

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 629.017:629.018+629.3.027.3

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-78-87

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДИСКОВЫХ ТОРМОЗАХ КАРЬЕРНОЙ СПЕЦТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (ЧАСТЬ 2)

Волосатов Артем Алексеевич<sup>1</sup>, Панасенков Дмитрий Александрович<sup>1</sup>,  
Арутюнян Георгий Артурович<sup>1</sup>, Садовец Владимир Юрьевич<sup>2\*</sup>,  
Дубинкин Семен Дмитриевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»

<sup>2</sup>Кузбасский 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:

карьерный самосвал,  
тормозной механизм,  
экстренное торможение,  
фрикционный нагрев, FEM,  
сопряженный  
термомеханический процесс

### Аннотация.

Тормозная система карьерного самосвала является одной из основных систем, влияющих на безопасность работ на карьере. Дисковые тормоза на карьерных самосвалах грузоподъемностью более 90 т используются в качестве аварийных тормозов либо для полной его остановки. Перегрев дисковых механизмов приводит к ухудшению тормозных характеристик самосвала, а значит, и к уменьшению безопасности на предприятии. В данной статье разработан второй этап численного метода для прогнозирования изменения температуры каждого элемента тормозного механизма при экстренном торможении. Метод состоит из двух этапов. В качестве начальных условий для второго этапа использовались результаты первого этапа. На втором этапе определяется распределение тепловой энергии по всей тормозной системе. С помощью этого метода было проведено исследование определенной конструкции тормоза. Результаты моделирования позволили выявить зоны с повышенной тепловой нагрузкой. Предложенный численный метод позволяет эффективно и экономично оценивать термомеханическое поведение тормозной системы на ранней стадии разработки. В результате исследования установлено, что вероятность перегрева тормозной жидкости при экстренном торможении низкая. После полной остановки самосвала из-за теплового излучения с поверхности диска значительно нагреваются уплотнения тормозных поршней. Это может привести к уменьшению герметичности гидравлической системы. В целях дальнейшего развития исследования нагрева тормозных механизмов планируется более подробное изучение влияния конвективного теплообмена при торможении, влияния зависимости коэффициента трения от температуры, а также рассмотрение большего количества режимов торможения. Таким образом, данное исследование будет охватывать более широкую область проблем.

**Для цитирования:** Волосатов А.А., Панасенков Д.А., Арутюнян Г.А., Садовец В.Ю., Дубинкин С.Д. Моделирование термодинамических процессов в дисковых тормозах карьерной спецтехники с использованием метода конечных элементов (часть 2) // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 3 (163). С. 78-87. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-78-87, EDN: OKZHFA

### 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

Карьерные самосвалы (КС) на предприятиях являются объектами, которые создают опасные и вредные производственные факторы [1-3]. Безопасная работа КС обеспечивается работоспособностью и надежностью их узлов, систем и элементов [4-6]. Одной из таких систем является тормозная [10-12].

От тормозной системы зависит, не только то, сможет ли КС остановиться в необходимый момент или нет, но и то, сможет ли быть обеспечено движение с безопасной скоростью на спусках [13-15].

Дисковые тормоза на карьерных самосвалах грузоподъемностью более 90 т используются в качестве аварийных тормозов либо для полной остановки КС [16-18]. Из-за условий эксплуатации карьерных самосвалов тормозные механизмы должны обладать надежными и стабильными характеристиками в экстренных ситуациях [19-21].

Процесс торможения сопровождается выделением тепла, а значит, возможен перегрев тормозных механизмов, который в свою очередь приведет к ухудшению тормозных характеристик КС [22-24].

Таким образом, при разработке КС с дисковыми тормозами необходимо оценивать термомеханическое поведение тормозной системы.

