

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И.Ленина»

Моделирование термомеханической контактной задачи тормозного диска автомобиля

Выполнил:

магистрант гр. 2-33М Лопырев В.А.

Научный руководитель:

доцент кафедры ТИПМ, к.т.н., доцент Шилов М.А.

Иваново 2020

Цель работы

Определение напряженно-деформированного состояния контактной пары «тормозной диск - колодка» при торможении

Задачи

1. Анализ научно-практической информации по теме исследования;
2. Определение физико-механических свойств материала диска.
3. Создание конечно-элементной модели для определения НДС тормозной системы диск-колодка при торможении.

Введение

Тормозная система является важным элементом автотранспортного средства

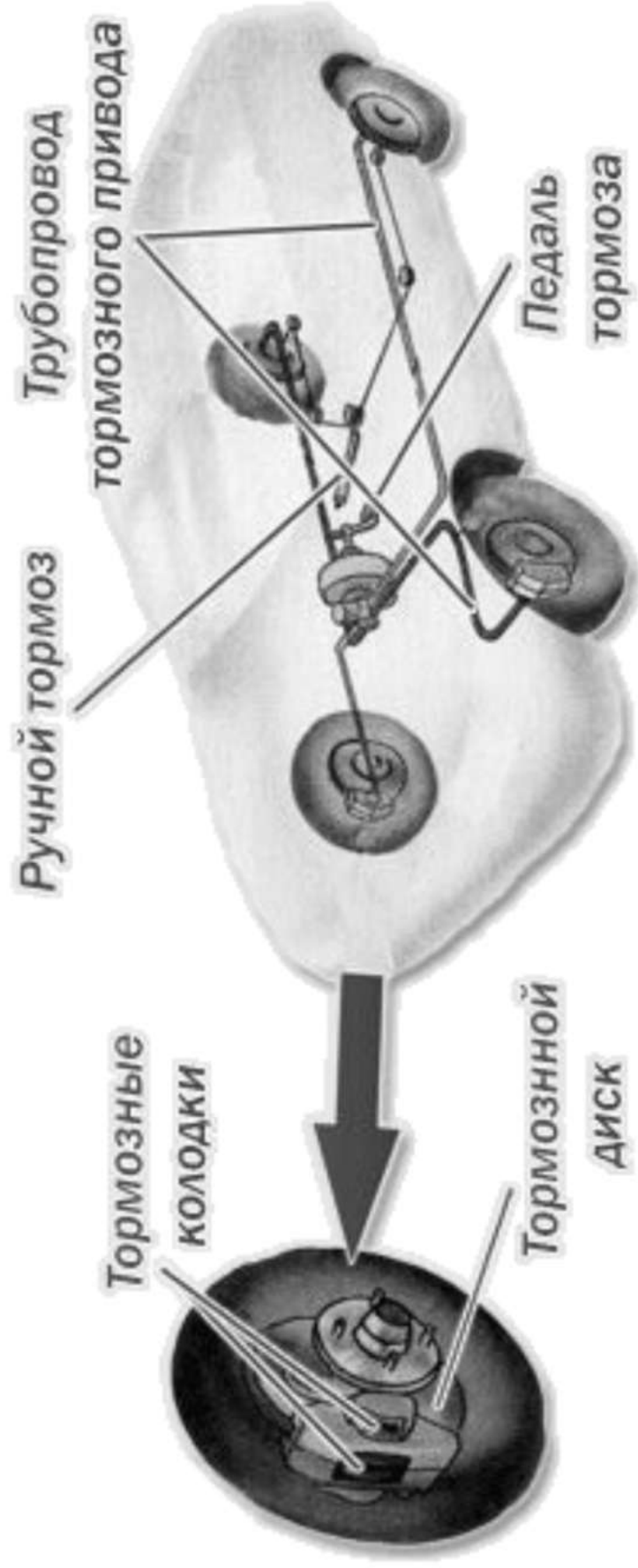


Рис. 1. Схема тормозной системы автомобиля

Таблица 1
Подмодели математической модели контактной пары «диск-колодка»

Название подмодели	Описываемые процессы	Переменные
Кинематическая	Изменение скорости скольжения	ν
Контактная	Контактная деформация поверхностей трения	p, u_x
Изнашивания	Изнашивание поверхностей трения	u_n
	Теплообразование при трении	
Тепловыделения	Теплопередача между элементами пары трения	q_n, q_d
	Теплопроводность	
Тепловая	Теплоотдача в окружающую среду	T_n, T_d
	Термоупругая деформация поверхностей трения	
Термоупругости		u_T

