

Оценка влияния учета податливости рамы фронтального погрузчика на возникающие нагрузки в системе динамики твердых тел

П.С. Рубанов¹, Р.Б. Гончаров¹, Г.И. Скотников¹, В.А. Горелов¹, В.С. Григорьев²

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана Москва, Российская Федерация;

² Чебоксарский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Для моделирования движения транспортных средств широко используют динамические модели. Увеличение точности расчетов достигается за счет добавления в модель податливых тел, что приводит к усложнению выполняемой задачи. Поэтому возникает необходимость в оценке влияния учета податливости элементов модели на получаемые результаты.

Целью работы является оценка влияния податливости несущей системы фронтального погрузчика на возникающие нагрузки в системе динамики твердых тел.

Материалы и методы. Решение задачи представлено на примере динамической модели фронтального погрузчика (ФП) массой 14,5 т с несущей системой с жестко закрепленными колесными движителями к передней полураме и качающимся мостом на задней полураме. Данный способ крепления позволяет оценивать влияние податливости элементов ФП путем сравнения вертикальных реакций, возникающих в пятне контакта колес с опорной поверхностью. Модели динамики выполнены в приложении NX 2206 программного комплекса NX Motion.

Результаты. Проведено сравнение вертикальных нагрузок, возникающих на колесных движителях в заданных нагрузочных режимах (симметричных и кососимметричных), с использованием абсолютно жесткой и податливой моделей несущей системы. Получено, что нагрузки для кососимметричных режимов нагружения могут отличаться до 20% в зависимости от жесткости рамы.

Заключение. В результате проведенного исследования можно утверждать, что учет податливости несущей системы транспортного средства значительно влияет на получаемые результаты в процессе моделирования.

Ключевые слова: фронтальный погрузчик; податливые элементы; динамические нагрузки; метод Крейга-Бэмптона; редуцированная конечно-элементная модель.

Для цитирования:

Рубанов П.С., Гончаров Р.Б., Скотников Г.И., Горелов В.А., Григорьев В.С. Оценка влияния учета податливости рамы фронтального погрузчика на возникающие нагрузки в системе динамики твердых тел // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 4. С. *x-y*. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106005>

Assessment of influence of considering the flexibility of the front loader frame on the emerging loads in the multibody system

Pavel S. Rubanov¹, Roman B. Goncharov¹, Gleb I. Skotnikov¹, Vasily A. Gorelov¹, Vladimir S. Grigoriev²

¹ *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;*

² *Chuvash State Agrarian University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Russian Federation*

ABSTRACT

BACKGROUND: Dynamic models are widely used for vehicle dynamics simulation. Increase of simulation accuracy is achieved with adding flexible bodies in a model, making problem solving more complicated. Therefore, assessment of influence of considering the flexibility of the front loader frame on the emerging loads in the multibody system becomes necessary.

AIMS: Assessment of considering the flexibility of the front loader frame on the emerging loads in the multibody system becomes necessary.

METHODS: The solution of the problem is presented with the example of a multibody model of a 14.5-ton front loader (FL) with a frame coupled with wheel movers rigidly fixed to the front half-frame and a swinging axle at the rear half-frame. This method of coupling makes it possible to assess the effect of the flexibility of the elements of the FL by comparing the vertical forces that occur in the contact patch of the wheels with the support surface. The multibody models are built in the NX Motion application of the NX 2206 software package.

RESULTS: The comparison of vertical wheel forces in given load conditions (symmetrical and skew-symmetric) using absolutely rigid and flexible models of the frame is carried out. It is found that the forces for skew-symmetric loading modes can differ by up to 20% depending on the frame stiffness.

Keywords: front loader, flexible elements, dynamic loads, Craig-Bampton method, reduced finite element model.

TO CITE THIS ARTICLE:

Rubanov PS, Goncharov RB, Skotnikov GI, Gorelov VA, Grigoriev VS. Assessment of the impact of considering the flexibility of the front loader frame on the emerging loads in the multibody system. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(4): x-y. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106005>

Received: 01.06.2023

Accepted: 10.09.2023

ВВЕДЕНИЕ

Задача, связанная с точным определением нагрузок, действующих на несущую систему при движении транспортного средства, возникает при необходимости проведения поверочных прочностных расчетов элементов системы. Для этого выполняется динамический анализ движения транспортных средств с использованием имитационных математических моделей [1, 2]. Для учета множества деталей и пространственной кинематики исследование обычно реализуется с помощью программных комплексов автоматизированного анализа динамики систем твердых тел [3, 4]. При этом, система представляется в виде набора твердых тел, шарниров и силовых взаимодействий из библиотеки типовых элементов. Для уточнения динамических нагрузок используется технология комбинированного анализа динамики систем твердых тел и упрощенных конечно-элементных моделей методом Крэйга-Бэмптона [5–7]. В связи с этим, актуальной проблемой является оценка влияния учета податливости элементов модели на получаемые динамические нагрузки в сравнении с моделями, составленными только из абсолютно твердых тел.

