

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 629.017:629.018+629.3.027.3

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-65-77

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДИСКОВЫХ ТОРМОЗАХ КАРЬЕРНОЙ СПЕЦТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (ЧАСТЬ 1)

Волосатов Артем Алексеевич¹, Панасенков Дмитрий Александрович¹,
Арутюнян Георгий Артурович¹, Пашков Дмитрий Алексеевич^{2*},
Закрасовский Дмитрий Иванович²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»

²Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*для корреспонденции: pashkovda@kuzstu.ru



Информация о статье

Поступила:

15 мая 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

29 мая 2024 г.

Принята к публикации:

29 мая 2024 г.

Опубликована:

28 июня 2024 г.

Ключевые слова:

Момент сопротивления повороту; многосвязное моделирование; карьерный самосвал; гидравлическая система; рулевое управление; методика, геометрические параметры

Аннотация.

Дисковые тормозные механизмы в карьерных самосвалах используются для торможения в случае возникновения аварийной ситуации. По причине большого веса самосвала и условий эксплуатации такие механизмы должны обладать стабильными и надежными тормозными характеристиками. Отмечается, что возможность расчета температурных полей в тормозном механизме на ранних стадиях проектирования позволяет улучшить тормозные характеристики и сократить время разработки новых машин. В данной статье для расчета температурных полей применен метод конечных элементов. Рассмотрены два подхода моделирования нагрева тормозов при экстренном торможении с помощью FEM. Для точного определения температур элементов тормозного механизма необходимо знать геометрию всего механизма, температуру окружающей среды, закон изменения скорости движения самосвала, закон обтекания тормозного механизма потоком воздуха, свойства материалов и т.д., поэтому для ускорения расчетов выбрана стратегия моделирования. Разработан первый этап численного метода для прогнозирования изменения температуры каждого элемента тормозного механизма при экстренном торможении. Метод состоит из двух этапов. На первом этапе моделируется фрикционный нагрев, после чего полученное температурное поле используется в качестве начальных условий для второго этапа, где определяется распределение тепловой энергии по всей тормозной системе. Проведенный аналитический расчет подтверждает корректность значений тепловой мощности, полученных численно. С помощью этого метода было проведено исследование определенной конструкции тормоза. Результатом первого этапа является рассчитанное поле температур. Полученные результаты будут являться исходными данными для второго этапа.

Для цитирования: Волосатов А.А., Панасенков Д.А., Арутюнян Г.А., Пашков Д.А., Закрасовский Д.И. Моделирование термодинамических процессов в дисковых тормозах карьерной спецтехники с использованием метода конечных элементов (часть 1) // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 3 (163). С. 65-77. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-65-77, EDN: IBPLHK

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 г. №075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической

программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Введение

Особенностью дисковых тормозных механизмов на карьерных самосвалах является то, что они преимущественно используются в качестве аварийных тормозов и применяются для полной остановки самосвала, тогда как служебное торможение осуществляется электродинамическим тормозом [1-3]. В связи с большим весом, особенностями ландшафта в горнодобывающих областях и высокими скоростями движения дисковые тормозные системы должны обладать надежными и стабильными характеристиками в экстренных ситуациях [4-6].

При торможении большая часть кинетической энергии карьерного самосвала выделяется в виде тепла в зонах фрикционного контакта [7-9], что приводит к значительному увеличению температуры диска и тормозных колодок. Перегрев элементов тормозного механизма может привести к уменьшению коэффициента трения [10-12], повышенному износу пары трения [13-15] и появлению таких дефектов, как термические трещины [16-18].

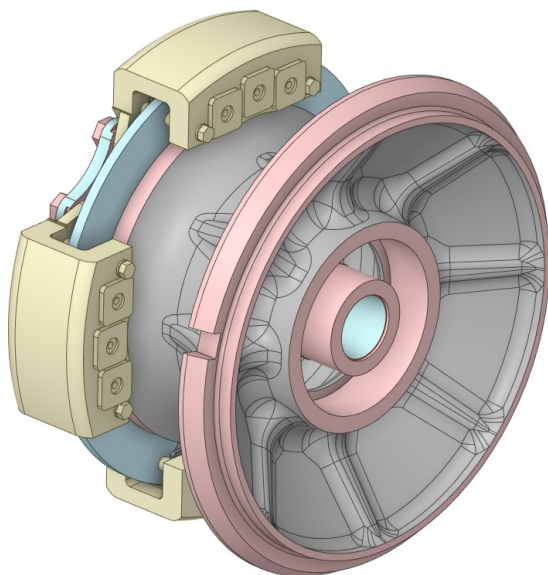


Рис. 1. CAD модель тормозного механизма
Fig. 1. CAD model of the brake mechanism

Таким образом, возможность расчета температурных полей в тормозном механизме на ранних стадиях проектирования позволяет улучшить тормозные характеристики и сократить время разработки новых машин.

Для наиболее точного расчета температурных полей используется метод конечных элементов, который позволяет численно рассчитать температуры различных деталей по CAD модели тормозного механизма. При использовании данного метода необходимо знать начальные и граничные условия, а также физические свойства материалов, из которых изготовлены детали тормозного механизма [19-21].

Существует несколько подходов к моделированию нагрева тормозов при экстренном торможении с помощью FEM. Самым простым является подход, основанный на принципе преобразования энергии, то есть рассчитывается кинетическая энергия самосвала в начальный момент времени, и с учетом коэффициента распределения тепловой энергии между диском и накладками, расчет которого представляет отдельную задачу, определяются функции плотностей тепловых потоков, поступающих к диску и к накладкам через элементарные площадки. Полученные функции задаются как граничные условия на контактирующих поверхностях [22-24]. Но на

самом деле тепловой поток не распределяется равномерно по поверхности торможения диска и накладок, поэтому данный способ увеличивает погрешность расчета. При другом подходе моделируется трение между диском и накладками, а тепловой поток рассчитывается исходя из значения коэффициента трения и сил прижатия колодок к диску. Этот метод в большей степени соответствует реальности, поэтому он обладает большим потенциалом для достижения высокой точности.

Теоретический анализ процесса экстренного торможения

При экстренном торможении скорость карьерного самосвала меняется от начальной до нулевой за несколько секунд [25-27]. Практически вся тепловая энергия, выделяющаяся в зонах фрикционного контакта за это время, поглощается диском и накладками, а затем путем теплопередачи распределяется по всему тормозному механизму и рассеивается в окружающую среду. Таким образом, для точного определения температур элементов тормозного механизма необходимо знать геометрию всего механизма, температуру окружающей среды, закон

изменения скорости движения самосвала, закон обтекания тормозного механизма потоком воздуха, свойства материалов и т.д. Учет всего этого при численном моделировании конечно-элементным методом потребует больших вычислительных и временных ресурсов. Для достижения результатов, удовлетворяющих требованиям точности и обеспечивающих быстрое выполнение расчетов, необходимо выбрать правильную стратегию моделирования.

