

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННОГО ВЕЗДЕХОДНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ ЗОН РФ, РАЙОНОВ КРАЙНЕГО СЕВЕРА И ДАЛЬНОГО ВОСТОКА

Д.Т.Н. Горелов В.А., К.Т.Н. Карташов А.Б., Ковтун К.И., К.Т.Н. Комиссаров А.И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, gvas@mail.ru; gorelov_va@bmstu.ru

В настоящее время МГТУ им. Н.Э. Баумана, ПАО «КАМАЗ» и Московский Политех ведут работы по созданию шарнирно-сочлененного вездеходного транспортного средства на базе серийных узлов и агрегатов автомобилей КАМАЗ, основной конструктивной особенностью которого является узел сочленения. В зависимости от конструкции различают одноступенные, двухступенные и трехступенные шарниры, позволяющие реализовать вращение вокруг вертикальной, продольной и поперечной осей узла сочленения. В статье рассматривается вопрос о влиянии угла наклона поворотного шкворня (вертикальной оси) и введения дополнительной (продольной) степени свободы в одноступенном узле сочленения на стабилизирующий момент. Для этого разработана в среде автоматизированного анализа динамики систем тел математическая модель шарнирно-сочлененного вездеходного транспортного средства. Приведено описание основных узлов, систем и алгоритмов управления разрабатываемого вездехода. При моделировании исследовалось движение транспортного средства при выполнении типового маневра при различных вариантах исполнения узла сочленения с одновременной регистрацией угла складывания секций рам. На основании выполненных исследований и анализа их результатов сформулированы следующие выводы: стабилизирующий момент, достаточный для возврата секций рам в исходное положение, возникает только при больших углах наклона поворотного шкворня, а введение дополнительной степени свободы в узле сочленения существенно снижает стабилизирующий момент. Дальнейшее развитие математической модели позволит на стадии проектирования оценить такие эксплуатационные показатели разрабатываемого вездеходного транспортного средства, как плавность хода, профильную проходимость, тяговые свойства и тормозную динамику при различных дорожных условиях.

Ключевые слова: узел сочленения, шарнирно-сочлененные вездеходные транспортные средства, среды автоматизированного анализа динамики систем тел, имитационное моделирование.

Введение

При освоении Арктических зон Российской Федерации, районов Крайнего Севера и Дальнего Востока возникает серьезная проблема перевозки различных грузов в условиях неразвитой или отсутствующей дорожной сети [1, 2]. В зимний период для этих районов характерно выпадение большого количества снега, а в периоды оттепели – появление практически непроходимых участков со слабой несущей способностью опорной поверхности. Там, где заканчивается хоть какое-то подобие дороги, в полной мере раскрывают свои уникальные качества шарнирно-сочлененные вездеходные транспортные средства (ВТС) (рис. 1).

Шарнирно-сочлененные ВТС наиболее эффективны в сложных дорожных условиях и условиях полного бездорожья: на грунтах с

низкой несущей способностью, крутых склонах, ледниках. Их эксплуатация экономически обоснована и наиболее целесообразна при разработке месторождений полезных ископаемых, строительстве и ремонте дорог, перевозке крупногабаритных грузов, а также при доставке персонала, причем в различных климатических условиях [3, 4]. Наличие в конструкции рамы шарниров, позволяющих совершать изломы в горизонтальной и в продольной плоскостях (рис. 2), в совокупности с шинами низкого давления обеспечивают высокий уровень проходимости ВТС при одновременно большой грузоподъемности (10...50 тонн), что в свою очередь гарантирует конкурентоспособность (так как при использовании крупногабаритных шин сохраняется возможность эксплуатации машины на дорогах общего пользования) (рис. 3).



а)



б)

Рис. 1. Примеры ВТС:

а – плавающий сочлененный гусеничный транспортер «Витязь ДТ-5П»; б – колесный вездеход «Ямал В-4»



Рис. 2. Узел сочленения самосвала Volvo A40F



Рис. 3. Шарнирно-сочлененный грузовик «Ельня»

Цель исследования

Целью исследования является разработка математической модели шарнирно-сочлененного вездеходного транспортного средства для Арктических зон РФ, районов Крайнего Севера и Дальнего Востока.