В данной работе обозначенная проблема изучается на примере динамической модели фронтального погрузчика (ФП) полной массой 14,5 тонн. Выбор модели ФП обусловлен тем, что передний и задний мосты крепятся к несущей системе жестко, без системы поддрессоривания, что позволяет оценивать влияние податливости элементов ФП путем сравнения вертикальных реакций, возникающих в пятне контакта колес с опорной поверхностью.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Звенья, входящие в динамическую модель ФП показаны на рис. 1.

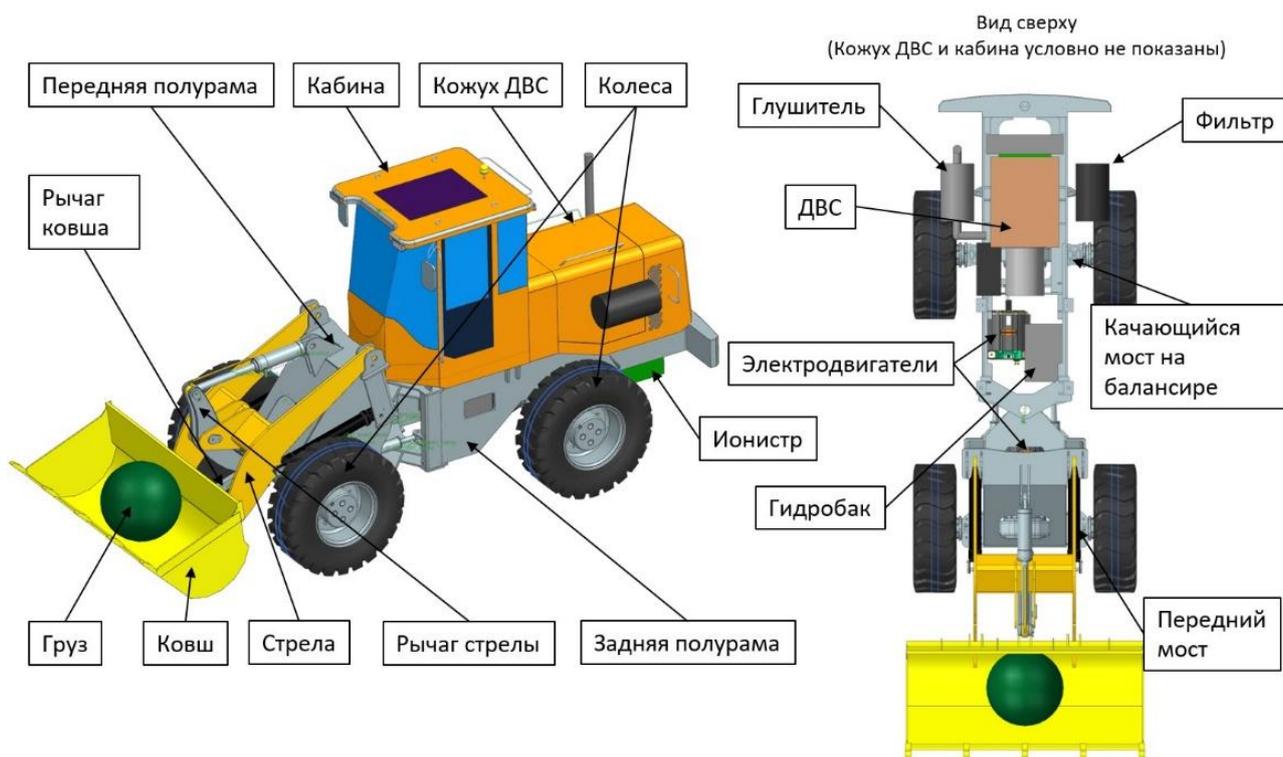


Рис. 1. Общий вид динамической модели.

Fig. 1. Main view of the multibody model.

Для моделирования взаимодействия колеса с опорной поверхностью создаются элементы – шина и дорога [8, 9], которые присутствуют в библиотеке программы NX 2206 в приложении Motion. Шины имеют размерность 17,5–25. Коэффициент сцепления колес с дорогой задается равным 0,8, коэффициент сопротивления движению равен 0,02. Деформация колес учитывается в модели взаимодействия колеса с опорной поверхностью, реакции на колесо от опорной поверхности приложены в центре колеса. Колеса крепятся к мостам при помощи элемента – узел вращения. Передний мост и прочее оборудование погрузчика жестко зафиксированы на несущей системе. Задний мост установлен на задней

полупраме с использованием элемента – узел вращения, поскольку крепление заднего моста на фронтальных погрузчиках осуществляется на балансирах. Особенности крепления мостов к несущей системе ФП позволяют оценивать влияние податливости рамы на ее нагруженность по силам, получаемым в пятне контакта колес с опорной поверхностью.

Несущая система представляется, редуцированной модальным методом Крэйга-Бэмптона, конечно-элементной моделью [10, 11], импортированной из программного комплекса NX Nastran.

