

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_2\_127

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАРЬЕРНОГО АВТОСАМОСВАЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РАМУ В ЗАДАННЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**И.В. Чичекин**ORCID: 0000-0001-7632-7657 e-mail: [chichekin\\_iv@bmstu.ru](mailto:chichekin_iv@bmstu.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия**Я.Ю. Левенков**ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: [levenkov\\_yy@bmstu.ru](mailto:levenkov_yy@bmstu.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия**Г.А. Арутюнян**ORCID: 0000-0001-5068-8550 e-mail: [georgy.arut@bmstu.ru](mailto:georgy.arut@bmstu.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия**Ф.А. Нырков**ORCID: 0000-0003-3431-8116 e-mail: [nfa18m127@student.bmstu.ru](mailto:nfa18m127@student.bmstu.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия**О.И. Чудаков**ORCID: 0000-0001-8788-7123 e-mail: [chudakov@bmstu.ru](mailto:chudakov@bmstu.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия

Представлена математическая модель динамики карьерного автосамосвала для получения нагрузок, действующих на раму, подвеску и другие элементы колесной машины. Приведен список типовых нагрузочных режимов для определения максимальных нагрузок и моделирования основных эксплуатационных режимов движения. Разработка математической модели карьерного самосвала для определения нагрузок в шарнирах и силовых связях, связанных с рамой для последующих прочностных расчетов и анализа долговечности, актуальна на ранних стадиях проектирования. Показаны примеры расчетов, даны рекомендации и примеры использования математической модели, разработанной в системе расчета динамики связанных тел (*Multi Body Dynamics – MBD*).

**Ключевые слова:** карьерный автосамосвал, динамика твердых тел, виртуальный прототип, долговечность, прочностной расчет, метод конечных элементов, нагрузки, подвеска, нагрузочные режимы, режимы эксплуатации.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Чичекин, И.В. Разработка математической динамической модели карьерного автосамосвала для определения нагрузок, действующих на раму в заданных режимах эксплуатации / И.В. Чичекин, Я.Ю. Левенков, Г.А. Арутюнян, Ф.А. Нырков, О.И. Чудаков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №2. С. 127-137. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_2\_127

## DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL DYNAMIC MODEL OF AN OPEN-PIT DUMP TRUCK FOR DETERMINATION OF LOADS ACTING ON FRAME IN SPECIFIED OPERATING MODES

**I.V. Chichekin**

ORCID: **0000-0001-7632-7657** e-mail: **chichekin\_iv@bmstu.ru**  
Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**Y.Y. Levenkov**

ORCID: **0000-0001-6556-3232** e-mail: **levenkov\_yy@bmstu.ru**  
Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**G.A. Arutunyan**

ORCID: **0000-0001-5068-8550** e-mail: **georgy.arut@bmstu.ru**  
Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**F.A. Nyrkov**

ORCID: **0000-0003-3431-8116** e-mail: **nfa18m127@student.bmstu.ru**  
Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**O.I. Chudakov**

ORCID: **0000-0001-8788-7123** e-mail: **chudakov@bmstu.ru**  
Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** Mathematical model of dynamics of an open-pit dump truck for obtaining of loads acting on frame, suspension elements and other elements of a wheeled vehicle, is presented. List of typical load modes for determination of maximum loads and modeling of the main operational driving modes, is given. Examples of calculations performed are shown, and recommendations and examples of use of the developed mathematical model are given. Development of mathematical model of an open-pit dump truck for determination of loads in articulation joints and power connections associated with the frame for subsequent strength calculations and durability analysis is an urgent task at the early stages of design. Mathematical model is developed in the connected bodies dynamics calculation system (Multi Body Dynamics – MBD).

**Key words:** open-pit dump truck, dynamics of solids, virtual prototype, durability, strength calculation, finite element method, loads, suspension, load modes, operating modes.