Описание стратегии моделирования с помощью FEM

Рассмотрим дисковый тормозной механизм карьерного самосвала, представленный на Рис. 1.

Нагрев дисковых тормозов при экстренном торможении условно можно разделить на два основных процесса. Первый – непосредственно само замедление карьерного самосвала, второй – самосвал уже полностью остановлен, и происходит процесс установления температурного равновесия в тормозном механизме.

Как упоминалось ранее, моделирование фрикционного нагрева между диском и накладками дает более близкие к реальности результаты, но требует большего объема вычислительных ресурсов вследствие того, что при этом одновременно решаются уравнения переходных процессов термодинамики и механики. А так как время торможения составляет всего несколько секунд, то в процессе замедления сильное изменение температуры произойдет лишь в тормозном диске и фрикционных накладках в областях, близких к зонам контакта. Поэтому, исходя из вышесказанного, в данном исследовании моделирование процесса торможения предлагается разбить на два этапа.

Первый этап заключается в моделировании тепловыделения в области контакта тормозного

диска с накладками тормозных колодок. При этом используется упрощенная трехмерная расчетная модель, состоящая из тормозного

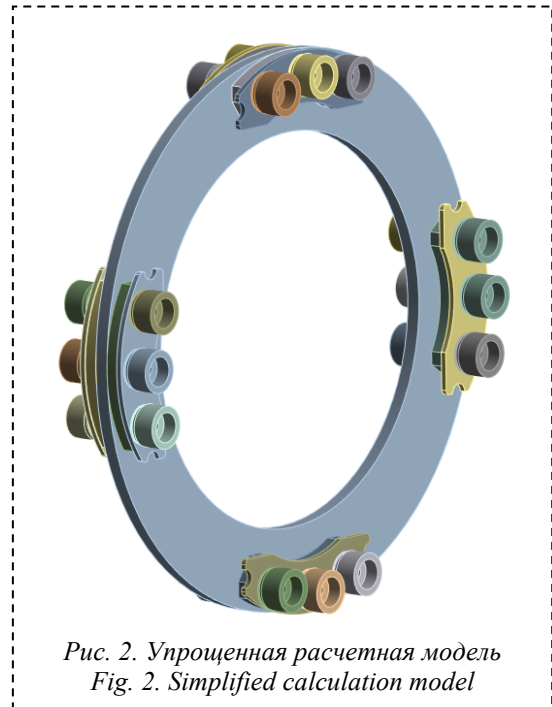


Рис. 2. Упрощенная расчетная модель
Fig. 2. Simplified calculation model

диска, тормозных колодок с фрикционными накладками и поршней (Рис. 2). Результатом первого этапа является поле температур расчетной области в момент полной остановки диска.

Во втором этапе моделируется распределение тепловой энергии от зон фрикционного нагрева по всему тормозному механизму. На этом этапе решаются уже только нестационарные уравнения теплопроводности. В результате рассчитывается изменение температур всех элементов тормозного механизма.

Принятые основные допущения на первом этапе моделирования:

Таблица 1. Свойства материалов диска и поршней
Table 1. Properties of disc and piston materials

Материал	Плотность, $\frac{кг}{м^3}$	Удельная теплоемкость, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$				Коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$			
		20°C	100°C	200°C	400°C	20°C	100°C	200°C	400°C
Сталь 35	7826	469	469	481	523	51	51	49	42
Сталь 45	7826	469	469	481	523	48	48	47	41

Таблица 2. Свойства фрикционного материала
Table 2. Properties of the friction material

Плотность, $\frac{кг}{м^3}$	Удельная теплоемкость, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$	Коэф. теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$	Модуль упругости, МПа		Коэф. Пуассона	Коэф. теплового расширения, $\frac{10^{-6}}{^\circ C}$
			5°C	00°C		

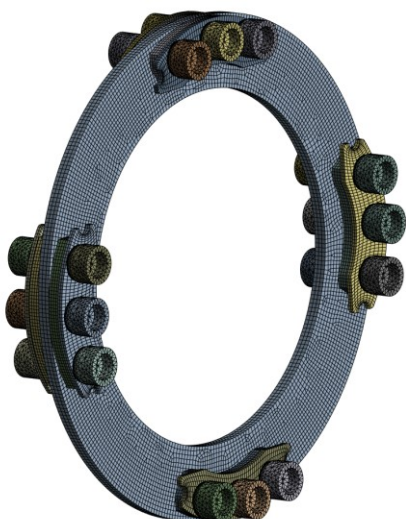


Рис. 3. Конечно-элементная сетка расчетной области

Fig. 3. Finite element grid of the computational domain

1) Колесо находится в состоянии чистого качения, скорость проскальзывания равна нулю;

2) Трение между тормозным диском и фрикционными накладками происходит в соответствии с законом трения Кулона ($F_{тр} = \mu N$, где μ – коэффициент трения скольжения, N – сила реакции опоры);

3) Износом диска и накладок пренебрегаем. Соответственно, тепловой поток от трения полностью распределяется между диском и накладками;

4) Пренебрегаем тепловым излучением, поскольку на данном этапе используется упрощенная геометрия тормозного механизма, что не позволяет рассчитать поток излучения от поверхности к поверхности для всех деталей. Кроме того, так как температуры относительно низкие, а время расчета небольшое, излучение не окажет существенного влияния;

5) Пренебрегаем конвективным теплообменом из-за малого времени моделирования, а также неопределенности закона изменения обтекания потоком воздуха тормозной механизм, и, как следствие, отсутствия возможности корректного определения коэффициента теплоотдачи.

