

УДК: 621.438

К.М. Басс, канд. техн. наук, доц.,
 В.В. Плахотник, канд. техн. наук, доц.,
 В.В. Кривда

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: KMBass@yandex.ru, pvitaliy.krivda@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ ДОРОГИ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АВТОСАМОСВАЛА НА ПОКАЗАТЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

К.М. Bass, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
 V.V. Plakhotnik, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
 V.V. Krivda

State Higher Education Establishment “National Mining University”, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: KMBass@yandex.ru, pvitaliy.krivda@yandex.ru

INFLUENCE OF THE ROAD PROFILE AND DUMP TRUCK PARAMETERS ON THE EXPLOITATION INDEXES

Цель. Исследование динамики и тягово-скоростных характеристик в процессе движения автосамосвала.

Методы. При выполнении работы использовались как общенаучные, так и специальные методы исследований, включая научное обобщение, методы комплексной оценки технического уровня, математическое моделирование и аппарат линейного программирования. Решение данной задачи базируется на составлении дифференциального уравнения движения, для чего были использованы уравнения Лагранжа второго рода, а также соответствующие выражения кинетической, потенциальной энергии и диссипативной функции.

Результаты получены при помощи математических расчетов в программном продукте математического анализа и расчета – “*Wolfram Mathematica*”.

Результат. В работе приведена математическая модель прямолинейного движения карьерного автосамосвала как многомассовой системы с восемью степенями свободы на прямолинейном участке дороги с учетом состояния дорожного покрытия. Получена методика расчета тяговых и динамических характеристик автосамосвала в процессе движения по дороге с продольным уклоном, позволяющая получить необходимую силу тяги.

Научная новизна. Составлена расчетная схема и уравнения движения машины при прямолинейном движении с учетом упругих и рассеивающих характеристик упругих связей, продольного уклона и профиля дороги, изменения конструктивных характеристик, что позволяет дать близкую к реальной картину динамики движения и определить значения тягово-скоростных характеристик.

Практическая значимость. Разработана методика расчета динамических характеристик автосамосвала в процессе движения и приведен анализ параметров конструкции автосамосвалов на основании которых можно дать рекомендации по сокращению капитальных затрат на разработку карьеров.

Ключевые слова: *расчетная схема, автосамосвал*

Вступление. Значительные финансовые затраты, связанные с транспортированием горных пород для обеспечения технологического процесса добычи полезных ископаемых открытым способом, обуславливают постоянное ведение широкомасштабных работ по техническому совершенствованию средств карьерного автомобильного транспорта. Их конструкция должна максимально учитывать особенности работы в карьерах: стесненные условия движения, короткие расстояния транспортирования, затяжные подъемы и спуски.

Анализ последних исследований. Значительный вклад в развитие теории и практики использования автомобильного транспорта на открытых горных разработках внесли М.В. Васильев, А.А. Кулешов, А.Н. Казарез, Н.В. Мельников, М.Г. Потапов, В.В. Ржевский, В.П. Смирнов, И.М. Циперфин, В.Д. Штейн, Б.Я. Яковенко, Ю.А. Монастырский, И.В. Зырянов, А.В. Буныкин, Г.А. Смирнов [1–3] и др. Ими были созданы математические модели для исследования динамических процессов карьерного

автомобильного транспорта, учитывающие его особенности эксплуатации (в частности, неровности дороги, удар при экскаваторной загрузке). Составленные при этом уравнения движения представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, которые решаются при заданных начальных условиях в определенном промежутке интегрирования с использованием специально разработанного алгоритма итерационно-разностного типа с определением точек разрыва правых частей [1–3].

Изложение основного материала. Дальнейшие усовершенствования конструкций автосамосвалов, которые работают в особо сложных условиях, и оценка их работоспособности требуют привлечения при составлении расчетной схемы большего числа конструктивных и технологических факторов, что позволяет определить их влияние на эксплуатационные характеристики машины и её надежность. Поэтому, исследование динамики машины в зависимости от физико-механических свойств упругих связей и значений масс и моментов инерций отдельных частей машины является актуальной задачей.

Исследуя динамику автомобиля как сложной многомассовой системы, необходимо учитывать, что при различных режимах движения влияние механических характеристик отдельных элементов машины проявляется в разной степени. Проведем исследование динамики прямолинейного движения машины с учетом продольного уклона дороги для определения изменения силы тяги F_t от конструктивных параметров машины.

