

В. И. Прокопьев¹, Т. В. Жданова¹, Б. С. Кушхов²

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА И РЕЛЬСА ПРИ КОНТАКТЕ

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

²ЗАО «Фодд», г. Москва, Россия

Аннотация. В статье перечислены методы, реализованные в программе ANSYS Mechanical, для решения контактных задач механики: метод множителей Лагранжа, метод штрафа, комбинация методов множителей Лагранжа и штрафа, метод ограничений во внутренних точках. Приводятся результаты примера анализа напряжённо-деформированного состояния контакта колеса и рельсы железнодорожного транспорта с максимально приближенной к реальности геометрией в статической постановке по программе ANSYS Mechanical.

Ключевые слова: контактные задачи, метод множителей Лагранжа, метод штрафа, метод ограничений, ANSYS, напряжённо-деформированное состояние, колесо, рельс, железнодорожный транспорт.

УДК: 539.3

При проектировании надежных и энергосберегающих технических устройств одной из важнейших задач является определение контактной прочности элементов соединений. Большие значения напряжений в области контакта железнодорожного колеса и рельса приводят к износу контактирующих поверхностей [1]. Решение задач контактного взаимодействия с учётом нелинейностей материала, как правило, возможно,

© Прокопьев В. И., Жданова Т. В., Кушхов Б. С., 2017

Прокопьев Валерий Иванович

e-mail: prokorievvi@mgsu.ru, кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры прикладной математики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия.

Жданова Татьяна Владимировна

e-mail: zhdanovatv@mgsu.ru, ассистент кафедры прикладной математики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия.

Кушхов Барасби Султанович

e-mail: zhdanovatv@mgsu.ru, Специалист ЗАО «Фодд», г. Москва, Россия.

Поступила 02.09.2017

лишь при использовании численных методов [2]. В настоящее время широко используется метод конечных элементов, реализованный в ряде известных комплексов программ для персональных компьютеров [3, 4]. Данная статья иллюстрирует использование программы ANSYS Mechanical для анализа напряжённо-деформированное состояния в области контакта колеса и рельсы железнодорожного транспорта.

В контактных задачах неизвестна зона контакта до решения задачи. В зависимости от нагрузок, свойств материала, граничных условий и других факторов поверхности могут входить в контакт друг с другом и выходить из него внезапно и непредсказуемо. С другой стороны, в зоне контакта необходимо учитывать трение взаимодействующих контактирующих поверхностей, что может сказаться на процессе сходимости при компьютерном моделировании.

Влияние шероховатости поверхностей на трение в контактирующих телах впервые было исследовано Боуденом и Тейбором в середине XX-го столетия, что привело к расширению направлений исследований в трибологии и возрождению идей Кулона об адгезии как о возможном механизме трения. К новаторским работам в этой области относятся труды Арчарда (1957), Гринвуда и Вильямсона (1966), Буша (1975) и Перссона (2002). Одним из важнейших толчков к точным расчетам условий нагрузки в контакте стало развитие железнодорожного транспорта, поскольку напряжения в области взаимодействия колесо-рельс могут достигать предельной допустимой нагрузки для стали. Исследования взаимодействующих контактирующих поверхностей в последующие годы отражены [5-11], что позволило сформулировать соответствующие математические модели. Компьютерное моделирование расчетных схем решения контактных задач описывается в [12].

В ANSYS Mechanical [13] реализованы следующие алгоритмы:

- метод множителей Лагранжа (Augmented Lagrangian, KEYOPT(2)=0);
- метод штрафа (Penalty method, KEYOPT(2)=1);
- метод множителей Лагранжа в направлении нормали к поверхности контакта и метод штрафа в направлении касательной (KEYOPT(2)=3);
- метод множителей Лагранжа в направлении нормали к поверхности контакта и касательной (KEYOPT(2)=4);
- метод ограничений во внутренних точках (internal multipoint constraint (MPC), KEYOPT(2) = 2).

Для моделирования контакта используются следующие модели: “поверхность–поверхность”, “узел–поверхность”, “узел–линия”, “узел–узел”.

Каждый тип модели использует разные наборы контактных элементов и применяется для решения разных задач.

Рассмотрим тип контакта “узел-поверхность”.

