

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЁННЫХ МАШИН

<sup>1</sup>Петровский А.Л., <sup>1</sup>Гурвич А.Ю., <sup>2</sup>Сафронов К.И.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

<sup>2</sup>ОАО «Амкодор», Минск

Проблема обеспечения управляемости и устойчивости транспортных средств и мобильного технологического оборудования до сих пор остается актуальной и однозначно до конца не решена [1–4]. Наиболее остро эта проблема встает при проектировании транспортных средств с шарнирно-сочлененной рамой. Такие машины обладают повышенной маневренностью, проходимостью и поэтому находят своё применение в строительной, горнодобывающей, лесохозяйственной и других отраслях промышленности. Особое внимание стоит уделить подземным самосвалам с шарнирно-сочлененной рамой, поскольку их производительность в основном зависит от способности маневрировать в стесненных условиях тоннелей при значительных габаритах и грузоподъемности машины.

Исследования динамических характеристик таких машин с использованием аналитических методов [1] сопряжено со сложностью решения системы дифференциальных уравнений с большим количеством неизвестных. Применение методов виртуального моделирования позволяют исследовать маневренность и устойчивость автомобиля в динамической постановке, т.е. воспроизводится поведение объекта с учётом массово-инерционных характеристик, конструктивных особенностей рамы и ходовой части.

В данной работе описана методика расчёта показателей маневренности и устойчивости шарнирно-сочлененного двухосного самосвала БелАЗ 75800, которая базируется на построении модели и проведении виртуальных испытаний в пакете SolidWorks Motion [5].

В основу методики расчета характеристик управляемости и устойчивости движения шарнирно-сочлененных машин (в соответствии с ГОСТ [6–8]) в пакете SolidWorks Motion входит:

- определение радиусов траекторий установившегося поворота при различных скоростях движения;
- определение углов складывания секций, при которых наблюдается потеря устойчивости машины, совершающей установившейся поворот;
- определение предельных углов бокового крена машины, совершающей установившейся поворот;
- определение силовых характеристик взаимодействия колес машины с полигоном при установившемся повороте;
- определение траекторий неустановившегося поворота при различных скоростях движения;
- определение углов складывания секций, при которых наблюдается потеря устойчивости машины, совершающей неустановившейся поворот;
- определение предельных углов бокового крена машины, совершающей неустановившейся поворот;
- определение силовых характеристик взаимодействия колес при неустановившемся повороте.

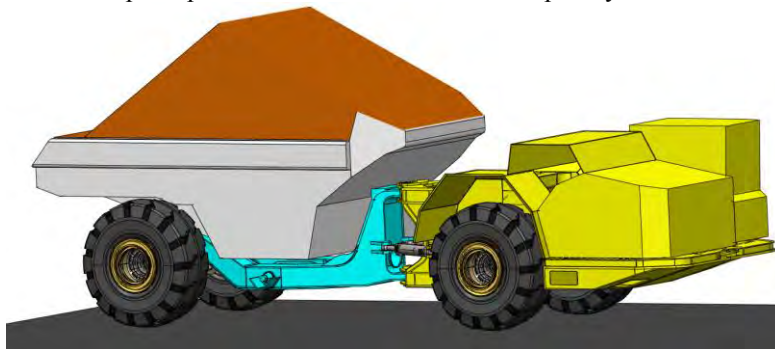


Рисунок 1 – Трехмерная модель шарнирно-сочлененного самосвала БелАЗ 75800

Модель самосвала состоит из двух полурам, четырёх колёс, передней оси, двух цилиндров и двух поршней гидрочилиндров, виртуальный полигон. Все основные части модели имеют следующие взаимосвязи:

- поворотным шарниром связаны задние колёса с задней полурамой, передние колёса с передней осью, передняя ось с передней полурамой, полурамы между собой, цилиндры и поршни с полурамами;
- цилиндрическим шарниром связаны цилиндр с поршнем;
- контактное соединение определено между всеми колёсами и полигоном, полурамами и полигоном, передней осью и передней полурамой.

Для каждой группы контактов задавались свои коэффициенты трения, жесткости и демпфирования. В модели учтена возможность качания передней оси самосвала во фронтальной плоскости на  $\pm 15^\circ$ . Управление поворотом осуществляется через изменение положения поршня относительно цилиндра с течением времени (рисунок 2). Скорость движения автомобиля задавалась через угловую скорость вращения каждого колеса.

