

УДК 625.032.3

## Анализ предпосылок создания математической модели функционирования автосцепок груженых тяговых агрегатов

Т. Л. Риполь-Сарагоси, Л. Ф. Риполь-Сарагоси, И. А. Яицков

Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

**Для цитирования:** Риполь-Сарагоси Т.Л., Риполь-Сарагоси Л. Ф., Яицков И.А. Анализ предпосылок создания математической модели функционирования автосцепок груженых тяговых агрегатов. Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 902–908. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-902-908

### Аннотация

**Цель:** рассмотрены вопросы, связанные с повышением безопасности перевозки угля в связи с увеличением спроса на энергоносители в мире, ростом потенциала экспорта в дружественные страны. Одним из основных направлений обеспечения безопасности перевозочного процесса является повышение надежности функционирования автосцепных устройств тяговых агрегатов и моторных думпкаров, а также возникающих в них продольно-динамических реакций. Рассмотрены предпосылки создания математической модели движения тягового агрегата с учетом факторов, влияющих на возникновение этих усилий. Проведен анализ предпосылок для создания математической модели, позволяющей определить условия обеспечения безопасности перевозочного процесса в части недопущения разрыва автосцепок груженых тяговых агрегатов, думпкаров, а также возможного эффекта «набегания» (выдавливания вагонов). **Методика:** для составления математической модели подвижной единицы, достаточно точно отражающей наиболее важные особенности динамического процесса, обычно пользуются одномассовой моделью. **Методы:** при решении задачи определения сил, действующих на подвижной состав, предлагается рассмотреть движение карьерного поезда как системы дискретных масс в лагранжевых координатах в зависимости от времени  $t$  и начальных координат таких масс. **Практическая значимость:** обоснована необходимость расчета возникающих продольно-динамических реакций в автосцепных устройствах тяговых агрегатов в связи с увеличением уклонов и скоростей движения.

**Ключевые слова:** угольная промышленность, тяговый агрегат, моторный думпкар, продольно-динамические реакции

### Введение

В условиях потребности в энергоносителях, поставляемых Россией в дружественные страны, вырос спрос на экспорт угля. Последние 10 лет стали для угольной промышленности этапом стабильного развития, который совпал с восстановительным ростом экономики страны в условиях санкционного давления. За этот период объем добычи российского угля вырос более чем

в 1,3 раза и сейчас превышает 440 млн т в год.

В настоящее время угольная промышленность представлена 58 шахтами и 133 разрезами. Доля России в международной торговле углем за 10 лет увеличилась с 9 до 15 %. Российские угольные компании осваивают рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона, прежде всего Республики Корея, Китайской

Народной Республики, Тайваня (КНР), Республики Индия, Малайзии и Социалистической Республики Вьетнам.

Оценка потенциальной доли России на угольных рынках основных стран-импортеров произведена исходя из возможностей наращивания поставок российского угля в абсолютное большинство стран, например, Республику Индонезия, которая на протяжении последних лет увеличивает эти закупки. Оценки основываются на информации о планах по наращиванию производства продукции черной металлургии и интенсивному развитию угольной генерации в этих регионах. Стабильная и бесперебойная доставка угля стала возможной благодаря реализации обеспечивающих инфраструктурных проектов долгосрочной программы развития ОАО «Российские железные дороги», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 года № 466-р [1, 2, 3].

Вывоз добытого угля из разрезов горно-обогатительных комбинатов осуществляется тяговыми агрегатами и думпкарами (самопрокидывающимися вагонами) по железнодорожным путям угледобывающих предприятий [4, 5], а впоследствии — магистральными локомотивами по путям общего пользования к месту перевалки. По мере роста выработки породы и увеличения перепадов высот (уклонов), а также длины и веса составов увеличивается нагрузка на автосцепные устройства. Кроме того, рельеф, по которому проложены железнодорожные магистрали общего пользования на полигонах Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока, также имеет значительный перепад высот [6], влияющий на продольно-динамические реакции, возникающие в автосцепных устройствах подвижного состава.