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА МКЭ

Конечно-элементная модель рамы, показанная на рис. 2, состоит из элементов типа Tetra10, соединение навесного оборудования с рамой смоделировано RBE 2 элементами, соединение кабины с рамой RBE 3 элементами. Марка материала несущей системы: сталь 09Г2С. Характеристики стали приведены в таблице 1.

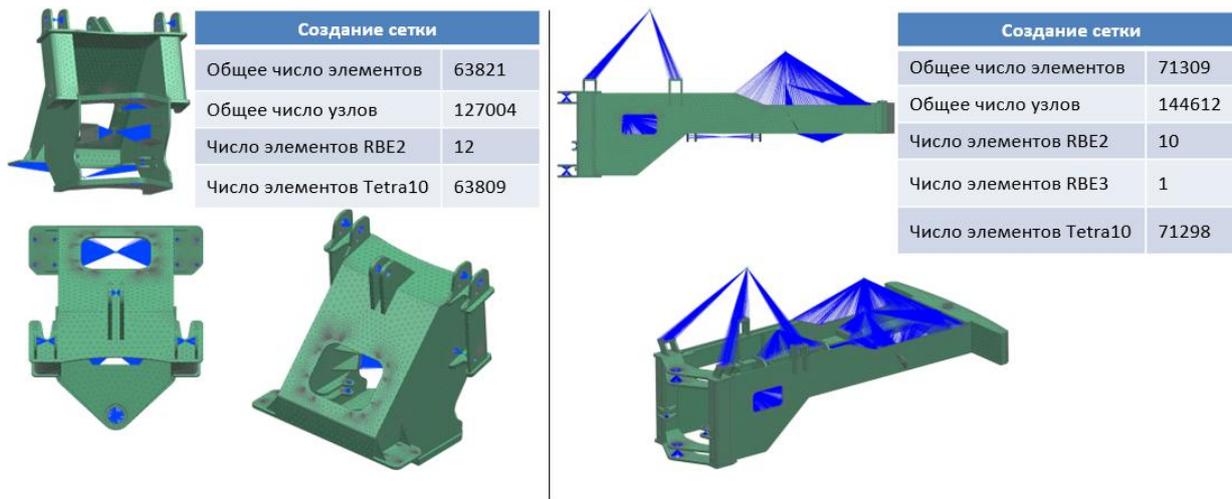


Рис. 2. Конечно-элементная модель и её параметры.

Fig. 2. The finite element model and its properties.

Таблица 1. Характеристики стали 09Г2С

Table 1. The 09G2S steel properties

Материал	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести Бт, МПа	Предел прочности, Бв, МПа
09Г2С ГОСТ 19282-73	200000	0,3	325	470

Конечно-элементная модель несущей системы фронтального погрузчика разработана с использованием решателя SOL 103 Flexible Body [12] для последующей интеграции в динамическую модель и исследования влияния податливости рамы на возникающие динамические нагрузки.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УЧЕТА ПОДАТЛИВОСТИ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ЕЕ ДИНАМИЧЕСКУЮ НАГРУЖЕННОСТЬ

Для анализа влияния учета податливости несущей системы на ее нагруженность проводилось моделирование движения для следующих режимов:

- въезд в горку под углом. В момент въезда в горку под углом ФП испытывает кососимметричные нагрузки на несущую систему;
- въезд в горку под прямым углом. В момент заезда в горку возникают симметричные нагрузки, действующие на несущую систему;
- переезд препятствия;
- движение в повороте.

На рис. 3–6 изображены графики реакций в пятне контакта колес с опорной поверхностью, полученных в результате проведения моделирования нагрузочных режимов с применением рамы в виде абсолютно твердого тела и податливого тела.