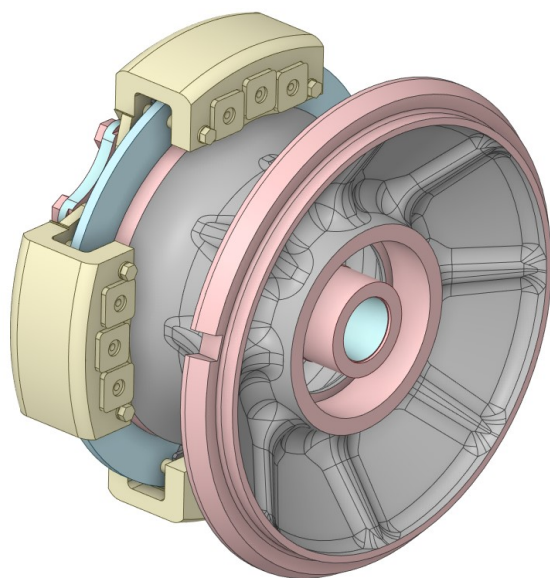


Рис. 1. CAD модель тормозного механизма  
Fig. 1. CAD model of the brake mechanism

### Описание стратегии моделирования с помощью FEM

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

Процесс моделирования торможения разбивается на два этапа.

Первый этап заключается в моделировании тепловыделения в области контакта тормозного диска с накладками тормозных колодок. Результатом первого этапа является поле температур расчетной области в момент полной остановки диска.

Результат первого этапа был получен ранее.

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.

Основные допущения на втором этапе:

1) Зазоры менее 2 мм между компонентами игнорируются, поэтому считаем, что между ними есть тепловой контакт;

2) По результатам тестовых расчетов было определено, что влияние естественной конвекции при экстренном торможении незначительно, поэтому принято допущение не учитывать ее при анализе.

### Конечно-элементная модель

#### 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.

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

Материал	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$				Коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$			
		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, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Удельная теплоемкость , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$	Коэф. теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$	Модуль упругости, МПа		Коэф. Пуассона	Коэф. теплового расширения, $\frac{10^{-6}}{^\circ\text{C}}$
			25°C	400°C		
2045	1100	1.7	804	495	0,34	11

### Второй этап – решение задачи нестационарной теплопроводности

Второй этап проводится с помощью модуля Transient Thermal. Конечно-элементная сетка строится для расчетной области всего тормозного механизма (Рис. 2).

#### Начальные условия

В качестве начальных условий задается температурное поле, полученное на предыдущем этапе, начальная температура остальных элементов принимается равной температуре окружающей среды.

#### Граничные условия

Для данного анализа кроме теплообмена за счет теплопроводности учитывается лучистый

теплообмен между поверхностями деталей тормозного механизма.

Модель, используемая для расчета распределения температуры тормозного механизма после полной остановки самосвала с заданными граничными и начальными условиями, показана на Рис. 3.

#### Результаты второго этапа

В результате данного анализа рассчитывается температурное поле всего тормозного механизма. Распределение температуры по сечению модели тормоза после 1, 10, 50 и 100 секунд после полной остановки самосвала показано на Рис. 4.

Полученные данные показывают, что

вследствие низкого коэффициента теплопроводности материала, из которого изготовлены фрикционные накладки, большая часть тепловой энергии распределяется по тормозному диску, а температура поршней, корпуса тормоза и уплотнений растет значительно медленнее. Но из-за теплового излучения с поверхности диска значительно нагреваются уплотнения тормозных поршней (Рис. 5).

#### Результаты моделирования

Предложенный способ численного моделирования позволяет получить кривую изменения температуры в любой интересующей нас точке тормозного механизма.

На Рис. 6 показан график температуры в точке 2 на поверхности тормозного диска при экстренном торможении карьерного самосвала. В начале процесса торможения наблюдается резкое увеличение температуры; после некоторого времени (примерно 3,2 с. от начала

