

УДК 62-592 : 004.94

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДИСКОВОГО ТОРМОЗА

СУХАНОВА О. А.

Кафедра графики, Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", ул. Кирова, 34, 246653, Гомель, Беларусь, тел. +375 (232) 95-39-66, e-mail: ol_suhan@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5651-7090

Аннотация. *Цель.* Опыт эксплуатации тормозов транспортных средств показывает наличие износа и повреждений, появление которых не в полной мере соответствует результатам аналитических расчетов. Существующие методы численного анализа позволяют выполнять расчет контактного взаимодействия диска и колодки только на высокопроизводительных компьютерах. Целью данного исследования стала разработка методики расчета динамического контактного взаимодействия тел, моделирующих элементы тормозных систем, которую можно реализовать на персональном компьютере. *Методика.* Выполнено конечно-элементное моделирование динамического контактного взаимодействия тормозного диска с колодкой в программе ANSYS/LS-DYNA. Принималось, что материалы диска и колодки обладают упругопластическими свойствами. При создании конечноэлементной сетки использован восьмиузловой объемный элемент SOLID164 и оболочечный четырехузловой SHELL163. *Результаты.* Установлено распределение напряжений и пластических деформаций на контактных поверхностях тормозного диска и колодки при разном их разбиении сеткой конечных элементов. Показано, что в местах расположения узлов чрезмерно крупной конечно-элементной сетки наблюдаются экстремумы пластических деформаций. Приведены зависимости изменения величины пластической деформации в разных точках тормозного диска от времени. Показано, что основной вклад в пластические деформации вносят первый и второй обороты диска. *Научная новизна.* Разработана методика конечно-элементного решения задачи о динамическом контактном взаимодействии элементов дискового тормоза, позволяющая оценить значения максимально допустимых деформаций, а с ними и сил прижатия тормозной колодки, при которых пластические деформации наблюдаться не будут. *Практическая значимость.* Применение разработанной методики решения динамической контактной задачи позволяет осуществить моделирование на персональных компьютерах, не имеющих высокой производительности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых конструкций элементов дискового тормоза, обладающих улучшенными триботехническими свойствами.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование; контактное взаимодействие; тормозной диск; колодка

КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ДИСКОВОГО ГАЛЬМА

СУХАНОВА О. А.

Кафедра графіки, Установа освіти "Білоруський державний університет транспорту", вул. Кірова, 34, 246 653, Гомель, Білорусь, тел. +375 (232) 95-39-66, e-mail: ol_suhan@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5651-7090

Анотація. *Мета.* Досвід експлуатації гальм транспортних засобів показує наявність зносу і пошкоджень, поява яких не в повній мірі відповідає результатам аналітичних розрахунків. Існуючі методи чисельного аналізу дозволяють виконувати розрахунок контактної взаємодії диска і колодки тільки на високопродуктивних комп'ютерах. Метою даного дослідження стала розробка методики розрахунку динамічної контактної взаємодії тіл, що моделюють елементи гальмівних систем, яку можна реалізувати на персональному комп'ютері. *Методика.* Виконано кінцево-елементне моделювання динамічної контактної взаємодії гальмівного диска з колодкою в програмі ANSYS / LS-DYNA. Приймалося, що матеріали диска і колодки мають пружнопластичні властивості. При створенні кінцево-елементної сітки використаний восьмиузловий об'ємний елемент SOLID164 і оболончатий чотирехвузловий SHELL163. *Результати.* Встановлено розподіл напружень і пластичних деформацій на контактних поверхнях гальмівного диска і колодки при різному їх розбитті сіткою кінцевих елементів. Показано, що в місцях розташування вузлів надмірно великої кінцево-елементної сітки спостерігаються екстремуми пластичних деформацій. Наведені залежності зміни величини пластичної деформації в різних точках гальмівного диска від часу. Показано, що основний внесок в пластичні деформації вносить перший і другий обороти диска. *Наукова новизна.* Розроблено методику кінцево-елементного рішення задачі динамічної контактної взаємодії елементів дискового гальма, що дозволяє оцінити значення максимально допустимих деформацій, а з ними і сил притиснення гальмівної колодки, при яких пластичні деформації спостерігатися не будуть. *Практична значимість.* Застосування розробленої методики вирішення динамічної контактної задачі дозволяє здійснити моделювання на персональних комп'ютерах, які не мають високої продуктивності. Отримані результати можуть бути використані при розробці нових конструкцій елементів дискового гальма, які мають поліпшені триботехнічні властивості.