При составлении расчетной схемы автомобиля допускаем, что механические характеристики колес, расположенных на одной оси соответствующих мостов – одинаковы. В этом случае автосамосвал можно представить в виде системы тел (рис. 1), соединенных между собой упругими и неупругими связями.

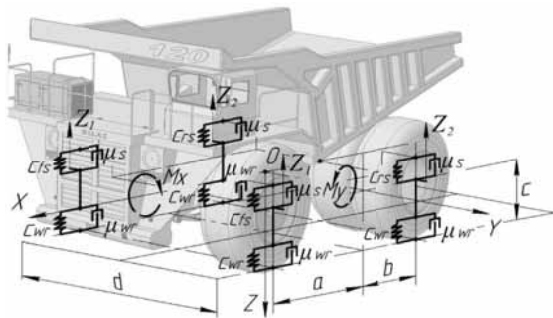


Рис. 1. Пространственная расчетная схема карьерного автосамосвала

На рис. 1 обозначено: a, b, c – размеры, определяющие положение центра масс автомобиля относительно осей колес и полотна дороги; межосевое расстояние (база автосамосвала) – $L=(a+b)$; d – колея автосамосвала; c_{wr}, μ_{wr} – коэффициенты жесткости и демпфирования передних и задних колес; $c_s, c_{wr}, \mu_s, \mu_{wr}$ – коэффициенты жесткости и демпфирования, соответственно, подвесок и колес; Z – относительное перемещение поддресоренной массы кузова перпендикулярно курсу движения автомобиля; Z_1, Z_2 – перемещение осей, соответственно, передних и задних колес перпендикулярно курсу движения автомобиля; X – перемещение центра масс автомобиля по курсу его движения; ϕ – угол поворота кузова относительно оси, проходящей через центр масс кузова перпендикулярно плоскости XOZ ; ϕ_1, ϕ_2 – угол поворота колес относительно оси; ψ – угол поворота кузова вокруг оси X ; α – угол наклона полотна дороги по направлению движения; $m_1, m_2, m_B, G_1, G_2, G$ – масса и вес, соответственно, передних, задних колес и кузова автосамосвала. Взаимодействие с дорожным покрытием выражается через нормальные реакции R_F, R_R , и силы сопротивления качению F_{kl} и F_{k2} .

Движение автомобиля рассматриваем в плоскости XOZ , проходящей через продольную ось автомобиля.

Для составления уравнения движения воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода, где при составлении выражений для кинетической T и потенциальной энергии Π , диссипативной функции D были использованы значения масс и моментов инерции $m_1, m_2, m_B, J_{YB}, J_{XB}, J_{Y1}, J_{Y2}$. В качестве обобщенных координат Q_i были выбраны $X, Z_1, Z_2, Z, \phi_1, \phi_2, \phi, \psi$.

Кинетическая энергия всей системы

$$T = \frac{1}{2} \cdot (J_{XB} \cdot \dot{\psi}^2 + J_{YB} \cdot \dot{\phi}^2 + \dot{X}^2 \cdot \frac{2(J_1 + J_2)}{r^2} + 2m_1 + 2m_2 + m_B) + J_{Y1} \cdot \dot{\phi}_1^2 + J_{Y2} \cdot \dot{\phi}_2^2 + m_B \cdot \dot{Z}^2 + m_1 \cdot \dot{Z}_1^2 + m_2 \cdot \dot{Z}_2^2$$

Потенциальная энергия всей системы

$$\Pi = \frac{1}{2} \cdot (c_s (\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2) + c_{wr} (\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2)).$$

Диссипативная функция

$$D = \frac{1}{2} \cdot (\mu_s (\dot{\Delta}_1^2 + \dot{\Delta}_2^2 + \dot{\Delta}_3^2 + \dot{\Delta}_4^2) + \mu_{wr} (\dot{\delta}_1^2 + \dot{\delta}_2^2 + \dot{\delta}_3^2 + \dot{\delta}_4^2)),$$

где $\Delta_i, \dot{\Delta}_i$ – соответственно, перемещение и скорость центра масс кузова автосамосвала в процессе движения по заданному профилю пути; $\delta_i, \dot{\delta}_i$ – соответственно, перемещение и скорость центра масс колес передней и задней подвески в процессе движения по заданному профилю пути.

