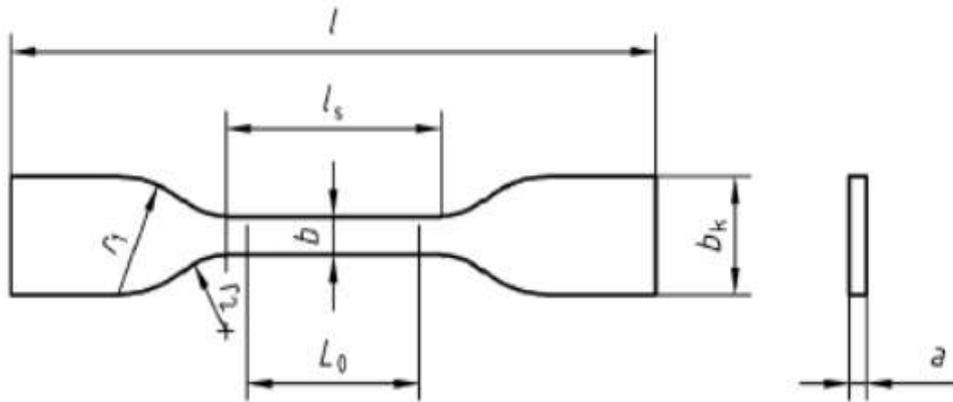


Рис.2. Геометрия гантели в соответствии с DIN 53504

Таблица 1. Геометрические параметры резиновых образцов в соответствии с DIN 53504

Общая длина $l$ , мм	75
Ширина головки гантели $b_k$ , мм	12,5
Длина шейки $l_s$ , мм	25
Ширина шейки $b$ , мм	4
Внутренний радиус перехода $r_1$ , мм	12,5
Внешний радиус перехода $r_2$ , мм	8
Толщина $a$ , мм	$2 \pm 0,2$
Исходная длина образца $l_0$ , мм	20

# Определение физико-механических характеристик

Таблица 2. Рецепт резиновой смеси на основе СКИ-3 и СКС-30-АРКМ-15

Компонент	Масс. %	Навеска на 3 кг.
СКИ-3	61,88	1856,44
Сера	0,62	18,56
Альтакс	0,37	11,14
Дифенилгуанидин	1,86	55,69
Оксид цинка	3,09	92,82
Стеариновая кислота	1,24	37,13
Тех. Углерод N220	15,47	464,11
Тех. Углерод N550	15,47	464,11
Итого:	100,00	3000,00

СКС-30-АРКМ-15	61,88	1865,67
Сера	1,24	37,31
Альтакс	0,93	27,99
Дифенилгуанидин	0,19	5,60
Оксид цинка	3,11	93,28
Стеариновая кислота	1,24	37,13
Тех. Углерод N220	15,55	466,42
Тех. Углерод N550	15,55	466,42
Итого:	100,00	3000,00

# Результаты испытаний

Таблица 3. Средняя эластичность по отскоку и твердость по Шору А для резин на основе СКИ-3 и СКС-30- АРМК-15 и их систем с ТУ/УНТ

Тип образца	Средняя эластичность по отскоку $\bar{x}$ , %	Твердость по Шору А, $\bar{y}$ , усл. ед.
СКИ-3	42	67
СКИ-3+ТУ/УНТ	35	75
СКС-30-АРМК-15	33	62
СКС-30-АРМК-15+ТУ/УНТ	28	69

Таблица 4. Прочностные характеристики резин на основе СКИ-3 и СКС-30-АРМК-15 и их систем с ТУ/УНТ

Тип образца	Условная прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
СКИ-3	31,15	811
СКИ-3+ТУ/УНТ	37,26	795
СКС-30-АРМК-15	27,45	721
СКС-30-АРМК-15+ТУ/УНТ	33,63	693

# Эксперимент на истирание образца



Характеристики установки:

- Вес: 40кг
- Электропитание: 220/110V 50/60Hz 3 А
- Размеры: 700 x 300 x 300мм
- Нагрузка: 5Н, 10Н
- Скорость вращения: 40 об/мин

Рис.3. Прототип установки на истирание резин

Таблица 5. Результаты испытаний на истирание

<b>Средняя плотность, кг/м<sup>3</sup></b>	<b>1117</b>
--	-------------

<b>Средняя потеря объема при истирании по Шоппер-Шлобах, мм<sup>3</sup></b>	<b>57</b>
---	-----------

Массовый износ  $57 * 10^{-9} \text{ м}^3 * 1117 \text{ кг/м}^3 = 63,7 \text{ мг}$