**FOR CITATION:** Chichekin I.V., Levenkov Y.Y., Arutyunyan G.A., Nyrkov F.A. Development of mathematical dynamic model of an open-pit dump truck for determination of loads acting on frame in specified operating modes. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №2. Pp. 127-137. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_2\_127

### Введение

Транспортировка сыпучих грузов и полезных ископаемых в открытых карьерах как в нашей стране, так и за рубежом производится, в основном, автомобильным транспортом. Повышения эффективности его использования можно достичь за счет повышения грузоподъемности, снижения снаряженной массы и увеличения долговечности основных элементов карьерного самосвала [1-3]. Для карьерных автосамосвалов важно минимизировать массу рамы при заданном уровне жесткости и прочности, поскольку это влияет на массу перевозимого груза, себестоимость перевозок и прибыль. Готовых методов расчета, учитывающих все многообразие

нагрузочных режимов, в которых эксплуатируются карьерные самосвалы, в настоящее время не существует. Их разработка возможна с использованием компьютерного моделирования. Для проектирования рамы, получения нагрузок в шарнирах и силовых связях, соединяющих раму с другими элементами на ранней стадии проектирования, сейчас используются математические модели динамики транспортных средств, разработанные в приложениях расчета динамики связанных тел (MBD) [4-7]. Используемый подход позволяет автоматизированно получить нагрузки на все элементы транспортного средства в любой момент моделирования. Они могут быть легко импортированы в приложения по проведению прочностных расчетов методом конечных элементов.

Целью работы является математическая модель карьерного самосвала для определения нагрузок в шарнирах и силовых связях, связанных с рамой для последующих прочностных расчетов и анализа долговечности.

Для достижения цели разработана и представлена математическая модель динамики карьерного автосамосвала, выбраны типовые нагрузочные режимы движения. Проведены расчеты в среде моделирования динамики связанных тел в выбранных нагрузочных режимах. Представлены примеры результатов расчета.

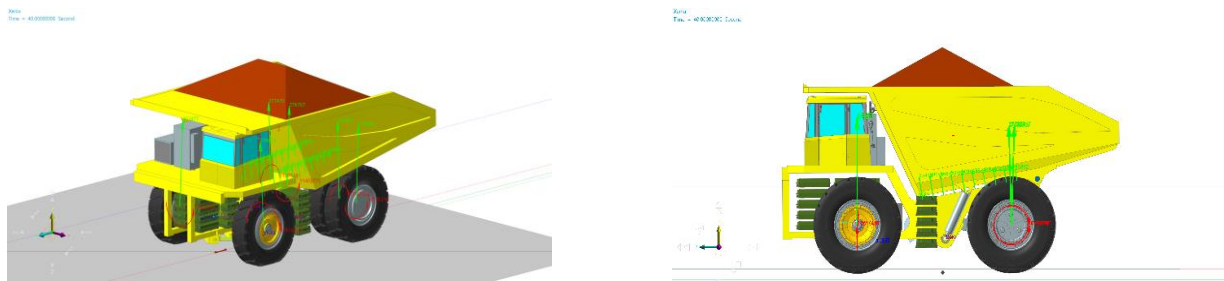
### Описание динамической модели карьерного автосамосвала

Общий вид динамической модели карьерного автосамосвала, разработанной в системе расчета динамики тел, представлен на рис. 1. Математическая модель автосамосвала (рис. 2) включает в себя батареи, груз, грузовую платформу (грузонесущую емкость), задний мост с подвеской, кабину, колеса, раму (раму), опорную поверхность (дорогу), передний мост с подвеской и рулевым управлением, ТЭД привода ведущих колес.

Допущения при построении модели:

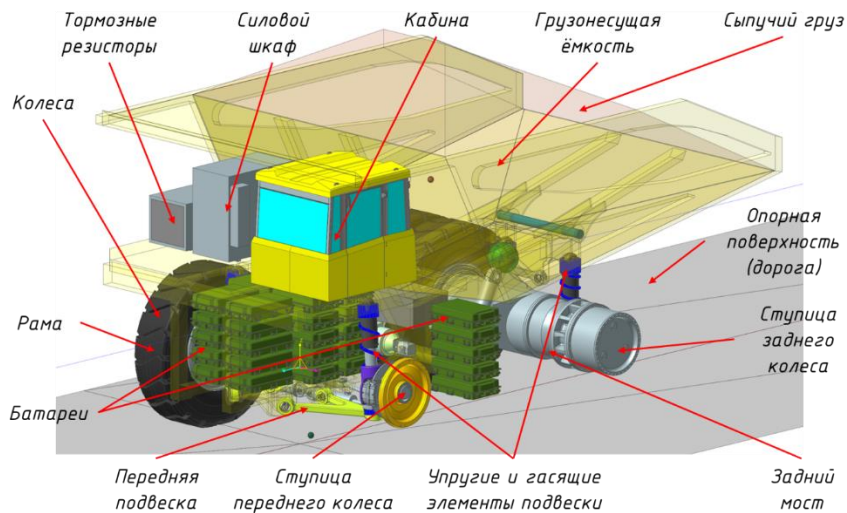
- все звенья динамической системы абсолютно жесткие;
- трение в шарнирах отсутствует;
- груз смоделирован абсолютно жестким единым телом, жестко связанным с грузонесущей емкостью;
- деформация колес учтена в модели взаимодействия колеса с опорной поверхностью, силы на колесо приложены в центре.