Для представления контакта и скольжения между двумя поверхностями (или между узлом и поверхностью или между линией и поверхностью) в двумерном (2D) или трехмерном (3D) пространствах может использоваться элемент CONTA175. Контакт происходит при внедрении контактного узла в элемент ответной поверхности TARGE169 или TARGE170 (рис. 1).

Методы контроля совместности гарантируют, что одна поверхность не будет внедряться в другую более чем на приемлемую величину. Это может быть выполнено при помощи вышеперечисленных алгоритмов.

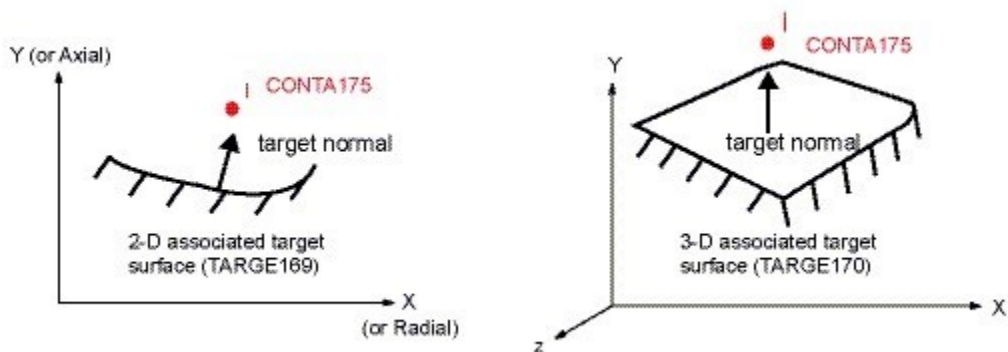


Рис. 1. Тип контакта «узел-поверхность»

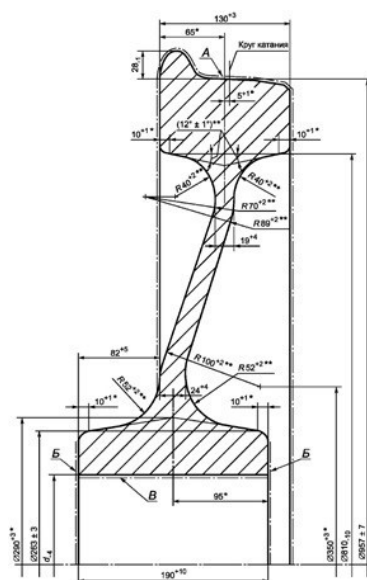


Рис. 2. Конструкция и размеры колеса типа А1

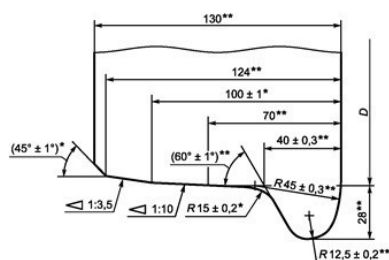


Рис. 3. Конструкция и размеры профиля обода колеса

Рассматривается расчёт контакта колеса и рельса с максимально приближенной к реальности геометрией в статической постановке. В качестве примера возьмём наиболее распространённое железнодорожное колесо А1 – цельнокатаные с плоскоконическим диском [14] и рельс типа Р65 [15].

Конечноэлементная модель представлена на рис. 5 и 6.

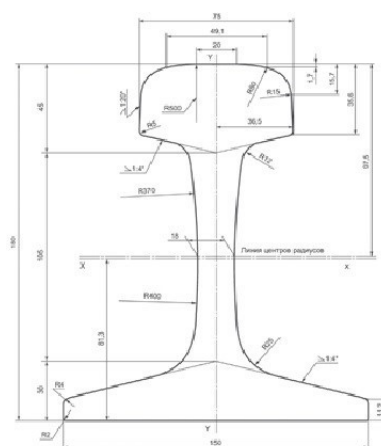


Рис. 4. Конструкция и размеры рельса типа Р65

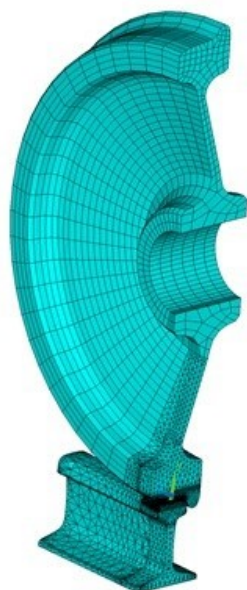


Рис. 5. Конечно-элементная модель системы колесо-рельса
(количество конечных элементов 118002)