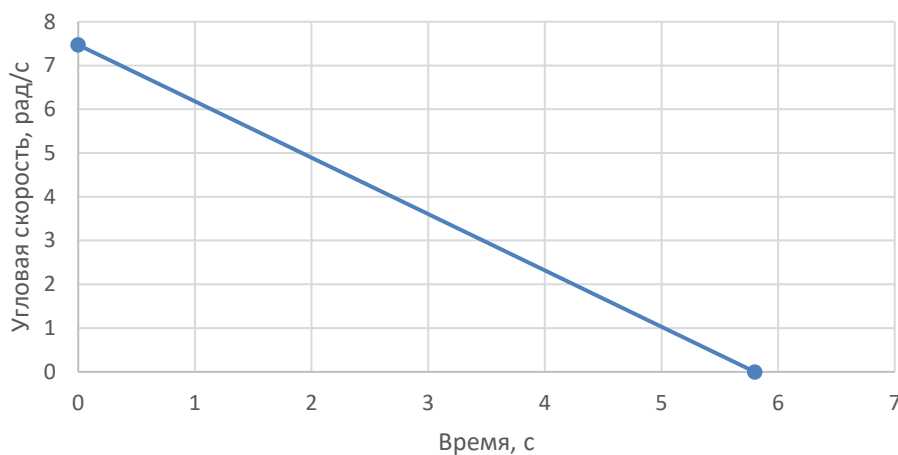


Рис. 4. Закон изменения угловой скорости тормозного диска

Fig. 4. The law of change in the angular velocity of the brake disc

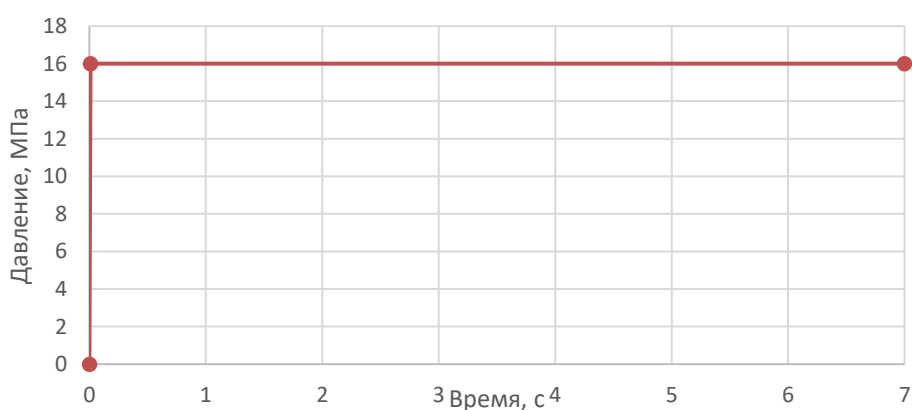


Рис. 5. Закон изменения давления в гидросистеме

Fig. 5. The law of pressure change in a hydraulic system

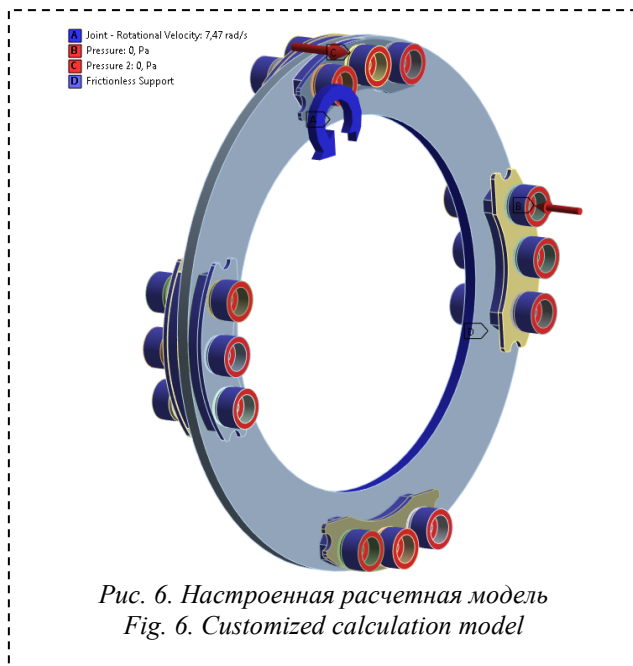


Рис. 6. Настроенная расчетная модель
Fig. 6. Customized calculation model

Конечно-элементная модель

1. Исходные данные моделирования

В данной работе исследуется нагрев тормозного механизма (Рис. 1). Для настройки теплового анализа принимаются следующие условия:

- 1) Начальная скорость торможения – 48 км/ч;
- 2) Радиус качения колеса – 1785 мм;
- 3) Время торможения – 5,8 с.;
- 4) Коэффициент трения между диском и тормозными накладками – 0,35;

- 5) Температура окружающей среды – 22°C;
- 6) Давление жидкости в тормозной системе – 16 МПа.

Материал тормозного диска – сталь 35, материал поршней – сталь 45, свойства перечисленных материалов приведены в Таблице 1. Характеристики фрикционного материала, из которого изготовлены тормозные накладки, показаны в Таблице 2.

2. Первый этап – сопряженный термомеханический расчет

Конечно-элементная сетка расчетной области показана на Рис. 3.

Данный расчет проводится в Ansys Workbench с помощью модуля Coupled Field Transient. Этот модуль имеет алгоритмы управления контактом с трением, основанные на различных методах.

Начальные условия

Предполагаем, что температура тормозного механизма в начальный момент времени равна 22°C.

Граничные условия

Тепловой поток, возникающий в зоне контакта фрикционных накладок с диском, определяется следующим образом [18]:

$$q = FHTG \cdot \sigma \cdot V \tag{1}$$

где σ – эквивалентное напряжение трения, V – скорость скольжения,

FHTG – доля энергии, преобразованной в тепловую энергию (принимается 1).

Скорость скольжения между накладками и диском определяется из условия замедления самосвала при торможении. В данном исследовании принимается, что замедление постоянное, и угловая скорость меняется с 7,47 рад/с до 0 рад/с за 5,8 с. (Рис. 4).

В момент начала торможения давление в гидросистеме увеличивается до 16 МПа за 0,01 с. (Рис. 5).

Граничные условия,

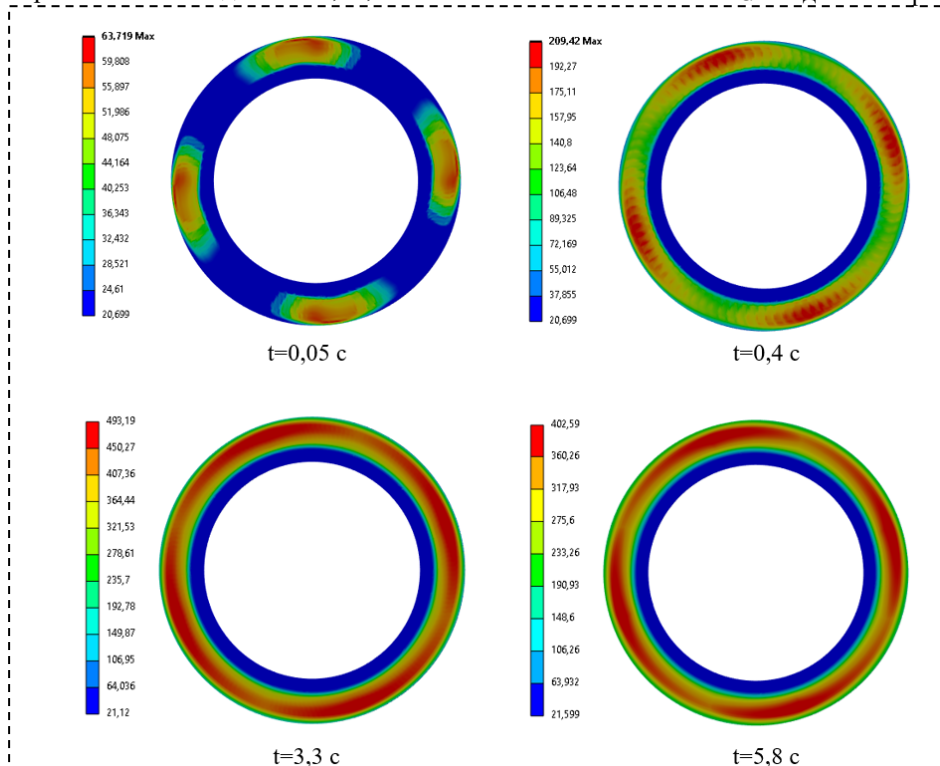


Рис. 7. Распределение температуры на поверхности диска
Fig. 7. Temperature distribution on the disk surface