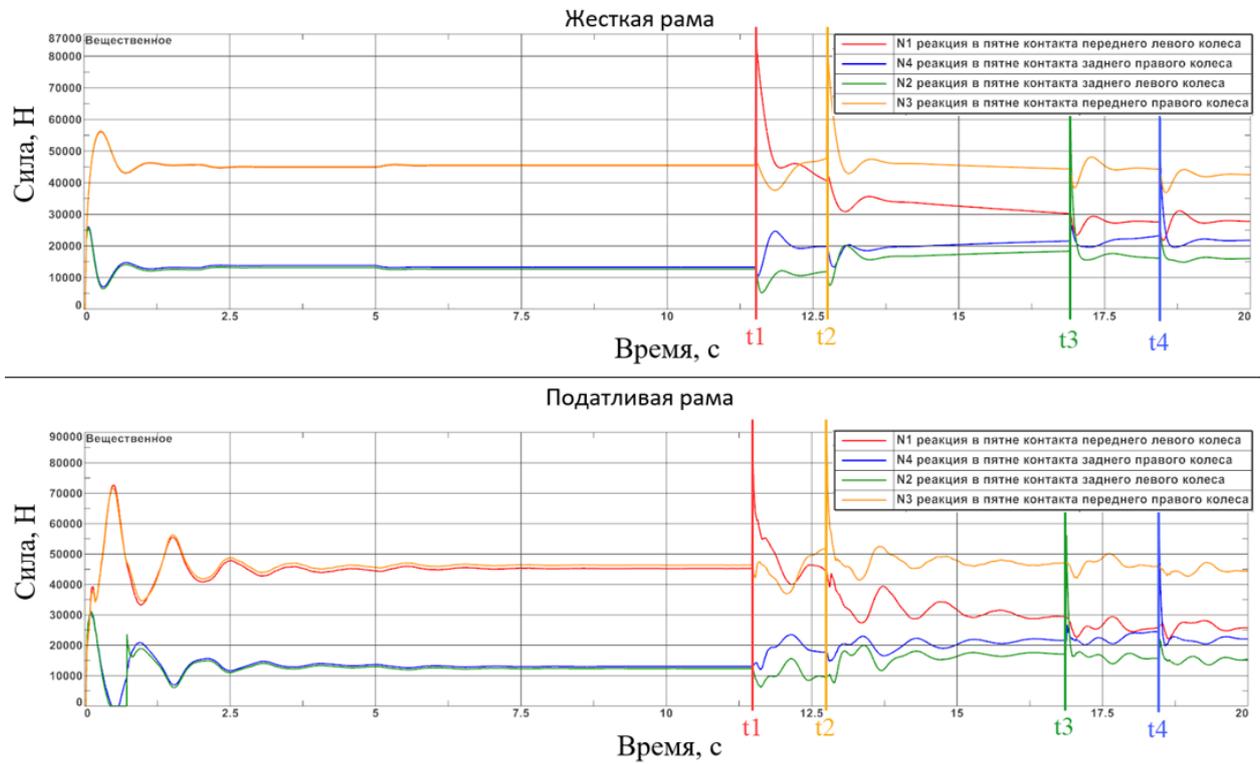


Рис. 3. Въезд в горку под углом.

Fig. 3. Uphill ride at the angle to a hill.

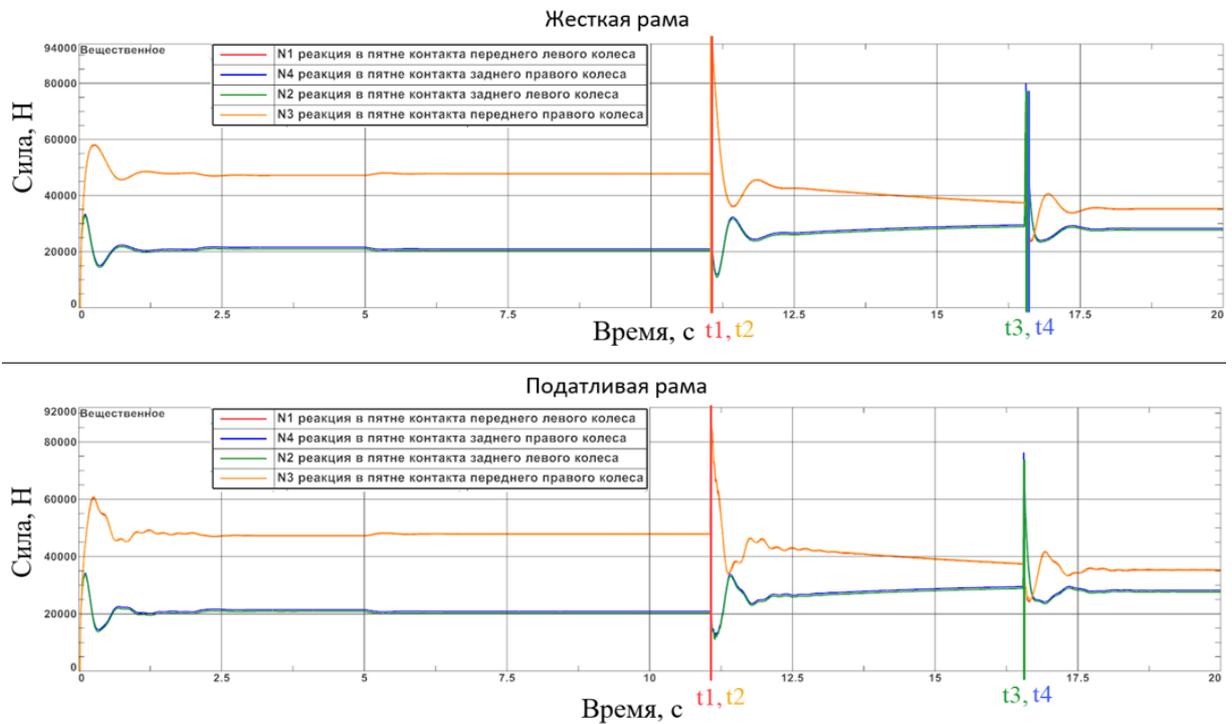


Рис. 4. Въезд в горку под прямым углом.

Fig. 4. Uphill ride normal to a hill.