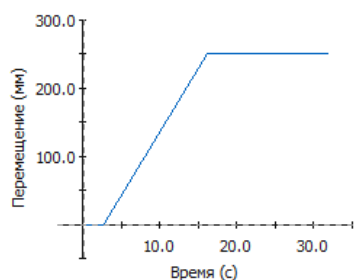


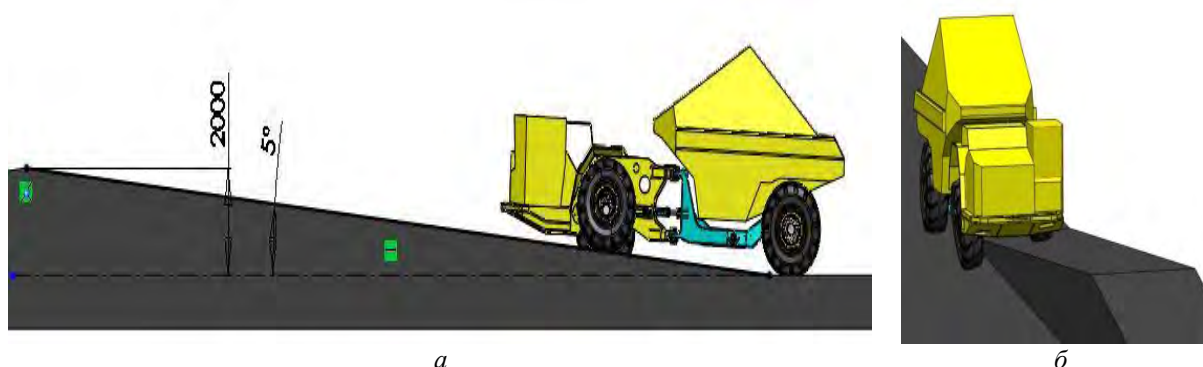
Рисунок 2 - Функция изменения положения поршня относительно цилиндра

Виртуальные испытания проводятся в два этапа. На первом этапе виртуальная модель разгоняется до скоростей 10, 20, 30, 40 км/ч, в момент времени 2.8 с, когда скорости поступательного движения становится постоянной, начинает сжиматься гидроцилиндр. В период времени с 2.8 до 16 с поршень относительно своего первоначального положения сместится на 250 мм, что соответствует максимальному углу складывания секций в  $42^\circ$ , и до конца расчёта остаётся постоянным.

Критерием потери устойчивости на этом этапе будет величина скорости движения машины и её угол складывания в момент отрыва переднего внутреннего колеса. На втором этапе виртуальная модель движется прямолинейно и одной стороной наезжает на уклон в  $5^\circ$ , высотой – 2 м, рисунок 3. Критерием потери устойчивости в этом случае будет угол бокового крена при отрыве заднего внутреннего колеса машины от полигона.

Критерием потери устойчивости на этом этапе будет величина скорости движения машины и её угол складывания в момент отрыва переднего внутреннего колеса.

На втором этапе виртуальная модель движется прямолинейно и одной стороной наезжает на уклон в  $5^\circ$ , высотой – 2 м, рисунок 3. Критерием потери устойчивости в этом случае будет угол бокового крена при отрыве заднего внутреннего колеса машины от полигона.