Ключові слова: кінцево-елементне моделювання; контактна взаємодія; гальмівний диск; колодка

FINITE ELEMENT MODELING OF DISC BRAKE ELEMENTS INTERACTION

SUKHANOVA V. A.

Department of Graphics, Education Establishment “Belarusian State University of Transport”, 34, Kirova str., Gomel 246653, Belarus, tel. +375 (232) 95-39-66, e-mail: ol_suhan@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-5651-7090

Abstract. Purpose. Experience in the operation of the brakes of vehicles shows the presence of wear and damage, the appearance of which does not fully satisfy to the results of analytical computations. Existing methods of numerical analysis make it possible to perform computations the contact interaction of a disk and a brake pad only by using high-performance computers. The purpose of this research is to develop numerical solution methods for computations the dynamic contact interaction of bodies simulating the elements of braking systems which can be realized on a personal computer. **Methodology.** Finite element modeling of the dynamic contact interaction of brake disk with a brake pad in the ANSYS / LS-DYNA software is proposed. It was assumed that the materials of the disc and the pad have elastoplastic properties. When creating a finite element grid, an eight-node volumetric element SOLID164 and a four-layer shell SHELL163 are used. **Findings.** The allocation of stresses and plastic deformations on the contact surfaces of the brake disc and pad is determined for different mesh splitting of the finite elements. It is shown that extremes of plastic deformations are observed near the nodes of a larger finite element mesh. Dependences of the dimension of plastic deformation at different points of brake disk versus time are presented. It is shown that the first and second disk rotations make the main contribution to plastic deformations. **Originality.** A method for the finite element solution of the problem of dynamic contact interaction of disc brake elements has been developed, which makes it possible to estimate the values of the maximum allowable deformations, and the forces of pressing the brake pad, in which plastic deformations will not be observed. **Practical value.** The application of the developed method for solving the dynamic contact problem allows for simulation on personal computers that do not have high performance. The obtained results can be used in the development of new designs of disc brake elements with improved tribotechnical properties.

Keywords: finite element modeling; contact interaction; brake disc; brake pad

Введение

При эксплуатации тормозных устройств трущиеся детали изнашиваются неравномерно. Это обусловлено характером распределения контактных давлений при фрикционном тепловыделении, колебаниями элементов пары трения, дефектами геометрии при изготовлении трибосопряжений, износом контактирующих поверхностей [8, 9, 11, 12]. Для изучения свойств и возможности управления сложной физической системой необходимо иметь ее реальную динамическую модель, что весьма затруднительно, а проведение экспериментального анализа затратно. Поэтому в настоящее время успешно развивается и совершенствуется компьютерное моделирование, основанное на численных методах. Проводятся исследования, посвященные анализу процессов термомеханического контакта в паре диск-колодка. Так для исследования фрикционного контакта в паре трения автомобильный тормозной диск – колодка применялся метод подвижных клеточных автоматов [3]. Граничный слой скольжения при этом рассматривался, как некоторое третье тело, возникновение которого обусловлено процессами износа. В работах [10, 13] исследовано распределение температурных полей сплошного и вентилируемого диска для определения критической температуры ротора в программном комплексе ANSYS. В статье [7] выполнен расчет температурного поля фрикционной пары диск – колодка, установлено влияние величины каналов в структуре диска на степень прогрева системы и тормозящий момент. В работе [2]

исследованы механические и тепловые напряжения в сплошных тормозных дисках, а также их градиенты в процессе торможения исходя из энергонагруженности с использованием ANSYS Workbench. При этом учитывалось напряженное состояние вблизи вершин микротрещин, развивающихся на поверхности диска.