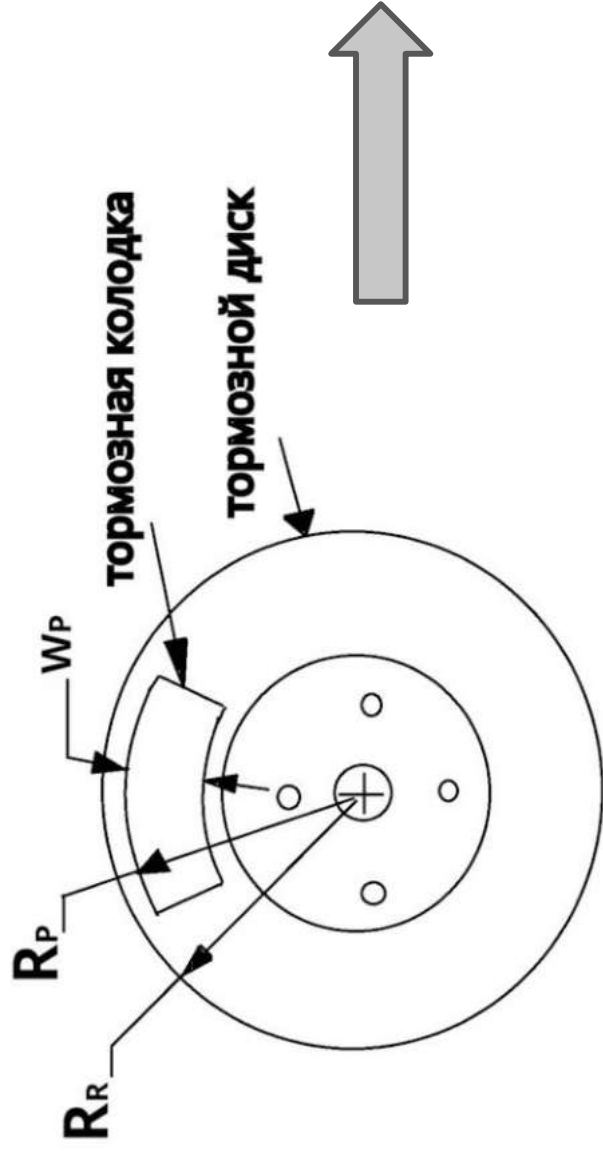


Рис. 2. Контактная пара диск-колодка

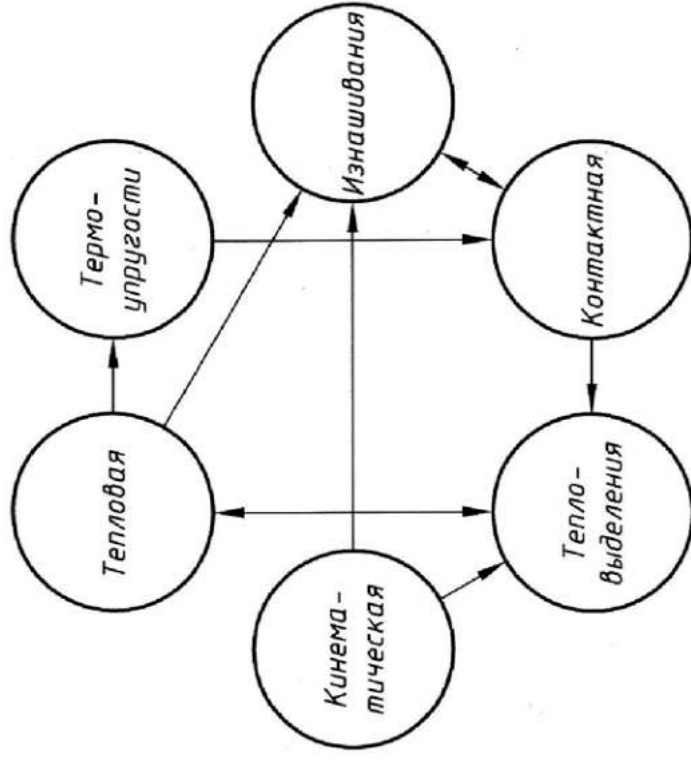


Рис. 3. Схема взаимосвязи процессов в контактной паре диск-колодка

Типы тормозных дисков автомобилей

Цельный (невентилируемый)

Характеристики:

- + высокая термостойкость;
- накопление продуктов износа;



Комбинированный диск

Характеристики:

- + высокая термостойкость;
- + низкая акустическая эмиссия;



Диск с перфорацией

Характеристики:

- + высокая термостойкость;
- склонность к деформации при повышенных температурах;



Вентилируемый

Характеристики:

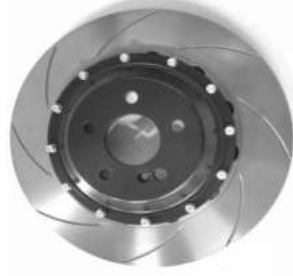
- + высокая термостойкость;
- повышенная масса;



Рифленый диск

Характеристики:

- + высокая термостойкость;
- высокая акустическая эмиссия;

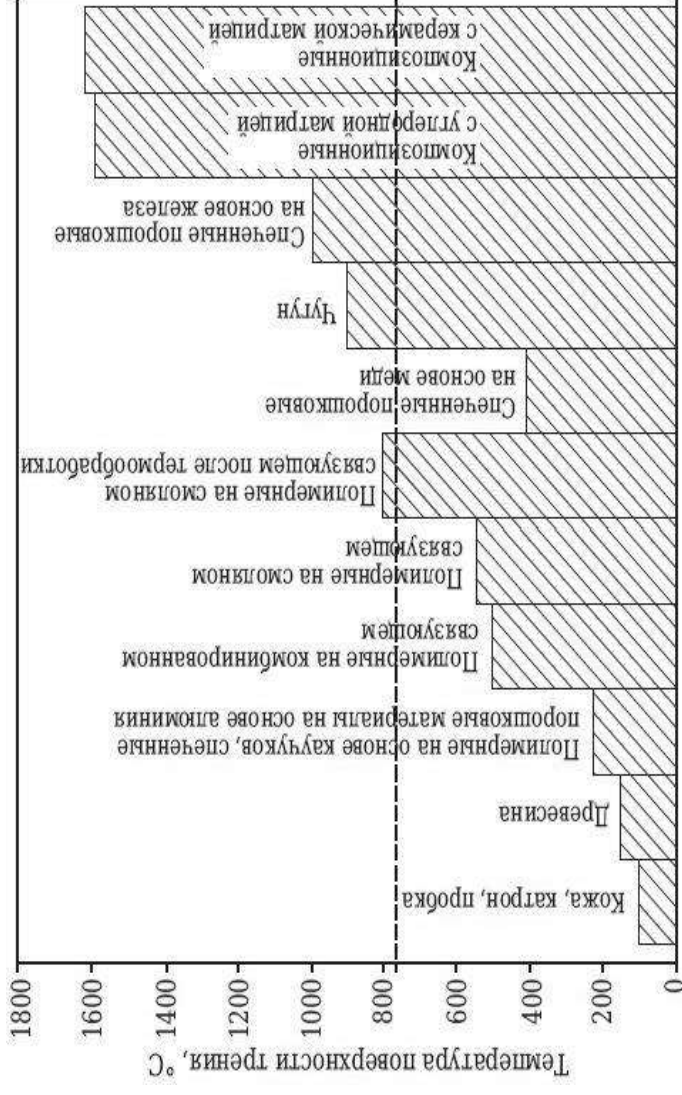


Физико-механические свойства пары трения «диск – тормозная колодка»

Таблица 2

Свойства материалов диска и колодки при 20°C

Материал Параметр	Сталь 12Х18Н10Т (20°C)	Фенилон	ТИИР-300
Плотность ρ , кг/м ³	7900	1350	2100
Модуль упругости E, МПа	198	3,2	5
Коэффициент Пуассона μ	0,3	0,3	0,36
Коэффициент теплопроводности и λ , Вт/(м·°C ⁻¹)	15	0,3	1,4
Коэффициент теплого расширения α , °C ⁻¹	16,6	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$
Теплоемкость C, Дж/(кг·°C ⁻¹)	462	1860	1480



Фрикционные материалы

Рис. 4. Допустимые температурные диапазоны эксплуатации основных типов фрикционных материалов, применяемых в парах трения транспортных средств [1]

Экспериментальное определение деформаций разрушения при высоких температурах

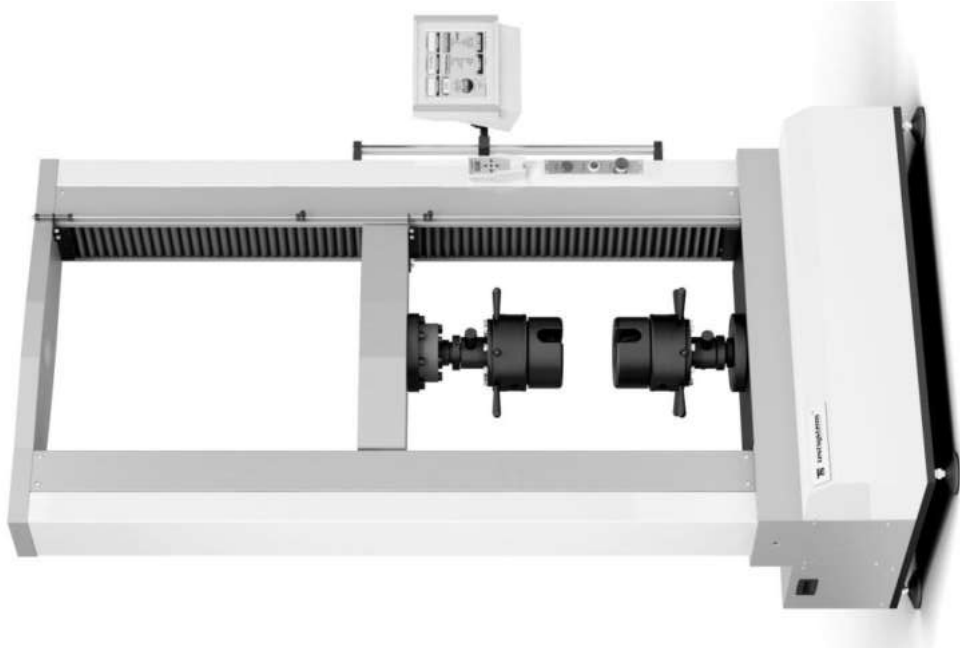


Рис. 5. Общий вид машины «УТС 111.2-50»
Рис.6. Крепление образца в зажимы установки