## Дифференциальные уравнения движения поезда

Одним из основных вопросов, возникающих при изучении продольной динамики поезда, является выбор математической модели подвижной единицы, достаточно точно отражающей наиболее важные особенности динамического процесса. При решении задачи определения действующих на подвижной состав сил обычно пользуются одномассовой моделью.

Движение карьерного поезда как системы дискретных масс рассмотрим в координатах Лагранжа в функции времени  $t$  и начальной координаты этих масс. Такое описание движения поезда позволяет непосредственно сравнивать результаты теоретического исследования с экспериментальными данными (значениями скоростей, деформаций, усилий и ускорений, измеряемых в сечениях поезда в различные моменты времени) [7, 8, 9].

Рассмотрим поезд, движущийся по участку пути, профиль которого известен и задан как простая кривая в пространстве:

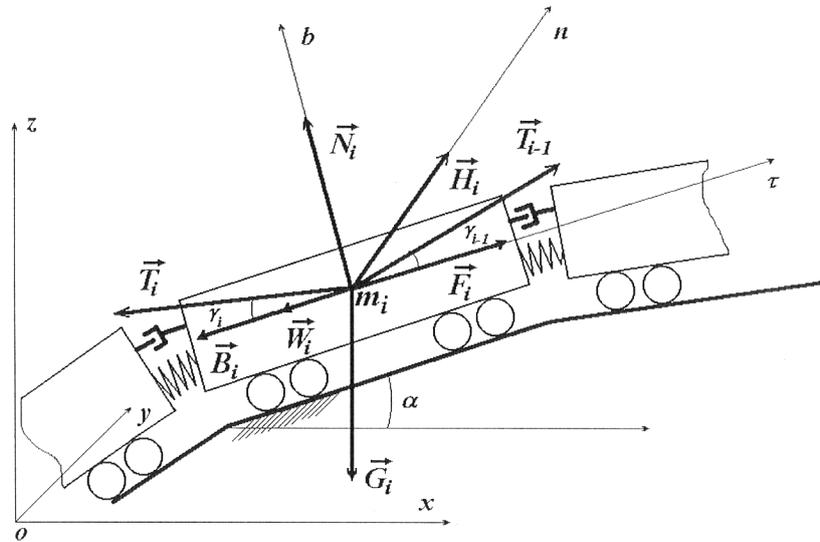
$$y = y(x), z = z(x). \quad (1)$$

Силы, действующие на единицу подвижного состава, движущегося по этому профилю, изображены на рис. 1 и в уравнениях (2) (см. ниже).

Уравнения (2) допускают значительные упрощения, если ввести некоторые разумные допущения о профиле пути и характере действующих на экипажи сил:

1. Подробную информацию о профиле пути, которая предполагалась известной выше, получить затруднительно. В целях упрощения расчетов профиль пути спрямляют.

2. Ввиду малых скоростей движения возвышение в кривых наружного рельса над внутренним не учитываем.



**Рис. 1.** Силы, действующие на единицу подвижного состава:  $G_i$  — вес подвижной единицы;  $N_i$  — нормальная реакция рельсов;  $H_i$  — боковая реакция рельсов;  $W_i$  — сила сопротивления движению;  $B_i$  — тормозная сила экипажа;  $F_i$  — сила тяги экипажа;  $T_i, T_{i-1}$  — межвагонные силы

$$\left. \begin{aligned} m_i \frac{d^2 S_i}{dt^2} &= F_i - W_i - B_i - G_i \cos(\vec{G}_{2i}, -\tau) + T_{i-1} \cos(\vec{T}_{i-1}, \tau) - T_i \cos(\vec{T}_i, -\tau); \\ m_i \frac{V_i^2}{\rho_i} &= H_i + G_i \cos(\vec{G}_{2i}, n) + T_{i-1} \cos(\vec{T}_{i-1}, n) + T_i \cos(\vec{T}_i, n); \\ 0 &= N_i - G_i \cos(\vec{G}_{2i}, -b) + T_{i-1} \cos(\vec{T}_{i-1}, b) + T_i \cos(\vec{T}_i, b); \end{aligned} \right\} \quad i = \overline{1, N} \quad (2)$$

