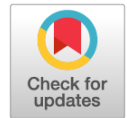


УДК 629.33

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-108869>

Оригинальное исследование



Разработка динамической модели фронтального погрузчика для анализа эксплуатационных свойств и определения нагрузок, действующих на его элементы

И.В. Чичекин¹, Ф.А. Нырков¹, В.С. Григорьев²

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² Чебоксарский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Для фронтальных погрузчиков важно минимизировать энергозатраты при выполнении погрузочно-разгрузочных работ. Для обеспечения конкурентных свойств при заданном времени складывания звеньев, подъема и при достаточной мощности приводов рулевого управления и управления стрелой и ковшом. Это требование существенно влияет на автономность, универсальность и в конечном итоге на экономическую эффективность работ при погрузке – разгрузке.

Цель работы – разработка динамической модели фронтального погрузчика для определения различных эксплуатационных свойств и нагрузок в шарнирах при работе в заданных нагрузочных режимах.

Материалы и методы. Динамическая модель разработана, и выполнено моделирование ее работы в системе расчета динамики связанных тел. Математическая модель включает в себя все основные элементы фронтального погрузчика: ведущие мосты, ДВС, генератор, гидроцилиндры рулевого управления, груз, ковш, задний мост, кабину, колеса, механизм подъема и опрокидывания ковша, несущую систему, опорную поверхность, ТЭД привода ведущих колес. Моделирование элементов выполнено с помощью графических примитивов, шарниров и силовых из стандартной библиотеки приложения по расчету динамики связанных тел.

Результаты. В работе представлено описание математической модели фронтального погрузчика, выполненной в приложении по расчету связанных тел. Представлен типовой список нагрузочных режимов и показаны примеры и результаты моделирования. Показаны возможные сферы использования описанной математической модели.

Заключение. Разработанная динамическая модель фронтального погрузчика позволяет на ранних стадиях проектирования провести анализ различных конструкторских решений, таких как модель и количество электродвигателей, кинематика механизма подъема и опрокидывания ковша, кинематика рулевого управления и т. п. на затраты энергии на выполнение типичных операций. Кроме того, разработанная динамическая модель позволяет определять нагрузки в шарнирах и силовых связях, которые можно использовать при выполнении прочностных расчетов или при подборе компонентов погрузчика.

Ключевые слова: фронтальный погрузчик; динамика твердых тел; виртуальный прототип; прочностной расчет; энергозатраты; нагрузки; нагрузочные режимы.

Для цитирования:

Чичекин И.В., Нырков Ф.А., Григорьев В.С. Разработка динамической модели фронтального погрузчика для анализа эксплуатационных свойств и определения нагрузок, действующих на его элементы // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 1. С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-108869>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-108869>

Original study article

Development of a dynamic model of a front loader for the analysis of operational properties and determination of loads acting on its elements

Ilya V. Chichekin¹, Filipp A. Nyrkov¹, Vladimir S. Grigoruev²¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia² Chuvash State University, Cheboksary, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: For front-end loaders, it is important to minimize energy consumption when performing loading and unloading operations. To ensure competitive properties at a given time of folding links, lifting and with sufficient power of the steering and boom and bucket control drives. This requirement significantly affects the autonomy, versatility and, ultimately, the economic efficiency of loading and unloading operations.

AIMS: Development of a dynamic model of a front loader to determine various operational properties and loads in the joints when working in specified load conditions.

METHODS: A dynamic model has been developed and its operation has been simulated in a system for calculating the dynamics of coupled bodies. The mathematical model includes all the main elements of a front loader – drive axles, internal combustion engine, generator, steering hydraulic cylinders, cargo, bucket, rear axle, cab, wheels, bucket lifting and tipping mechanism, load-bearing system, support surface, TED drive of the driving wheels. The elements are modeled using graphical primitives, hinges and power ones from the standard library of the application for calculating the dynamics of connected bodies.

RESULTS: The article presents a description of a mathematical model of a front loader made in the application for the calculation of connected bodies. A typical list of load modes is presented and examples and simulation results are shown. Possible areas of use of the described mathematical model are shown.