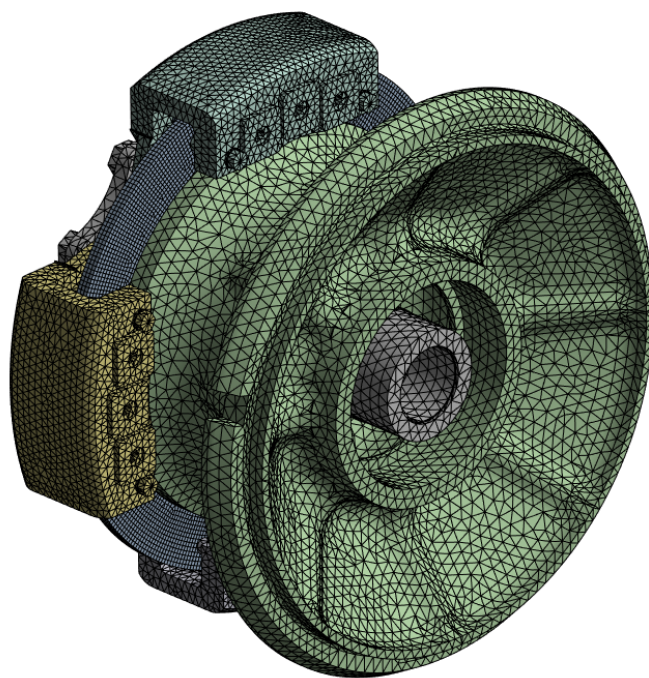


Рис. 2. Конечно-элементная сетка расчетной области  
Fig. 2. Finite element grid of the computational domain

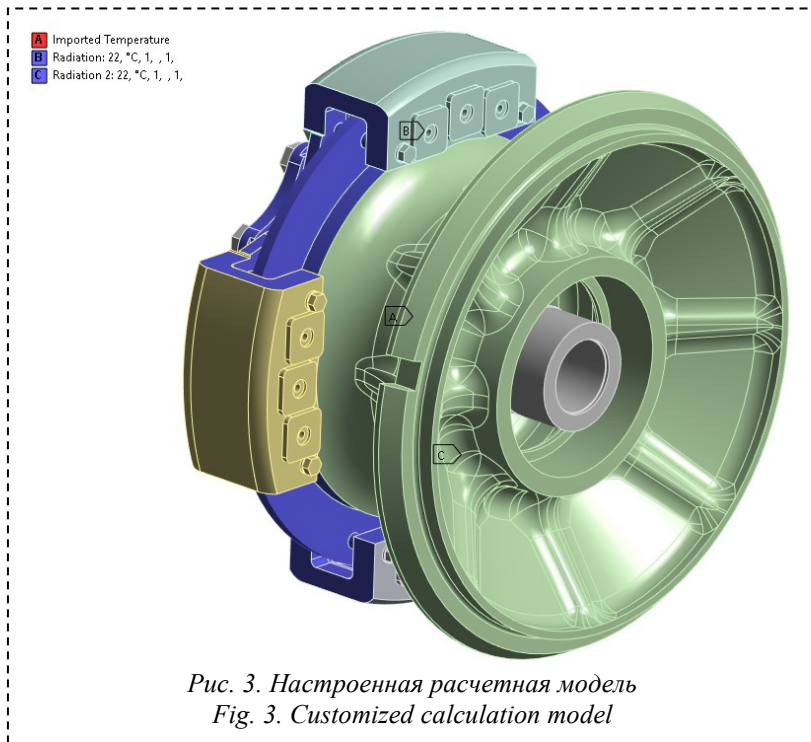


Рис. 3. Настроенная расчетная модель  
Fig. 3. Customized calculation model

вследствие того, что со снижением скорости самосвала мощность тепловыделения уменьшается. Спустя 5,8 с. самосвал полностью останавливается, у кривой пропадает колебательный характер, наблюдается уменьшение температуры за счет процессов теплопроводности и излучения.

**Выводы**

В данном исследовании рассмотрен способ численного моделирования методом конечных элементов процесса нагрева тормозного механизма карьерного самосвала при экстренном торможении. Учитывая, что при экстренном торможении самосвал останавливается за несколько секунд, моделирование разбивается на два этапа:

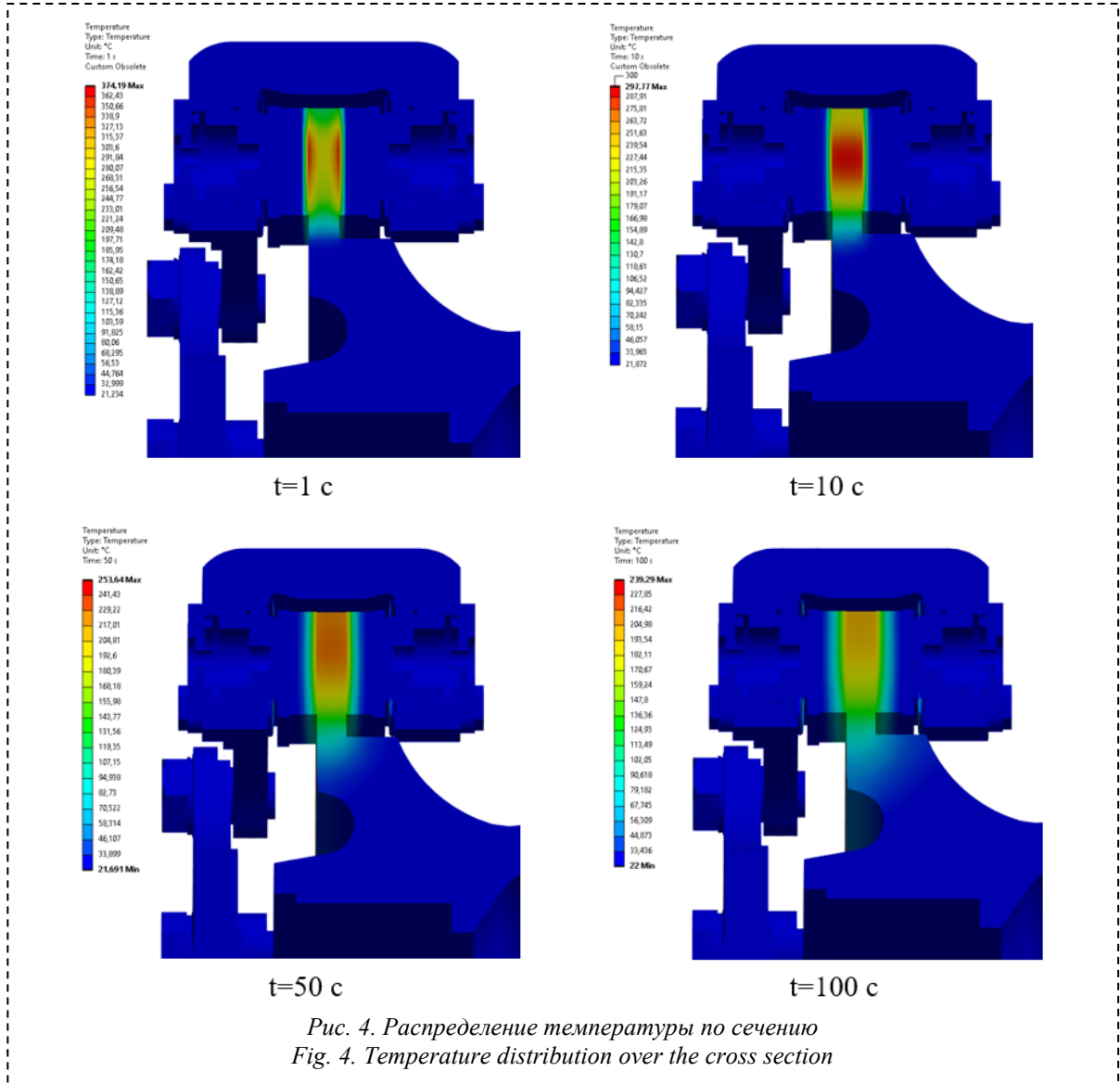


Рис. 4. Распределение температуры по сечению  
Fig. 4. Temperature distribution over the cross section

моделирование фрикционного нагрева и установления температурного равновесия в тормозном механизме. Такой подход позволяет рассмотреть тепловые процессы, протекающие во всем тормозном механизме.

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

1) Температура поршней и корпусов меняется намного медленнее, чем температура диска и колодок. Поэтому вероятность перегрева тормозной жидкости при экстренном торможении низкая.

2) После полной остановки самосвала из-за теплового излучения с поверхности диска значительно нагреваются уплотнения тормозных поршней. Это может привести к уменьшению герметичности гидравлической системы.

Сделанные выводы доказывают необходимость моделирования нагрева тормозных механизмов. Такое моделирование позволяет определить зоны повышенной тепловой нагруженности конструкции и увеличить ее надежность еще на стадии разработки.

В целях дальнейшего развития исследования нагрева тормозных механизмов планируется более подробное изучение влияния конвективного теплообмена при торможении, влияния зависимости коэффициента трения от температуры, а также рассмотрение большего количества режимов торможения. Таким образом, данное исследование будет охватывать более широкую область проблем.