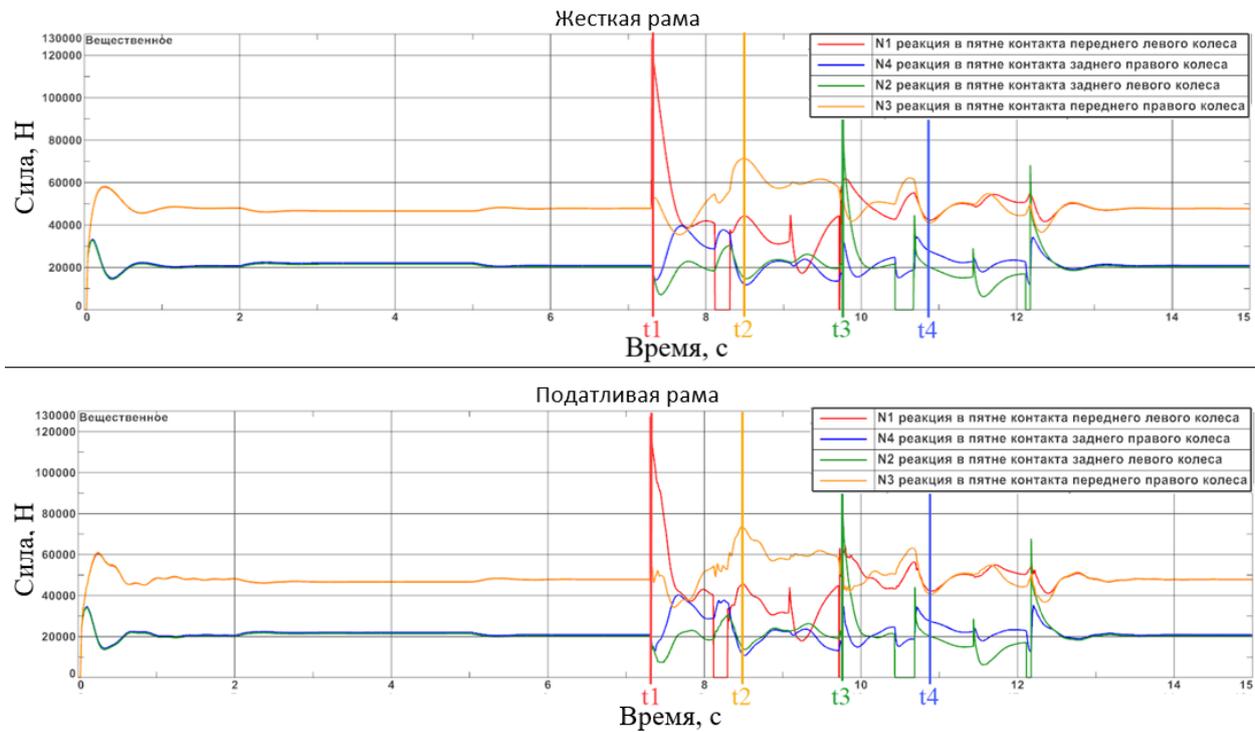


Рис. 5. Переезд препятствия.

Fig. 5. Ride through an obstacle.