Математические модели, созданные в приложениях по расчету динамики твердых тел, позволяют определять нагрузки в шарнирах для последующих прочностных расчетов [7, 8] и для расчета долговечности деталей [9, 10], подбирать компоненты колесной машины. В настоящей работе рассматривается определение только максимальных нагрузок.



**Рис. 1. Общий вид модели карьерного автосамосвала в статическом положении при полной массе на горизонтальной опорной поверхности**

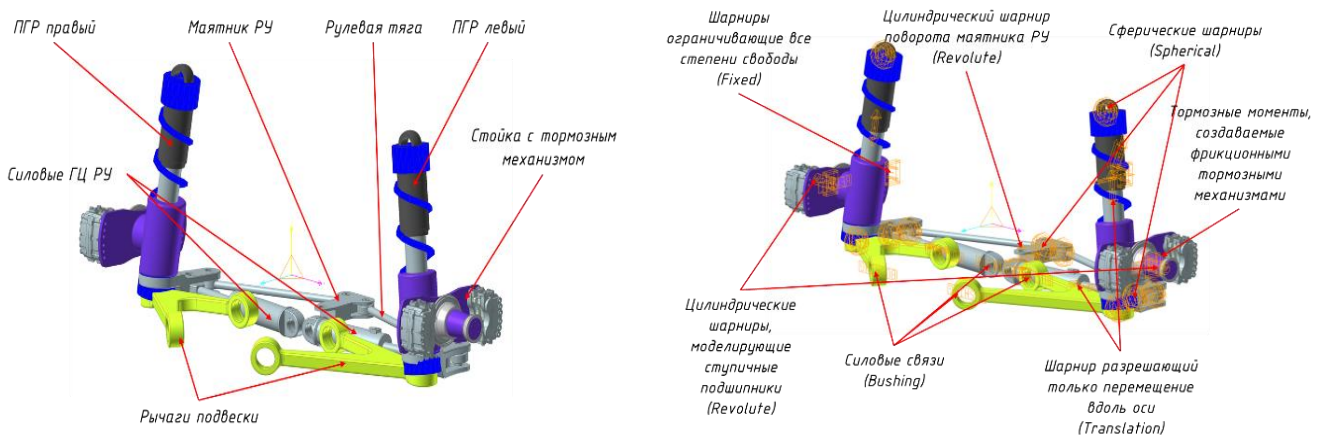
**Fig. 1. General view of the model of a mining dump truck in a static position with a full weight on a horizontal surface**



**Рис. 2. Компоненты математической модели карьерного автосамосвала**

**Fig. 2. Components of the mathematical model of a mining dump truck**

Геометрия передней подвески и рулевого управления импортирована из CAD геометрии переднего моста. Общий вид модели переднего моста со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели карьерного самосвала показан на рис. 3. Звенья подвески связаны между собой жесткими шаровыми шарнирами (Spherical), ступичные подшипники и подшипник поворота тележки смоделированы шарнирами вращения (Revolute).



**Рис. 3. Общий вид модели переднего моста со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели карьерного самосвала**

**Fig. 3. General view of the front axle model with the layout of hinges and power connections in the mining dump truck model**

Модель рулевого управления включает маятник рулевого управления соединенных шарниров Revolute с рамой, двух рулевых тяг и силовых гидроцилиндров (рис. 3). Угол поворота маятника ограничивается так, чтобы углы поворота управляемых колес не превышали  $29^\circ$  и  $41^\circ$  для наружного и внутреннего управляемых колес соответственно.

Упругий и гасящий элементы передней и задней подвесок заданы силовым соединением типа «Пружина» в программном комплексе по расчету динамики твердых тел (рис. 4). Усилие, развиваемое силовым соединением типа «Пружина» – упругий элемент с демпфером в зависимости от ее деформации и скорости сжатия, вычисляется по формуле:

$$F_s = -K \cdot (l - l_f)^m - C \cdot \dot{l}^n + F$$

Stiffness Coefficient	<i>K</i>	Коэффициент жесткости пружины
Damping Coefficient	<i>C</i>	Коэффициент демпфирования
Stiffness Exponent	<i>m</i>	Показатель степени, изменения деформации пружины
Damping Exponent	<i>n</i>	Показатель степени, изменения скорости деформации пружины
Free Length	<i>l<sub>f</sub></i>	Свободна длина пружины
Current Length	<i>l</i>	Текущая длина пружины. Определяется как расстояние между двумя маркерами определяющих положение пружины
Pre Load	<i>F</i>	Предварительная сила, развиваемая пружиной в начальный момент времени моделирования