Перемещение и скорость центра масс кузова автосамосвала в процессе движения по заданному профилю пути

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= Z + \psi \cdot \frac{L}{2} + \phi \cdot (a + b) - (Z_1 + \frac{\phi_1 \cdot L}{2}); \\ \Delta_2 &= Z - \psi \cdot \frac{L}{2} + \phi \cdot (a + b) - (Z_1 - \frac{\phi_1 \cdot L}{2}); \\ \Delta_3 &= Z + \psi \cdot \frac{L}{2} - \phi \cdot (a + b) - (Z_2 + \frac{\phi_2 \cdot L}{2}); \\ \Delta_4 &= Z - \psi \cdot \frac{L}{2} - \phi \cdot (a + b) - (Z_2 - \frac{\phi_2 \cdot L}{2}). \end{aligned} \tag{1}$$

Перемещение центра масс колес передней и задней подвески в процессе движения по заданному профилю пути

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \delta_3 = Z_1 - P(x); \\ \delta_2 &= \delta_4 = Z_2 - P(x). \end{aligned} \tag{2}$$

Функция $P(x)$ – предлагаемый авторами полином, описывающий характеристику пути, профиль дороги с учетом мелких неровностей в 0,05–0,2 м и продольным уклоном дороги в 7%

$$P(x) = 2,81863 \cdot 10^{-17} x^5 - 1,4033 \cdot 10^{-12} x^4 + 5,6 \cdot 10^{-9} x^3 - 6,9359 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,0719192 x. \tag{3}$$

После подстановки и решения в программном продукте “Wolfram Mathematica” выражений для кинетической и потенциальной энергии, диссипативной функции с учетом зависимостей (1–3), а также соответствующих преобразований, приходим к системе 8 дифференциальных уравнений второго порядка. Решения уравнений описывают изменения обобщенных координат, которые позволяют оценить динамику автомобиля с учетом характера дороги.

Используя программный продукт "Wolfram Mathematica", определим перемещения и ускорения, а так же силу тяги при преодолении пути с продольным уклоном $i = 7\%$ (дороги с учетом мелких неровностей в 0,05–0,2 м) согласно СНиП 2.05.07-91 „Промышленный транспорт. Строительные нормы и правила“, передними и задними колесами для автосамосвала БелАЗ 7513 с параметрами:

$a=2,2$ м; $b=3,1$ м; $c=3,1$ м; $c_{wv}=3,75 \cdot 10^5$ Н/м;
 $c_s=1,8 \cdot 10^4$ Н/м; $\mu_s=3 \cdot 10^5$ Н/м²; $m_I=3500$ кг,
 $J_{YI}=7875$ кгм²; $m_2=7000$ кг; $J_{Y2}=15750$ кгм²;
 $m_B=240000$ кг; $J_{XB}=101,2 \cdot 10^4$ кг м²; $J_{YB}=243 \cdot 10^4$ кг /м²;
 $r=1,57$ м; $X=32$ км/ч (8,9 м/с).