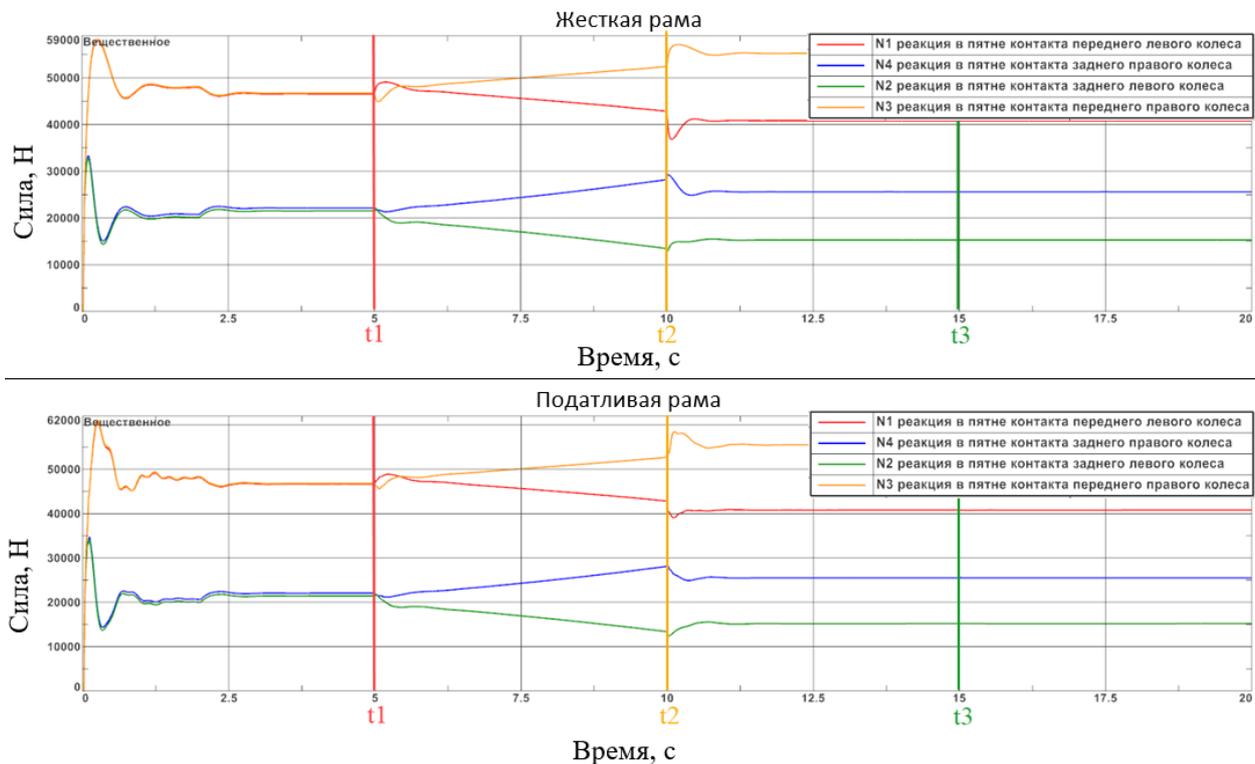


Рис. 6. Движение в повороте.

Fig 6. Cornering.

В таблице 2 указаны значения реакций в пятнах контакта колес с опорной поверхностью в моменты времени изменения характера взаимодействия с опорной поверхностью t_1 , t_2 , t_3 , t_4 .

N1 — реакция в пятне контакта переднего левого колеса, кН; N2 — реакция в пятне контакта заднего левого колеса, кН; N3 — реакция в пятне контакта переднего правого колеса, кН; N4 — реакция в пятне контакта заднего правого колеса, кН.

Таблица 2. Результаты моделирования

Table 2. Simulation results

Въезд в горку под углом												
Жесткая рама				Податливая рама				Изменение сил в %				
N1	86,2	40,5	30,2	27,5	85,9	44,1	29,3	26,0	0,4	8,7	2,9	5,5
N2	12,5	11,8	57,4	16,4	12,4	9,5	56,3	15,5	1,5	19,8	1,9	5,2
N3	45,6	86,4	44,3	44,2	46,3	89,2	47,0	46,3	1,5	3,3	6,1	4,7
N4	13,2	19,7	21,6	62,6	13,0	17,8	21,7	63,1	1,2	9,9	0,2	0,8
Въезд в горку под прямым углом												
N1	92,6	91,0	37,3	36,9	92,6	88,4	37,4	37,4	0,0	2,8	0,1	1,4
N2	20,3	19,8	73,5	64,0	20,3	20,2	73,4	64,4	0,4	1,8	0,1	0,6
N3	47,9	93,3	37,5	36,3	48,0	92,5	37,6	37,7	0,2	0,8	0,2	3,9
N4	21,0	20,4	29,7	80,2	20,9	20,8	29,5	79,4	0,3	2,2	0,6	1,0
Переезд препятствия												
N1	127,8	44,2	55,4	42,3	127,5	45,2	57,1	42,2	0,3	2,3	3,1	0,3
N2	20,3	15,2	106,1	19,8	20,3	15,2	103,5	19,9	0,4	0,1	2,4	0,5
N3	47,9	71,3	59,6	41,1	48,0	73,7	61,7	40,6	0,2	3,4	3,7	1,2
N4	21,0	12,2	16,6	27,3	20,9	12,2	16,1	27,2	0,4	0,4	3,4	0,4
Движение в повороте												
N1	46,5	42,8	40,8	—	46,6	42,8	40,8	—	0,18	0,01	0,06	—
N2	21,5	13,4	15,3	—	21,4	13,4	15,2	—	0,39	0,56	0,65	—
N3	46,7	52,6	55,2	—	46,8	52,9	55,6	—	0,21	0,55	0,61	—
N4	22,1	28,3	25,6	—	22,0	28,1	25,5	—	0,37	0,78	0,35	—
t	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4

В результате моделирования процесса въезда погрузчика в горку под углом определено, что при контакте правого переднего колеса с наклонной плоскостью реакция в пятне контакта левого заднего колеса N2 снижается на 19,8% из-за перераспределения сил на колесах, вызванного деформациями несущей системы. На заднем правом колесе реакция в пятне контакта N4 снизилась на 9,9%, в то время как реакции в пятне контакта левого N1 и правого N3 передних колес увеличились на 8% и 3,2% соответственно.

При заезде задних колес в горку происходит уменьшение реакций в пятне контакта на левом борту на 5%. Перераспределение нагрузок вызвано деформациями передней полурамы и как следствие смещением центра масс погрузчика в сторону левого борта.

По результатам моделирования въезда в горку под прямым углом из таблицы 2 видно, что изменения реакций в пятне контакта на колесах не значительно и не превышают 4%. При моделировании переезда препятствия изменения нормальных реакций на колесах также не превышают 4%.