Однако даже при высоком уровне современной автоматизации вычислений решение динамических контактных задач занимает длительное время. Эту проблему пытаются решить различными способами: изменяют временной шаг, оказывающий существенное влияние на устойчивость и точность численных методов решения нестационарных задач; корректируют настройки свойств контактных пар и сетку конечных элементов. Так в работе [1] установлены диапазоны значений параметров контактной жесткости и допустимого проникновения, при которых обеспечивается сходимость решения задачи о контактном взаимодействии с диском тел, имеющих сферическую поверхность, в среде программного комплекса ANSYS. Авторами статьи [4] разработана методика определения напряжений и температурных полей в деталях дискового тормоза скоростного вагона методом прямого математического моделирования, который менее требователен к мелкому шагу по времени. В работе также отмечено, что методика использования элементов высоких порядков точности для расчета сложных конструкций проработана недостаточно. В статье [5] предложено решение контактной задачи методом

конечных элементов с использованием моделей, содержащих слой элементов пониженной жесткости путем изменения модуля упругости материала. Авторы отмечают достаточную точность определения напряженного состояния в области контакта при использовании данного метода даже при небольшом количестве степеней свободы.

Таким образом, в настоящее время решены некоторые задачи контактного взаимодействия элементов тормозной системы, однако для этого потребовалось применение высокопроизводительных компьютеров, так как однократный расчет на персональном компьютере часто требует недели и более.

Цель

Разработка методики конечноэлементного расчета динамического контактного взаимодействия тел, моделирующих элементы тормозных систем, которая может быть реализована на персональных компьютерах за приемлемое время.

Методика

Разработана конечно-элементная модель элементов системы тормозной диск – колодка в среде ANSYS/LS-DYNA. Геометрическая форма диска (рис. 1) представляет объем, составленный из двух цилиндров с длинами образующих 20 и 50 мм, наружным диаметром 150 и 140 мм соответственно, имеющих общее сквозное отверстие диаметром 100 мм. Тормозная колодка толщиной 20 мм имеет форму сектора с внешним и внутренним радиусами 75 и 50 мм соответственно. Материал элементов модели – сталь с модулем упругости 200 ГПа, коэффициентом Пуассона 0,3.

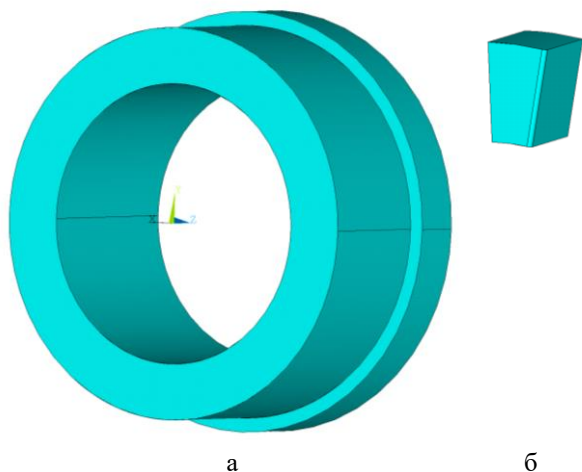


Рис. 1. Геометрическая модель: а – диска, б – колодки / Geometrical model: a – of disc, b – of brake pad

Для создания конечноэлементной сетки использовались восьмиузловой объемный элемент SOLID164 и оболочечный четырехузловой SHELL163. Созданный тип контактной пары «поверхность – поверхность». Коэффициент трения

принимался равным 0,2. В качестве граничных условий для колодки использовался запрет перемещений по всем направлениям кроме оси, перпендикулярной поверхности контакта. График движения колодки вдоль названной оси приведен на рис. 2. Для диска задавался угол поворота вокруг оси симметрии системы. Построенная конечноэлементная модель приведена на рис. 3.