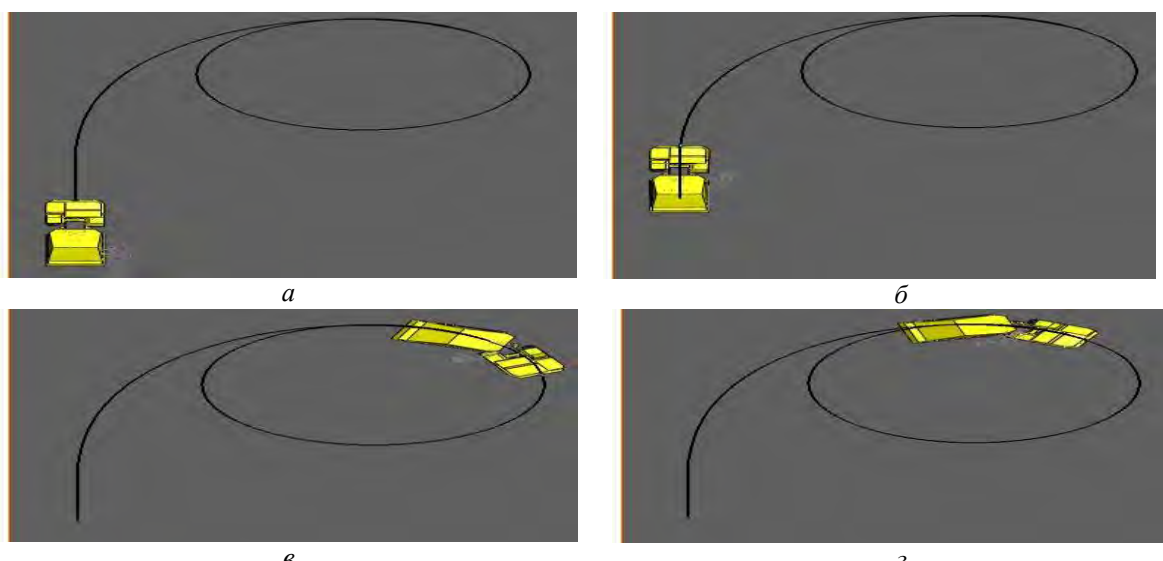


а – вид спереди на модель самосвала, въезжающего на уклон;  
б – вид слева на модель самосвала, въезжающего на уклон.

Рисунок 3 – Движение модели самосвала по полигону с уклоном

Результатами виртуальных испытаний маневренности и устойчивости на опрокидывание шарнирно-сочленённого самосвала, проводимых методами виртуального моделирования в пакете SolidWorks Motion, могут быть как в виде таблиц и графиков, так и анимация поведения модели в процессе расчёта.

На рисунке 4 представлены этапы движения модели во время прохождения поворота на скорости 10 км/ч.



а – начало движения; б – вход в поворот; в – начало установившегося поворота; г – конец движения.

Рисунок 4 – Движение модели по полигону

На рисунке 5 представлены этапы движения модели во время прохождения поворота.

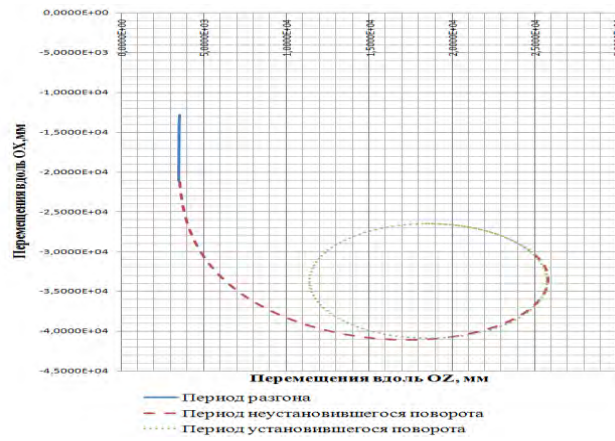


Рисунок 5 - Этапы движения модели

На рис. 6 представлена графическая зависимость контактных сил между каждым колесом машины и испытательным полигоном за период всего движения.