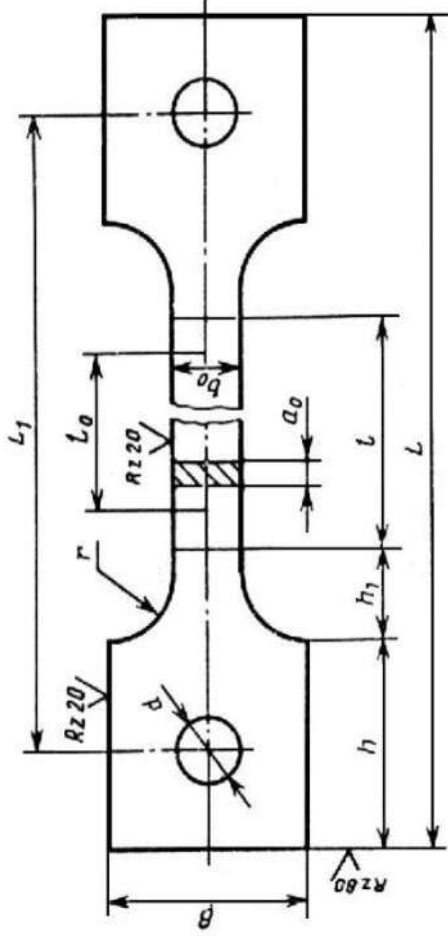


Рис. 7. Тип испытательного образца

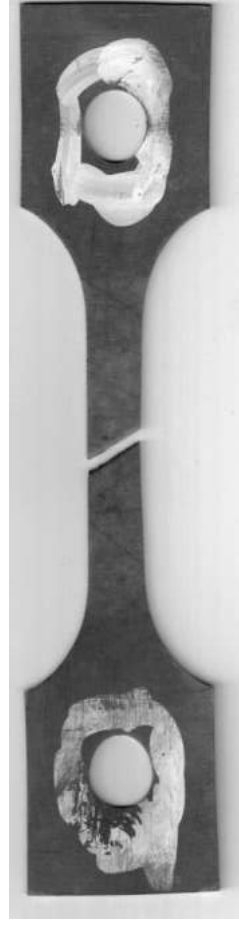


Рис. 8. Вид разрушенного образца

Определение термомеханических свойств материала

Для тормозного диска

8

Таблица 3
Механические свойства стали 12X18H10T

Свойства	t, °C	20	100	200	300	400	500	600
Плотность		7900	-	-	-	-	-	-
ρ , кг/м ³		198	194	189	181	174	166	157
Модуль упругости		650	-	-	450	450	450	400
E, МПа		300	-	-	200	180	180	180
Предел прочности		0,3	-	-	-	-	-	-
σ_B , МПа		15	16	18	19	21	23	25
Предел текучести		16,6	17	17,2	17,5	17,9	18,2	18,6
$\sigma_{0,2}$, МПа		462	496	517	538	550	563	575
Коэфф. Пуассона								
μ								
Коэффициент теплопроводности								
λ , Вт/(м·°C)								
Коэфф. теплового расширения								
α , °C ⁻¹								
Теплоемкость								
C, Дж/(кг·°C)								

Таблица 4
Результаты испытаний стали 12X18H10T при 500°C

Образец	Площадь поперечного сечения, мм ²	Абсолютное разрывное усилие, Н	Предел прочности, МПа	Условный предел текучести, МПа	Длина между кернами, мм	Абсолютное остаточное удлинение, мм	Относительное равномерное удлинение, %	Относительное остаточное удлинение, %
Плоский	7,4625	4918	659,03	290,53	25	15,381	49,2	51,3

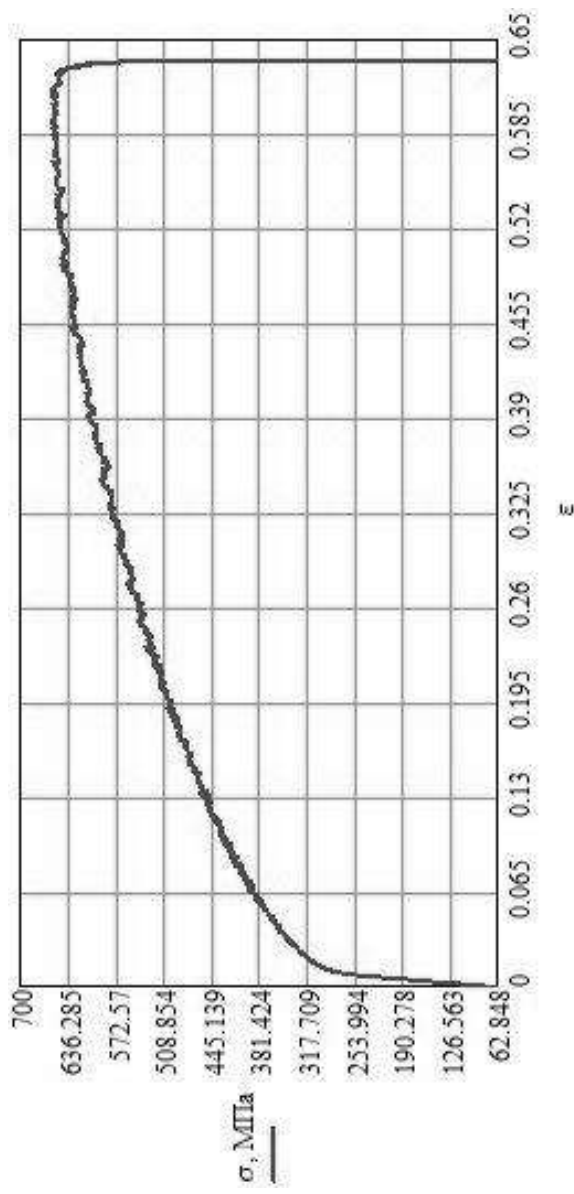


Рис. 9. Диаграмма одноосного растяжения стали 12X18H10T

Обработка экспериментальных данных

Регрессионный анализ

данных

$$\sigma_{sr} = \frac{\sum_{i=0}^n \sigma_i}{n+1} = 176 \text{ (МПа)}$$

$$\epsilon_{sr} = \frac{\sum_{i=0}^n \epsilon_i}{n+1} = 4,99 \times 10^{-3}$$

(1)

$$a11 = \frac{\sum_{i=0}^n [(\epsilon_i - \epsilon_{sr}) \times (\sigma_i - \sigma_{sr})]}{\sum_{i=0}^n (\sigma_i - \sigma_{sr})^2}$$

$$a01 = \epsilon_{300sr} - a11 \times \sigma_{300sr}$$

(2)