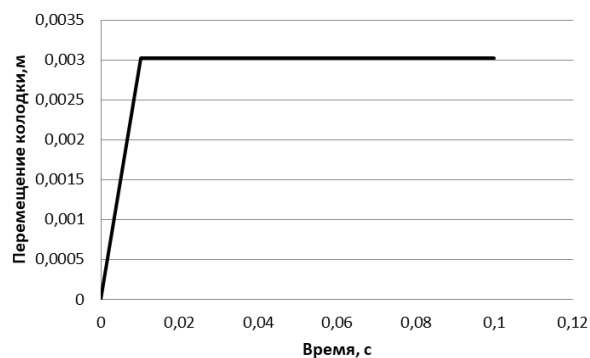


Рис. 2. График движения колодки / Graph for motion of brake pad

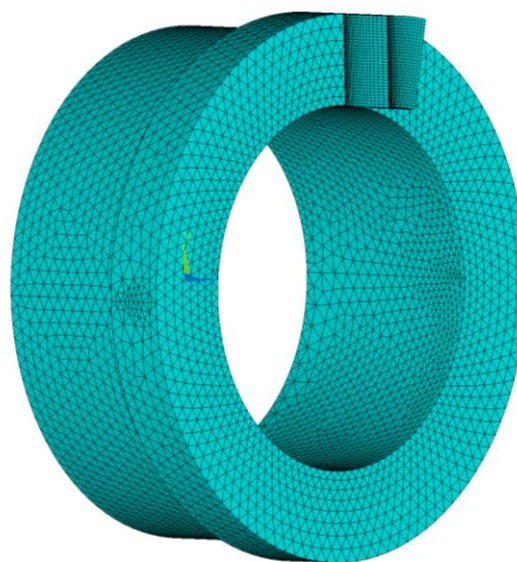


Рис. 3. Конечноэлементная модель взаимодействия деталей дискового тормоза / Finite element model of disc brake parts interaction

Результаты

В реальных конструкциях дисковых тормозов центральный угол сектора колодки близок к 90 градусам. При мелкой конечноэлементной сетке расчет на персональном компьютере для одного оборота диска занял более недели. Проведены расчеты для разных центральных углов, определяющих размеры сектора колодки. Выполненный анализ показал, что картина распределения напряжений и деформаций практически не меняется при значениях центрального угла, 12 градусов. Если же центральный угол оказывается меньшим указанного

значения, то значительным становится изгиб колодки, существенно изменяется картина напряжений. Поэтому для сокращения времени расчетов дальнейший анализ проводился при значении центрального угла 12 градусов.

Расчеты для случая незакругленного набегающего ребра колодки показали, что в нем возникают большие напряжения, которые свидетельствуют о разрушении материала. Поэтому в области набегающего ребра колодки на диск выполнено скругление. Проведен конечно-элементный анализ влияния размеров сетки на напряженно-деформированное состояние элементов дискового тормоза. Расчеты показали, что при крупной сетке конечных элементов вблизи ее узлов наблюдаются экстремумы пластических деформаций (рис. 4, а).

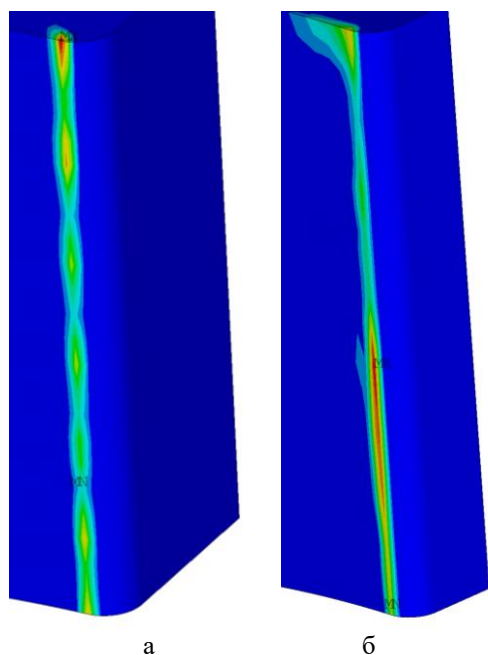


Рис. 4. Эквивалентные по Мизесу пластические деформации колодки: а – общее количество элементов модели 96717, б – общее количество элементов модели 267459 / Equivalent von Mises plastic strain of brake pad: a – full number of model elements 96717, b – full number of model elements 267459

Это обусловлено увеличенной жесткостью модели в местах соединения узлов и свидетельствует о необходимости использования более мелкой сетки. Увеличение числа элементов вдоль ребра колодки с 8 до 30 позволило решить проблему (рис. 4, б).