где  $S_i$  — дуговая координата центра масс  $i$ -го экипажа, отсчитываемая от начального положения на профиле в сторону возрастания  $x_i$ ;  
 $V_i = \dot{S}_i$  — алгебраическая величина скорости центра масс;  
 $k_i, \rho_i = 1 / k_i$  — кривизна и радиус кривизны профиля пути.

3. Кривизну на отдельных участках принимаем постоянной, равной  $k_v = 1 / \rho_v$ , где  $\rho_v$  — радиус закругления на  $v$ -м участке.

Число спрямленных участков обозначим  $n_y$ , поэтому  $v = 1, n_y$ .

4. Углы  $\gamma_i$  и  $\gamma_{i-1}$  между касательной и силами  $T_i$  и  $T_{i-1}$  малы и оказывают слабое влияние на продольную динамику поезда, поэтому полагаем:

$$\sin \gamma_i = \gamma_i, \sin \gamma_{i-1} \cong \gamma_{i-1}, \cos \gamma_i = \cos \gamma_{i-1} \cong 1.$$

5. Угол наклона профиля пути к горизонту в точке профиля, где находится экипаж с номером  $i$ , обозначим через  $a_i$ . Предполагаем, что для профиля известна зависимость  $a = a(\sigma)$ . Так как уклоны пути не превышают 100%, то углы  $a_i$  можно отнести к малым и принять:

$$\cos a_i \cong 1, \sin a_i \cong a_i.$$

Сделанные предположения позволяют значительно упростить систему уравнений (2). Положив  $\cos(\vec{T}_i, b) = \cos(\vec{T}_{i-1}, b) = 0$  и

$\cos(\overline{G}_i, -b) = 1$ , последнее уравнение системы (2) можно заменить одним:

$$0 = N_i - G_i.$$

В системе уравнений (2), по существу, дифференциальным является только первое уравнение, а последующие — алгебраическими и позволяющими определить боковую реакцию рельсов  $H_i$ . Однако боковая реакция рельсов не влияет в данной постановке на продольную динамику поезда и может вообще не определяться. Таким образом, система уравнений записывается в виде:

$$\begin{aligned} m_i \ddot{S}_i = T_{i-1} - T_i + F_i - W_i - \\ - B_i - G_{2i} \alpha_i; i = \overline{1, N} \end{aligned} \quad (3)$$

Отсчет дуговых координат  $S_i (i = \overline{1, N})$  производится от положения статического равновесия, когда межвагонные связи не деформированы и установлены так, что относительные перемещения масс равны нулю.

Текущая дуговая координата масс экипажа под номером  $i$  в неподвижной системе координат, начало которой совпадает при  $t = 0$  с центром масс последнего экипажа и с точкой на профиле, соответствующей  $x = 0$ , определяется как:

$$\sigma_i = L_i^{XB} + S_i, \quad i = \overline{1, N},$$

где  $L_i^{XB}$  — расстояние от центра масс  $i$ -го экипажа до центра масс последнего вагона в положении статического равновесия.

Учитывая это, определим:

$$L_i^{XB} = \sum_{k=1}^N l_k - (l_N + l_i) / 2, \quad i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где  $l_k$  — длина экипажа по осям сцепления автосцепок.

Для уточнения математической модели карьерного поезда необходимо учесть энергию вращающихся масс [10–12]. Колесная пара со всеми элементами и связанный с ней через редуктор с передаточным отношением  $k_i^*$  якорь

тяговых двигателей (только для электровоза управления и моторных думпкаров) создают дополнительную силу инерции, учитываемую следующим образом:

$$F_{Bi}^C = M_{Bi}^C \frac{d\omega_i}{dt} \cdot \frac{1}{R_i},$$

где  $M_{Bi}^C$  — момент сил инерции вращающихся частей;

$R_i$  — радиус колеса по кругу катания.