$$\epsilon_{\eta_j} = a01 + a11 \times \sigma_j \quad (3)$$

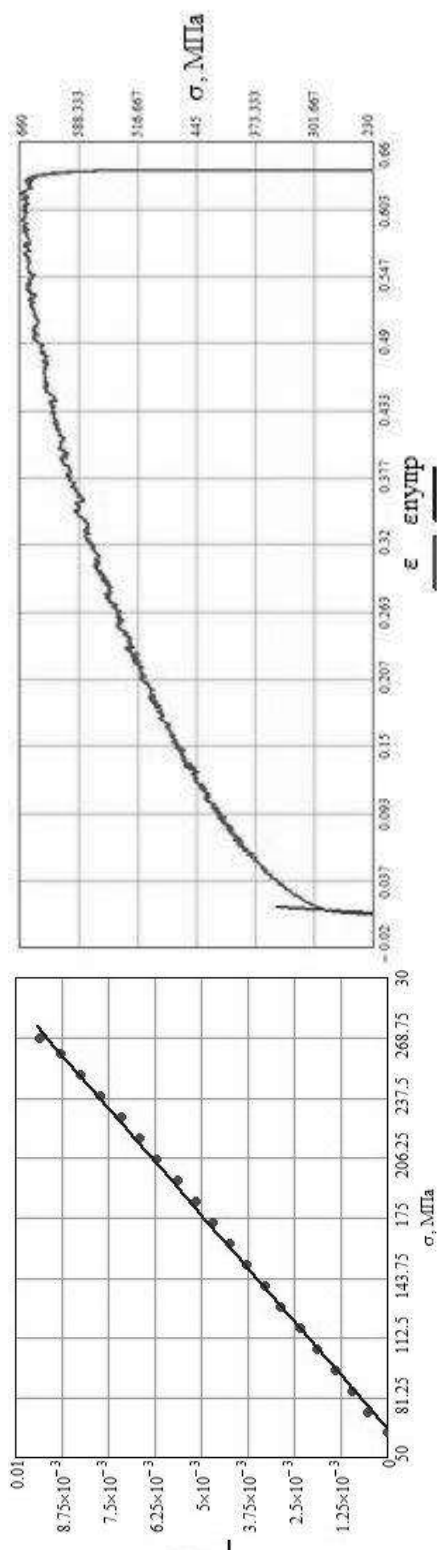


Рис. 10. Прямолинейная регрессионная модель

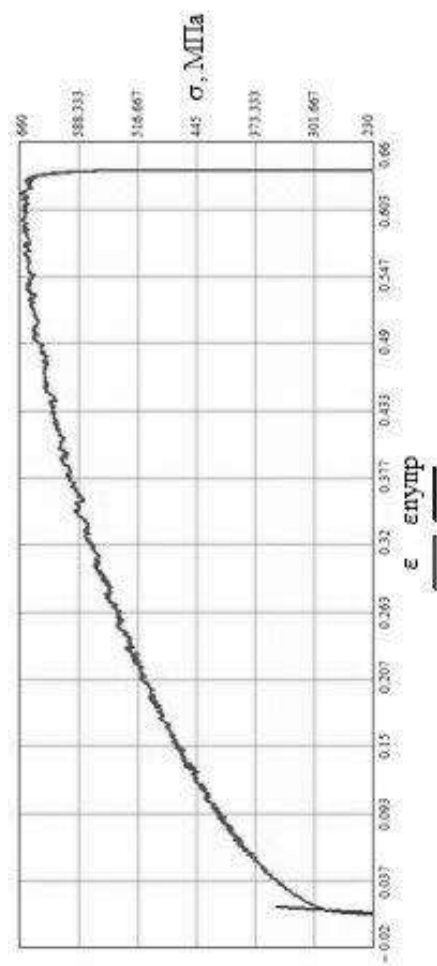


Рис. 11. Общий вид регрессионной модели на диаграмме одноосного растяжения стали 12X18N10T

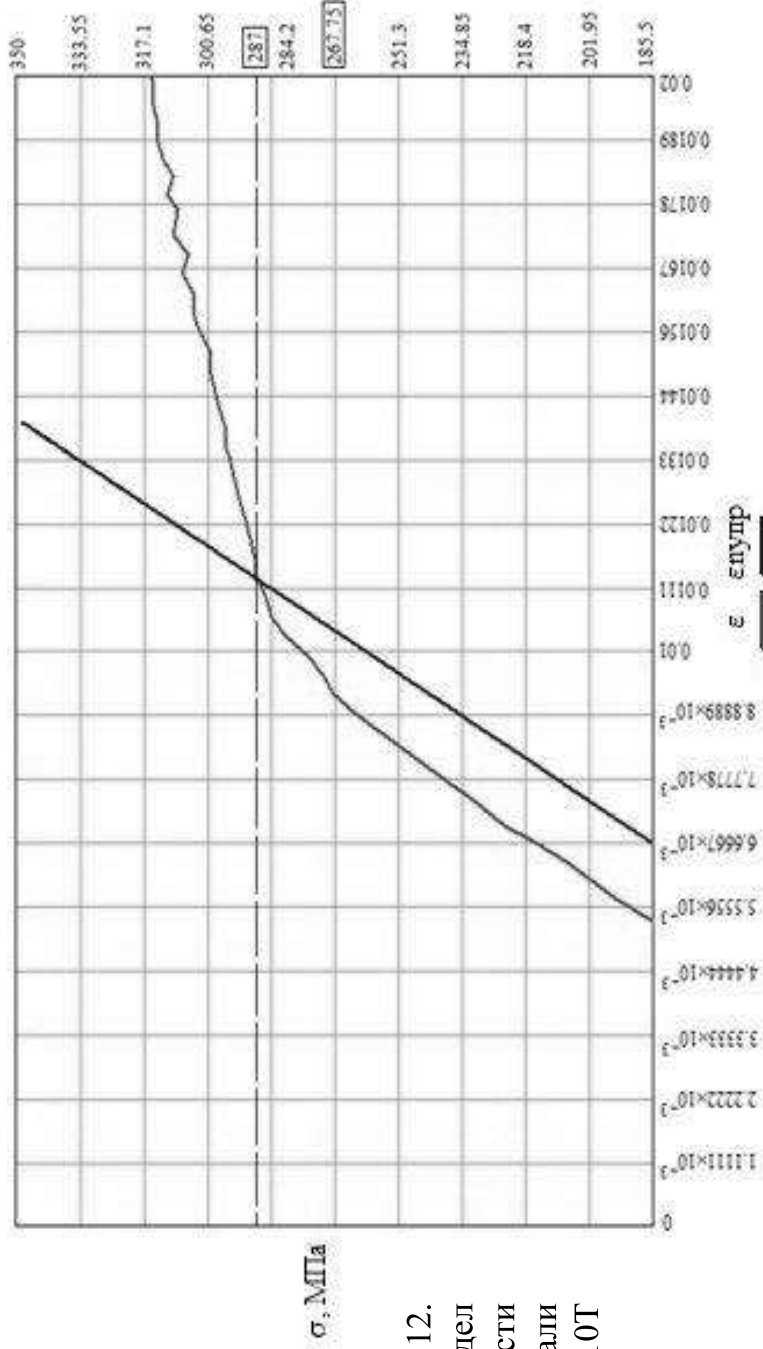


Рис. 12. Предел упругости стали 12X18N10T

$\sigma_{пр} = 268 \text{ МПа}$

$\sigma_{упр} = 287 \text{ МПа}$

$E = 188,8 \text{ ГПа}$

Определяющие уравнения контактной термомеханики

Закон сохранения импульса в дифференциальной форме, выполняемый для любой материальной точки рассмотренных тел V_1 и V_2

$$\rho_{\sigma_i} \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma_i + F_i, \quad (4)$$

Граничные условия первого или второго рода

$$\begin{aligned} \sigma_i \cdot N_i |_{\Gamma_{\sigma_i}} &= T_i, \\ \sigma_i \cdot u_i |_{\Gamma_{u_i}} &= \bar{u}_i, \end{aligned} \quad (5)$$

где N_i - внешняя нормаль к Γ_{σ_i} .