Материалы и методы исследования

В настоящее время МГТУ им. Н.Э. Баумана, ПАО «КАМАЗ» и Московский Политех ведут работы по созданию шарнирно-сочлененного ВТС для Арктических зон Российской Федерации на базе узлов и агрегатов автомобиля КАМАЗ-6522. Использование высокотехнологичных компонентов позволит снизить требования к состоянию «зимников» при обеспечении заданного уровня подвижности, проходимости и энергоэффективности, а также расширит период эксплуатации транспортного средства. Одним из таких компонентов является узел сочленения, проектирование которого – сложная инженерная задача.

Для проверки работоспособности различных систем транспортных средств в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации, на этапе проектирования эффективно использовать комплексы автоматизированного анализа динамики систем тел [5–9]. В таких комплексах создаваемая модель описывается как набор твердых тел, связанных шарнирными или силовыми взаимодействиями. Массы звеньев задаются в виде параметров модели, а их моменты инерции вычисляются по упрощенным геометрическим моделям. На основании полученного описания программный комплекс автоматически формирует системы уравнений динамики и связи между телами. Решение уравнений производится при помощи различных численных методов с автоматическим контролем точности [5–7]. Большинство таких комплексов позволяют использовать разработанные пользователем модели силовых взаимодействий в виде динамически подключаемых библиотек (DLL).



Рис. 4. Общий вид модели ВТС в ПК «Универсальный механизм»

Таким образом, становится очевидна актуальность создания пространственно-динамической модели ВТС, имеющего шарнирно-сочлененную раму, в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел, что позволит решить большинство конструкторских вопросов на этапе проектирования, существенно уменьшив финансовые затраты и сроки проектирования.

В качестве объекта исследований выбрано ВТС, имеющее шарнирно-сочлененную раму с двумя степенями свободы (общий вид математической модели (ММ), созданной в программном комплексе (ПК) автоматизированного моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм» [5], показан на рис. 4. Технические характеристики разрабатываемого ВТС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики объекта исследований

Колесная формула	6×6
Рама	Шарнирно-сочлененная
Максимальный угол складывания рамы, град.	±45
Минимальный радиус поворота по внешнему переднему колесу, не более, м	12
Шины	710/70R38
Свободный радиус колеса, мм	1960
Передняя подвеска колес	Зависимая рессорная
Задняя подвеска	Балансирная
Полная масса, кг	30 000
Снаряженная масса, кг	17 000
Габаритная длина, мм	10000
Габаритная высота, мм	3500
Габаритная ширина, мм	2540
Дорожный просвет, мм	650
Тип ДВС	дизельный
Количество и расположение цилиндров	8, V-образное
Максимальная мощность двигателя, кВт (л.с.)	292 (400)
Максимальная скорость, км/ч	65

Динамическая модель ВТС включает в себя следующие подсистемы, представленные на рис. 5:

- 1) поддрессоренная масса – модель динамики поддрессоренной массы ВТС;
- 2) передняя подвеска – модель динамики подвески передних колес;
- 3) задняя подвеска – модель динамики подвески задних колес;
- 4) шина – модель динамики шины.

Поддрессоренная масса ВТС состоит из двух полурам (секций), соединенных шарниром с двумя степенями свободы (рис. 6). Такая конструкция исключает вывешивание или разгрузку одного из колес при преодолении неровностей дороги, способствует полному использованию сцепной массы машины, что улучшает проходимость. В то же время шарнир повышает долговечность рамы, предотвращая ее работу на «скручивание».

Управление углом складывания секций рамы относительно друг друга осуществляется системой рулевого управления, представляющей собой пропорциональный регулятор. Необходимый угол поддерживается за счет изменения усилий в гидроцилиндрах (ГЦ) согласно разнице между требуемым и реализуемым значениями угла складывания:

$$F = k(S - S_{\text{тек}}), \quad (1)$$

где k – коэффициент усиления; S – требуемое значение угла складывания; $S_{\text{тек}}$ – текущее значение угла складывания.

Разрабатываемое ВТС имеет сложный направляющий аппарат подвесок передних и задних колес, который состоит из большого числа тел, шарниров и силовых взаимодействий. Общий вид, шарниры и сайлентблоки математических моделей подвесок представлены на рисунках.

