

УДК 629.4.027.4:656.2

DOI: 10.12737/article\_59353e2a4df3e3.59657732

Д.Я. Антипин, А.С. Космодамианский, В.О. Корчагин

## КОНТАКТНОЕ ПЯТНО ПРИ КОНФОРМНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КОЛЕСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С РЕЛЬСОМ

Рассмотрены вопросы анализа профиля колеса и рельса для определения степени конформности. Приведены математические выкладки, построены графические зависимости. Описаны усло-

вия образования конформного контакта колеса с рельсом.

**Ключевые слова:** конформное взаимодействие, профиль колеса, профиль рельса, контактное пятно, степень конформности.

D.Ya. Antipin, A.S. Kosmodamiansky, V.O. Korchagin

## CONTACT SPOT AT CONFORMAL INTERACTION OF ROLLING-STOCK WHEEL WITH RAIL

The problems in the analysis of a rail contour and a rolling-stock wheel for the definition of the degree of contact conformity are considered. Computations are shown, the geometrical parameters of a contact spot are calculated, graphical dependences are created. The results obtained are juxtaposed with the existing investigations in the field of a contact interaction of a wheel with a rail.

The definition of contact spot parameters under conditions of operation widens the potentialities in

control systems of a locomotive clutch. A method for the conformity degree detection in a deformed contact based on the width and area definition of a contact spot of a non-elliptical shape is offered. The essential and sufficient conditions for the formation of a conformal contact of a wheel with a rail are described with the use of a mathematical device, the integral and differential methods of functions investigations are used.

**Key words:** conformal interaction, wheel contour, wheel profile, contact spot, conformity degree.

Железнодорожный транспорт занимает ведущее место в транспортной системе страны. Его отличие от других видов наземного транспорта заключается в том, что колёса подвижного состава катятся по рельсам, а их гребни способствуют удержанию колёсной пары в рельсовой колее. Железнодорожные колеса также выполняют функции, присущие колесам наземных транспортных средств: торможение, качение, передача нагрузки. Надёжность системы «колесо – рельс» напрямую влияет на безопасность движения. Основные потери энергии механической части тягового привода локомотива приходятся на контакт колеса с рельсом [1]. Таким образом, взаимодействие колеса с рельсом можно считать основополагающим процессом в работе железнодорожного транспорта.

Схожее очертание поверхностей взаимодействующих тел способствует их плотному прилеганию. Применительно к колесу железнодорожного подвижного состава и рельсу плотно прилегающие контакты называются конформными. Кон-

формные контакты делятся на одноточечные и двухточечные [2]. Контакт является плотноконформным при зазоре между недеформированными колесом и рельсом менее 0,1 мм; когда зазор менее 0,4 мм, контакт еще считается конформным. Следует отметить, что указанный способ определения конформности контакта является несколько виртуальным, поскольку в условиях эксплуатации в зоне контакта колеса и рельс всегда деформированы.

Плотное прилегание колеса к рельсу является достаточным условием существования конформного контакта. Точечный контакт между недеформированными профилями колеса и рельса характеризуется наличием зазора  $\Delta$ , показывающего степень плотности контакта после деформации. Контакт превращается в многоточечный после исчезновения зазора. Если профили колеса и рельса аппроксимированы функциями  $Z_K(y)$  и  $Z_P(y)$ , то функция зазора между колесом и рельсом для неде-

формированного состояния будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta(y) = Z_K(y) - Z_P(y).$$

Повышению конформности контакта способствуют упругие и пластические деформации, приработка поверхностей. В точке контакта колеса с рельсом функция

зазора имеет минимум:  $\frac{\Delta(y)}{dy} = 0$ . Координаты точек контакта на поверхности катания и гребне колеса  $y_K, y'_K$  соответствуют корням этого уравнения. Графики аппроксимации профилей колеса и рельса функцией зазора и её производной представлены на рис. 1.