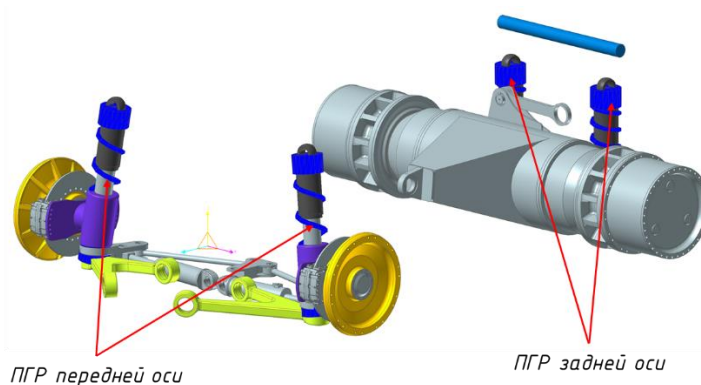


Рис. 4. Размещение упругих элементов подвески

Fig. 4. Placement of elastic suspension elements

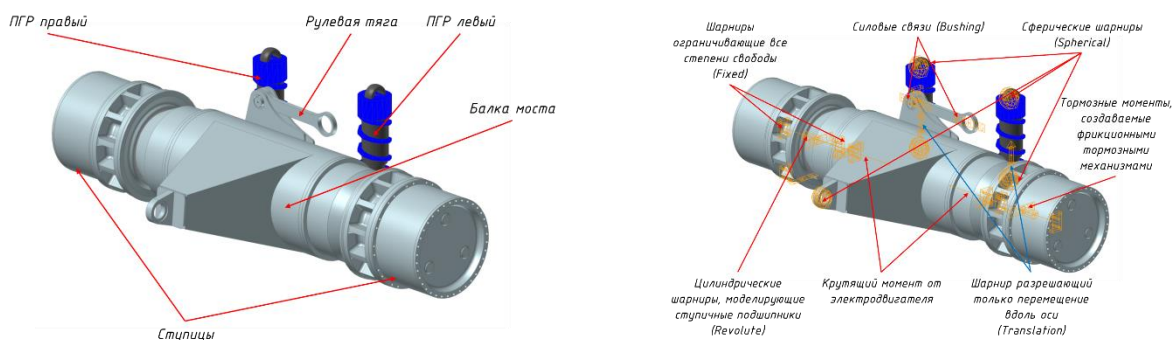


Рис. 5. Общий вид модели заднего моста со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели карьерного самосвала

Fig. 5. General view of the rear axle model with the layout of hinges and force connections in the model of a mining truck

Геометрия задней подвески импортирована из CAD геометрии заднего моста самосвала. Общий вид модели заднего моста со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели карьерного самосвала показан на рис. 5. Звенья подвески связаны между собой жесткими шаровыми шарнирами (Spherical), ступичные подшипники и подшипник поворота тележки смоделированы шарнирами вращения (Revolute) (рис. 5). При моделировании используется стандартная модель взаимодействия шины с опорной поверхностью из библиотеки приложения по расчету динамики твердых тел [11-13]. Общий вид модели колесного движителя представлен на рис. 6. Принята следующая нумерация звеньев, шарниров и силовых соединений: элементы, относящиеся к левому переднему движителю, имеют индекс «11», элементы, относящиеся к правому

переднему движителю, имеют индекс «12», элементы, относящиеся к левому заднему движителю, имеют индекс «21», элементы, относящиеся к правому заднему движителю, имеют индекс «22». Колеса задней оси двухскатные. Наружные колеса имеют приставку «*out*», внутренние – «*in*». Шины размерностью 27.00R49, номинальной грузоподъемностью 534462 Н при давлении воздуха в шине 7 атм. Масса одного колеса в сборе составляет 2 000 кг.