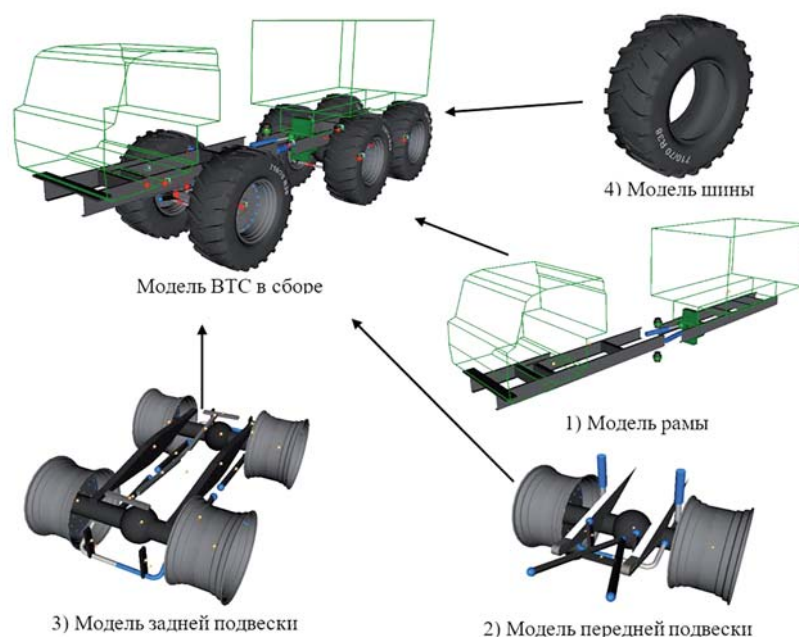


Рис. 5. Структура модели ВТС

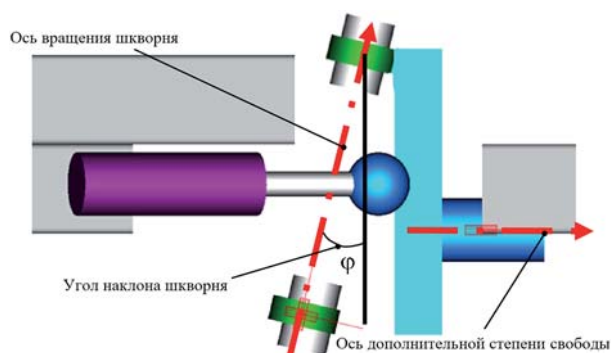


Рис. 6. Общий вид модели узла сочленения

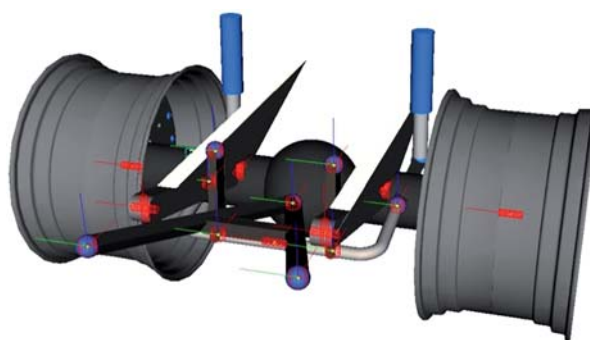


Рис. 7. Общий вид модели передней подвески колес

Для ограничения хода звеньев балансирной подвески в конструкцию добавлены отбойники, неподвижно закрепленные на раме ВТС (рис. 7 и 8). Отбойники установлены над балансирами на расстоянии 90 мм и ограничивают вертикальный ход моста. Моделирование взаимодействия отбойника с опорными площадками упругого балансира выполнено с помощью контактной силы – «Точка-плоскость» [5].

При создании математической модели вездеходного транспортного средства использовалась разработанная авторами динамически подключаемая библиотека Tire.dll [10], с помощью которой производится вычисление сил и моментов, возникающих при взаимодействии колеса с опорной поверхностью [10, 11]. Схема, иллюстрирующая совместную работу модели шины и модели динамики колеса, представлена на рис. 9.

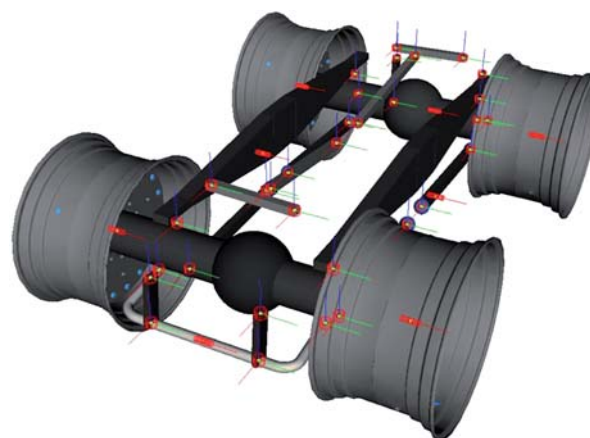


Рис. 8. Общий вид модели задней подвески колес

Схема взаимодействия шины с твердым опорным основанием для вертикально расположенного колеса представлена на рис. 10, где R_z – вертикальная реакция; R – вектор силы взаимодействия шины с опорной поверхностью.