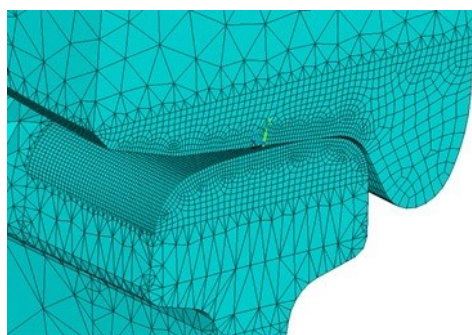


Рис. 6. Конечно-элементная модель системы колесо-рельса (в масштабе)

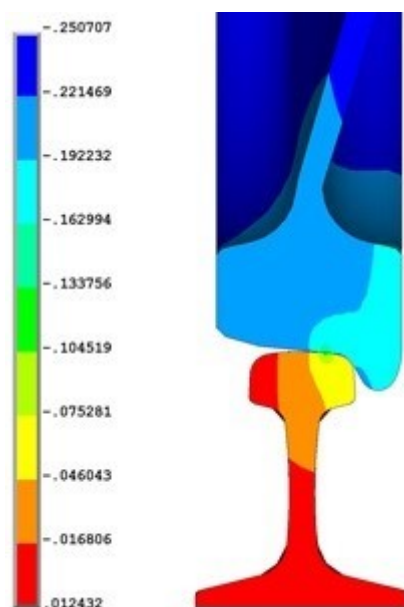


Рис. 7. Изополя перемещений

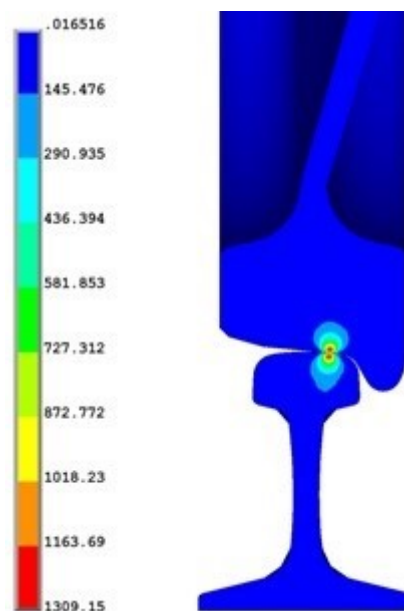


Рис. 8. Изополя напряжений по Мизесу

Для колеса и рельса использовались материалы со следующими механическими свойствами:

Колесо: $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$, $\sigma_T = 820$ МПа, модуль упрочнения $E_{упр} = 2.1 \cdot 10^2$ МПа.

Рельса: $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$, $\sigma_T = 1080$ МПа, модуль упрочнения $E_{упр} = 2.1 \cdot 10^2$ МПа.

Коэффициент трения $\mu = 0.15$.

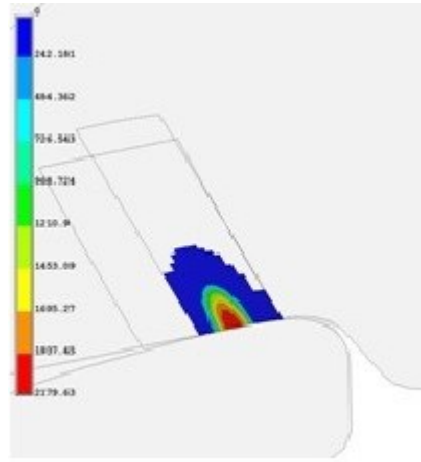


Рис. 9. Изополя контактного давления в тестовом расчёте

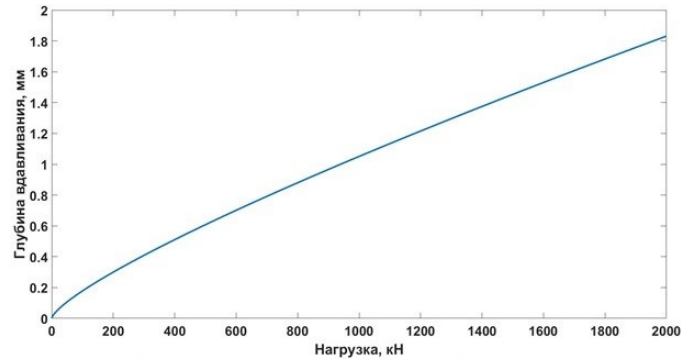


Рис. 10. Зависимость глубины вдавливания d от величины нагрузки F для численного решения ($max=1.83$ мм).