# Построение КЭ модели

Контактные  
давления

Расчет величины  
износа по  
формуле Арчарда

Таблица 6. Геометрические размеры модели

Радиус диска	150 мм
Высота диска	10 мм
Радиус образца	10 мм
Высота образца	30 мм

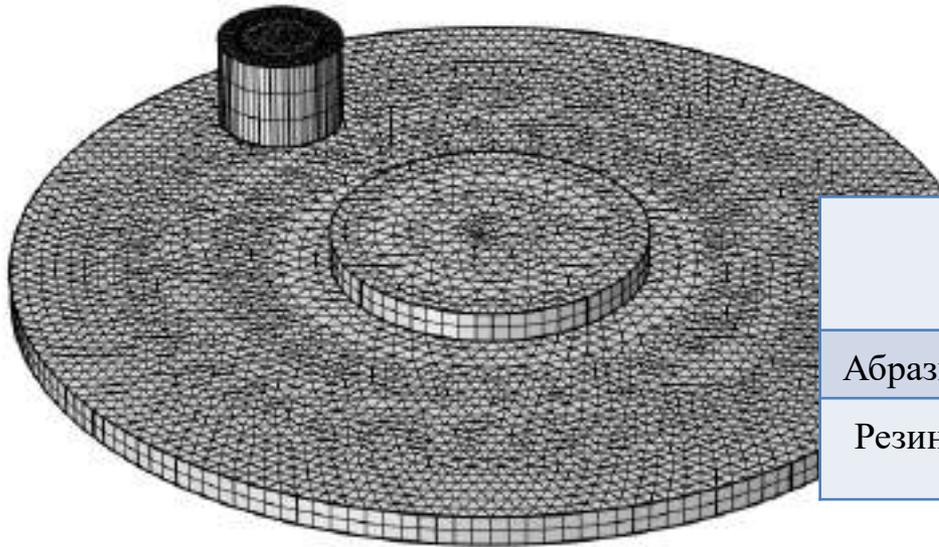
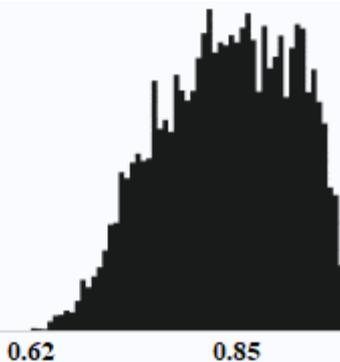


Таблица 7. Свойства материалов

	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Абразив	215,6	0,131	562
Резина	20	0,495	1117

Рис.4. КЭ модель



— Domain element statistics —

Number of elements: 17420 - число элементов  
 Minimum element quality: 0.6191 - минимальное качество элементов  
 Average element quality: 0.8499 - среднее качество элементов

# Результаты моделирования

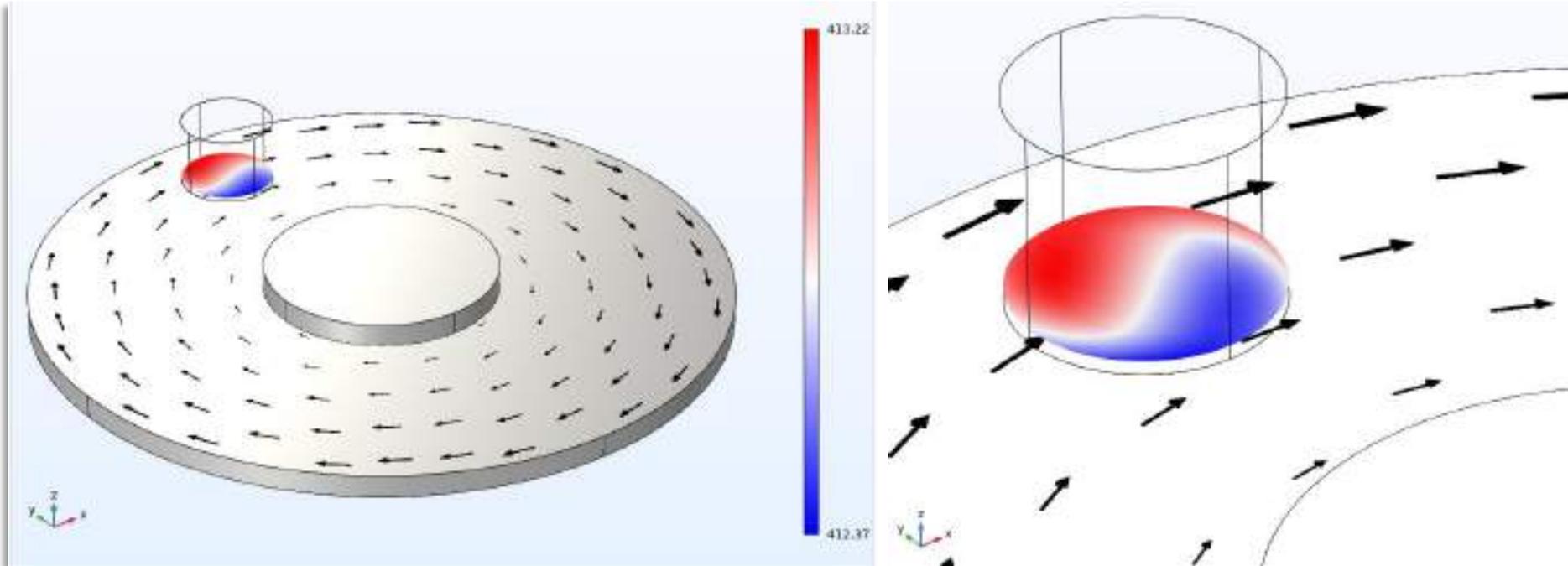


Рис.5. Результат моделирования износа

$$\dot{h}_{wear} = k_{wear} \left( \frac{T_n}{T_{n,ref}} \right)^n \|v_{slip}\|$$