A точка 1
B точка 2
C точка 3
D точка 4
E точка 5

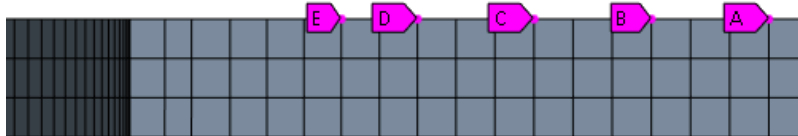


Рис. 8. Положение узлов в радиальном направлении диска
 Fig. 8. The position of the nodes in the radial direction of the disk

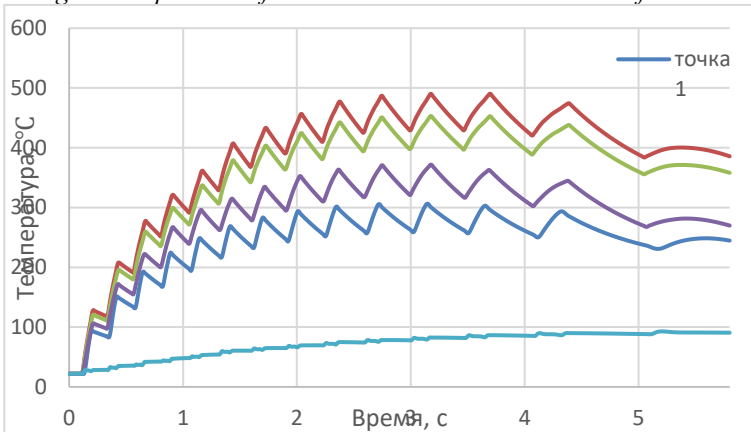


Рис. 9. Кривые роста температуры узлов в радиальном направлении
 Fig. 9. Temperature growth curves of nodes in the radial direction

приложенные к колодкам и поршням, разрешают только одну степень свободы вдоль оси вращения диска.

Настроенная модель тормозного механизма для сопряженного термомеханического расчета показана на Рис. 6.

3. Результаты первого этапа

На Рис. 7 представлено распределение температуры по поверхности диска в различные моменты времени.

Чтобы подробнее проанализировать изменение температуры, выбирается несколько узлов расчетной сетки на поверхности диска в радиальном направлении (Рис. 8).

Графики температур в выбранных точках показаны на Рис. 9.

По приведенным графикам видно, что при экстренном торможении в радиальном направлении поверхности тормозного диска появляется значительный градиент распределения температуры. Также можно отметить колебательный характер кривых роста температур в выбранных точках тормозного диска. Это обусловлено периодичностью контакта между определенной точкой диска и фрикционными накладками. Заметно, что с течением времени период колебаний увеличивается, так как скорость вращения диска уменьшается.

Распределение температуры фрикционной накладки в различные моменты времени (Рис. 10) показывает, что тепловой поток на поверхности трения накладки также не является равномерным.

Максимальная температура в рассматриваемой области тормозного механизма по результатам расчета составила 502,4 °C и была зафиксирована на поверхности колодки в момент времени, равный 3,24 с от начала торможения. Кривые изменения максимальной температуры диска и фрикционной накладки приведены на Рис. 11.

Изменение мощности тепловыделения в процессе торможения, численно рассчитанное на данном этапе, представляет собой линейную функцию с максимальным значением 3398 кВт (Рис. 12). Сравним

численный расчет с аналитическим.

Закон изменения угловой скорости тормозного диска при торможении:

$$\omega(t) = \omega_0 - \frac{\omega_0}{T} t \quad (2)$$

где $\omega_0 = 7,47 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ – скорость вращения колеса в начальный момент времени,

$T = 5,8 \text{ с}$ – время торможения.

Сила, прикладываемая к одной колодке:

$$P_{\text{пр}} = p F_{\text{п}} z \quad (3)$$

где $p = 16 \text{ МПа}$ – давление в гидросистеме,

$F_{\text{п}} = \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4}$ – площадь поршня, $d_{\text{п}} = 90 \text{ мм}$,

$z = 3$ – количество поршней, давящих на одну колодку.

Суммарный тормозной момент от всех колодок:

$$M_{\text{т}} = P_{\text{пр}} \mu R n \quad (4)$$

где $\mu = 0,35$ – коэффициент трения,

$n = 8$ – количество колодок,

$R = 535 \text{ мм}$ – радиус скольжения (Рис. 13)

Проведенный аналитический расчет подтверждает корректность значений тепловой мощности, полученных численно.

В соответствии со стратегией моделирования, описанной в п. 3, результатом первого этапа является рассчитанное поле температур (Рис. 14).

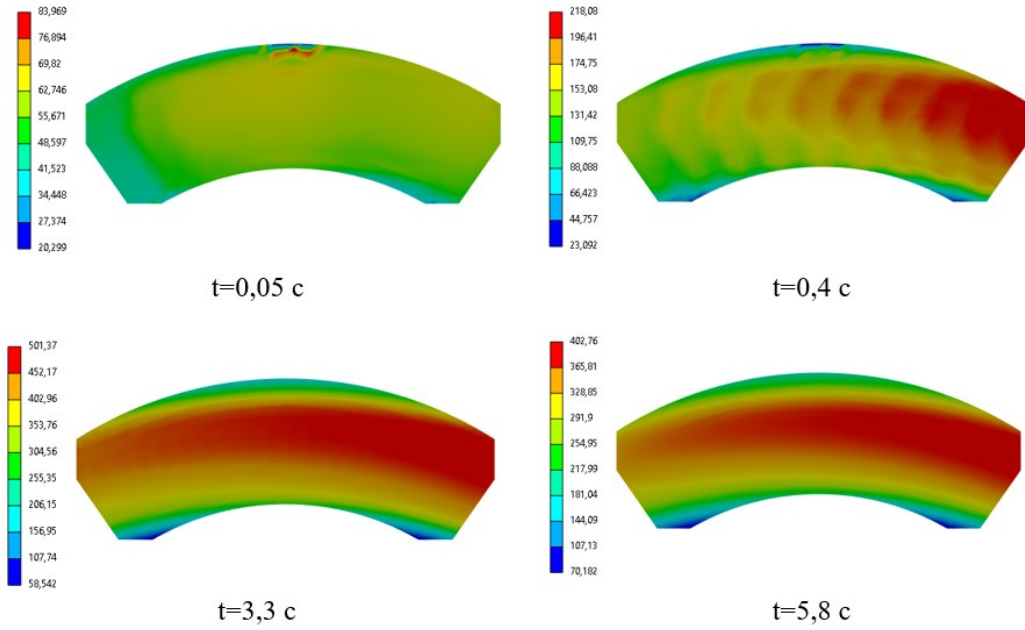


Рис. 10. Распределение температуры на поверхности фрикционной накладки
 Fig. 10. Temperature distribution on the surface of the friction lining