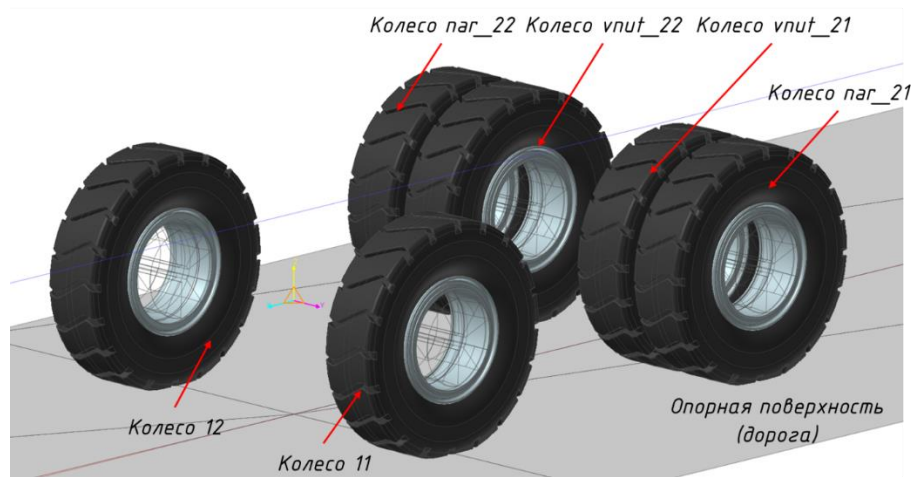


Рис. 6. Модели колесного движителя

Fig. 6. Wheel mover models

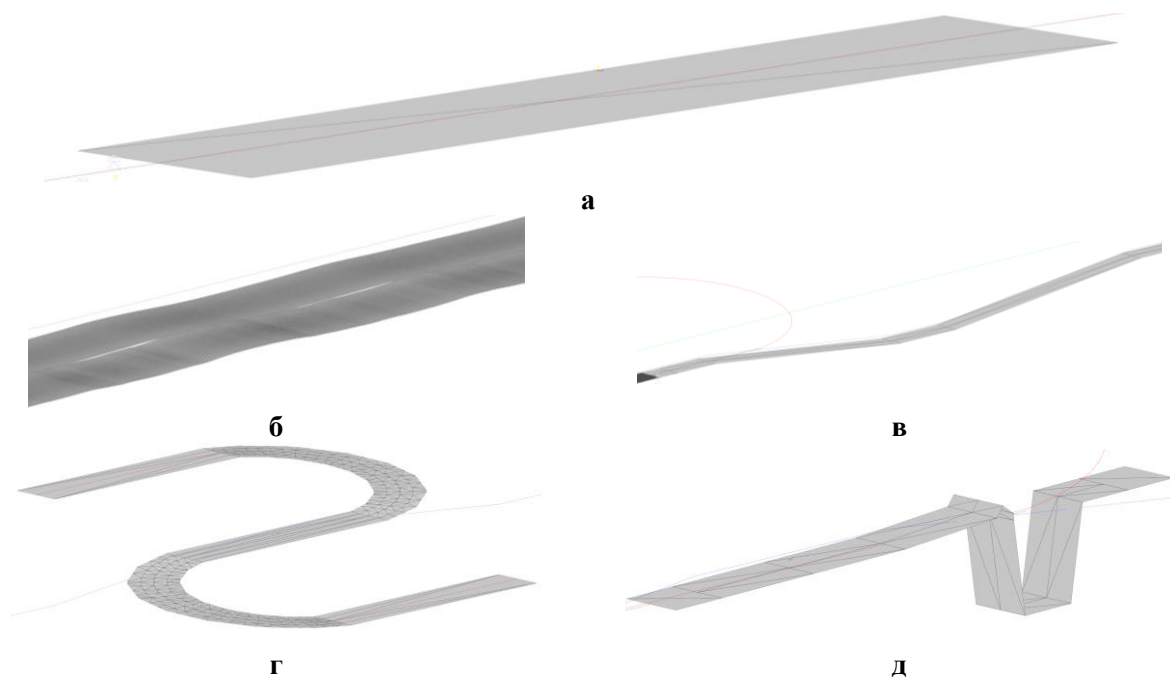


Рис. 7. Общий вид моделей опорных поверхностей:

*а* – ровная горизонтальная; *б* – неровная; *в* – трасса для моделирования спусков и подъемов;  
*г* – трасса для моделирования спусков и подъемов при повороте;  
*д* – для моделирования упора колес при разгрузке

Fig. 7. General view of models of supporting surfaces:

*a* – smooth horizontal; *b* – not even; *c* – track for modeling descents and ascents;  
*d* – track for modeling descents and ascents when turning;  
*e* – to simulate the stop of the wheels during unloading