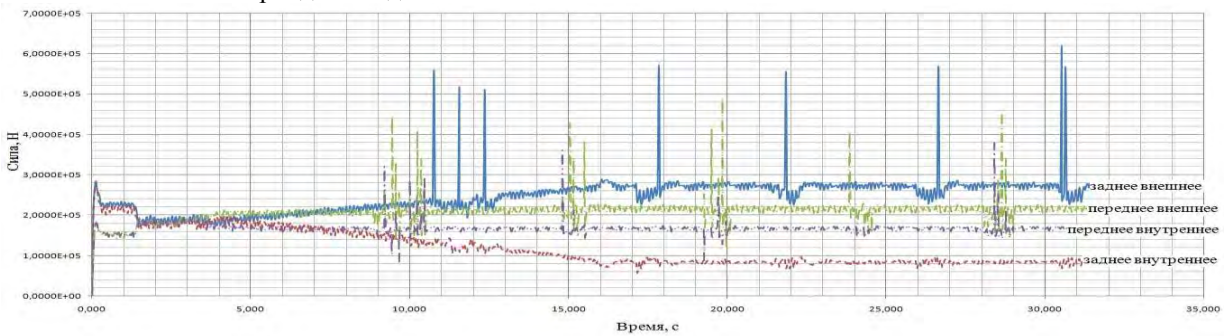
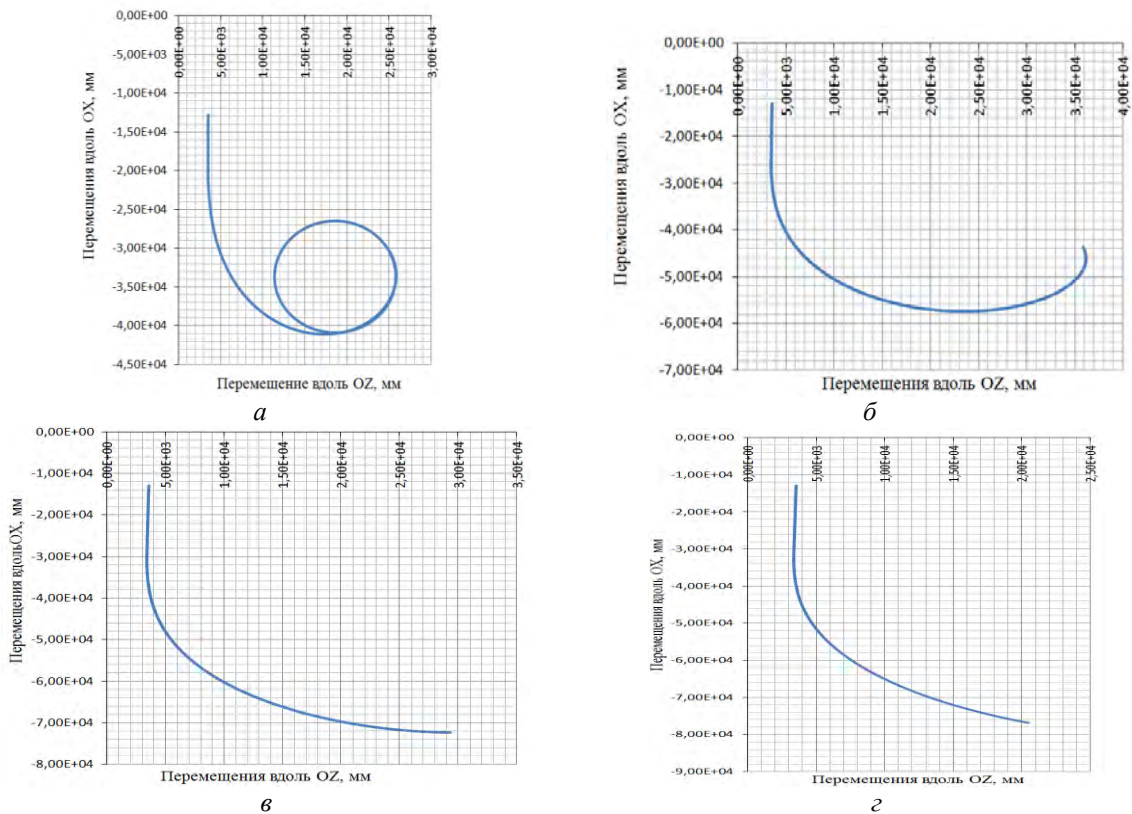


Рисунок 6 – Изменение контактных сил между колесами и полигоном

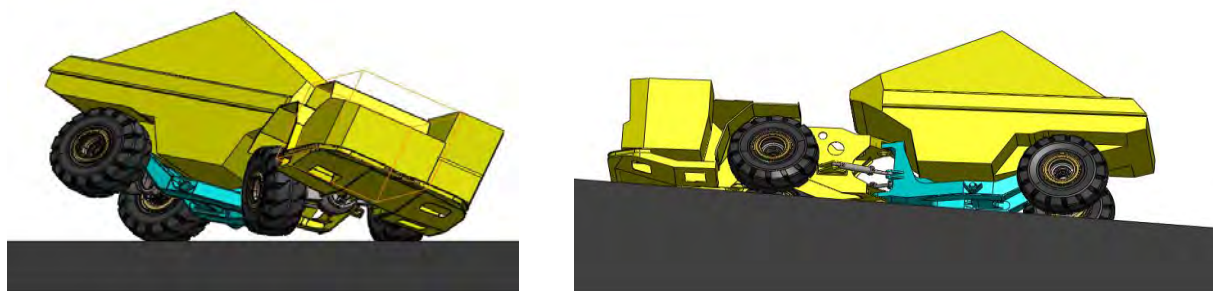
На рис. 7 представлены траектории центральной точки переднего бампера модели при различных скоростях движения.