$$\Delta m = \rho \pi r^2 (H - h)$$

# Результаты моделирования

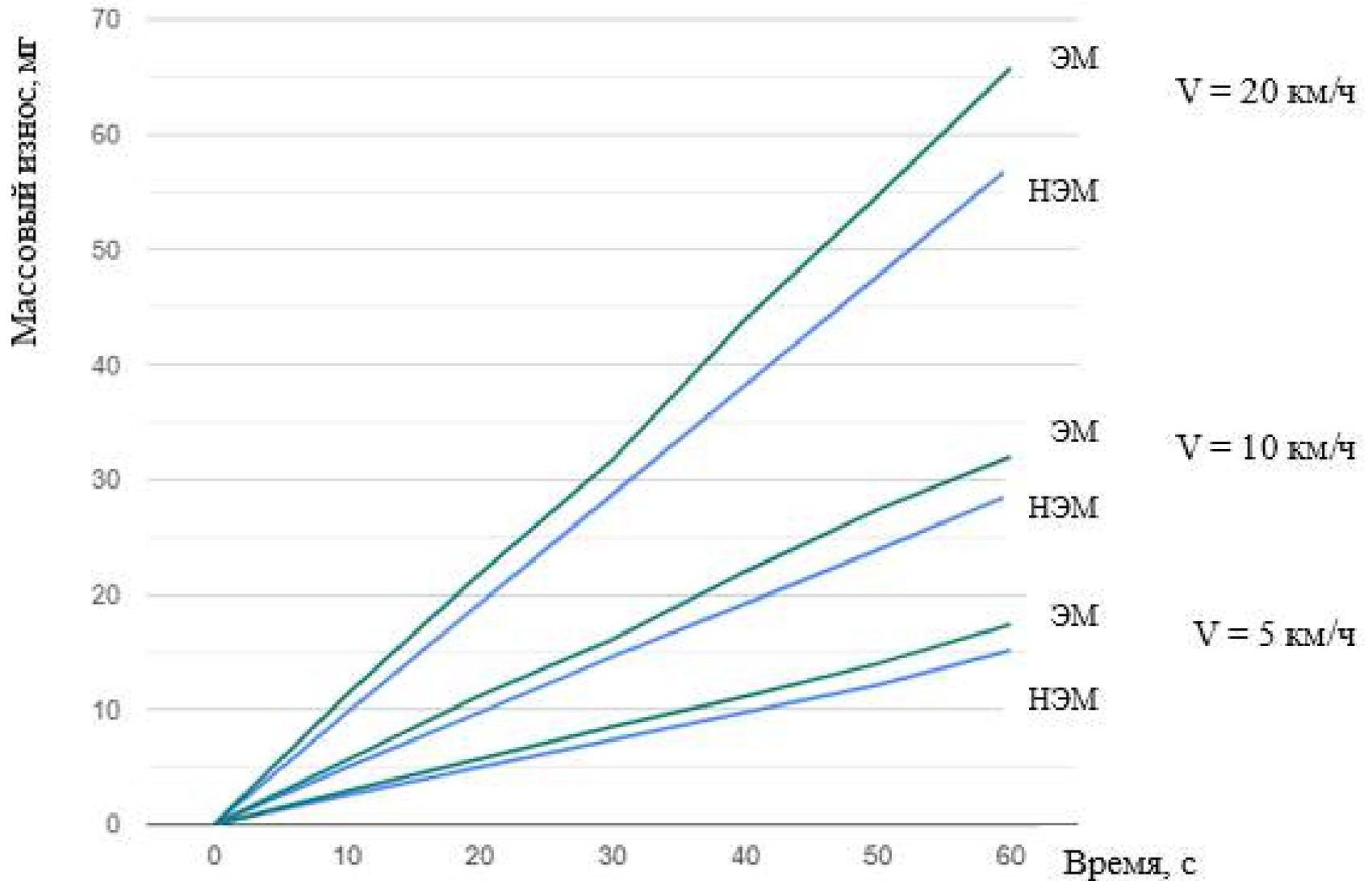


Рис. 6. Зависимость величины износа от скорости

# Выводы по работе

- 1) Проведен литературный обзор. Рассмотрены аллотропные формы углерода, проанализировано использование наночастиц в качестве компонента резин.
- 2) Проведены экспериментальные исследования по определению свойств эластомеров, армированных УНТ и ТУ. Определены средняя эластичность по отскоку, твердость по Шору А и прочностные характеристики.
- 3) Проведены экспериментальные исследования по изнашиванию эластомерных образцов по возобновляемой поверхности. Определена величина массового износа.
- 4) Разработана конечно-элементная модель износа эластомерного образца по возобновляемой поверхности. Определена величина массового износа.