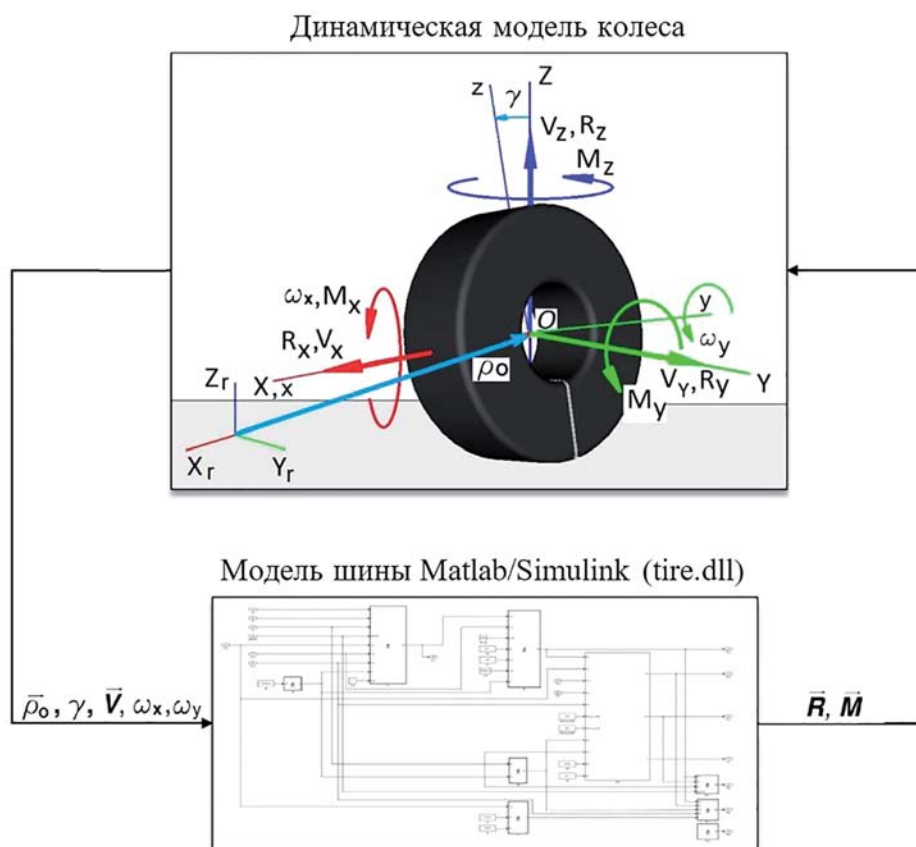


Рис. 9. Схема взаимодействия динамической модели колеса и модели шины Matlab/Simulink

стью; M_k – момент, подводимый к колесу от трансмиссии; M_f – момент сопротивления качению колеса; V_x – скорость центра колеса; $V_{ск}$ – скорость скольжения; ω_y – угловая скорость колеса.

Результаты и их обсуждение

При проектировании нового вездеходного транспортного средства с шарнирно-сочлененной рамой возникает вопрос о влиянии угла наклона поворотного шкворня и/или введения дополнительной степени свободы на стабилизирующий момент в узле сочленения (см. рис. 6) при криволинейном движении. Реализация угла наклона поворотной оси шкворня и введение дополнительной степени свободы в значительной степени усложняют и увеличивают стоимость конструкции узла сочленения, возрастает количество агрегатов и шарниров, в следствие чего уменьшается надежность ВТС. С другой стороны, такие конструкторские решения позволяют улучшить управляемость, проходимость и устойчивость разрабатываемой машины.

Для оценки влияния угла наклона поворотного шкворня и введения дополнительной (вращение вокруг продольной оси ВТС) степени свободы на стабилизирующий момент в узле сочленения проводилось моделирование типового маневра при различных вариантах исполнения узла сочленения (см. табл. 2), с регистрацией угла складывания секций рам после снятия управляющего воздействия на рулевом механизме.