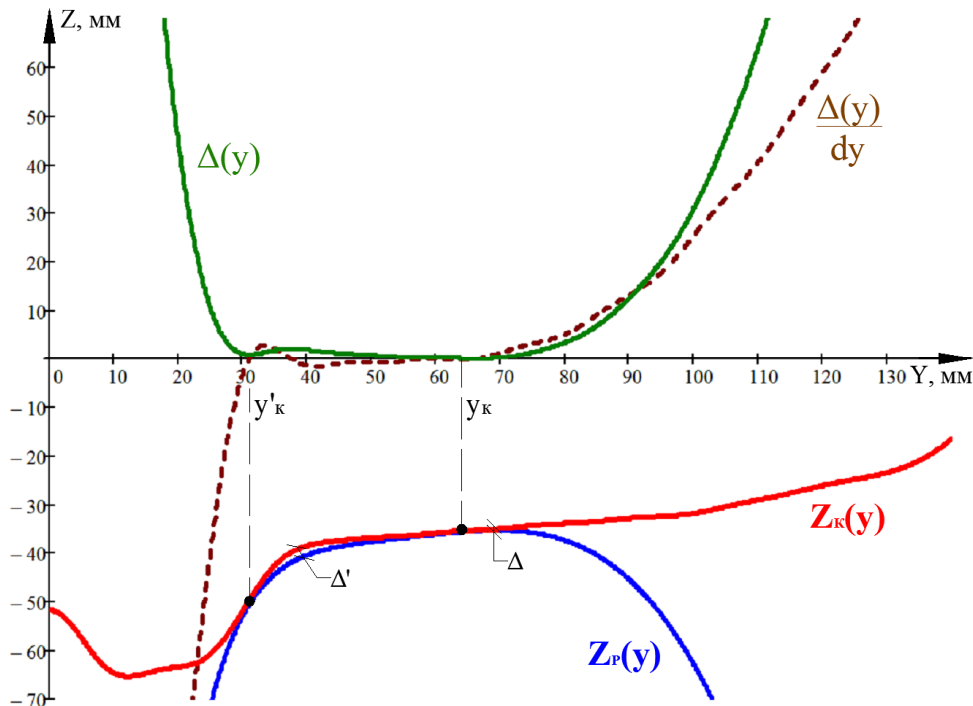


Рис. 1. Графики аппроксимации профилей колеса и рельса функцией зазора и её производной:

$Z_K(y)$  – аппроксимация профиля колеса;  $Z_P(y)$  – аппроксимация профиля рельса;

$\Delta(y)$  – функция зазора между колесом и рельсом;  $\frac{\Delta(y)}{dy}$  – производная функции зазора

Переопределим функцию зазора между колесом и рельсом для случая, когда колесо и рельс не контактируют, т.е.  $Z_K(y_K) = Z_P(y_K); \Delta(y) = Z_K(y) - Z_P(y) - Z_K(y_K) + Z_P(y_K)$ . В результате  $\min \Delta(y) = 0$ . Геометрически это выразится перемещением графика зазора к оси OY и образованием точечного контакта.

Дальнейший шаг заключается в определении параметров контактного пятна: ширины контакта  $2b$  и площади  $S_K$ . Если из функции зазора  $\Delta(y)$  вычесть величину деформации  $d$ , то отрицательная величина зазора будет характеризовать зону деформированного контакта. Границы контакт-

ного пятна  $y_{b1}, y_{b2}$  определим из уравнения  $\Delta(y) = d$ . Условившись, что контактное пятно имеет эллиптическую форму, определим примерную его площадь:  $S_K = \pi b \sqrt{1 + \frac{D_K d}{2}}$ , где  $b = \frac{y_{b2} - y_{b1}}{2}$  – полуширина контактного пятна. Точную площадь определим с учётом кривизны профиля колеса. Ширина контактного пятна  $2b$  рассчитывается интегрированием профиля колеса [3] в пределах деформированного контакта.

$$2b = \int_{y_{b1}}^{y_{b2}} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_K(y)}{dy}\right)^2} dy; S_K = 1.11 \sqrt{D_K d} \int_{y_{b1}}^{y_{b2}} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_K(y)}{dy}\right)^2} dy.$$

В исследованиях [4; 5] рассматривался конформный контакт колеса с рельсом. Было установлено, что при повышенных осевых нагрузках, свойственных карьерному железнодорожному транспорту, конформный контакт образуется, если зазор  $\Delta < 0,8$  мм. Полоса изнашивания при плотноконформном контакте находится в пределах 25...38 мм [6].