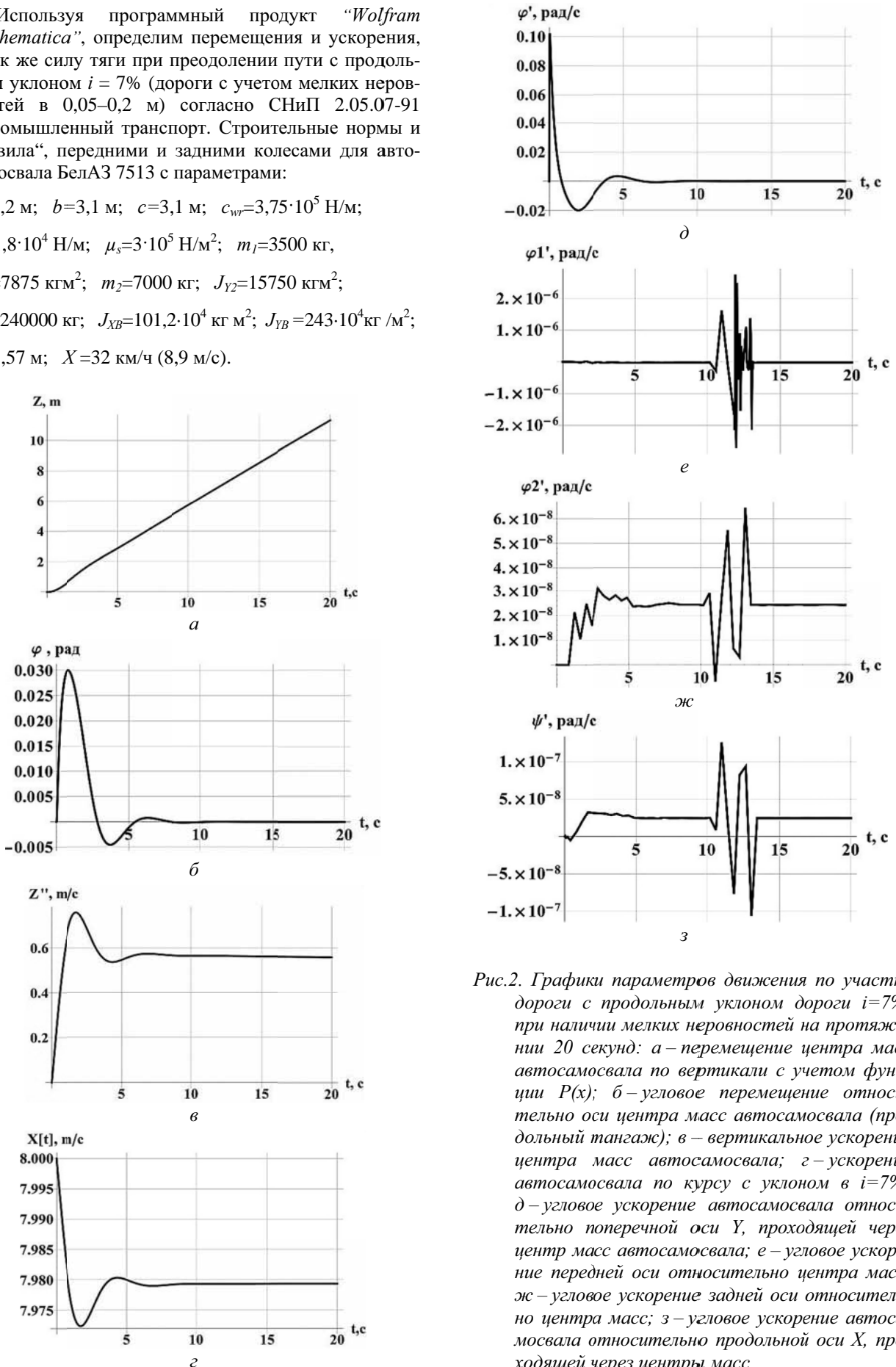


Рис.2. Графики параметров движения по участку дороги с продольным уклоном дороги $i=7\%$, при наличии мелких неровностей на протяжении 20 секунд: а – перемещение центра масс автосамосвала по вертикали с учетом функции $P(x)$; б – угловое перемещение относительно оси центра масс автосамосвала (продольный тангаж); в – вертикальное ускорение центра масс автосамосвала; г – ускорение автосамосвала по курсу с уклоном в $i=7\%$; д – угловое ускорение автосамосвала относительно поперечной оси Y, проходящей через центр масс автосамосвала; е – угловое ускорение передней оси относительно центра масс; ж – угловое ускорение задней оси относительно центра масс; з – угловое ускорение автосамосвала относительно продольной оси X, проходящей через центры масс

На рис. 2 приведены графики изменения основных динамических показателей автосамосвала при движении по участку дороги с продольным уклоном дороги $i=7\%$, при наличии мелких неровностей на протяжении 20 секунд.

Задачей исследования является оценка влияния конструктивных параметров автосамосвала на тягово-скоростные характеристики автосамосвала с учетом профиля и характера подъема, следовательно, для определения тяговых характеристик автосамосвала необходимо воспользоваться уравнениями распределения реакций на передние и задние колеса, а также включить в расчет продольный уклон дороги.

На рис. 2, з видно, что ускорение всей системы в момент движения автосамосвала по дороге с продольным уклоном и неровностями не постоянно, это влечет изменение величины силы тяги системы, то есть на систему действуют следующие силы сопротивления.