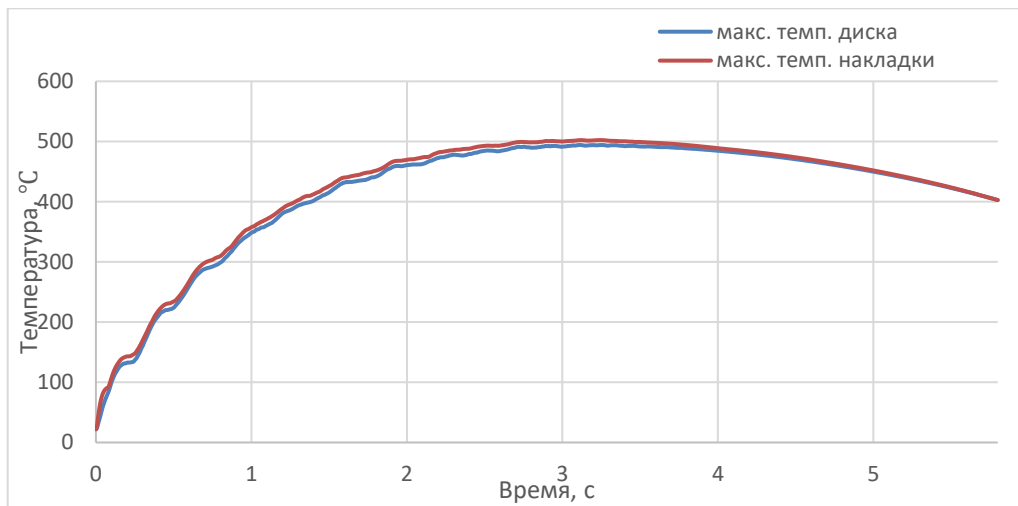


Рис. 11. График изменения максимальной температуры диска и накладки
 Fig. 11. Graph of changes in the maximum temperature of the disc and the lining

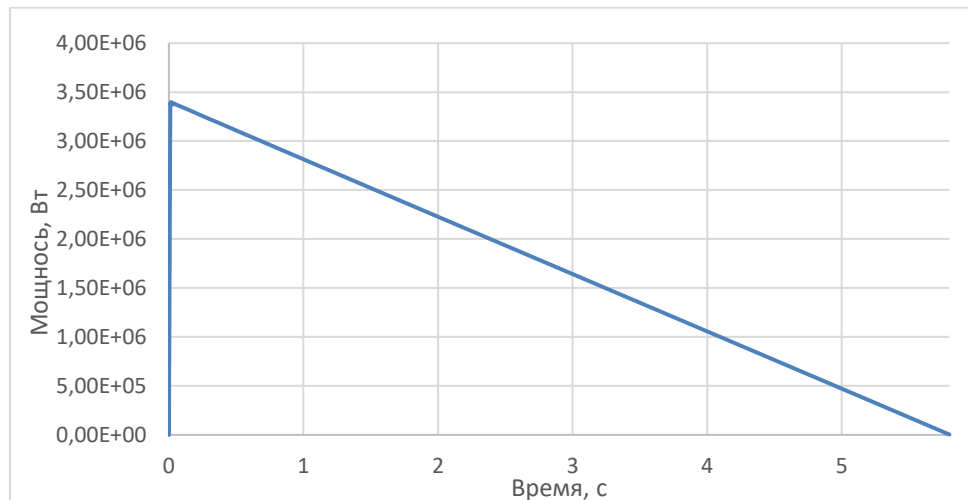


Рис. 12. График изменения мощности
 Fig. 12. Power change schedule

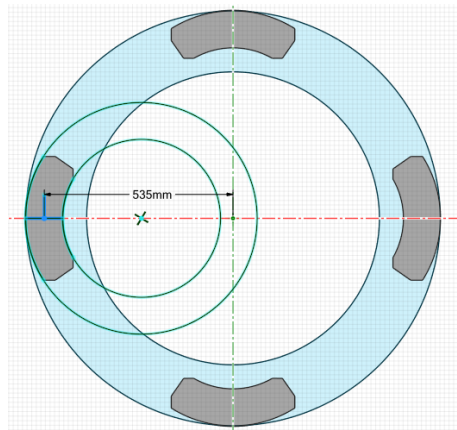


Рис. 13. Радиус скольжения колодки
Fig. 13. Sliding radius of the pad

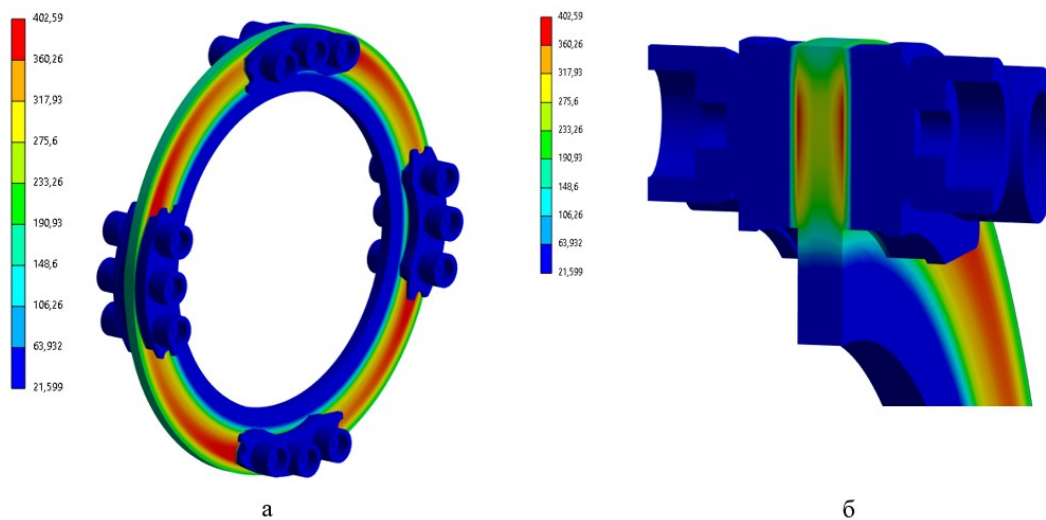


Рис. 14. Рассчитанное поле температур
Fig. 14. Calculated temperature field

Выводы

В данном исследовании рассмотрен первый этап численного моделирования методом конечных элементов процесса нагрева тормозного механизма карьерного самосвала при экстренном торможении.

С помощью описанного метода проведено исследование конкретной конструкции тормозного механизма. По результатам моделирования можно сделать следующие основные выводы.

1) Разработанный метод дает возможность смоделировать нагрев дискового тормозного механизма и исследовать изменение температуры отдельных его компонентов.

2) При экстренном торможении карьерного самосвала наблюдается значительное увеличение температуры в зоне фрикционного контакта. Максимальное значение температуры для исследуемого тормозного механизма составило 502,4°C.