**Рис. 8. Иллюстрации примеров моделирования нагрузочных режимов:**  
*a – статика без груза; б – статика с грузом; в – переезд рампы 10 % с грузом – движение на спуске; г – переезд рампы 10 % с грузом – движение на подъеме; д – косогор 5 %; е – криволинейное движение; ж – разгон; з – торможение; и – торможение на спуске; к – буксировка вперед без груза на подъеме; л – спуск с поворотом вперед; м – движение по неровной опорной поверхности*

**Fig. 8. Illustrations of examples of simulation of load modes:**  
*a – static without load; b – static with a load; c – ramp crossing 10 % with a load – movement on the descent; d – ramp crossing 10 % with a load-movement on the rise; e – slope 5 %; e - curvilinear movement; g – acceleration; h – braking; and – braking on the descent; k – towing forward without load on the rise; l – descent with a turn forward; m – movement on an uneven supporting surface*

В конструкцию колес переднего моста добавлены вставки. Они смоделированы отдельными телами, жестко связанными с передними колесами шарнирами Fixed. Такое решение поз-

волило использовать одну математическую модель колеса с одинаковыми колесами для передней и задней осей. Моделирование нагрузочных режимов карьерного самосвала производилось на различных ОП. Модель ОП описывалась в подключаемых файлах, коэффициент сцепления задавался равным 0.5. Общий вид основных моделей ОП, использованных при моделировании, представлен на рис. 7.

### Описание расчетных случаев

Проведен анализ условий эксплуатации карьерных автосамосвалов при добыче полезных ископаемых и перевозки горной породы; список расчетных случаев представлен в табл. 1.

Таблица 1.

#### Список расчетных режимов для определения нагрузок в шарнирах рамы карьерного автосамосвала

Table 1.

#### List of design modes for determining loads in the frame hinges of a mining dump truck

№	Название
01	Статика без груза
02	Статика с грузом
03	Переезд рампы 10 % с грузом
04	Переезд рампы 10 % без груза
05	Косогор 5 %
06	Разгон – торможение с грузом вперед
07	Разгон – торможение с грузом назад
08	Разгон – торможение без груза вперед
09	Разгон – торможение без груза назад
10	Криволинейное движение с минимальным радиусом поворота с грузом вперед
11	Криволинейное движение с минимальным радиусом поворота без груза вперед
12	Криволинейное движение с минимальным радиусом поворота с грузом назад
13	Криволинейное движение с минимальным радиусом поворота без груза назад
14	Поворот на месте управляемых колес
15	Проезд заданного коридора
16	Торможение на спуске с грузом
17	Торможение на спуске без груза
18	Упор колес при разгрузке
19	Буксировка вперед без груза
20	Буксировка назад без груза
21	Подъем с поворотом вперед
22	Спуск с поворотом вперед
23	Движение по неровному ОП

### Описание результатов моделирования

В результате проведенного моделирования получены усилия во всех нагрузочных режимах в шарнирах и силовых связях карьерного автосамосвала. Примеры иллюстраций по некоторым нагрузочным режимам представлены на рис. 8. Получены реакции в пятне контакта в любой момент времени для каждого нагрузочного режима. Например, для нагрузочного режима движение по неровной ОП (рис. 8, м) представлено изменение реакций во время моделирования для переднего левого и заднего левого наружного колеса (рис. 9). Также в процессе моделирования в шарнирах и силовых связях динамической модели карьерного автосамосвала получены силы и моменты. Полученные значения были экспортированы и использовались для последующих прочностных расчетов МКЭ. Нагрузки выписывались относительно маркера центра масс



(CM Marker, рис. 10). Направления систем координат в точках приложения нагрузок показаны на рис. 10. Для рассматриваемой работы нагрузки получены в 55 точках.

Также с помощью разработанной динамической модели производилась оценка работоспособности рулевого управления. Для этого был задан коридор [14] и опорная траектория, вдоль которой должен был двигаться исследуемый карьерный автосамосвал.