Для исследования контактирования профилей колеса и рельса использовалась программа моделирования поперечного положения колёсной пары в колее. Было установлено, что ширина контакта принимает значения от 8 до 26 мм (наибольшие соответствуют контактированию изношенных колеса и рельса).

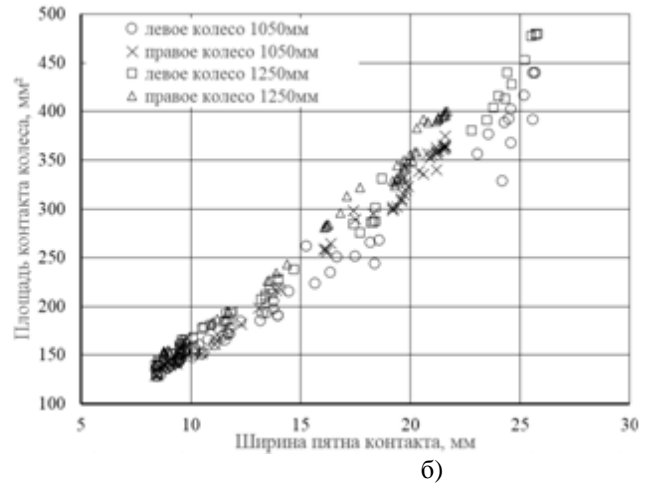
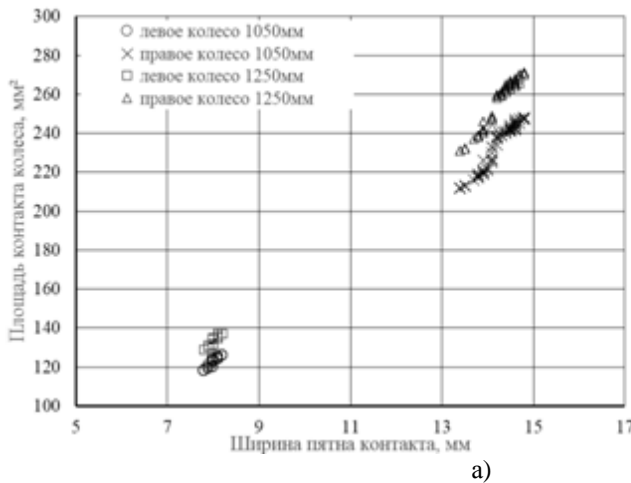


Рис. 2. Зависимость контурной площади контакта колес с рельсами (левый рельс – без износа, Правый – изношен) от ширины контактного пятна: а – новые колёса; б – изношенные колёса

Поскольку размеры контурной площади контакта и ширина контактного пятна практически пропорциональны, то по одному из этих параметров представляется возможным выявлять конформность контакта в деформированном состоянии. Ширина контактного пятна может отслеживаться устройством [7], а площадь влияет на электрическое и магнитное сопротивление контакта.

Величина контактного пятна существенно зависит от профиля колеса. Конформный контакт образуется в условиях приработки профиля колеса и профиля рельса. Реальное пятно контакта имеет неэллиптическую форму. Полученные данные хорошо коррелируются с результатами моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм» [8;9]. Комплекс использует быстрые безытера-

ционные и итерационные алгоритмы для решения обширного круга задач. К ним относятся и задачи упругого взаимодействия колеса с рельсом. Для расчёта неэллиптических пятен контакта колеса с рельсом используется алгоритм FASTSIM, основанный на теории контакта качения Дж. Калкера [10].