3) Во время торможения на поверхности тормозного диска наблюдается значительный температурный градиент как в радиальном, так и в осевом направлении, а кривая роста температуры носит колебательный характер. Эти явления могут привести к повышенному износу тормозного диска и образованию термических трещин

Список литературы

1. Воронов Ю. Е., Воронов А. Ю., Дубинкин Д. М., Максимова О. С. Сравнительная оценка качества функционирования действующих и роботизированных экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов // Уголь. 2023. №11(1173). С. 65–71. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-65-71.
2. Хорешок А. А., Литвин О. И., Кацубин А. В., Дубинкин Д. М., Марков С. О., Тюленев М. А. К определению рациональной области применения выемочно-погрузочного оборудования // Уголь. 2023. №3(1165). С. 91–95. DOI: 10.18796/0041-

5790-2023-3-91-95.

3. Дубинкин Д. М., Пашков Д. А. Импортонезависимость производства беспилотных карьерных самосвалов // Уголь. 2023. №4(1166). С. 42–48. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-4-42-48.

4. Дубинкин Д. М., Аксенов В. В., Пашков Д. А. Тенденции развития беспилотных карьерных самосвалов // Уголь. 2023. №6(1168). С. 72–79. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-6-72-79.

5. Воронов Ю. Е., Воронов А. Ю., Дубинкин Д. М., Максимова О. С. Диспетчеризация в карьерных экскаваторно-автомобильных комплексах с беспилотным транспортом // Уголь. 2023. №9(1171). С. 75–83. – DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-75-8.

6. Дубинкин Д. М., Ялышев А. В. Влияние процесса погрузки угля в грузовую платформу на коэффициент использования грузоподъемности карьерного самосвала БелАЗ-7530 (220 т) // Уголь. 2023. №S12(1175). С. 11–19. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-11-19.

7. Дубинкин Д. М., Ялышев А. В. Определение параметров модели угля для имитационного моделирования погрузки и разгрузки грузовой платформы карьерного самосвала // Уголь. 2023. №S12(1175). С. 4–10. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-4-10.

8. Hu B., Zhang X., Liu Y., Yan J., Liu X., Wang X., Sun R. 3D quasi-transient thermo-mechanical analysis for vehicle brake disc // Journal of Mechanical Science and Technology. 2022. №36(2). Pp. 969–981. DOI: 10.1007/s12206-022-0143-5

9. Han M. J. [et al.] Low and high cycle fatigue of automotive brake discs using coupled thermo-mechanical finite element analysis under thermal loading // Journal of Mechanical Science and Technology. 2018. №32(12). Pp. 5777–5784.

10. Дубинкин Д. М., Исмаилова Ш. Я. Влияние процесса погрузки суглинка и глины в грузовую платформу на коэффициент использования грузоподъемности карьерного самосвала грузоподъемностью 220 тонн // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. №6(160). С. 105–118. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-105-118.

11. Дубинкин Д. М., Исмаилова Ш. Я. Определение параметров модели суглинка и глины для имитационного моделирования погрузки и разгрузки грузовой платформы карьерного самосвала // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. №6(160). С. 94–104. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-94-104.

12. Дубинкин Д. М., Бокарев А. И. Разработка методики определения нагрузок на силовую структуру карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика. 2023. №5(169). С. 31–44. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-31-44.

13. Сыркин И. С., Дубинкин Д. М., Садовец В. Ю. Обоснование выбора симулятора

для исследования автономного управления беспилотного карьерного самосвала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2023. №48. С. 72–97. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.04.

14. Рахаев С. М., Газизуллин Р. Л., Карташов А. Б., Дубинкин Д. М., Зеляева Е. А. Выбор нагрузочных режимов на начальных этапах проектирования несущих систем (рам) карьерных самосвалов // Техника и технология горного дела. 2023. № 4(23). С. 41–55. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-41-55.

15. Карташов А. Б., Арутюнян Г. А., Киселев П. И., Зайцев Л. А., Попов И. П., Дубинкин Д. М., Тарасюк И. А. Синтез рациональных параметров систем телескопической подвески и рулевого управления карьерного автосамосвала грузоподъемностью до 240 тонн // Техника и технология горного дела. 2023. №4(23). С. 56–75. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-56-75.

16. Воронов А. Ю., Хорешок А. А., Воронов Ю. Е., Дубинкин Д. М., Воронов А. Ю. Оптимизация параметров экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов // Горная промышленность. 2022. № 5. С. 92–98. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-92-98.

17. Дубинкин Д. М., Голофастова Н. Н., Сыркин И. С. Технико-экономическое обоснование разработки отечественного программного обеспечения управления автономным движением роботизированных карьерных самосвалов // Евразийское пространство: экономика, право, общество. 2023. №9. С. 22–27.

18. Belhocine Ali. Finite Element Analysis of Automotive Disk Brake and Pad in Frictional Model Contact // International Journal of Manufacturing Materials, and Mechanical Engineering. 2015. №5(4). Pp. 32–62.

19. Aksenov V. V., Dubinkin D. M., Khoreshok A. A., Markov S. O., Efremenkov A. B., Tyulenev M. A. Evaluating the impact of excavator bucket capacity on the output of a haul truck in different variants of their positioning // Journal of Physics: Conference Series: 3, Veliky Novgorod, 06-07 September 2021. Vol. 2052. – RUS: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012001.

20. Dubinkin D., Kartashov A., Muraviev A., Buzunov N., Khlobystov I. Study of the control algorithm of the braking system of an autonomous haul truck braking system with the use of imitational models // E3S Web of Conferences: VIth International Innovative Mining Symposium, Kemerovo. October 19–21. 2021. Vol. 315. Kemerovo : EDP Sciences, 2021. P. 03021.

21. Dubinkin D. M., Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Markov S. O., Efremenkov A. B., Tyulenev M. A. Influence of geotechnical factors on the output of quarry haul trucks // AIP Conference

Proceedings: IV International Scientific And Practical Conference On Innovations In Engineering And Technology (Ispciet 2021), Veliky Novgorod, Russia, June 28–29, 2021. Vol. 2486. – Veliky Novgorod, Russia : AIP Publishing, 2022. P. 040009. DOI: 10.1063/5.0106051.

22. Dubinkin D. M., Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Markov S. O., Tyulenev M. A., Efremkov A. B. On the mutual influence of average speed, trip time and hauling distance of quarry haul trucks // AIP Conference Proceedings: IV International Scientific And Practical Conference On Innovations In Engineering And Technology (Ispciet 2021), Veliky Novgorod, Russia, June 28–29, 2021. Vol. 2486. Veliky Novgorod, Russia: AIP Publishing, 2022. P. 040017. DOI: 10.1063/5.0106089.

23. Dubinkin D. M., Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Markov S. O., Tyulenev M. A., Nozirezoda Sh. S. Some prerequisites for the use of autonomous heavy platforms in open-pit mining // AIP Conference Proceedings: IV International Scientific And Practical Conference On Innovations In Engineering And Technology (ISPCIET 2021). Veliky Novgorod, Russia, June 28–29, 2021. Vol. 2486. Veliky Novgorod, Russia : AIP Publishing, 2022. P. 040003. DOI: 10.1063/5.0105989.