#### Список литературы

1. Dubinkin D., Kartashov A., Muraviev A., Buzunov N., Khlobystov I. Study of the control algorithm of the braking system of an autonomous haul

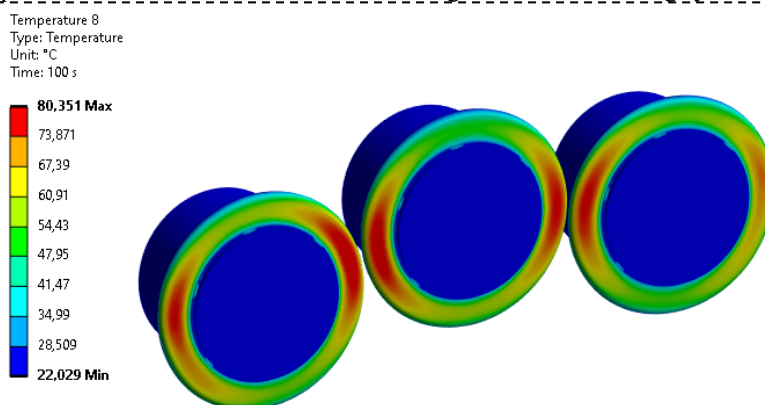


Рис. 5. Распределение температуры уплотнений тормозных поршней  
Fig. 5. Temperature distribution of brake piston seals

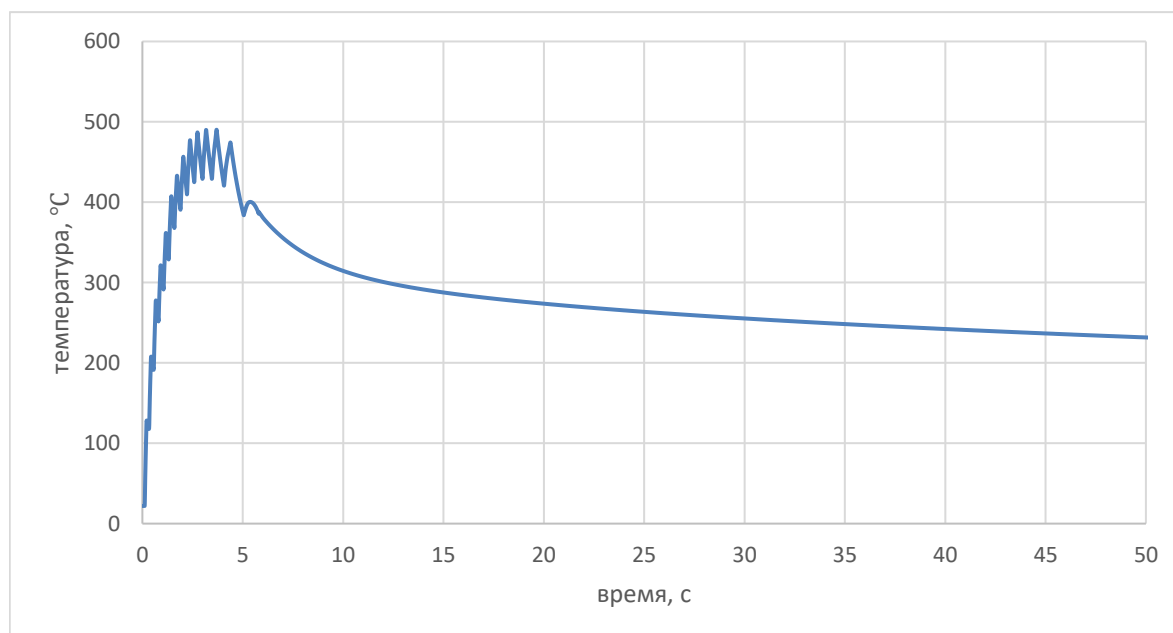


Рис. 6. Изменение температуры в точке 2 на поверхности тормозного диска  
Fig. 6. Temperature change at point 2 on the surface of the brake disc

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.

2. 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.

3. 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

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. 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/ijees13.134.

8. 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.

9. 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.

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. 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.

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. 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.

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. 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.

19. Aksenov V.V., Dubinkin D.M., Khoreshok A.A., Markov S.O., Efremkov 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. Дубинкин Д. М., Пашков Д. А. Импортнезависимость производства беспилотных карьерных самосвалов // Уголь. 2023. № 4(1166). С. 42–48. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-4-42-48.