Необходимым условием образования конформного контакта является наличие на профилях участков с кривизной одного знака, профили колеса и рельса должны быть выпуклой формы. Причём величина кривизны колеса в зоне контакта  $K_K$  не должна превышать кривизну рельса  $K_P$ . Запишем необходимые условия существования конформного контакта между колесом и рельсом в математической форме:

$$\left| \frac{K_P}{K_K} \right| \leq 1; K_K K_P = \frac{\frac{z_K(y_K)}{dy^2} \frac{z_P(y_K)}{dy^2}}{\left(1 + \left(\frac{z_K(y_K)}{dy}\right)^2\right)^{1,5} \left(1 + \left(\frac{z_P(y_K)}{dy}\right)^2\right)^{1,5}} \geq 0$$

В точке контакта радиус профиля колеса должен быть больше или равен ра-

диусу профиля рельса. Зависимость между радиусами профилей колеса и рельса для

образования конформного контакта | (рис.3), выражается формулой

$$R_{кр}(R_{кк}, \Delta, b) = \sqrt{\left[ \sqrt{R_{кк}^2 - b^2} - \Delta - \frac{\Delta(\sqrt{R_{кк}^2 - b^2} - \Delta)}{2(R_{кк} + \sqrt{R_{кк}^2 - b^2})} \right]^2 + b^2}.$$

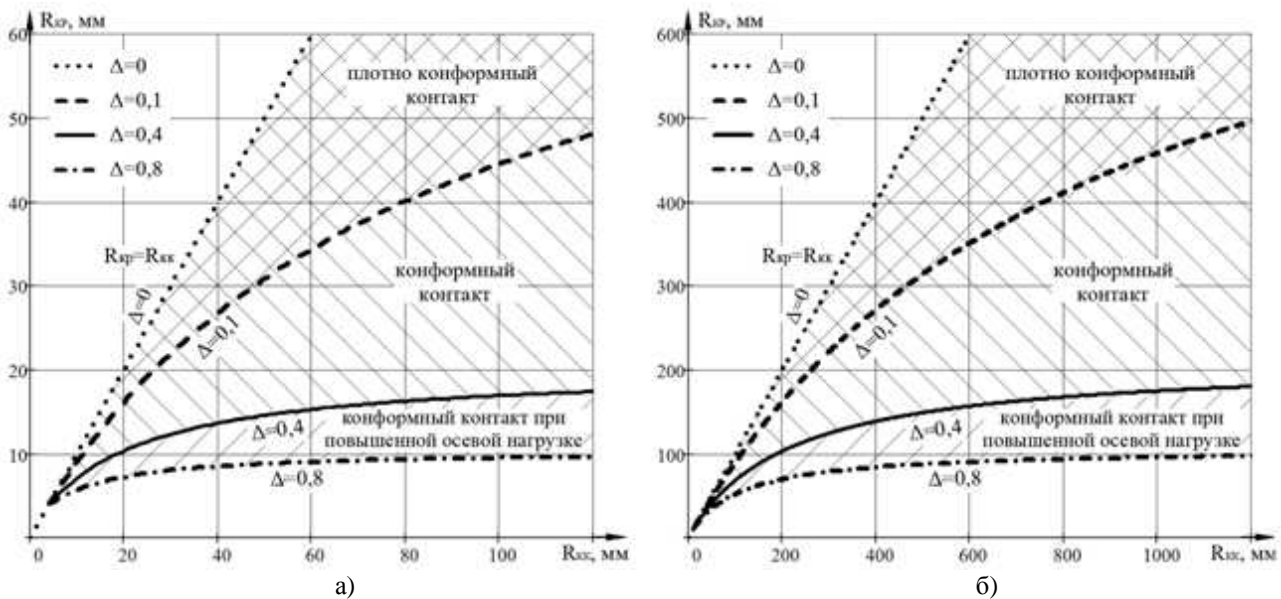


Рис. 3. Зависимость радиуса профиля рельса от радиуса профиля колеса при конформном контакте шириной  $2b=26$  мм

При конформном гребневом контакте достигается наибольшая площадь взаимодействия поверхностей колеса и рельса, за счёт чего снижается интенсивность износа и ослабевают контактные напряжения.