24. Dubinkin D. M., Golofastova N. N. Economic aspect of unmanned open-pit coal mining technologies / BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Development and Modern Problems of Aquaculture” (Aquaculture 2023), Divnomorskoe, September 27 – October 04, 2023. Divnomorskoe : EDP Sciences, 2024. P. 02013. DOI: 10.1051/bioconf/20248402013.

25. Dubinkin D., Arutyunyan G., Kartashov A. Algorithm for hydraulic system parameters of a dump truck // E3S Web of Conferences, Voronezh, October 09–13, 2023. Vol. 458. Voronezh : EDP Sciences, 2023. P. 08024. DOI: 10.1051/e3sconf/202345808024.

26. Dubinkin D. Design development of autonomous mining dump trucks // E3S Web of Conferences: International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2023, Novosibirsk, Russia, May 16–19, 2023. Vol. 402. Novosibirsk, Russia : EDP Sciences, 2023. P. 10022. DOI: 10.1051/e3sconf/202340210022.

27. Dubinkin D., Turgenev I. Choice of traction battery for mining dump trucks on electric draft / International Journal of Ecosystems and Ecology Science. 2023. Vol. 13, No. 1. P. 259–266. DOI: 10.31407/ijeess13.134.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Волосатов Артем Алексеевич – студент, конструктор, г. Москва, Российская Федерация, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»; e-mail: volosatovaa@student.bmstu.ru

Панасенков Дмитрий Александрович – ведущий конструктор, г. Москва, Российская Федерация, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»; e-mail: panasenkov@bmstu.ru

Арутюнян Георгий Артурович – кандидат технических наук, заместитель директора, г. Москва, Российская Федерация, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»; e-mail: georgy.arut@bmstu.ru

Пашков Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; e-mail: pashkovda@kuzstu.ru

Закрасовский Дмитрий Иванович – магистрант, младший научный сотрудник, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; e-mail: zakrasovskydi@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Волосатов Артем Алексеевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Панасенков Дмитрий Александрович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Арутюнян Георгий Артурович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Пашков Дмитрий Алексеевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Закрасовский Дмитрий Иванович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

MODELING OF THERMODYNAMIC PROCESSES IN DISC BRAKES OF MINING MACHINERY USING THE FINITE ELEMENT METHOD (PART 1)

Artem A. Volosatov¹, Dmitry A. Panasenkov¹,
Georgy A. Arutyunyan¹, Dmitry A. Pashkov²,
Dmitry I. Zakrasovsky²

¹Bauman Moscow State Technical University, KAMAZ-BAUMAN R&D

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*for correspondence: pashkovda@kuzstu.ru



Article info

Received:

15 May 2024

Accepted for publication:

29 May 2024

Accepted:

29 May 2024

Published:

28 June 2024

Keywords:

emergency braking, friction heating, FEM, coupled thermomechanical process

Abstract.

Disc brakes in dump trucks are used for braking in case of an emergency. Due to the heavy weight of the dump truck and the operating conditions, such mechanisms must have stable and reliable braking characteristics. It is noted that the ability to calculate temperature fields in the braking mechanism at the early stages of design makes it possible to improve braking characteristics and reduce the development time of new machines. In this article, the finite element method is used to calculate temperature fields. Two approaches to modeling brake heating during emergency braking using FEM are considered. To accurately determine the temperatures of the braking mechanism elements, it is necessary to know the geometry of the entire mechanism, the ambient temperature, the law of changing the speed of the dump truck, the law of air flow around the braking mechanism, the properties of materials, etc., therefore, a modeling strategy has been chosen to accelerate calculations. The first stage of a numerical method has been developed to predict the temperature change of each element of the braking mechanism during emergency braking. The method consists of two stages. At the first stage, frictional heating is simulated, after which the resulting temperature field is used as the initial conditions for the second stage, where the distribution of thermal energy throughout the braking system is determined. The analytical calculation carried out confirms the correctness of the values of thermal power obtained numerically. Using this method, a study was conducted on a specific brake design. The result of the first stage is a calculated temperature field. The results obtained will be the initial data for the second stage

For citation: Volosatov A.A., Panasenkov D.A., Arutyunyan G.A., Pashkov D.A., Zakrasovsky D.I. Modeling of thermodynamic processes in disc brakes of mining machinery using the finite element method (part 1). *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 3(163):65-77. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-65-77, EDN: IBPLHK

Acknowledgements

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Agreement № 075-15-2022-1198 dated 30.09.2022 with the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University on complex scientific and technical program of full innovation cycle «Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life» (the «Clean Coal – Green Kuzbass» Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle) as part of implementing the project «Development and creation of an unmanned shuttle-type mining dump truck with a payload of 220 tons» in terms of research, development and experimental-design work.