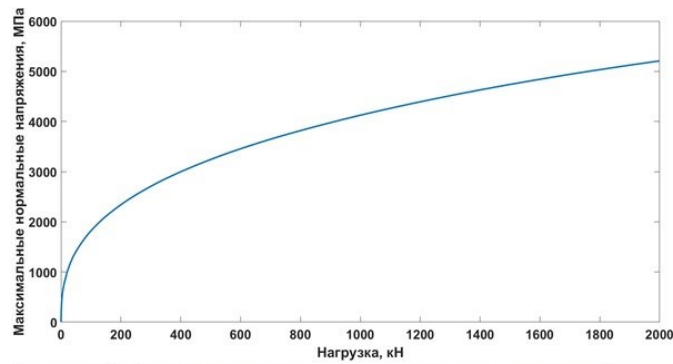


Рис. 11. Зависимость максимальных нормальных напряжений σ_{max} от величины нагрузки F для численного решения ($max = 5208$ МПа)

Модуль упрочнения используется в постановке, учитывающей нелинейные свойства материала, трение и геометрическую нелинейность.

Конструкция и размеры колеса и рельса представлены на рис. 2, 3 и 4.

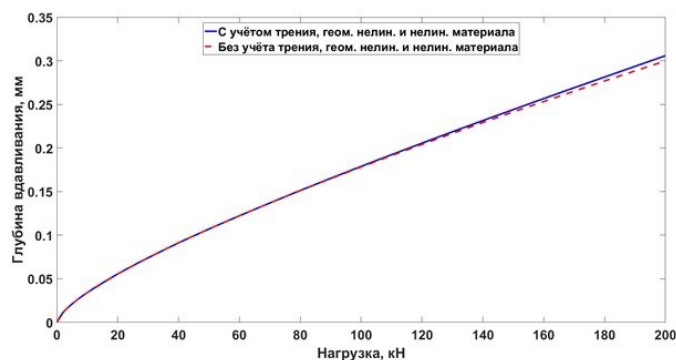


Рис. 12. Зависимость глубины вдавливания d от величины нагрузки F для численных решений с учётом ($max = 0,31$ мм) и без учёта ($max = 0,30$ мм) трения, геометрической нелинейности и нелинейных механических свойств материала.

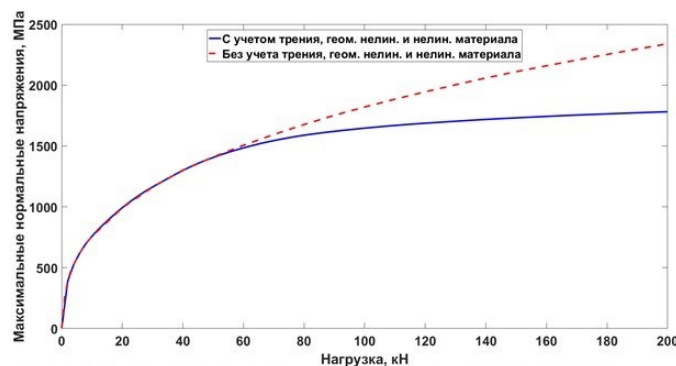


Рис. 13. Зависимость максимальных нормальных напряжений σ_{max} величины нагрузки F для численных решений с учётом ($max = 1782$ МПа) и без учёта ($max = 2340$ МПа) трения, геометрической нелинейности и нелинейных механических свойств материала

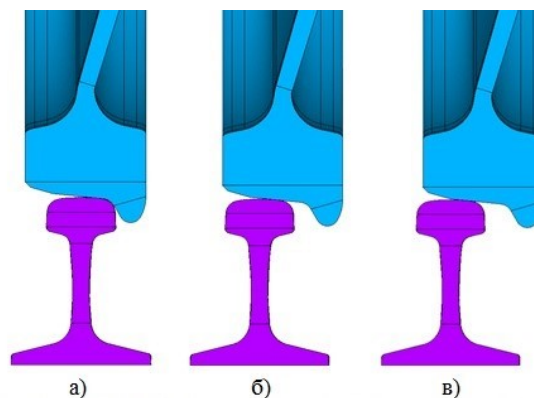


Рис. 14. Различные положения колеса на рельсе а) центральное положение, б) смещение на 2 см. в) смещение на 3 см

Для иллюстрации вида изополей перемещений, напряжений по Мизесу и контактного давления в области колеса проводился дополнительных расчёт на действие кинематической нагрузки: перемещение, равное 0,25мм, приложенное к ступице колеса и направленное к рельсу. Результаты расчёта показаны на рис. 7, 8, 9.