Учитывая, что  $d\omega_i / dt = dV_{2i} / dt \cdot 1 / R_i$ , получаем:

$$\begin{aligned} F_{Bi}^C = \left[ (\int \rho_{ki}^2 dm_k + (k_i^*)^2 \times \right. \\ \left. \times \int \rho_{IIIi}^2 dm_{III}) dV_{2i} / dt \right] / R_i^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражение в скобках в формуле (5) имеет размерность массы, следовательно, формулу можно записать следующим образом:

$$F_{Bi}^C = m_{Bi} \cdot dV_{2i} / dt,$$

где  $m_{Bi}$  — динамическая масса вращающихся частей.

В уравнениях движения поезда динамическая масса вращающихся частей  $m_{Bi}$  может быть учтена через коэффициент инерции вращающихся масс:

$$K_i^{II} = 1 + \frac{m_{Bi}}{m_{2i}}.$$

Поскольку величины продольных сил в межвагонных связях и силы, действующие на вагон, зависят от относительных перемещений и скоростей последовательно соединенных масс [13], то переходят от системы уравнений для абсолютных перемещений (3) к системе уравнений для относительных перемещений. Однако абсолютные перемещения и скорости в случае исследования динамики поездов также необходимы, ведь от этих величин зависят внешние силы, действующие на экипажи, и другие факторы, влияющие на характер

движения поезда. Поэтому более естественно непосредственно решать уравнения (3) в абсолютных перемещениях и скоростях, а относительные перемещения и скорости получать попутно в процессе решения.

Понизим порядок системы дифференциальных уравнений (3) и запишем полученную систему (6):

$$\dot{S}_i = V_i \text{ и } C_i = 1/m_i, \text{ где}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_i &= V_i; \\ \dot{V}_i &= C_i(T_{i-1} - T_i + F_i - W_i - \\ &\quad - B_i - G_i \alpha_i / K_i^H) \end{aligned} \right\} i = \overline{1, N} \quad (6)$$

## Выводы

1. Предлагаемая тема научного исследования представляет интерес и является востребованной.

2. Результаты, полученные путем математического моделирования, дадут возможность значительно повысить безопасность движения подвижного состава.

3. Снижение рисков разрыва автосцепных устройств позволит повысить экономический эффект от наращивания перевозок угля железнодорожным транспортом.

4. Представляется целесообразным рассмотреть модель движения поезда иными методами математического моделирования с целью получения объективной картины и возможности сравнения результатов расчетов различных режимов напряжения, возникающих в автосцепных устройствах, с результатами данного математического моделирования.

5. В дальнейшем для составления общей математической модели представляется целесообразным использовать полученную систему из  $2N$  дифференциальных уравнений первого порядка.

## Библиографический список

1. Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 № 1582-р (ред. от 13.10.2022). URL: <http://static.government.ru/media/files/OoKX6PriWgDz4CNNAxwIYZEE6zm6I52S.pdf>
2. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 № 466-р. URL: [https://ar2019.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report\\_long-term-development-programme.pdf](https://ar2019.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report_long-term-development-programme.pdf)
3. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы»: постановление Правительства РФ от 20.12.2017 № 1596. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/841/events/>
4. Электромагнитный рельсовый тормоз: патент № RU 2216471 С2 Российская Федерация, МПК В61Н7/08. № 2001100437/28 / Л.В. Балон, В.А. Соломин, Л.Ф. Риполь-Сарагоси; заявл. 05.01.2001, опубл. 20.11.2003.
5. Электромагнитный рельсовый тормоз: патент № RU 2361761 С1 Российская Федерация, МПК В61Н7/08. № 2008104744/11 / Л.В. Балон, В.А. Соломин, Т.Л. Риполь-Сарагоси; заявл. 07.02.2008, опубл. 20.07.2009.
6. Рекомендация по техническим требованиям к магниторельсовому тормозу: памятка ОСЖД NP 546.1976.
7. Kunevich A.V., Podol'skii A.V., Sidorov I.N. Ferrites. Encyclopaedic guide. Part I. Magnets and magnet assemblies (in Russian). St. Petersburg: Lik Publishing, 2004.
8. Риполь-Сарагоси Т.Л., Риполь-Сарагоси Л.Ф. Исследование влияния температурного режима катушки на время включения электромагнитного рельсового тормоза (ЭМРТ) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3(87). С. 35–43.