Моделирование движения в повороте показывает, что изменений реакций в пятне контакта каждого колеса с опорной поверхностью практически нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. В случаях податливой и абсолютно жесткой несущих систем разница при определении нагрузок, действующих на конструкцию, может достигать 20% для кососимметричных режимов нагружения (въезд в горку под углом).
2. В отношении симметричных режимов нагружения, различие в силах, действующих на податливую и абсолютно жесткую несущие системы, составляет не более 4%.
3. На этапе поверочных прочностных расчетов необходимо учитывать податливость тел для получения уточненных результатов нагрузок, действующих на конструкцию при динамическом моделировании.
4. Учет податливости тел методом Крейга-Бэмптона при динамическом моделировании транспортного средства позволяет более точно определять возникающие нагрузки в системах и выявлять потенциально опасные участки в процессе проектирования.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. П.С. Рубанов — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Р.Б. Гончаров — редактирование текста рукописи, создание изображений; Г.И. Скотников — редактирование текста рукописи; В. А. Горелов — редактирование текста рукописи, экспертная оценка, В.С. Григорьев — экспертная оценка, утверждение финальной версии. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследования выполнены Чебоксарским государственным университетом им. И.Н. Ульянова по договору № 517-21 от 22 апреля 2021 г. при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по теме «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом» Соглашения № 075-11-2021-051 от 24 июня 2021 г.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. P.S. Rubanov — search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript; R.B. Goncharov — editing the text of the manuscript, creating images; G.I. Skotnikov — editing the text of the manuscript; V.A. Gorelov — editing the text of the manuscript, expert opinion, V.S. Grigoriev — expert evaluation, approval of the final version. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. The research was carried out by the Chuvash State Agrarian University named after I.N. Ulyanov under Contract No. 517-21 dated April 22, 2021 with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia as part of the implementation of a comprehensive project on the topic "Creation of a high-tech import-substituting production of a family of front-end loaders with hybrid electric drive" Agreement No. 075-11-2021-051 dated June 24, 2021.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горелов В.А., Падалкин Б.В., Чудаков О.И. Математическая модель прямолинейного движения по деформируемой опорной поверхности двухзвенного седельного автопоезда с активным полуприцепным звеном // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2017. № 2(113). С. 121–138.
2. Чудаков О.И., Анкинович Г.Г., Горелов В.А. Математическая модель прямолинейной динамики по недеформируемому опорному основанию седельного автопоезда с активным полуприцепом // Вестник машиностроения. 2017. № 3. С. 37–42.
3. Вдовин Д.С., Чичекин И.В., Левенков Я.Ю. Прогнозирование усталостной долговечности элементов подвески полуприцепа на ранних стадиях проектирования // Труды НАМИ. 2019. № 2. С. 14–23.
4. Горелов В.А., Комиссаров А.И., Вдовин Д.С., и др. Анализ нагрузок рамы грузового автомобиля методом динамики систем тел с использованием конечно-элементной модели // Транспортные системы. 2020. № 4(18). С. 4–14. doi: 10.46960/62045_2020_4_4
5. Zhu S.H., Xiao Z.J., Li X.Y. Vehicle frame fatigue life prediction based on finite element and multi-body dynamic // Applied Mechanics and Materials. 2012. Vol. 141. С. 578–585.
6. Юдаков А.А. Принципы построения общих уравнений динамики упругих тел на основе модели Крейга–Бэмптона и их практически значимых приближений // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2012. № 3. С. 126–140. doi: 10.20537/vm120312
7. Гончаров Р.Б., Рябов Д.М. Методика расчета нагрузок, действующих в направляющих элементах подвески автомобиля при преодолении препятствий // Известия МГТУ «МАМИ». 2015. Т. 9, №3–1. С. 129–135. doi: 10.17816/2074-0530-67249
8. Левенков Я.Ю., Вольская Н.С. Сглаживающая способность пневматической шины автомо-

- бильного колеса при взаимодействии с твёрдой неровной опорной поверхностью // *Технология колёсных и гусеничных машин*. 2015. № 1. С. 20–26.
9. Вольская Н.С., Левенков Я.Ю., Русанов О.А. Моделирование автомобильной пневматической шины, взаимодействующей с твёрдой неровной опорной поверхностью // *Наука и образование*. 2013. № 5. С. 107–124. doi: 10.7463/0513.0571409
 10. Farid M.L. *Fundamentals of multibody dynamics: theory and applications*. Basel: Birkhäuser, 2006.
 11. Kong Y.S., Abdullah S., Omar M.Z., et al. Side force analysis of suspension strut under various load cases // *Jurnal Teknologi*. 2016. Vol. 78, N 6. P. 85–90. doi: 10.11113/jt.v78.9193
 12. Bremer H. *Elastic Multibody Dynamics*. Berlin: Springer Science+Business Media, 2008.