Были рассмотрены варианты конструктивного исполнения узла сочленения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Варианты узла сочленения ВТС

№ варианта	Угол наклона шкворня, град	Дополнительная степень свободы
1	0	+
2	0	-
3	6	+
4	6	-
5	25	+
6	25	-

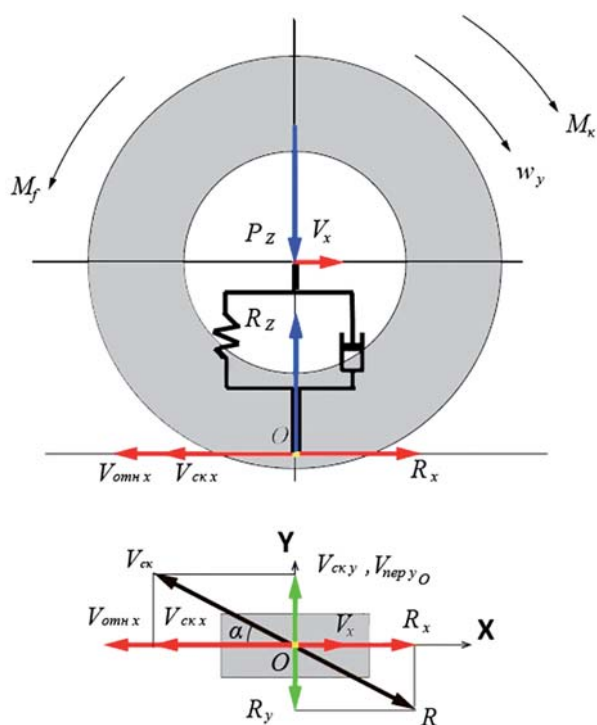


Рис. 10. Расчетная схема взаимодействия шины с дорогой

В качестве типового был принят маневр, при котором ВТС разгоняется до 14 км/ч и продолжает движение с установившейся постоянной скоростью. Далее первая секция рамы складывается относительно второй на угол 10° за счет сил в гидроцилиндрах рулевого управления, при этом скорость движения остается постоянной. При достижении установившегося режима коэффициент усиления в модели рулевого управления «обнуляется», что приводит к «исчезновению» усилий в гидроци-

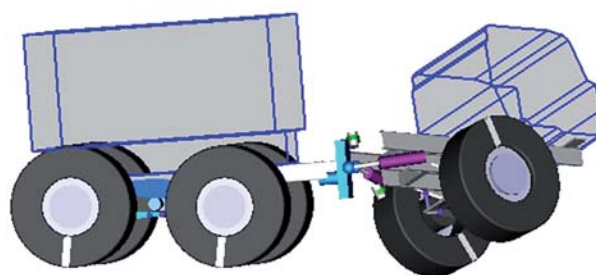


Рис. 11. Выполнение маневра при угле наклона шкворня 25°

линдрах. Одновременно с этим прекращается подача крутящего момента к колесам. По дальнейшему движению ВТС оценивается влияние варьируемых параметров на стабилизирующий момент в узле сочленения.

Математическое моделирование разрабатываемого ВТС с колесной формулой 6Ч6 позволило получить результаты, приведенные ниже.

1. При угле наклона шкворня $\alpha_{\text{шкв}} = 0^\circ$ стабилизирующий момент не возникает.
2. При угле наклона шкворня $\alpha_{\text{шкв}} = 6^\circ$ стабилизирующий момент слишком мал для того, чтобы вернуть секции рамы в исходное состояние.
3. Стабилизирующий момент, необходимый для возврата секций рамы в исходное положение, возникает при угле наклона шкворня $\alpha_{\text{шкв}} = 25^\circ$.
4. При угле наклона шкворня $\alpha_{\text{шкв}} = 25^\circ$ и при отсутствии дополнительной степени свободы происходит вывешивание средней оси (см. рис. 11).
5. Введение дополнительной степени свободы существенно снижает стабилизирующий момент (на рис. 12 представлен график измене-