Определяющие уравнения для напряжений и деформаций при кинематическом линейном упрочнении

$$\begin{aligned} \sigma &= C \cdot (\varepsilon - \varepsilon^p) - 3K\alpha TE, \\ f(\sigma, t) &= \sqrt{\frac{3}{2}(s - r) \cdot (s - r)} = \sigma_Y, \\ r &= H\varepsilon^p, \\ \varepsilon^p &= \dot{p} \frac{3s - r}{2\sigma_Y}, \\ \dot{p} &= \sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon^p \cdot \varepsilon^p}, \end{aligned} \quad (6)$$

где C - тензор модулей упругости, ε^p - тензор пластических деформаций, σ_Y - предел текучести, s - дивiator тензора напряжений, H - постоянная кинематического линейного упрочнения, $\cdot \cdot$ - операция двойного скалярного произведения.

Аналитическая модель расчета температур трибологической системы

Аналитическая постановка термоупругой контактной задачи состоит из следующих уравнений:

Уравнение движения:

$$\sigma_{ij,j} + \rho X_i = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} \quad (7)$$

Уравнение теплопроводности:

$$\lambda_T T_{ii} = C_\varepsilon \dot{T} + T_0 (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \varepsilon_{kk} \quad (8)$$

Соотношения между напряжениями и деформациями:

$$\sigma_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij} + (\lambda \varepsilon_{kk} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T (T - T_0)) \delta_{ij} \quad (9)$$

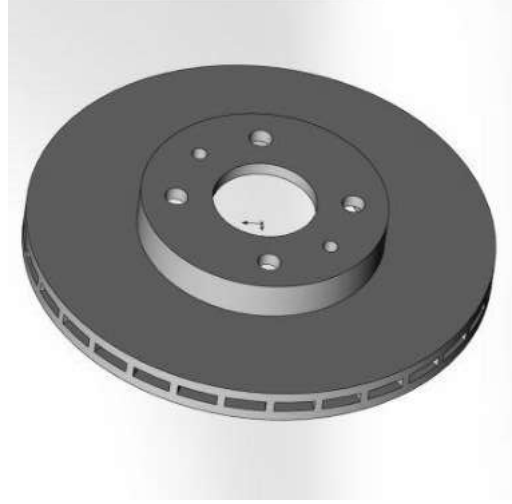
Соотношения между деформациями и перемещениями:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (U_{i,j} + U_{j,i}) \quad (10)$$

Граничные условия контакта в случае теплоотдачи:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T_k}{\partial n} \right|_\Gamma = \sigma (T_k - T^e) \quad (11)$$

Разработка объемной конечно-элементной модели пары трения «диск – колодка» в программном комплексе Abaqus



Определить изменение температуры и НДС контактной пары при варьировании геометрии подкладки колодки

Рис. 13. Модель тормозного диска

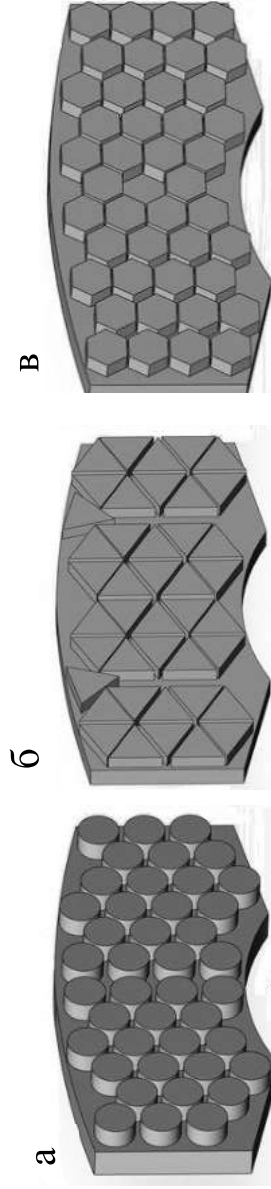


Рис.14. Форма колодки с: а - круглым основанием накладки, б - треугольным основанием накладки, в - шестиугольным основанием накладки

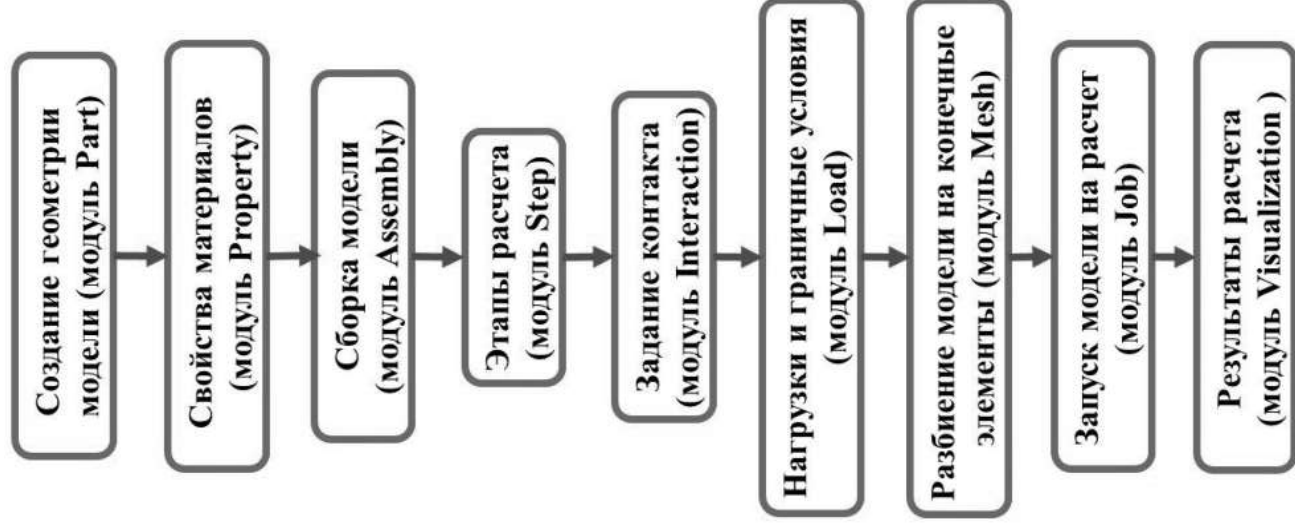


Рис. 15. Схема построения модели

Граничные условия (при создании модели)

Таблица 5. Граничные условия

Модели	Свойства модели	Граничные условия	Примечание
Диск	$E = 198 \text{ [ГПа]}$ (при $T=20^{\circ}\text{C}$) $E = 188,8 \text{ [ГПа]}$ (при $T=500^{\circ}\text{C}$) $\lambda_T = 15 \text{ [К]}$ $\rho = 7900 \text{ [кг/м}^3\text{]}$ $c = 462 \text{ [Дж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)]}$ $\nu = 0,3$	$u_1 = u_2 = u_3 = 0$ $wr_1 = wr_2 = 0$ $wr_3 = 127,7$	Разрешено вращение относительно оси Z. Угловая скорость 127,7 рад/с (линейная скорость движения колеса 60 км/ч) относительно оси Z.
Колодка	$E = 3,2 \text{ [ГПа]}$ $\lambda_T = 0,3 \text{ [К]}$ $\rho = 1350 \text{ [кг/м}^3\text{]}$ $c = 1860 \text{ [Дж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)]}$ $\nu = 0,3$	$u_1 = u_2 = 0$	Разрешено перемещение вдоль оси Z. Задавалась нормальная нагрузка вдоль оси Z.