Не реалистичная картина распределения пластических деформаций наблюдается при крупной сетке конечных элементов и на диске. Уменьшение размера сетки позволило получить адекватные результаты (рис. 5).

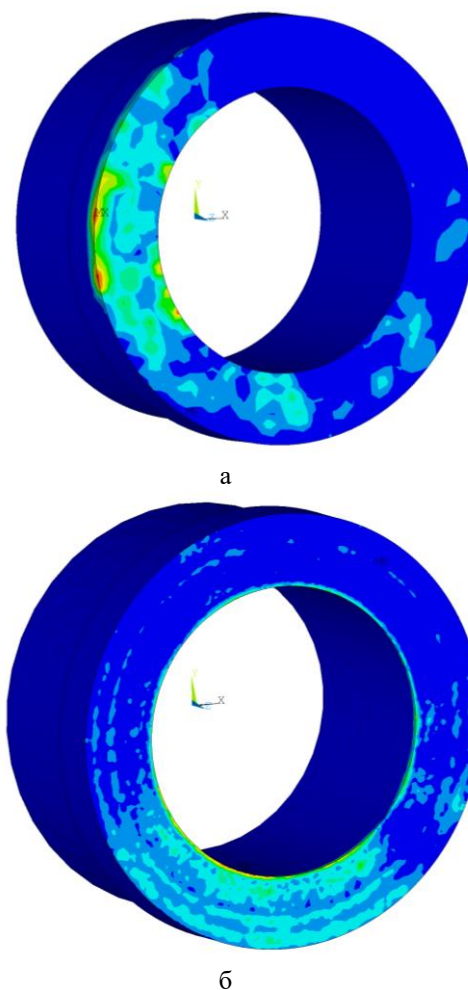


Рис. 5. Эквивалентные по Мизесу пластические деформации диска: а – общее количество элементов модели 96717, б – общее количество элементов модели 267459 / Equivalent von Mises plastic strain of disc: a – full number of model elements 96717, b – full number of model elements 267459

Был проанализирован характер распределения пластической деформации вблизи контактной поверхности диска в зависимости от времени. На рис.6 приведены соответствующие графики для трех различных точек конечноэлементной сетки диска.

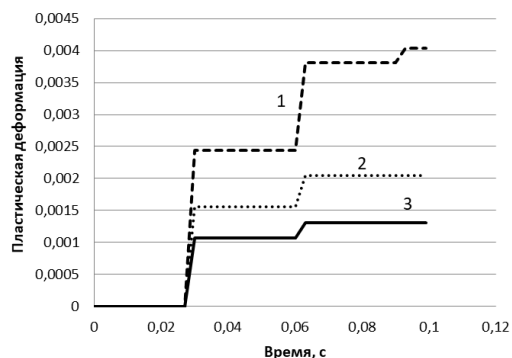


Рис. 6. График изменения пластической деформации для трех точек тормозного диска / Graph of plastic strain for three points of the brake disc

Результаты расчета показали, что основной вклад в пластические деформации вносят первый и второй обороты диска. При дальнейшем движении диска они увеличиваются незначительно. Регулируя величину перемещения колодки (рис. 2) можно добиться снижения сил прижатия, а также уйти от пластических деформаций.

прижатия тормозной колодки, при которых пластические деформации наблюдаться не будут. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых конструкций элементов дискового тормоза, обладающих улучшенными триботехническими свойствами.