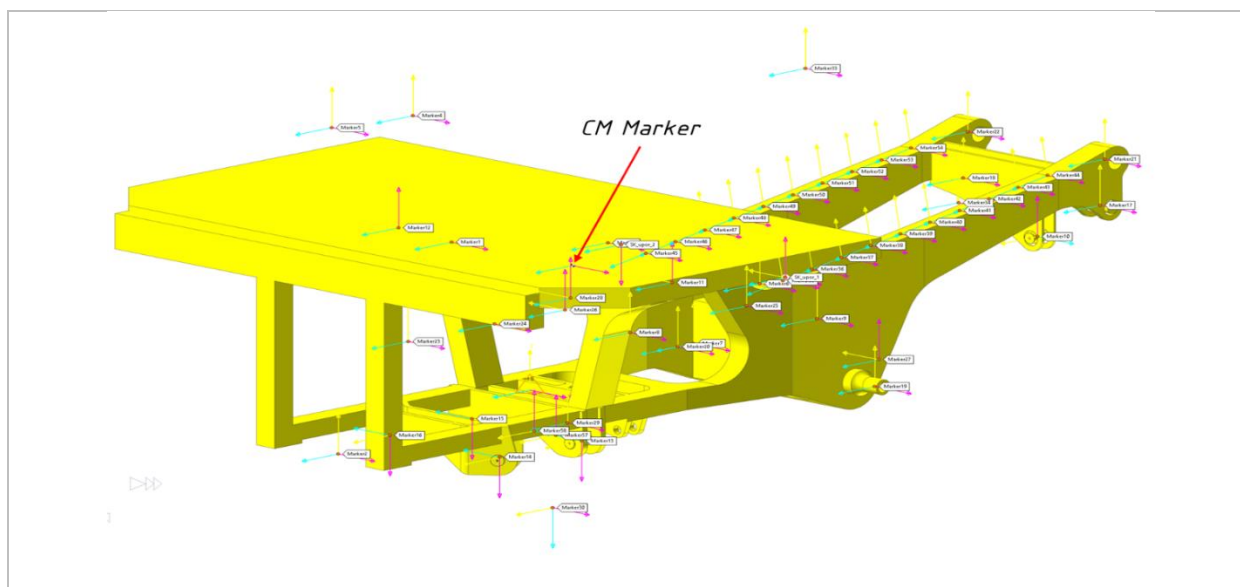
*a*



*б*

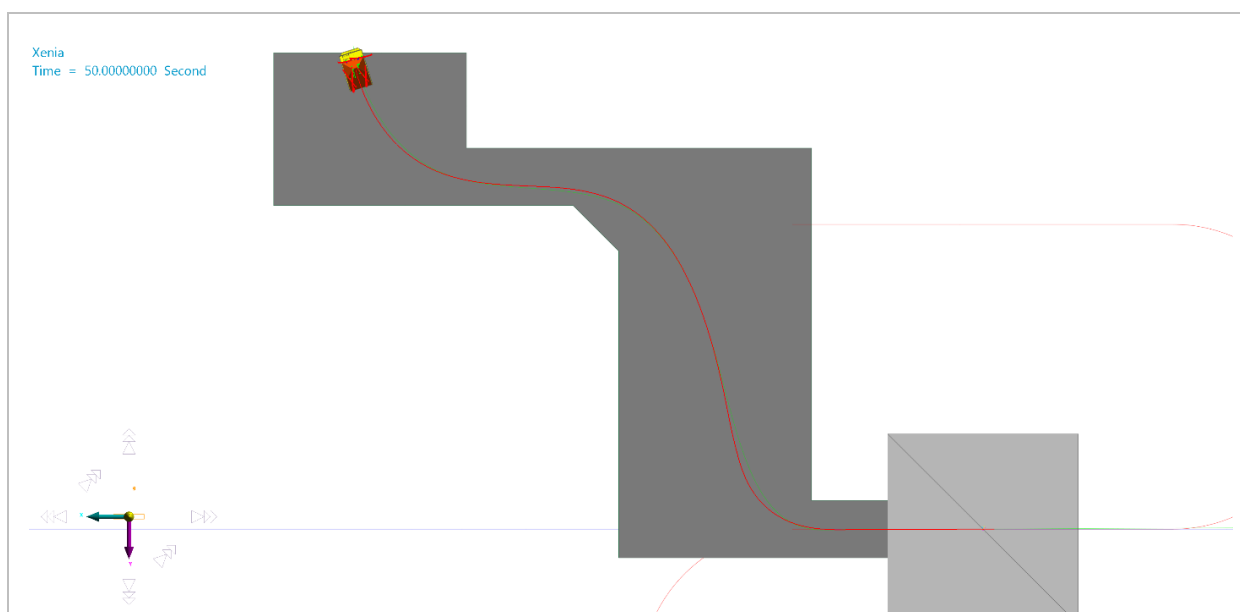
**Рис. 9. Изменение реакций в пятне контакта колес карьерного автосамосвала при движении по неровной опорной поверхности:**  
*a* – переднее левое колесо; *б* – заднее левое наружное колесо