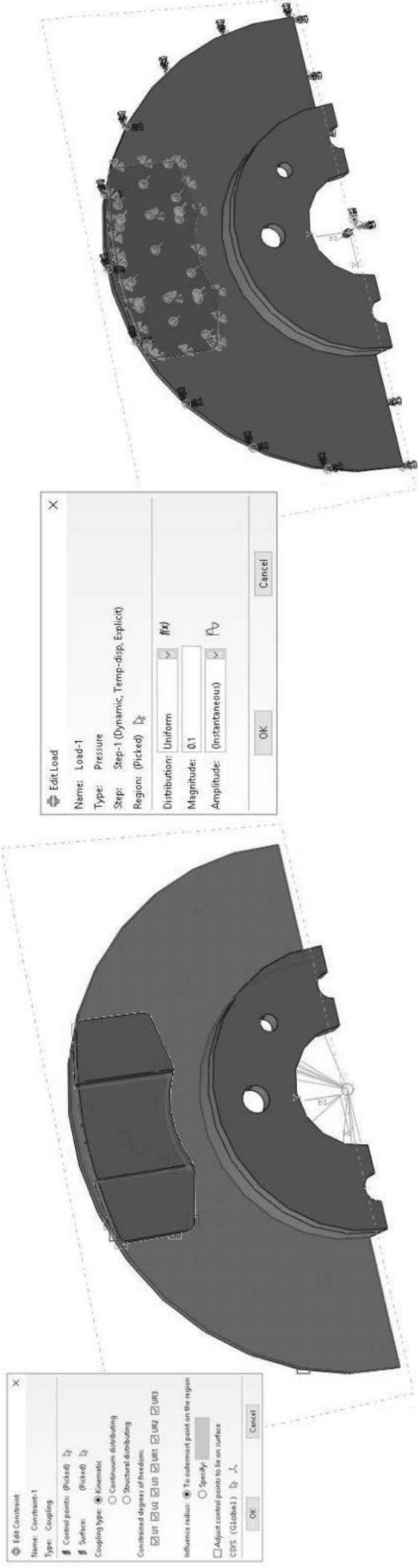


Рис.16. Условия контакта дисков

Рис.17. Приложенное усилие на колодку

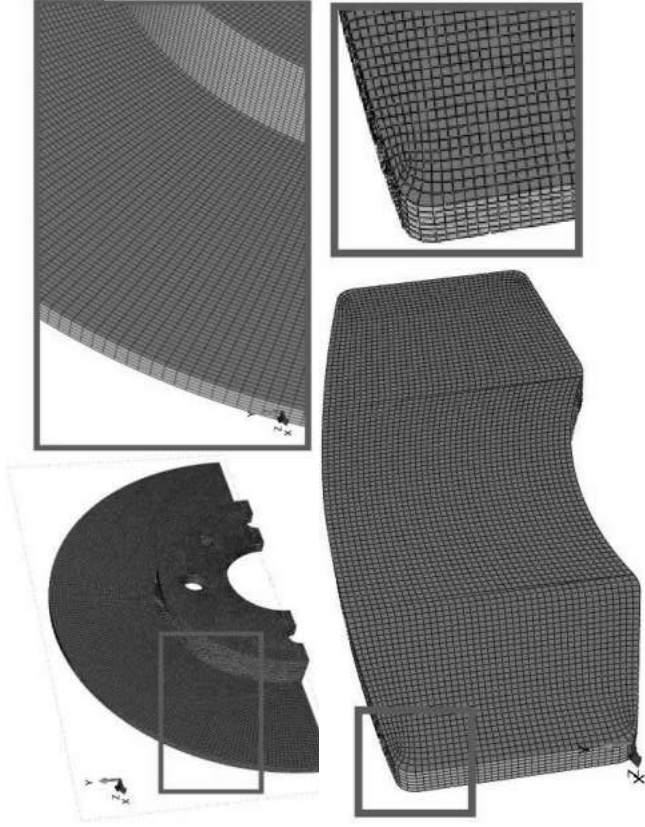


Рис. 18.
Конечно-элементная модель тормозного диска и тормозной колодки

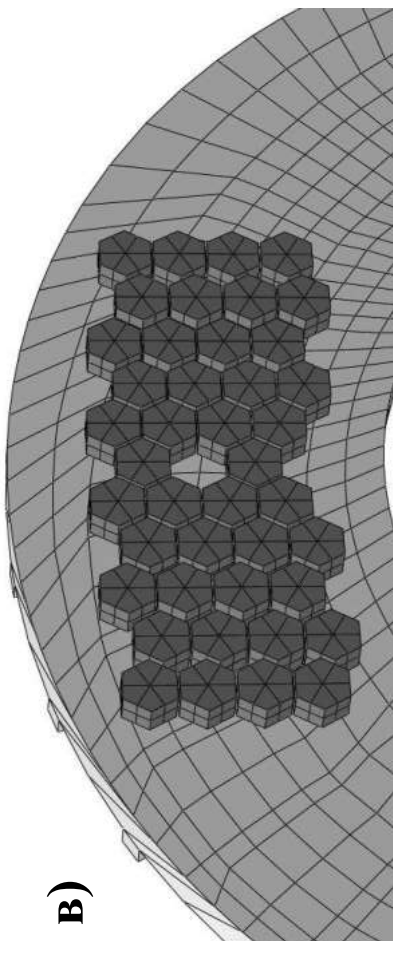
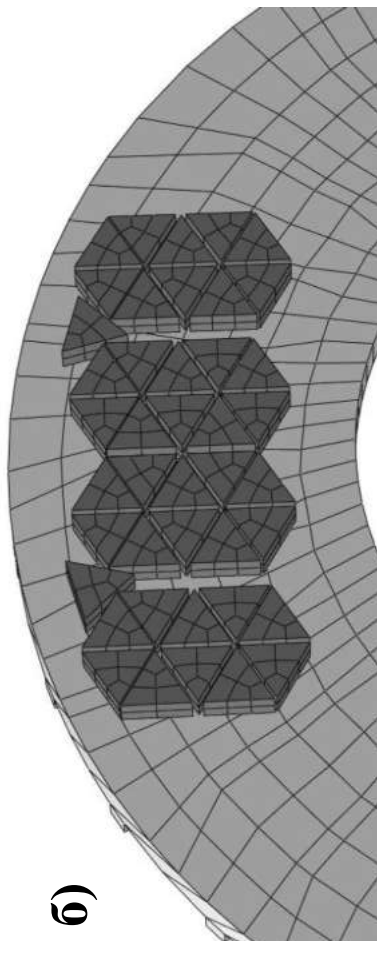
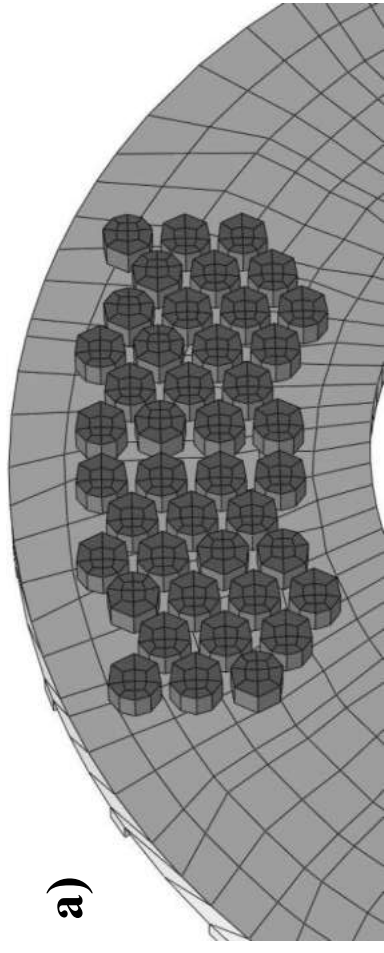