9. Kitanov S., Podolskiy A. Analysis of eddy-current and magnetic rail brakes for high-speed trains // The open transportation journal. 2008. № 2. P. 19–28.
10. Автосцепка СА-3Т для вагонов тяжеловесного движения: особенности конструкции и технологии изготовления / Р. А. Савушкин [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. 2018. № 1(53). С. 30–32.
11. ГОСТ 22703–2012. Детали литые сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия (с изменением № 1, с поправкой). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095718>
12. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2016. 57 с.
13. Ромен Ю. С., Мугинштейн Л. А., Неверова Л. И. Влияние продольных сил в поездах на опасность схода вагонов в зависимости от их загрузки // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 3(46). С. 64–68.
- Дата поступления: 29.08.2024  
Решение о публикации: 05.10.2024
- Контактная информация:**  
РИПОЛЬ-САРАГОСИ Татьяна Леонидовна — докт. техн. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте»; [ripol-saragosi@mail.ru](mailto:ripol-saragosi@mail.ru)  
РИПОЛЬ-САРАГОСИ Леонид Францискович — канд. техн. наук., доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; [el.siete.07@mail.ru](mailto:el.siete.07@mail.ru)  
ЯИЦКОВ Иван Анатольевич – докт. техн. наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»; [yia@rgips.ru](mailto:yia@rgips.ru)

## Analysis of the prerequisites for the creation of a mathematical model of the functioning of automatic couplings of loaded traction units

T. L. Ripol-Saragosi, L. F. Ripol-Saragosi, I. A. Yaickov

Rostov State Transport University, 2, Square of the Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, Rostovon-Don, 344038, Russia

**For citation:** *Ripol-Saragosi T. L., Ripol-Saragosi L. F., Yaitskov I. A.* Analysis of the prerequisites for the creation of a mathematical model of the functioning of automatic couplings of loaded traction units. Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 902–908. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-902-908

### Abstract

**Purpose:** the article considers issues related to improving the safety of coal transportation due to the increasing demand for energy resources in the world and the growth of export potential to friendly countries. One of the main areas of ensuring the safety of the transportation process is to improve the reliability of the automatic coupling devices of traction units and motor dump cars, and the longitudinal-dynamic reactions that occur in them. The article considers the prerequisites for creating a mathematical model of the traction unit motion, taking into account the factors that influence the occurrence of these forces. Analyzed the prerequisites for creating a mathematical model that allows determining the conditions for ensuring the safety of the transportation process in terms of preventing the rupture of automatic couplings of loaded traction units, dump cars, as well as the possible effect of “running up” (squeezing out cars). **Methodology:** to compile a mathematical model of a moving unit that accurately reflects the most important features of the dynamic process, a single-mass model is usually used. **Methods:** when solving the problem of determining the forces acting on the rolling stock, it is proposed to consider the motion of a quarry train as a system of discrete masses in Lagrange coordinates as a function of time  $t$  and the initial coordinate of these masses. **Practical**

**significance:** the need to calculate the arising longitudinal-dynamic reactions in the automatic coupling devices of traction units in connection with the increase in slopes and speeds of movement is substantiated.