**Fig. 9. Change in reactions in the contact patch of the wheels of a mining dump truck when driving on an uneven supporting surface:**  
*a* – front left wheel; *b* – rear left outer wheel



**Рис. 10. Схема размещения и название маркеров систем координат шарниров соединения рамы карьерного самосвала**

**Fig. 10. Layout scheme and the name of the markers of the coordinate systems of the hinges of the mining dump truck frame connection**



**Рис. 11. Общий вид модели коридора**

**Fig. 11. General view of the corridor model**

### Выводы

Представлена математическая модель динамики карьерного автосамосвала для получения нагрузок, действующих на раму, элементы подвески и другие элементы колесной машины. Анализ условий эксплуатации автосамосвалов позволил сформировать список нагрузочных режимов, в которых не только определяются максимальные нагрузки, но и анализируются эксплуатационные свойства, проводится анализ работы систем подрессоривания и рулевого управления.

Разработанная модель динамики автосамосвала универсальна, она позволяет не только определять нагрузки в шарнирах и силовых связях, но и исследовать кинематику подвески и механизма поворота, работу гидроцилиндров механизма опрокидывания грузонесущей емкости, проводить анализ эксплуатационных свойств.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2020-031 от 14.12.2020 г. с ПАО «КАМАЗ» по комплексному проекту «Создание высокотехнологичного производства семейства роботизированных карьерных самосвалов грузоподъемностью до 90 т с электромеханической трансмиссией на основе цифровых технологий», при участии ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева» в части выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.*

### Библиографический список

1. **Боровков, Ю.А.** Основы горного дела: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю.А. Боровков, В.П. Дробаденко, Д.Н. Ребриков. – М.: Издательский центр «Академия»; «Академия-Медиа», 2012. – 432 с.
2. **Кольга, А.Д.** Повышение эффективности и расширение области применения автомобильного транспорта на карьерах / А.Д. Кольга, С.Е. Гавришев // Добыча, обработка и применение природного камня: Сб. науч. тр. Вып. 3. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 179-191.
3. **Андреев, Л.И.** Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов / Л.И. Андреева, Ю.Ю. Ушаков // Известия УГГУ. 2016. № 3(43). С. 74-77.
4. **Vdovin D.S.** Quad bike frame dynamic load evaluation using full vehicle simulation model. Vdovin D., Chichekin I., Ryakhovsky O. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. С. 012025.
5. **Vdovin D.S., Chichekin I.V., Levenkov Y.Y., Shabolin M.L.** Automation of wheeled vehicles load bearing frames finite-element models loading procedure by using inertia relief method and vehicle multi-body dynamics model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Т. 534. № 1. С. 012024.
6. **Gorelov V.A., Komissarov A.I.** Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire-Rigid Terrain Irregularities Interaction. Procedia Engineering. – 2016. Vol. 150. Pp. 1322-1328.
7. **Вдовин, Д.С.** Виртуальный стенд для определения нагрузок на рулевое управление автомобиля / Д.С. Вдовин, И.В. Чичекин, Т.Д. Поздняков // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 8 (68). С. 3.
8. **Vdovin D., Chichekin I.** Loads and Stress Analysis Cycle Automation in the Automotive Suspension Development Process. Procedia Engineering. 2016. Т. 150. С. 1276-1279.
9. **Вдовин, Д.С.** Нагружение конечно-элементных моделей рамколесных машин с применением метода inertia relief и твердотельной динамической модели автомобиля / Д.С. Вдовин, Я.Ю. Левенков, И.В. Чичекин // В сб.: Технологии и компоненты интеллектуальных транспортных систем. 2018. С. 620-640.
10. **Вдовин, Д.С.** Прогнозирование усталостной долговечности элементов подвески полуприцепа на ранних стадиях проектирования / Д.С. Вдовин, И.В. Чичекин, Я.Ю. Левенков // Труды НАМИ. 2019. № 2 (277). С. 14-23.
11. **Рачејка Н.В.** Tyre and Vehicle Dynamics. Oxford, Butterworth Heinemann, 2006. 672 p.
12. **Рачејка Н.В., Besselink I.Y.** Magic Formula Tyre Model with Transient Properties. Supplement to Vehicle System Dynamics, 1997, vol. 27, pp. 234-249.
13. **TNO Automotive: MF-Tool 6.1 User Manual.** – Netherlands, 2008.
14. **ГОСТ ISO 5010:2011 Машины землеройные.** Системы рулевого управления колесных машин.

*Дата поступления  
в редакцию: 28.12.2021*