Вывод

Научная новизна и практическая значимость

В ходе исследования разработана методика конечно-элементного моделирования динамического контактного взаимодействия элементов дискового тормоза, которая позволяет оценить значения максимально допустимых деформаций, а с ними и сил

Разработанная методика решения динамической контактной задачи позволяет осуществить моделирование в течение приемлемого времени на персональных компьютерах, что дает возможность оперативной коррекции исходных данных и ускорения процесса разработки изделия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ точности и сходимости решения контактных задач с применением программного комплекса ANSYS / А. О. Шимановский, О. А. Суханова // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2016. – Вып. 5. – С. 180-184.
2. Возный А. В. Напряженно-деформированное состояние металлического фрикционного элемента дисково-колодочного тормоза (часть вторая) / А. В. Возный // Проблемы трения и износа. – 2016. – № 1(70). – С. 47-57. – Режим доступа: <http://docplayer.ru/29092383-Issn-problems-of-friction-and-wear-2016-1-70-47.html>.
3. Дмитриев А. И. Моделирование локального фрикционного контакта на примере пары трения автомобильный тормозной диск – колодка / А. И. Дмитриев // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4(4). – С. 1470-1472. – Режим доступа: http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/19931778_2011_4-4_unicode/54.pdf.
4. Моисеенко М. А. Моделирование температурных полей в деталях дискового тормоза / М. А. Моисеенко, В. И. Сакало // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2009. – № 2(22). – С. 57-64. – Режим доступа: <http://www.docme.ru/doc/1106482/276.vestnik-bryanskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-unive>.
5. Применение конечноэлементных моделей со слоями пониженной жесткости для решения контактных задач / А. В. Сакало, В. И. Сакало // Компьютерное моделирование на железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ : сб. тез. / БГТУ. – Брянск, – 2016. – С. 78-81. – Режим доступа: <http://www.umlalab.ru/workshops/2016/umworkshop2016abstracts.pdf>.
6. Суханова О. А. Моделирование работы дисковых тормозов методом конечных элементов / О. А. Суханова // Механика. Исследования и инновации. – 2017. – Вып. 10. – С. 192-196. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34965546>.
7. Чебаков М. И. Моделирование контактного взаимодействия элементов дискового тормоза / М. И. Чебаков, А. А. Ляпин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 14. – С. 36-39. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-kontaktного-vzaimodeystviya-elementov-diskovogo-tormoza>.
8. Чичинадзе А. В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше. – Москва : Машиностроение, 2001. – 664 с.
9. Abdel-Naser A. Squeal analysis of ventilated disc brake using ansys / A. Abdel-Naser, I. Ahmed, E. Allam, S. Allam, Sh. Abouel-seoud // International Journal of Energy and Environment. – 2012. – Vol. 3, Issue. 5. – P. 809-832. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/267407506>.
10. Agnihotri V. Optimized Thermo-Structural Analysis of Solid and Vented Disc Brake Using Finite Element Method (A Case Study) / V. Agnihotri, Dr. M.K. Chopra // Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2014. – Vol. 11, Issue. 4. – P. 40-49. – Режим доступа: <http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol11-issue4/Version-5/G011454049.pdf>.
11. Rashid A. Overview of Disc Brakes and Related Phenomena – a review / A. Rashid // International Journal of Vehicle Noise and Vibration. – 2014. – Vol. 10, № 4. – P. 257-301. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/280761396>.
12. Sergienko V. P. Noise and vibration in friction systems / V. P. Sergienko, S. N. Bukharov. – Cham : Springer, 2014. – 251 p.
13. Thermal analysis of both ventilated and full disc brake rotors with frictional heat generation / A. Belhocine, C.-D. Cho, M. Nouby, Y.B. Yi, A.R. Abu Bakar // Applied and Computational Mechanics. – 2014. – Vol. 8. – P. 5-24. – Режим доступа: <https://www.scribd.com/document/237118112>.

REFERENCES

1. Shimanovsky A.O., Sykhanova O.A. *Analiz tochnosti i skhodimosti resheniya kontaktnykh zadach s primeneniym programmnoy kompleksa ANSYS* [Analysis of the accuracy and convergence of the contact problems solutions with the use of ANSYS Software]. *Aktualnyye voprosy mashinovedeniya* [Topical Issues of Mechanical Engineering]. Proc. of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus. Minsk, 2016, no. 5, pp. 180-184. (in Russian).
2. Voznyi A.V. *Napriazhenno-deformirovannoye sostoyaniye metallicheskogo friksionnogo elementa diskovo-kolodochnogo tormoza (chast vtoraya)* [The deflected mode of metal friction element of disc brake (par two)]. *Problemy tritia ta znoshuvannia* [Problems of friction and wear]. 2016, no. 1(70), pp. 47-57. Available at: <http://docplayer.ru/29092383-Issn-problems-of-friction-and-wear-2016-1-70-47.html>. (in Russian).