Сила сопротивления качению F_K

$$F_K = F_{K1} + F_{K2},$$

где F_{K1} , F_{K2} – силы сопротивления качению на колесах, соответственно, передней и задней оси автосамосвала

$$F_{K1} = f_k \cdot R_F;$$

$$F_{K2} = f_k \cdot R_R,$$

где f_k – коэффициент сопротивления качению, который зависит от уплотнения грунта, высоты неровности и радиуса колеса – принимаем равным 0,197 (движение по крупному щебню, с перепадами неровностей в 0,2 м, описывается в функции $P(x)$).

Реакция на заднюю ось

$$R_R = \frac{1}{a+b} \left(m_1 \cdot r + \frac{J_1}{r} + m_2 \cdot r + \frac{J_2}{r} + m_B \cdot c \right) \cdot \ddot{X} + G_B \cos \phi \cdot a - G_B \cdot \sin \phi \cdot c - G_1 \cdot \sin \phi \cdot r + G_2 \cdot \cos \phi \cdot (a+b) - G_2 \cdot \sin \phi \cdot r.$$

Реакция на переднюю ось

$$R_F = (G_1 + G_2 + G_B) \cdot \cos \phi - R_R.$$

Сила F_V сопротивления воздуха принимается равной нулю в результате малых скоростей.

Сила сопротивления подъему

$$F_{II} = G_a \cdot \sin \phi.$$

Сила инерции всей системы

$$F_i = (m_1 \cdot r + \frac{J_1}{r} + m_2 \cdot r + \frac{J_2}{r} + m_B \cdot c) \cdot \ddot{X}.$$

Тогда сила тяги всей системы будет равна сумме сил сопротивления

$$F_t = F_K + F_V + F_{II} + F_i.$$

Исследования показали, что при наличии возможности изменения межосевого расстояния (базы автосамосвала) происходит значительное уменьшение необходимой силы тяги при движении по дороге с продольным уклоном 7%, о чем свидетельствуют результаты, представленные на рис. 3

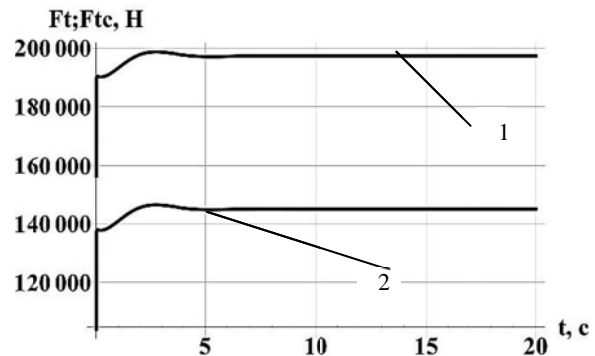


Рис. 3. Сила тяги всей системы, приложенная к ведущим колесам по дороге с продольным углом наклона $i = 7\%$: 1 – с обычной базой (межосевое расстояние $L = 5,3$ м); 2 – с измененной базой (межосевое расстояние $L = 5,96$ м)

Выводы.

1. Проявляющиеся при преодолении препятствий на протяжении пути с постоянным продольным уклоном дороги карьерным автосамосвалом собственные колебания значительно влияют на величину силы тяги F_t , и рассеиваются по отношению к установившемуся движению рис. 3.

2. Полученная пространственная математическая модель движения карьерного автосамосвала позволяет оценить влияние изолированной неровности дороги, а также конструктивных параметров автосамосвала на основные динамические и эксплуатационные тяговые характеристики.

3. По результатам расчета, на примере графических зависимостей рис. 2, а – 2, з, можно оценить величину смещения подвесок передних и задних колес, а также центра масс кузова при преодолении препятствий. Кроме того, получены значения ускорений, позволяющие оценить инерционную нагрузку на отдельные части конструкции машины при преодолении препятствий.

Список литературы / References

1. Зырянов И.В. Повышение эффективности систем карьерного автотранспорта в экстремальных условиях эксплуатации : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.05.06 „Гірничі машини” / И.В. Зырянов. – СПб., 2006. – 20 с.

Zyryanov, I.V. (2006), "Improvement of effectiveness of career vehicles systems in extreme conditions", Abstract of Dr. dissertation, Mining Machines, St. Petersburg., Russia.