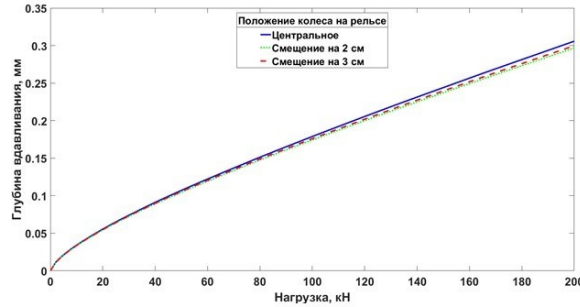


Рис. 15. Зависимость глубины вдавливания d от величины нагрузки F для различных положений колеса на рельсе с учётом трения, геометрической нелинейности и нелинейных механических свойств материала

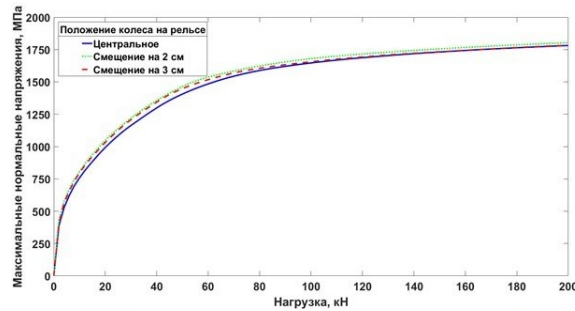


Рис. 16. Зависимость максимальных нормальных напряжений σ_{max} от величины нагрузки F для различных положений колеса на рельсе с учетом трения, геометрической нелинейности и нелинейных механических свойств материала

Первоначально расчёты проводились по схеме, использованной в предыдущих задачах (линейный материал). Результаты расчета приведены на рис. 10 и 11.

На рис. 12 и 13 сравниваются результаты расчётов с учётом и без учета трения, геометрической нелинейности и нелинейных свойств материала.

Результаты расчетов для различных положений колеса на рельсе (рисунок 14) с учётом трения, геометрической нелинейности и упругопластических свойств материала приведены на рис. 15 и 16.

Результаты проведённых расчётов показывают, что учёт геометрической нелинейности, трения и упругопластических свойств материала приводит к существенному уменьшению напряжения в области контакта при незначительном изменении глубины вдавливания. Различные положения колеса на рельсе слабо влияют на напряжения в области контакта и глубину заглабления (до 5%).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сакало В. М., Коссов В. С. Контактные задачи железнодорожного транспорта. М.: Машиностроение, 2004. 496 с.
- [2] Джонсон К. Л. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
- [3] Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Машиностроение, 1999. 544 с.
- [4] Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 272 с.

- [5] Johnson K. L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 6. Nachdruck der 1. Auflage, 2001.
- [6] Попов V.L. Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Na-notribologie bis zur numerischen Simulation. Springer-Verlag, 2009. 328 p. ISBN 978-3-540-88836-9.
- [7] Попов V. L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications. Springer-Verlag, 2010. 362 p. ISBN 978-3-642-10802-0.
- [8] Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. М.: Физматлит, 2012. 348 с. ISBN 978-5-9221-1443-1.
- [9] Sneddon I. N. The Relation between Load and Penetration in the Axisymmetric Boussinesq Problem for a Punch of Arbitrary Profile //Int. J. Eng. Sci. 1965. V. 3. P. 47–57.
- [10] Hyun S., Robbins M. O. Elastic contact between rough surfaces: Effect of roughness at large and small wavelengths //Tribology International. 2007. V. 40. P. 1413–1422.
- [11] Попов V. L. Method of reduction of dimensionality in contact and friction mechanics: A linkage between micro and macro scales // Friction. 2013. V. 1. №1. P. 41–62. [12] Бураго Н. Г., Кукуджанов В. Н. Обзор контактных алгоритмов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2005. №1. С. 44–85.
- [13] ANSYS 14.5 Users Guide. Canonsburg, 2012.
- [14] ГОСТ 10791-2011 Колеса цельнокатаные. Москва: Стандартиформ, 2011.
- [15] ГОСТ Р 51685-2013 Рельсы железнодорожные. Москва: Стандартиформ, 2011.