3. Dmitriyev A.I. *Modelirovaniye lokalnogo friktsionnogo kontakta na primere pary treniya avtomobilnyy tormoznoy disk – kolodka* [Modeling the local frictional contact using the example of a friction pair automotive brake pad – disc]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky state university of Nizhni Novgorod]. 2011, no. 4(4), pp. 1470-1472.. Available at: http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/19931778_2011_4-4_unicode/54.pdf. (in Russian).
4. Moiseyenko M.A., Sakalo V.I. *Modelirovaniye temperaturnykh poley v detaliyakh diskovogo tormoza*. [Simulation of the temperature fields of the disk brake details]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific and technical journal of Bryansk state technical university]. 2009, no. 2(22), pp. 57-64.. Available at: <http://www.docme.ru/doc/1106482/276.vestnik-bryanskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-unive>. (in Russian)
5. Sakalo A.V., Sakalo I.V. *Primeneniye konechnoelementnykh modeley so sloiami ponizhennoy zhestkosti dlia resheniia kontaktnykh zadach* [Application of finite element models with layers of reduced rigidity for the solution of contact problems]. *Kompiuternoye modelirovaniye na zheleznodorozhnom transporte: dinamika, prochnost, iznos* [Computer simulation in railway transport: dynamics, strength, wear]. BSTY. Bryansk, 2016, pp. 78-81.. Available at: <http://www.unlab.ru/workshops/2016/umworkshop2016abstracts.pdf>. (in Russian)
6. Sykhanova O.A. *Modelirovaniye raboty diskovykh tormozov metodom konechnykh elementov* [Modeling of the work of disk brakes by the method of finite elements]. *Mekhanika. Issledovaniia i innovatsii* [Mechanics. Researches and innovations]. Belarusian state university of transport. Gomel, 2017, vol. 10, pp. 192-196.. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34965546>. (in Russian)
7. Chebakov M.I., Liapin A.A. *Modelirovaniye kontaktnogo vzaimodeystviya elementov diskovogo tormoza* [Modeling of contact interaction for disc brakes elements]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Yestestvennyye nauki* [University news. North-caucasian region. Natural sciences series]. 2016, no. 14, pp. 36-39.. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-kontaktного-vzaimodeystviya-elementov-diskovogo-tormoza>. (in Russian)
8. Chichinadze A.V., Braun E.D., Bushe N.A. *Osnovy tribologii (treniye, iznos. smazka)* [Foundations of tribology (friction, wear, lubrication)]. Moscow: Mechanical engineering, 2001, 664. (in Russian).
9. Abdel-Naser A., Ahmed I., Allam E., Allam S., Abouel-seoud Sh. *Squeal analysis of ventilated disc brake using ansys*. *International Journal of Energy and Environment*. 2012, vol. 3, issue. 5, pp. 809-832. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/267407506>.
10. Agnihotri V., Chopra Dr. M.K. *Optimized Thermo-Structural Analysis of Solid and Vented Disc Brake Using Finite Element Method (A Case Study)*. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2014, vol. 11, issue. 4, pp. 40-49. Available at: <http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol11-issue4/Version-5/G011454049.pdf>.
11. Rashid A. *Overview of disc brakes and related phenomena – a review*. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*. 2014, vol. 10, no. 4, pp. 257-301. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/280761396>.
12. Sergienko V.P., Bukharov S.N. *Noise and vibration in friction systems*. Cham : Springer, 2014, 251 p.
13. Belhocine A., Cho C.-D., Nouby M., Yi Y.B. and Abu Bakar A.R. *Thermal analysis of both ventilated and full disc brake rotors with frictional heat generation*. *Applied and Computational Mechanics*. 2014, vol. 8, pp. 5-24. Available at: <https://www.scribd.com/document/237118112>