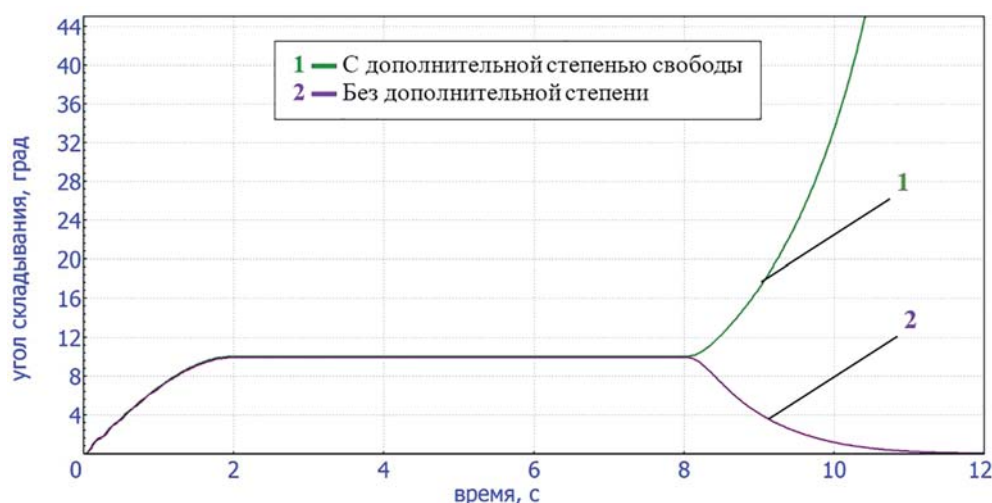


Рис. 12. Влияние дополнительной степени свободы на стабилизирующий момент в узле сочленения при угле наклона шкворня 25°

ния угла складывания секций рамы для вариантов 5 и 6 узла сочленения).

На основании данных полученных при моделировании результатов принято решение отказаться от дополнительной степени свободы, так как она крайне негативно влияет на стабилизирующий момент в узле сочленения.

Для определения минимального угла наклона шкворня, обеспечивающего необходимый стабилизирующий момент, было проведено моделирование движения ВТС, выполняющего схожий маневр, но отличающийся углом складывания секций рам: первая складывается относительно второй на угол 1° .

Регистрация угла складывания секций рам проводилась для наклона шкворня от 14° до 18° . Полученные результаты представлены на рис. 13.

Анализируя графики для рассмотренных углов наклона шкворня, можно отметить, что стабилизирующий момент обеспечивает возврат секций рамы в исходное положение после 30 и более секунд движения ВТС. Это существенно хуже, чем при угле наклона шкворня $\alpha_{\text{шкв}} = 25^\circ$ (см. рис. 12). Следовательно, стабилизирующий момент, возникающий в узле сочленения, эффективен только при больших углах наклона шкворня.

Выводы

На основании проведенных исследований угла наклона поворотного шкворня и влияния дополнительной степени свободы на стабили-

зирующий момент, можно сделать следующие выводы.

1. При угле наклона поворотного шкворня $\alpha_{\text{шкв}} = 0^\circ$ стабилизирующий момент в узле сочленения не возникает.

2. Для создания стабилизирующего момента, достаточного для возвращения секций рамы в исходное состояние за приемлемый промежуток времени, необходим угол наклона шкворня не менее $\alpha_{\text{шкв}} = 25^\circ$.

3. При больших углах наклона поворотного шкворня и при отсутствии дополнительной степени свободы в узле сочленения средняя ось ВТС 6х6 вывешивается (см. рис. 11).

4. Введение дополнительной степени свободы в узле сочленения позволяет решить проблему вывешивания средней оси, но при этом существенно снижает стабилизирующий момент (см. рис. 12).

5. Дальнейшее развитие математической модели позволит на стадии проектирования оценить такие эксплуатационные показатели разрабатываемого вездеходного транспортного средства, как плавность хода, профильную проходимость, тяговые свойства и тормозную динамику при различных дорожных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора №11-38-07/15 от 29.07.2015 г. между ПАО «КАМАЗ» и ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет (Московский Политех)».