Рис. 19. Конечно-элементная модель: а) круглых накладок, б) треугольных накладок, в) шестигранных накладок

**Количество элементов диска – 123196.
Количество элементов колодки – 30734.
Тип элемента – C3D8T.**

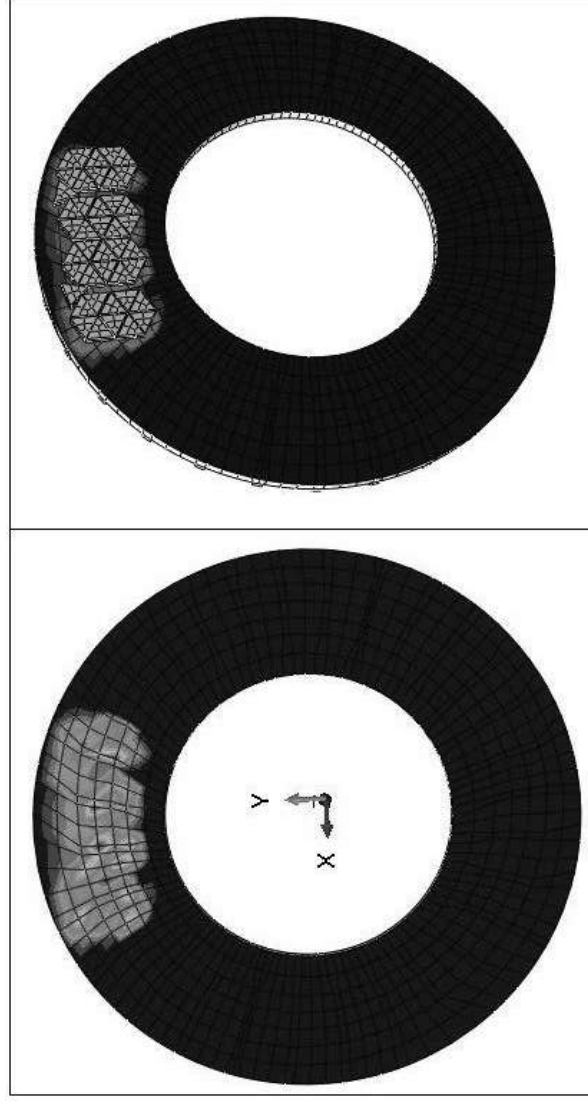


Рис.20. Поле контактных давлений тормозного диска и колодки с треугольным основанием накладки

Результаты КЭ моделирования

Таблица 6

Результаты моделирования тормозной системы «диск-колодка»

Тип основания элемента фрикционной подкладки	Значение изменения температуры, выделенное системой ΔT , °C
Круглый	293
Треугольный	664
Шестигранный	1028

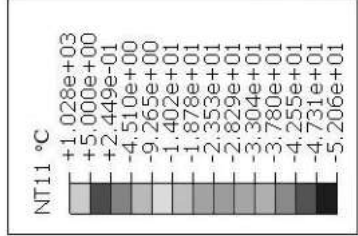
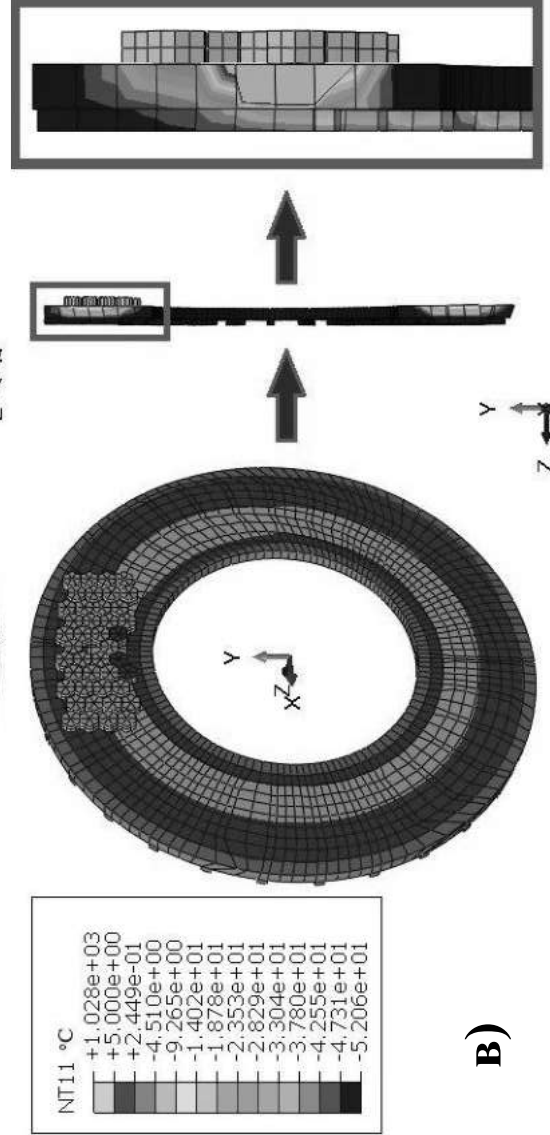
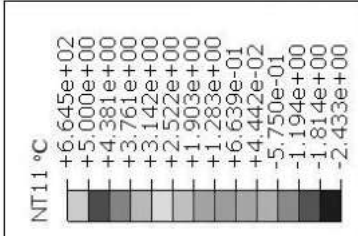
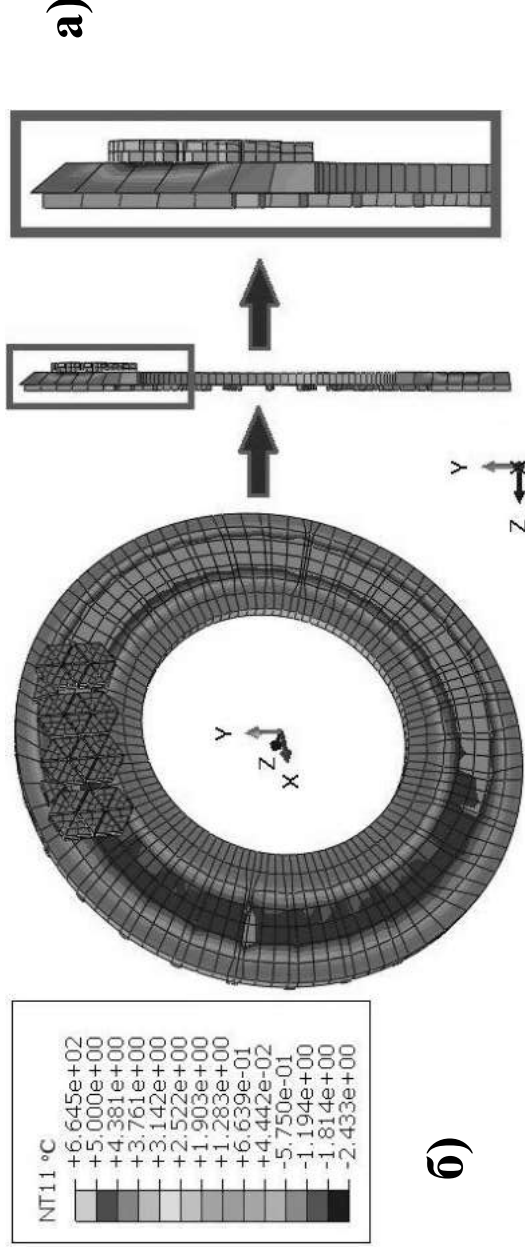
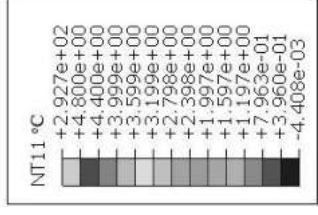
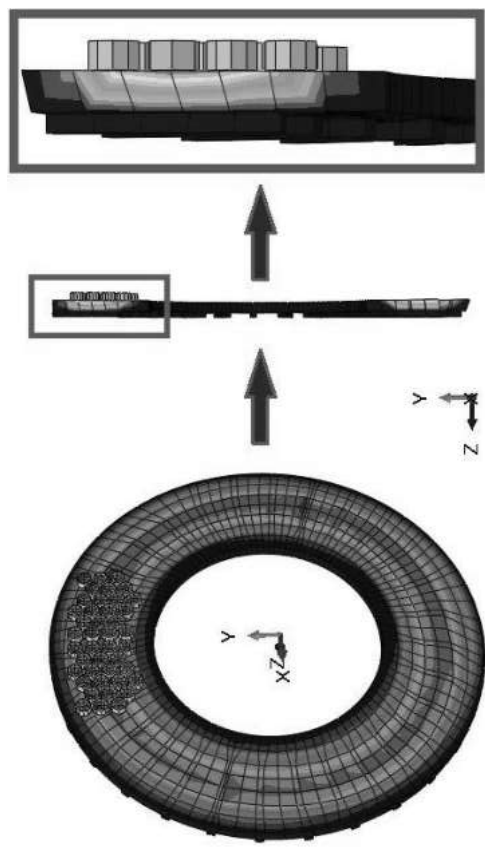