REFERENCES

1. Gorelov VA, Padalkin BV, Chudakov OI. Mathematical model of rectilinear motion along a deformable supporting surface of a two-link semi-trailer road train with an active semi-trailer link. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*. 2017;2(113):121–138. (In Russ).
2. Chudakov OI, Ankinovich GG, Gorelov VA. Mathematical model of rectilinear dynamics on a non-deformable support base of a semi-trailer road train with an active semi-trailer. *Vestnik mashinostroeniya*. 2017;3:37–42. (In Russ).
3. Vdovin DS, Chichekin IV, Levenkov YaYu. Prediction of fatigue life of semi-trailer suspension elements at early design stages. *Trudy NAMI*. 2019;2:14–23. (In Russ).
4. Gorelov VA, Komissarov AI, Vdovin DS, et al. Analysis of truck frame loads using the method of dynamics of body systems using a finite element model. *Transportnye sistemy*. 2020;4(18):4–14. (In Russ). doi: 10.46960/62045_2020_4_4
5. Zhu SH, Xiao ZJ, Li XY. Vehicle frame fatigue life prediction based on finite element and multi-body dynamic. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;141:578–585.
6. Yudakov AA. Principles for constructing general equations for the dynamics of elastic bodies based on the Craig–Bampton model and their practically significant approximations. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Kompyuternye nauki*. 2012;3:126–140. (In Russ). doi: 10.20537/vm120312
7. Goncharov R.B., Ryabov D.M. Methods of calculating suspension guide elements loads of vehicle when obstacle crossing. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2015;9(3–1):129–135. (In Russ). doi: 10.17816/2074-0530-67249
8. Levenkov YaYu, Volskaya NS. Smoothing ability of a pneumatic tire of a car wheel when interacting with a hard, uneven supporting surface. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin*. 2015;1:20–26. (In Russ).
9. Volskaya NS, Levenkov YaYu, Rusanov OA. Modeling of a car pneumatic tire interacting with a hard, uneven supporting surface. *Nauka i obrazovanie*. 2013;5:107–124. (In Russ). doi: 10.7463/0513.0571409
10. Farid ML. *Fundamentals of multibody dynamics: theory and applications*. Basel: Birkhäuser; 2006.
11. Kong YS, Abdullah S, Omar MZ, et al. Side force analysis of suspension strut under various load cases. *Jurnal Teknologi*. 2016;78(6):85–90. doi: 10.11113/jt.v78.9193
12. Bremer H. *Elastic Multibody Dynamics*. Berlin: Springer Science+Business Media; 2008.

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

* Автор, ответственный за переписку:

* **Рубанов Павел Сергеевич**,
студент кафедры «Колесные машины»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
адрес: Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1;
ORCID: 0009-0000-2055-2046;
e-mail: rubanov_ps@bk.ru

* Corresponding author

* **Pavel S. Rubanov**,
student of the Wheeled Vehicles Department;
address: 5 2nd Baumanskaya street, 105005
Moscow, Russian Federation;
ORCID: 0009-0000-2055-2046;
e-mail: rubanov_ps@bk.ru

Соавторы:

Гончаров Роман Борисович,
канд. техн. наук,
доцент кафедры «Колесные машины»;
ORCID: 0000-0003-4805-967X;
eLibrary SPIN: 1180-9530;
e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru

Скотников Глеб Игоревич,
канд. техн. наук,
ассистент кафедры «Колесные машины»;
ORCID: 0000-0003-3162-5356;
eLibrary SPIN: 5025-1660;
e-mail: skotnikovg@bmstu.ru

Горелов Василий Александрович,
профессор, д-р техн. наук,
заведующий кафедрой «Многоцелевые гу-
сеничные машины и мобильные роботы»
ORCID: 0000-0002-2171-6302;
eLibrary SPIN: 1455-9984;
e-mail: gorelov_va@bmstu.ru

Григорьев Владимир Станиславович,
руководитель Чебоксарского инжиниринго-
вого центра транспортного и сельскохозяй-
ственного машиностроения;
ORCID: 0000-0003-3437-9541;
eLibrary SPIN: 4989-7923;
e-mail: wsgrig@mail.ru

Co-Authors:

Roman B. Goncharov,
Cand. Sci. (Tech.),
Associate Professor of the of the Wheeled Ve-
hicles Department;
ORCID: 0000-0003-4805-967X;
eLibrary SPIN: 1180-9530;
e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru

Gleb I. Skotnikov,
Cand. Sci. (Tech.),
Assistant of the Wheeled Vehicles Department;
ORCID: 0000-0003-3162-5356;
eLibrary SPIN: 5025-1660;
e-mail: skotnikovg@bmstu.ru

Vasily A. Gorelov,
Professor, Dr Sci. (Tech.),
Head of the Multipurpose Tracked Vehicles
and Mobile Robots Department;
ORCID: 0000-0002-2171-6302;
eLibrary SPIN: 1455-9984;
e-mail: gorelov_va@bmstu.ru

Vladimir S. Grigoriev,
Head of Cheboksary Engineering Center of
Transport and Agricultural Engineering;
ORCID: 0000-0003-3437-9541;
eLibrary SPIN: 4989-7923;
e-mail: wsgrig@mail.ru