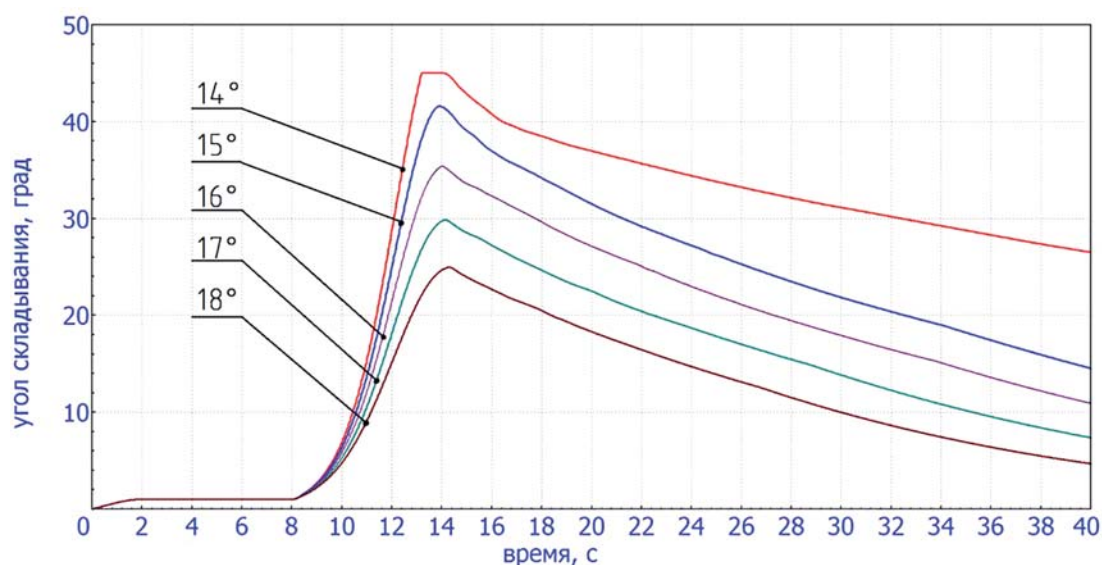


Рис. 13. Изменение угла складывания секций рамы при различных углах наклона шкворня

Литература

1. Котляков В.М., Гуцуляк В.Н. Арктика. Большая российская энциклопедия. Т. 2. Анкилоз-Банка. М.: Большая российская энциклопедия, 2005. Т. 2. С. 227–231 (Большая российская энциклопедия: в 30 т. Т. 2. 766 с.).
2. Сулейманов А.А. Сотрудничество Советского Союза и приарктических стран в области научного изучения Арктики в годы «разрядки» // 1945 год: формирование основ послевоенного мироустройства. Киров: Радуга-ПРЕСС, 2015. 468 с.
3. Воздействие изменения климата на российскую Арктику: анализ и пути решения проблемы. М.: WWF Рос-сии, 2008. 28 с.
4. Клименко В.В., Астрина Н.А. Документальные свидетельства сильных колебаний климата российской Арктики в XV–XX вв. // История и современность. 2006. № 1. С. 179–217.
5. Универсальный механизм: программный комплекс для моделирования динамики и кинематики плоских и пространственных механических систем [Электронный ресурс]. URL: <http://www.umlabor.ru> (дата обращения: 27.07.2016).
6. EULER: программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем [Электронный ресурс]. URL: <http://www.euler.ru> (дата обращения: 27.07.2016).
7. ADAMS: The Multibody Dynamics Simulation Solution [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (дата обращения: 27.07.2016).
8. Котиев Г.О., Горелов В.А., Бекетов А.А. Математическая модель движения вездеходного транспортного средства // Журнал автомобильных инженеров. 2008. № 1(48). С. 50–54.
9. Горелов В.А., Комиссаров А.И., Мирошниченко А.В. Моделирование колесного транспортного средства 8Ч8 в программном комплексе автоматизированного анализа динамики систем тел // Сборник: Пром-Инжиниринг: труды Международной научно-технической конференции. ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет). Челябинск, 2015. С. 221–225.
10. Горелов В.А., Комиссаров А.И., Косицын Б.Б. Исследование движения автомобиля в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел // Журнал автомобильных инженеров. 2016. № 1(96). С. 18–23.
11. Рождественский Ю.Л., Машков К.Ю. О формировании реакций при качении упругого колеса по недеформируемому основанию // Труды МВТУ. 1982. № 390. С. 56–64.