2. Бунякин А.В. Комплексная оценка и прогнозирование показателей качества эксплуатации карьерных автосамосвалов: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.06 „Гірничі машини“ / А.В. Бунякин. – Кемерово, 2004. – 20 с.

Bunyakin, A.V. (2004), "Complex evaluation and prediction of quality indexes of mining dump trucks", Abstract of Ph.D. dissertation, Mining Machines, Kemerovo., Russia.

3. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин / Смирнов Г.А. – М : Машиностроение, 1990. – 352 с.

Smirnov, G.A. (1990), *Teoriya dvizheniya kolesnykh mashin* [The theory of wheeled vehicles motion], *Mashinostroyeniye*, Moscow, Russia

4. Блохин С.Е. Пути повышения тормозных возможностей шахтных локомотивов / С.Е. Блохин // Збірник наукових праць НГУ. – 2011. – № 36. – Т. 2. – С. 63–67.

Blokhin, S.E. (2011), "The ways of increasing brake possibilities of mine locomotives", *Zbirnyk naukovykh prats NGU*, no 36, Vol. 2, pp. 63-67.

Мета. Дослідження динаміки та тягово-швидкісних характеристик у процесі руху автосамоскида.

Методи. При виконанні роботи використовувалися як загальнонаукові, так і спеціальні методи досліджень, включаючи наукове узагальнення, методи комплексної оцінки технічного рівня, математичне моделювання та апарат лінійного програмування. Рішення даної задачі базується на складанні диференціального рівняння руху, для чого були використані рівняння Лагранжа другого роду, а також відповідні вирази кінетичної, потенційної енергії та дисипативної функції.

Результати отримані за допомогою математичних розрахунків у програмному продукті математичного аналізу та розрахунку – "Wolfram Mathematica".

Результат. У роботі наведена математична модель прямолінійного руху кар'єрного автосамоскида як багатомасової системи з вісьмома ступенями свободи на прямолінійній ділянці дороги з урахуванням стану дорожнього покриття. Отримана методика розрахунку тягових і динамічних характеристик автосамоскида у процесі руху по дорозі з позовжнім ухилом, що дозволяє отримати необхідну силу тяги.

Наукова новизна. Складена розрахункова схема та рівняння руху при прямолінійному русі машини з урахуванням пружних і розсіювальних характерис-

тик пружних зв'язків, позовжнього ухилу та профілю дороги, зміни конструктивних характеристик, що дозволить дати близьку до реальної картину динаміки руху та значення тягово-швидкісних характеристик.

Практична значимість. Розроблена методика розрахунку динамічних характеристик автосамоскида у процесі руху, а також аналіз параметрів конструкції автосамоскидів, на підставі чого можна дати рекомендації зі скорочення капітальних витрат на розробку кар'єрів.

Ключові слова: розрахункова схема, автосамоскид

Purpose. Research of dynamics and pull-speed characteristics during the process of dump truck movement.

Methods. There were used general scientific as well as special methods of research in current paper. They include scientific synthesis, integrated assessment methods of technical level, mathematical modeling and apparatus of linear programming. The solution of this problem is based on the composing of differential equation of motion, for which it was used the Lagrange equation of the second order, and appropriate expression of the kinetic, potential energy and dissipation function.

The results are obtained by mathematical calculations in the software for mathematical analysis and calculation – "Wolfram Mathematica".

Result. The article is going about the mathematical model of the linear movement of career dump truck as a multimass system with eight degrees of freedom on a linear track, accounting for the road covering conditions. The method for calculation pulling and dynamic characteristics of dump truck movement on the road with longitudinal gradient is obtained. It allows to receive required traction force.

Originality. It was compiled a calculation scheme and equations of motion in rectilinear vehicle's motion, which includes elastic-dissipative characteristics of ties, longitudinal incline and road profile, changing of mechanical characteristics that are similar to real exploitation indexes of career dump truck and indexes of traction performance.

Practical value. The evaluation method of the dynamical characteristics of the dump truck while driving regime is described. The analysis of dump truck design parameters, basing on which it is possible to give the recommendations on reduction of capital costs on development of the open mines.

Keywords: calculation scheme, dump truck

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.П. Франчуком. Дата надходження рукопису 12.12.12.