21. Dubinkin D. M., Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Markov S. O., Efremkov 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 (ISPCIT 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., 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.

© 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

**Садовец Владимир Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; e-mail: svyu.pmh@kuzstu.ru

**Дубинкин Семен Дмитриевич** – студент КузГТУ, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; e-mail: dubinkinsd@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.

Садовец Владимир Юрьевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, подведение итогов, написание текста, обзор актуальной литературы, сбор данных.

Дубинкин Семен Дмитриевич – 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 2)

Artem A. Volosatov<sup>1</sup>, Dmitry A. Panasenkov<sup>1</sup>,  
Georgy A. Arutyunyan<sup>1</sup>, Vladimir Yu. Sadovets<sup>2</sup>,  
Semyon D. Dubinkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, KAMAZ-BAUMAN R&D

<sup>2</sup>T.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:

dump truck, brake mechanism,  
emergency braking, friction  
heating, FEM, coupled  
thermomechanical process

## Abstract.

The brake system of a dump truck is one of the main ones affecting the safety of work at the quarry. Disc brakes on dump trucks with a load capacity of more than 90 tons are used as emergency brakes, or to stop it completely. Overheating of the disc mechanisms leads to deterioration of the braking characteristics of the dump truck, and therefore to a decrease in safety at the enterprise. In this article, the second 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. The results of the first stage were used as the initial conditions for the second stage. At the second stage, the distribution of thermal energy throughout the braking system is determined. Using this method, a study was conducted on a specific brake design. The simulation results made it possible to identify areas with increased thermal load. The proposed numerical method makes it possible to efficiently and economically evaluate the thermomechanical behavior of the braking system at an early stage of development. As a result of the study, it was found that the probability of overheating of the brake fluid during emergency braking is low. After the dump truck stops completely, the seals of the brake pistons heat up significantly due to thermal radiation from the surface of the disc. This may lead to a decrease in the tightness of the hydraulic system. In order to further develop the study of heating of braking mechanisms, it is planned to study in more detail the effect of convective heat transfer during braking, the effect of the dependence of the coefficient of friction on temperature, and also consider a larger number of braking modes. Thus, this study will cover a broader area of problems

**For citation:** Volosatov A.A., Panasenkov D.A., Arutyunyan G.A., Sadovets V.Yu., Dubinkin S.D. Modeling of thermodynamic processes in disc brakes of mining machinery using the finite element method (part 2). *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*—Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 3(163):78-87. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-78-87, EDN: OKZHFA

## 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. 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 imitation models. *E3S Web of Conferences: VIth International Innovative Mining Symposium*. 2021; 315: 03021. Kemerovo: EDP Sciences; 2021.



2. 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.
3. 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.
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. *Coal*. 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., 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.
8. 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. *Ugol*. 2023; 11(1173):65–71. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-65-71.
9. 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.
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 lifting 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. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. Determination of the parameters of the coal model for simulation modeling of loading and unloading of the cargo platform of a dump truck. *Ugol*. 2023; S12(1175):4–10. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-4-10.
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. 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; 402. Novosibirsk, Russia: EDP Sciences; 2023. P. 10022. DOI: 10.1051/e3sconf/202340210022
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. 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.
19. Aksenov V.V., Dubinkin D.M., Khoreshok A.A., Markov S.O., Efremkov A.B., Tyulenev M.A. Evaluating the impact of excavator bucket capacity on the output of a haul truck in different variations 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.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.
21. Dubinkin D. M., Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Markov S. O., Efremkov 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., Nozirzoda Sh.S. Some credentials 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., 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.

© 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.

**Vladimir Yu. Sadovets** - Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Kemerovo, Russian Federation, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev. T.F. Gorbachev; e-mail: pashkovda@kuzstu.ru

**Semyon D. Dubinkin** - student of KuzSTU, Kemerovo, Russian Federation, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev. T.F. Gorbachev; e-mail: dubinkinsd@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.

Vladimir Yu. Sadovets - statement of research problem, conceptualisation of the study, data analysis, summarising, writing, review of current literature, data collection.

Semyon D. Dubinkin - 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.*