**Keywords:** coal industry, traction unit, motor dump car, longitudinal-dynamic reactions

## References

1. Ob utverzhdenii Programmy razvitiya ugol'noj promyshlennosti Rossii na period do 2035 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 13.06.2020 No. 1582-r (red. ot 13.10.2022). URL: <http://static.government.ru/media/files/OoKX6PriWgDz4CNNAxwIYZEE6zm6I52S.pdf> (In Russian)
2. Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO "RZHD" do 2025 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 19.03.2019 No. 466-r. URL: [https://ar2019.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report\\_long-term-development-programme.pdf](https://ar2019.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report_long-term-development-programme.pdf) (In Russian)
3. Ob utverzhdenii gosudarstvennoj programmy Rossijskoj Federacii "Razvitie transportnoj sistemy": postanovlenie Pravitel'stva RF ot 20.12.2017 No. 1596. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/841/events/> (In Russian)
4. Elektromagnitnyj rel'sovyy tormoz: patent No. RU 2216471 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK B61H7/08. No. 2001100437/28 / L.V. Balon, V.A. Solomin, T.L. Ripol'-Saragosi; zayavl. 05.01.2001, opubl. 20.11.2003. (In Russian)
5. Elektromagnitnyj rel'sovyy tormoz: patent No. RU 2361761 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK B61H7/08. No. 2008104744/11 / L.V. Balon, V.A. Solomin, L.F. Ripol'-Saragosi; zayavl. 07.02.2008, opubl. 20.07.2009. (In Russian)
6. Rekomendaciya po tekhnicheskim trebovaniyam k magnitrel'sovomu tormozu: pamyatka OSZHD NP 546.1976. (In Russian)
7. Kunevich A.V., Podol'skii A.V., Sidorov I.N. Ferrites. Encyclopaedic guide. Part I. Magnets and magnet assemblies (in Russian). St. Petersburg: Lik Publishing, 2004.
8. Ripol'-Saragosi T.L., Ripol'-Saragosi L.F. Issledovanie vliyaniya temperaturnogo rezhima katushki na vremya vklyucheniya elektromagnitnogo rel'sovogo tormoza (EMRT) // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2022. No. 3(87). S. 35–43. (In Russian)
9. Kitanov S., Podolskiy A. Analysis of eddy-current and magnetic rail brakes for high-speed trains // The open transportation journal. 2008. No. 2. P. 19–28.
10. Avtoscepka SA-3T dlya vagonov tyazhe-lovesnogo dvizheniya: osobennosti konstrukcii i tekhnologii izgotovleniya / R.A. Savushkin [i dr.] // Vagony i vagonnoe hozyajstvo. 2018. No. 1(53). S. 30–32. (In Russian)
11. GOST 22703–2012. Detali litye scepnyh i avtoscepnyh ustrojstv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya (s izmeneniem No. 1, s popravkoj). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095718> (In Russian)
12. GOST 33211–2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam. M.: Standartinform, 2016. 57 s. (In Russian)
13. Romen Yu.S., Muginshtejn L.A., Neverova L.I. Vliyanie prodol'nyh sil v poezdah na opasnost' skhoda vagonov v zavisimosti ot ih zagruzki // Transport Rossijskoj Federacii. 2013. No. 3 (46). S. 64–68. (In Russian)

Received: 29.08.2024

Accepted: 05.10.2024

## Author's information:

Tatiana L. RIPOL-SARAGOSI —

Dr. Sci. in Engineering, Professor, Chair "Heat engineering at railway transport";

[ripol-saragosi@mail.ru](mailto:ripol-saragosi@mail.ru)

Leonid F. RIPOL-SARAGOSI — PhD in Engineering, Associate Professor, Chair "Cars and car economy";

[el.siete.07@mail.ru](mailto:el.siete.07@mail.ru)

Ivan A. YAICKOV — Dr. Sci. in Engineering,

Professor, Chair "Cars and car economy"; [yia@rgips.ru](mailto:yia@rgips.ru)