Работа [11] посвящена задачам повышения энергетической эффективности тягового привода локомотива за счёт снижения потерь в связи колесно–моторного блока с рельсом. При решении данной задачи рассматривалось воздействие на зону контакта колеса с рельсом магнитного по-

ля и электрического тока. Отметим, что размеры поверхности контакта напрямую влияют на параметры магнитного поля и электрического тока. Поток магнитной индукции через поверхность заданной площади определяется как скалярное произведение вектора индукции на вектор площади. При изменении размеров поверхности контакта изменяются и параметры магнитного поля, что должно учитываться системами регулирования сцепления с обратной связью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев, В.И. Методы поиска конструкции тягового привода локомотива с минимальными потерями энергии в эксплуатации / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, С.Г. Волохов, В.О. Корчагин // Энерго- и ресурсосбережение - XXI век: материалы XII междунар. науч.-практ. интернет-конф. (г. Орёл, 15 марта - 30 июня 2014 г.). - Орёл: Госуниверситет-УНПК, 2014. - С. 162-166.
2. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса: [пер. с англ.] / У.Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландгрэн, Х. Турне, В. Эберсен. - М.: Интертекст, 2002. - 408 с.
3. Каплан, И.А. Практические занятия по интегральному исчислению и интегрированию дифференциальных уравнений / И.А. Каплан. - Изд. 2-е, стер. - Харьков: Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1971. - 947 с.
4. Керопян, А.М. Теоретические исследования условий обеспечения конформного контакта системы «колесо - рельс» карьерного железнодорожного транспорта / А.М. Керопян // Трение и смазка в машинах и механизмах. - М.: Машиностроение, 2013. - № 2. - С. 11-16.
5. Керопян, А.М. Условия взаимодействия колес карьерных локомотивов с рельсами и определение рациональных геометрических параметров