а - 10 км/ч; б - 20 км/ч; в - 30 км/ч; г - 40 км/ч.

Рисунок 7 – Траектории движения центральной точки переднего бампера модели при различных скоростях движения

При заданной скорости складывания секций, на скорости 10 км/ч, модель самосвала ведёт себя устойчиво и не сходит с траектории входа в поворот, а также с траектории установившегося поворота с радиусом кривизны, равным 8 м (рисунок 7а). Машина теряет устойчивость в фазе входа в поворот на скоростях движения 20, 30 и 40 км/ч (рисунки 7б, в, г и 8а), соответственно, при углах складывания секций 32.7°, 18° и 12.64°. В случае наезда на препятствие автомобиль теряет устойчивость при угле бокового крена, равном 20° (рисунок 8б).



а – при входе в поворот;

б – при наезде на препятствие.

Рисунок 8 – Потеря устойчивости автомобиля

**Заключение.** С моделью шарнирно-сочленённого самосвала БелАЗ 75800 были проведены виртуальные испытания в пакете SolidWorks Motion по определению характеристик управляемости и устойчивости машины, совершающей поворот. В ходе исследования были получены: графики траекторий поворота при различных скоростях движения самосвала; значения скоростей и величины углов складывания секций при потере устойчивости во время прохождения поворота; угол бокового крена при потере устойчивости во время наезда автомобиля на препятствие; определены силовые характеристики взаимодействия колес с полигоном при установившемся и неустановившемся повороте. Реализована анимация поведения модели за все время испытаний. Результаты виртуальных испытаний согласуются на качественном и количественном уровнях с данными заводских экспериментальных исследований, а также с результатами, полученными в [1–4]. Использование методов виртуальных испытаний позволяют с большой точностью смоделировать поведение не только серийных, но и перспективных шарнирно-сочленённых самосвалов в обычных и экстремальных условиях, что значительно сокращает объём натурных испытаний, время выпуска и стоимость доводки серийных и проектируемых машин.

### Резюме

Описана методика исследования управляемости и устойчивости транспортных средств в пакете SolidWorks Motion. Разработана динамическая модель сочлененного самосвала, с помощью которой посредством виртуальных испытаний определены показатели управляемости и устойчивости движения машины. Приведены результаты виртуальных испытаний.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич, Ю.А. Динамика поворота шарнирно-сочленённой машины с двумя осями / Ю.А. Гурвич, А.Л. Петровский // Научные труды научно-практической конференции учёных МАДИ(ГТУ), РГАУ-МСХА, ЛНАУ. 17-18 июня 2010 г. Том 6. Естественные и технические науки. Москва-Луганск. Издательство МАДИ(ГТУ), РГАУ-МСХА, ЛНАУ. – с. 85-90.
2. Гурвич, Ю.А. Разработка методов описания динамики многоосных и шарнирно-сочлененных машин по критериям управляемости и устойчивости / Ю.А.Гурвич, К.И.Сафронов // Теоретическая и прикладная механика №27. Мн.: 2012, – с. 341-346.
3. Альгин, В.Б. Виртуальное моделирование как способ получения адекватных результатов поперечной и продольной устойчивости транспортных средств / В.Б. Альгин, С.В. Харитончик, А.Н. Колесникович // Сб. Науч. Тр./НИРУП "Белавтотракторостроение" Минск, Беларусь, 2005.
4. Теория движения колёсных машин / Г.А. Смирнов. – М.: Машиностроение, 1990. – 352с.
5. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А.А. Алямовский. – М.: ДМК-Пресс, 2010. – 464 с.
6. ГОСТ Р 52302–2004 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытания».
7. СТБ ГОСТ Р 52302–2006 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытания».
8. ГОСТ 27257–87 (ИСО 7457-83) «Методы определения параметров поворота колесных машин»

### Summary

The article describes a technique to study the controllability and stability of the transport vehicles in the package SolidWorks Motion. Developed a dynamic model considered dump truck, which through virtual testing determined for the handling and stability of the car, which would greatly reduce the amount of field tests.

Поступила в редакцию 21.12.2012