Рис. 21. Поле распределения температуры тормозного диска и колодки с:

- а) круглым основанием накладки,
- б) треугольным основанием накладки,
- в) шестиугольным основанием накладки

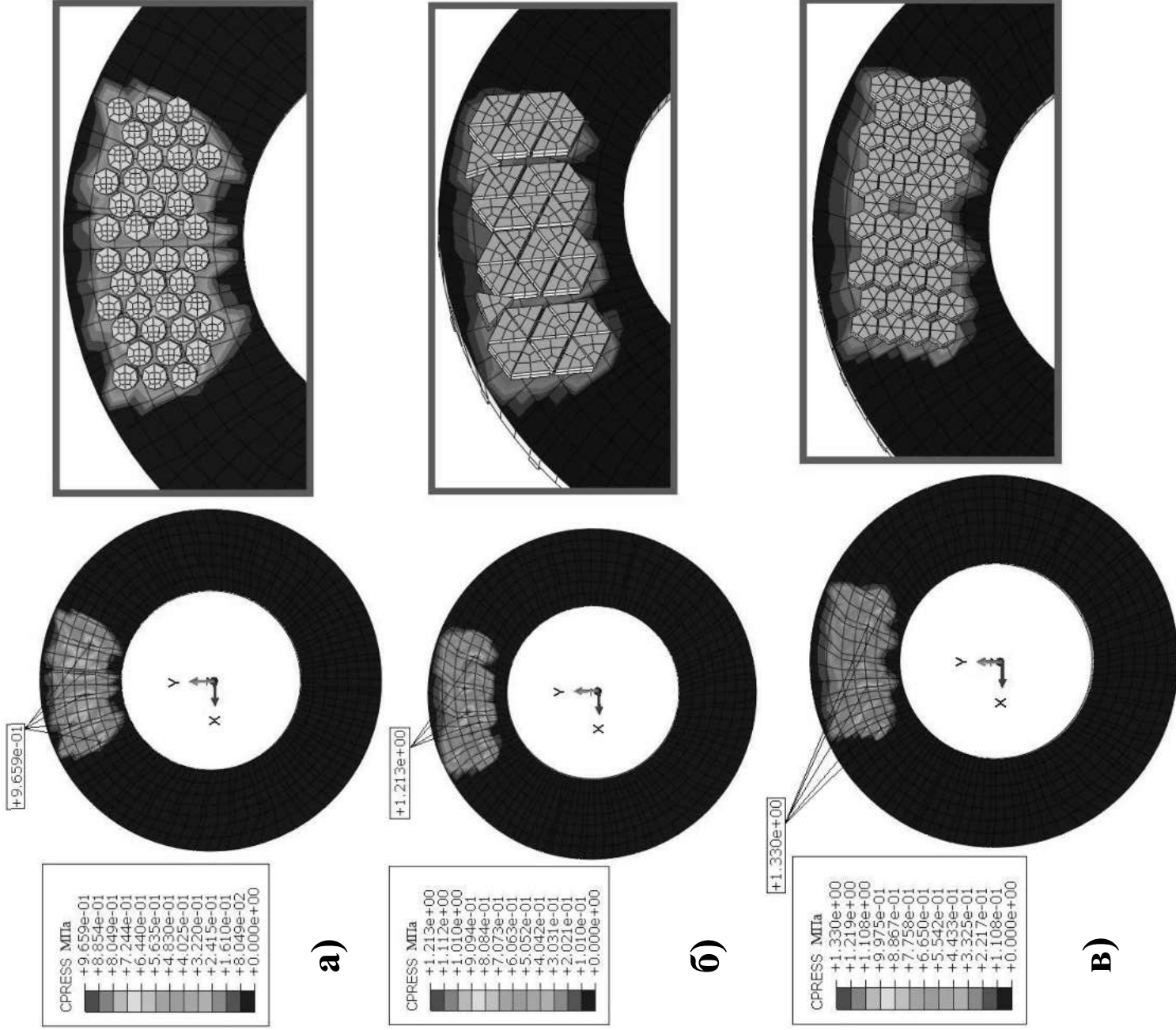


Таблица 7
Результаты моделирования тормозной системы
«диск-колодка»

Тип основания элемента фрикционной подкладки	Максимальное контактное давление Р, МПа
Круглый	0,97
Треугольный	1,21
Шестигранный	1,33

Рис. 22. Поля контактных давлений
тормозного диска и колодки с:
а) круглым основанием накладки,
б) треугольным основанием
накладки,
в) шестиугольным основанием
накладки

Заключение

В ходе работы выполнены следующие задачи:

1. Проведен анализ научно-практической информации по теме исследования и определена ее актуальность.
2. Экспериментальными методами определены физико-механические свойства материала диска при высоких температурах.
3. Созданы конечно-элементные модели тормозных колодок для определения НДС тормозной системы диск-колодка при торможении.

Благодарность

Выражаем благодарность Титову Владимиру Николаевичу (ООО «ТестСистемы») за помощь в проведении экспериментальных испытаний

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО ИГЭУ им. В.И.Ленина»

Моделирование термомеханической контактной задачи тормозного диска автомобиля

Выполнил:

магистрант гр. 2-33М Лопырев В.А.

Научный руководитель:

доцент кафедры ТИПМ, к.т.н., доцент Шилов М.А.

Иваново 2020