V. I. Prokopev¹, T. V. Zhdanova¹, B. S. Kuschov²

MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE RAILWAY WHEEL AND RAIL IN CONTACT

¹*National research Moscow state University of civil engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russia*

²*CJSC «Fodd», Moscow, Russia*

Abstract. This article lists the methods implemented in ANSYS Mechanical, the solution of contact problems in mechanics: Augmented Lagrangian, Penalty method, Lagrange multiplier on contact normal and penalty on tangent, Pure Lagrange multiplier on contact normal and tangent, Internal multipoint constraint. Results over of example of analysis of the tensely-deformed state of contact of wheel and rail of railway transport are brought with maximally close to reality geometry in the static raising on the program ANSYS Mechanical.

Keywords: contact problems, Augmented Lagrangian, Penalty method, Lagrange multiplier on contact normal and penalty on tangent, Pure Lagrange multiplier on contact normal and tangent, Internal multipoint constraint, ANSYS, the stress-strain state, wheel, rail, rail transport.

REFERENCES

- [1] Sakalo V. M., Kossov V. S. Kontaktnye zadachi zheleznodorozhnogo transporta. M.: Mashinostroenie, 2004. 496 s. (in Russian)
- [2] Dzhonson K. L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodejstviya. M.: Mir, 1989. 510 s. (in Russian)
- [3] Morozov E. M., Zernin M. V. Kontaktnye zadachi mekhaniki razrusheniya. M.: Mashinostroenie, 1999. 544 s. (in Russian)
- [4] Kaplun A. B., Morozov E. M., Olfer'eva M. A. ANSYS v rukah inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo. M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2009. 272 s.
- [5] Johnson K. L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 6. Nachdruck der 1. Auflage, 2001.
- [6] Popov V.L. Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Na-notribologie bis zur numerischen Simulation. Springer-Verlag, 2009. 328 p. ISBN 978-3-540-88836-9.
- [7] Popov V. L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications. Springer-Verlag, 2010. 362 p. ISBN 978-3-642-10802-0.
- [8] Popov V. L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodejstviya i fizika treniya. M.: Fizmatlit, 2012. 348 c. ISBN 978-5-9221-1443-1. (in Russian)

Prokopev Valeriy Ivanovich

e-mail: prokopievvi@mgsu.ru, Ph. D., Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics, National research Moscow state University of civil engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russia.

Zhdanova Tatiana Vladimirovna

e-mail: zhdanovatv@mgsu.ru, Assistant Professor of the Department of Applied Mathematics, National research Moscow state University of civil engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russia.

Cushow Barasbi Sultanovich

e-mail: zhdanovatv@mgsu.ru, Specialist of CJSC «Fodd», Moscow, Russia.

- [9] Sneddon I. N. The Relation between Load and Penetration in the Axisymmetric Boussinesq Problem for a Punch of Arbitrary Profile // *Int. J. Eng. Sci.* 1965. V. 3. P. 47–57.
- [10] Hyun S., Robbins M. O. Elastic contact between rough surfaces: Effect of roughness at large and small wavelengths // *Tribology International*. 2007. V. 40. P. 1413–1422.
- [11] Popov V. L. Method of reduction of dimensionality in contact and friction mechanics: A linkage between micro and macro scales // *Friction*. 2013. V. 1. №1. P. 41–62. [12] Burago N. G., Kukudzhanov V. N. Obzor kontaktnyh algoritmov // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela*. 2005. №1. С. 44–85. (in Russian)
- [13] ANSYS 14.5 Users Guide. Canonsburg, 2012.
- [14] GOST 10791-2011 Kolesa cel'nokatanye. Moskva: Standartinform, 2011. (in Russian)
- [15] GOST R 51685-2013 Rel'sy zheleznodorozhnye. Moskva: Standartinform, 2011. (in Russian)