References

1. Kotlyakov V.M., Gutsulyak V.N. *Arktika. Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya* [Arctic. Great Russian Encyclopedia]. Vol. 2. Ankiroz-Banka Publ. Moscow: Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya, 2005. Vol. 2, pp. 227–231 (Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya: v 30 t. Vol. 2. 766 p.).
2. Suleymanov A. A. *Sotrudnichestvo Sovetskogo Soyuza i priarkticheskikh stran v oblasti nauchnogo izucheniya Arktiki v gody «razryadki»* [Cooperation between the Soviet Union and the Arctic countries in the field of scientific study of the Arctic during the years of “detente”]. 1945 god: formirovanie osnov poslevoennogo miroustroystva. Kirov: Raduga-PRESS Publ., 2015. 468 p.
3. *Vozdeystvie izmeneniya klimata na rossiyskuyu Arktiku: analiz i puti resheniya problemy* [The impact of climate change on the Russian Arctic: analysis and ways to solve the problem]. Moscow: WWF Rossii Publ., 2008. 28 p.
4. Klimenko V.V., Astrina N.A. Documentary evidence of strong climate fluctuations in the Russian Arctic in the XV-XX. *Istoriya i sovremennost'*. 2006. No 1, pp. 179–217 (in Russ.).
5. *Universal'nyy mekhanizm: programmnyy kompleks dlya modelirovaniya dinamiki i kinematiki ploskikh i prostranstvennykh mekhanicheskikh system* [Universal mechanism: a software package for modeling the dynamics and kinematics of plane and spatial mechanical systems] [Elektronnyy resurs] (in Russ.). URL: <http://www.umlabor.ru> (accessed: 27.07.2016).
6. EULER: *programmnyy kompleks avtomatizirovannogo dinamicheskogo analiza mnogokomponentnykh mekhanicheskikh system* [Software complex for automated dynamic analysis of multicomponent mechanical systems] [Elektronnyy resurs] (in Russ.). URL: <http://www.euler.ru> (accessed: 27.07.2016).
7. ADAMS: The Multibody Dynamics Simulation Solution [Elektronnyy resurs] (in Russ.). URL: <http://www.mscsoftware.com/product/adams> (accessed: 27.07.2016).
8. Kotiev G.O., Gorelov V.A., Beketov A.A. Mathematical model of motion of cross-country vehicle. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*. 2008. No 1(48), pp. 50–54 (in Russ.).
9. Gorelov V.A., Komissarov A.I., Miroshnichenko A.V. Simulation of a wheeled vehicle 8 Ч 8 in the software package for automated analysis of the dynamics of systems of bodies. *Sbornik: Prom-*

Inzhiniring: trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. FGBOU VPO «Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet» (Natsional'nyy issledovatel'skiy universitet) [Collection: Prom-Engineering: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. FGBOU VPO "South Ural State University" (National Research University)]. Chelyabinsk, 2015, pp. 221–225 (in Russ.).

10. Gorelov V.A., Komissarov A.I., Kositsyn B.B. The study of the movement of a car in the program complex of automated modeling of the dynamics of systems of bodies. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*. 2016. No 1(96), pp. 18–23 (in Russ.).
11. Rozhdestvenskiy Yu.L., Mashkov K.Yu. On the formation of reactions during the rolling of an elastic wheel along a non-deformable base. *Trudy MTU*. 1982. No 390, pp. 56–64 (in Russ.).

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF AN ARTICULATED CROSS-COUNTRY VEHICLE FOR THE ARCTIC ZONES OF THE RUSSIAN FEDERATION, REGIONS OF THE FAR NORTH AND THE FAR EAST

DSc in Engineering **V.A. Gorelov**, PhD in Engineering **A.B. Kartashov**, **K.I. Kovtun**, PhD in Engineering **A.I. Komissarov**
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,
gvas@mail.ru; gorelov_va@bmstu.ru

Currently Bauman Moscow State Technical University, PJSC "KAMAZ" and Moscow Polytechnic University are working on the creation of an articulated-cross-country vehicle on the basis of serial units and aggregates of KAMAZ vehicles, the main design feature of which is the joint junction. Depending on the design, single-stage, two-stage and three-stage hinges are distinguished, allowing to realize rotation around the vertical, longitudinal and transverse axis of the junction joint. The article deals with the influence of the angle of inclination of the pivot pin (vertical axis) and the introduction of an additional (longitudinal) degree of freedom in a single-junction joint at the stabilizing moment. For this purpose, a mathematical model of an articulated cross-country vehicle was developed in the environment of the automated analysis of the dynamics of systems of bodies. The description of the main nodes, systems and control algorithms of the developed all-terrain vehicle is given. During the simulation, the movement of the vehicle was investigated when performing the typical maneuver with different versions of the joint unit with simultaneous registration of the folding angle of the frame sections. Based on the studies performed and analysis of their results, the following conclusions are formulated: the stabilizing moment, sufficient to return the frame sections to the initial position, arises only at large angles of inclination of the pivot pin, and the introduction of an additional degree of freedom in the junction node substantially reduces the stabilizing moment.

Further development of the mathematical model will allow at the design stage to estimate such operational indicators of the all-terrain vehicle being developed as smooth running, profile cross-country, traction and braking dynamics under different road conditions.

Keywords: joint junction, articulated-cross-country vehicles, environment for automated analysis of the dynamics of body systems, simulation.