- их контактирующих поверхностей / А.М. Керопян, П.Е. Сизин, Н.М. Кряжев, Р.К. Басов // Горная промышленность. - М.: Гемос Лимитед, 2012. - № 4. - С. 108.
6. Керопян, А.М. Развитие теории взаимодействия и обоснование рациональных параметров системы «колесо – рельс» карьерных локомотивов в режиме тяги: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / А.М. Керопян. - Екатеринбург, 2015. - 233 с.
  7. Пат. 2426664 РФ. Способ определения бокового усилия прижатого колеса на рельс при движении железнодорожного состава / Ватонин А.А., Аккерман С.Г., Аккерман Г.Л. - № 2010108960/11; опубли. 10.03.10, Бюл. № 23.
  8. Погорелов, Д.Ю. Методы моделирования динамики железнодорожных колесных пар с учетом упругости в программном комплексе «Универсальный механизм» / Д.Ю. Погорелов, Г.В. Михеев, С.Б. Томашевский, А.Н. Родиков // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: III науч.-техн. семинар (г. Брянск, 6-7 апр. 2016 г.): сб. тез. / под ред. Д.Ю. Погорелова. - Брянск: БГТУ, 2016. - С. 57-59.
  9. Pogorelov, D.Yu. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software / D.Yu. Pogorelov // Rail Vehicle Dynamics and Associated Problems / ed. A. Sladkowski. - Gliwice, 2005. - P.13-58.
  10. Родиков, А.Н. Быстрые алгоритмы решения контактной задачи «колесо - рельс» в задачах моделирования динамики рельсовых экипажей / А.Н. Родиков // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Казань, 20-24 авг. 2015 г.). - С. 3227-3229.
  11. Воробьев, В.И. Особенности синтеза механической части энергосберегающего тягового привода локомотива / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, М.И. Борзенков, В.С. Адвашченко, В.О. Корчагин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2015. - №1. - С. 73-80.
1. Vorobiyov, V.I. Search methods of locomotive traction drive design with minimum energy consumption in operation / V.I. Vorobiyov, O.V. Izmerov, S.G. Volokhov, V.O. Korchagin // *Energy- and Resource-saving - the XXI-st Century: Proceedings of the XII-th Inter. Scientific-Practical Internet-Conf. (Orel, 15 March - 30 June, 2014)*. - Orel: State University-ESPC, 2014. - pp. 162-166.
  2. *Generalization of Advanced Experience in Heavy Railway Traffic: Problems of Wheel and Rail Interaction*: [transl. from Engl.] / W.J. Harris, S.M. Zakharov, J. Landgren, H. Tourne, V. Ebersen. - M.: Intertext, 2002. - pp. 408.
  3. Kaplan, I.A. *Practical Training on Integral Calculus and Integration of Differential Equations* / I.A. Kaplan. - 2-d Edition stereotyped. - Kharkov: Publishing House of Kharkov State University, 1971. - pp. 947.
  4. Keropyan, A.M. Theoretical investigations of conditions for provision of conformal contact in 'wheel-rail' system of pit railway transport / A.M. Keropyan // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. - M.: Mechanical Engineering, 2013. - № 2. - pp. 11-16.
  5. Keropyan, A.M. Conditions for interaction of pit locomotives wheels with rails and definition of efficient geometrical parameters of their contacting surfaces / A.M. Keropyan, P.E. Sizin, N.M. Kryazhev, R.K. Basov // *Mining*. - M.: Gemos Ltd., 2012. - № 4. - pp. 108.
  6. Keropyan, A.M. Development of Interaction Theory and Substantiation of Efficient Parameters in 'Wheel-Rail' System of Pit Locomotives in Trac-
  - tion Mode: D. Eng.: 05.05.06 / A.M. Keropyan. - Catherineburg, 2015. - pp. 233.
  7. Pat. 2426664 the RF. *Method for Definition of Side Force in Pressed Wheel to Rail at Train Motion* / Vatonin A.A., Akkerman S.G., Akkerman G.L. - № 2010108960/11; published. 10.03.10, Bull. № 23.
  8. Pogorelov, D.Yu. Methods for wheel pair dynamics modeling taking into account elasticity in 'Universal Mechanism' program complex / D.Yu. Pogorelov, G.V. Mikheev, S.B. Tomashevsky, A.N. Rodnikov // *Computer Modeling in Railway Transport: Dynamics, Strength, Wear: the III-d Scientific-Tech. Seminar* (Bryansk, April 6-7, 2016): Abstract Transactions / under the editorship of D.Yu. Pogorelov. - Bryansk: BSTU, 2016. - pp. 57-59.
  9. Pogorelov, D.Yu. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software / D.Yu. Pogorelov // Rail Vehicle Dynamics and Associated Problems / ed. A. Sladkowski. - Gliwice, 2005. - P.13-58.
  10. Rodikov, A.N. Quick algorithms for solution 'wheel-rail' contact problem in problems of rail carriage dynamics modeling / A.N. Rodikov // *the XI-th All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics* (Kazan, August 20-24, 2015). - pp. 3227-3229.
  11. Vorobiyov, V.I. Peculiarities in Synthesis of Mechanical Part in Energy-Saving Locomotive Traction Drive / V.I. Vorobiyov, O.V. Izmerov, M.I. Borzenkov, V.S. Advashchenko, V.O. Korchagin // *Fundamental and Applied Problems in Engineering and Technology*. - 2015. - №1. - pp. 73-80.

Статья поступила в редколлегию 26.01.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Кобищанов В.В.

**Сведения об авторах:**

**Антипин Дмитрий Яковлевич**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «ПСЖД» Брянского государственного технического университета, e-mail: [psbstu@yandex.ru](mailto:psbstu@yandex.ru).

**Antipin Dmitry Yakovlevich**, Can. Eng., Assistant Prof., Head of the Dep. "PSRT", Bryansk State Technical University, e-mail: [psbstu@yandex.ru](mailto:psbstu@yandex.ru).

**Kosmodamiansky Andrey Sergeevich**, D. Eng., Prof., Head of the Dep. "TPS" Emperor Nikolas the II-d MSUC, e-mail: [vadim1688@yandex.ru](mailto:vadim1688@yandex.ru).

**Космодамианский Андрей Сергеевич**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «ТПС» МГУПС Императора Николая II, e-mail: [vadim1688@yandex.ru](mailto:vadim1688@yandex.ru).

**Корчагин Вадим Олегович**, ст. преподаватель МГУПС Императора Николая II, e-mail: [vadim1688@yandex.ru](mailto:vadim1688@yandex.ru).

**Korchagin Vadim Olegovich**, Senior Lecturer of Emperor Nikolas the II-d MSUC, e-mail: [vadim1688@yandex.ru](mailto:vadim1688@yandex.ru).