REFERENCES

1. Voronov Yu.E., Voronov A.Yu., Dubinkin D.M., Maksimova O.S. Comparative assessment of the quality of functioning of existing and robotic excavator-automobile complexes of sections. *Coal*. 2023; 11(1173):65–71. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-65-71.
2. Khoreshok A.A., Litvin O.I., Katsubin A.V., Dubinkin D.M., Markov S.O., Tyulenev M.A. To the definition of a rational field of application of dredging and loading equipment. *Coal*. 2023; 3(1165):91–95. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-91-95.
3. Dubinkin D.M., Pashkov D.A. Import dependence of production of unmanned mining dump trucks. *Coal*. 2023; 4(1166):42–48. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-4-42-48.
4. Dubinkin D.M., Aksenov V.V., Pashkov D.A. Trends in the development of unmanned mining dump trucks. *Coal*. 2023; 6(1168):72–79. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-6-72-79.
5. Voronov Yu.E., Voronov A.Yu., Dubinkin D.M., Maksimova O.S. Dispatching in quarry excavator-automobile complexes with unmanned transport. *Ugol*. 2023; 9(1171):75–83. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-9-75-8.
6. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. The influence of the process of loading coal into a cargo platform on the utilization factor of the BelAZ-7530 (220 t) dump truck. *Coal*. 2023; S12(1175):11–19. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-11-19.
7. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. Determination of coal model parameters for simulation modeling of loading and unloading of a dump truck cargo platform. *Ugol*. 2023; S12(1175):4–10. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-4-10.
8. Hu B., Zhang H., Liu Y., Yang J., Liu H., Wang H., Song R. Three-dimensional quasi-transient thermomechanical analysis of the vehicle brake disc. *Journal of Science and Technology in the Field of Mechanics*. 2022; 36(2):969–981. DOI: 10.1007/s12206-022-0143-5.
9. Han M.J. [et al.] Low and high cycle fatigue of automotive brake discs using coupled thermo-mechanical finite element analysis under thermal loading. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018; 32(12):5777–5784.
10. Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ya. The influence of the process of loading loam and clay into a cargo platform on the utilization factor of a mining dump truck with a capacity of 220 tons. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2023; 6(160):105–118. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-105-118.
11. Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ya. Determination of the parameters of the loam and clay model for simulation of loading and unloading of the cargo platform of a dump truck. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2023; 6(160):94–104. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-94-104.
12. Dubinkin D.M., Bokarev A.I. Development of a methodology for determining loads on the power structure of quarry dump trucks. *Mining equipment and electromechanics*. 2023; 5(169):31–44. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-31-44.
13. Syrkin I.S., Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu. Justification of the choice of a simulator for the study of autonomous control of an unmanned mining dump truck. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2023; 48:72–97. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.04
14. Rakhaev S.M., Gazizullin R.L., Kartashov A.B., Dubinkin D.M., Zelyaeva E.A. The choice of load modes at the initial stages of designing load-bearing systems (frames) of quarry dump trucks. *Technique and technology of mining*. 2023; 4(23):41–55. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-41-55.
15. Kartashov A.B., Harutyunyan G.A., Kiselev P.I., Zaitsev L.A., Popov I.P., Dubinkin D.M., Tarasyuk I.A. Synthesis of rational parameters of telescopic suspension and steering systems of a dump truck with a lifting capacity of up to 240 tons. *Technique and technology of mining*. 2023; 4(23):56–75. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-56-75.
16. Voronov A.Yu., Khoreshok A.A., Voronov Yu.E., Dubinkin D.M., Voronov A.Yu. Optimization of parameters of excavator-automobile complexes of sections. *Mining industry*. 2022; 5:92–98. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-92-98.
17. Dubinkin D.M., Golofastova N.N., Syrkin I.S. Feasibility study of the development of domestic software for autonomous movement control of robotic dump trucks. *Eurasian space: economics, law, society*. 2023; 9:22–27.
18. Belkhotsin Ali, Finite element analysis Automotive Disc Brakes and Pads in Friction Model Contact. *International Journal of Manufacturing, Materials and Mechanical Engineering*. 2015; 5(4):32–62.
19. Aksenov V.V., Dubinkin D.M., Khoreshok A.A., Markov S.O., Efremenkov A.B., Tyulenev M.A. Evaluating the impact of excavator bucket capacity on the output of a haul truck in different variants of their positioning. *Journal of Physics: Conference Series: 3, Veliky Novgorod, 06-07 September 2021. Vol. 2052. RUS: IOP Publishing Ltd*. 2021. P. 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012001.
20. Dubinkin D., Kartashov A., Muraviev A., Buzunov N., Khlobystov I. Study of the control algorithm of the braking system of an autonomous haul truck braking system with the use of imitational models. *E3S Web of Conferences: Vth International Innovative Mining Symposium*. Kemerovo, October 19-21. 2021; 315. Kemerovo: EDP Sciences; 2021. P. 03021.
21. Dubinkin D.M., Aksenov V.V., Khoreshok A.A., Markov S.O., Efremenkov A.B., Tyulenev M.A. Influence of geotechnical factors on the output of quarry haul trucks. *AIP Conference Proceedings: IV International Scientific And Practical Conference On Innovations In Engineering And Technology (Ispciot 2021), Veliky Novgorod, Russia, June 28-29. 2021. Vol.*

2486. Veliky Novgorod, Russia: AIP Publishing; 2022. P. 040009. DOI: 10.1063/5.0106051.

22. Dubinkin D.M., Aksenov V.V., Khoreshok A.A., Markov S.O., Tyulenev M.A., Efremkov A.B. On the mutual influence of average speed, trip time and hauling distance of quarry haul trucks. *AIP Conference Proceedings: IV International Scientific And Practical Conference On Innovations In Engineering And Technology (ISPCJET 2021)*, Veliky Novgorod, Russia, June 28-29, 2021. Vol. 2486. Veliky Novgorod, Russia: AIP Publishing; 2022. P. 040017. DOI: 10.1063/5.0106089.

23. Dubinkin D.M., Aksenov V.V., Khoreshok A.A., Markov S.O., Tyulenev M.A., Nozirezoda Sh.S. Some prerequisites for the use of autonomous heavy platforms in open-pit mining. *AIP Conference Proceedings: IV International Scientific And Practical Conference On Innovations In Engineering And Technology (ISPCJET 2021)*, Veliky Novgorod, Russia, June 28-29, 2021. Vol. 2486. Veliky Novgorod, Russia: AIP Publishing; 2022. P. 040003. DOI: 10.1063/5.0105989.

24. Dubinkin D.M., Golofastova N.N. Economic aspect of unmanned open-pit coal mining technologies /

BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Development and Modern Problems of Aquaculture” (Aquaculture 2023), Divnomorskoe, September 27 – October 04, 2023. Divnomorskoe: EDP Sciences; 2024. P. 02013. DOI: 10.1051/bioconf/20248402013.

25. Dubinkin D., Arutyunyan G., Kartashov A. Algorithm for hydraulic system parameters of a dump truck. *E3S Web of Conferences*. Voronezh, October 09-13, 2023. Vol. 458. Voronezh: EDP Sciences; 2023. P. 08024. DOI: 10.1051/e3sconf/202345808024.

26. Dubinkin D. Design development of autonomous mining dump trucks / E3S Web of Conferences: International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2023, Novosibirsk, Russia, May 16-19. 2023. Vol. 402. Novosibirsk, Russia: EDP Sciences; 2023. P. 10022. DOI: 10.1051/e3sconf/202340210022.

27. Dubinkin D., Turgenev I. Choice of traction battery for mining dump trucks on electric draft / *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*. 2023; 13(1):259–266. DOI: 10.31407/ijees13.134.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Artyom A. Volosatov – student, designer, Moscow, Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University, KAMAZ-BAUMAN Research Center; e-mail: volosatovaa@student.bmstu.ru

Dmitry A. Panasenkov – Lead Designer, Moscow, Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University, KAMAZ-BAUMAN Research Center; e-mail: panasenkov@bmstu.ru

Georgy A. Arutyunyan – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director, Moscow, Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University, KAMAZ-BAUMAN Research Centre; e-mail: georgy.arut@bmstu.ru.

Dmitry A. Pashkov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Kemerovo, Russian Federation, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev. T.F. Gorbachev; e-mail: pashkovda@kuzstu.ru

Dmitry I. Zakrasovsky – undergraduate, Junior Researcher, Kemerovo, Russian Federation, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev. T.F. Gorbachev; e-mail: zakrasovskydi@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Artyom A. Volosatov – setting the research problem, conceptualisation of the study, data analysis, summarising, writing, review of current literature, data collection.

Dmitry A. Panasenkov – research problem statement, research conceptualisation, data analysis, summarising, writing, review of current literature, data collection.

Georgy A. Arutyunyan – research problem statement, conceptualisation of the study, data analysis, summarising, writing, review of current literature, data collection.

Dmitry A. Pashkov – statement of research problem, conceptualisation of the study, data analysis, summarising, writing, review of current literature, data collection.

Dmitry I. Zakrasovsky – statement of research problem, conceptualisation of the study, data analysis, summarising, writing, review of current literature, data collection.

All authors have read and approved the final manuscript.