CONCLUSIONS: The developed dynamic model of the front loader makes it possible to analyze various design solutions at the early stages of design, such as the model and number of electric motors, kinematics of the bucket lifting and tilting mechanism, steering kinematics, etc. for energy costs during typical operations. In addition, the developed dynamic model allows you to determine the loads in the hinges and power connections, which can be used when performing strength calculations or when selecting loader components.

Keywords: front loader; wheel loader; dynamics of solids; virtual prototype; strength calculation; energy consumption; loads; load modes.

Cite as:

Chichekin IV, Nirkov FA, Grigoruev VS. Development of a dynamic model of a front loader for the analysis of operational properties and determination of loads acting on its elements. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2022;16(1):71–80. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-108869>

Received: 09.02.2022

Accepted: 16.03.2022

Published: 15.04.2022

ВВЕДЕНИЕ

Погрузка и выгрузка сыпучих грузов и полезных ископаемых в открытых карьерах, на производственных и строительных площадках производится с использованием фронтальных погрузчиков (ФП) [1–8]. Кроме того, ФП применяются при уборке улиц от снега в зимний период, для работы на лесозаготовке и т. п. Повышения эффективности использования ФП можно добиться за счет выбора рациональных параметров силовой установки, механизма изменения положения ковша, параметров рулевого управления и т. п.

Для фронтальных погрузчиков важно минимизировать энергозатраты на складывание звеньев, подъеме и опрокидывании ковша с грузом при заданных временных ограничениях, для обеспечения конкурентных преимуществ. Сокращение энергозатрат влияет на автономность, универсальность, время простоя техники и прибыль. Кроме того, важно обеспечить долговечность деталей и узлов, а также выбрать рациональные размеры, обеспечивающие работоспособность деталей под действием максимально возможных усилий, возникающих в процессе эксплуатации ФП. Готовых методов расчета, учитывающих все многообразие нагрузочных режимов, в которых эксплуатируются фронтальные погрузчики, в настоящее время не существует.

Решить эти задачи можно с использованием компьютерного моделирования. В настоящее время для проектирования несущих систем, элементов ходовой части, рулевого управления и т. п., получения нагрузок в шарнирах и силовых связях, соединяющих раму с другими элементами, на ранней стадии проектирования используют имитационные модели динамики транспортных средств, разработанные в приложениях расчета динамики твердых тел [9, 10]. Используемый подход позволяет автоматизировано получить нагрузки на все элементы транспортного средства в любой момент моделирования. Полученные нагрузки могут быть легко импортированы в приложения по проведению прочностных расчетов методом конечных элементов. Также во время моделирования можно оценить энергозатраты в заданном нагрузочном режиме.

Цель работы – разработка динамической модели фронтального погрузчика для определения различных эксплуатационных свойств и нагрузок в шарнирах при работе в заданных нагрузочных режимах.

Для достижения цели в данном исследовании разработана и представлена имитационная модель динамики фронтального погрузчика, а также выбраны типовые нагрузочные режимы движения. Проведены расчеты в среде моделирования динамики твердых тел в выбранных нагрузочных режимах. Представлены примеры результатов расчета некоторых нагрузочных режимов.

ОПИСАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА

Общий вид динамической модели фронтального погрузчика с массой груза в ковше равной 3500 кг, разработанной в системе расчета динамики тел, представлен на рис. 1. Синими стрелками на изображениях показаны усилия в шарнирах или силовых связях, красными – моменты. Численные значения показывают величину силы в Н и момента в Н·м. На рис. 1 для примера показаны магнитуды реакций в пятне контакта колес с опорной поверхностью и вес груза в ковше.

Математическая модель погрузчика (рис. 2) включает в себя баки, ведущие мосты, ДВС, генератор, гидроцилиндры рулевого управления, груз, ковш, задний мост, кабину, колеса, механизм подъема и опрокидывания ковша, несущую систему (две полурамы), опорную поверхность (дорогу), ТЭД привода ведущих колес.

Допущения, использованные при построении модели:

- все звенья динамической системы абсолютно жесткие;
- трение в шарнирах отсутствует;
- груз смоделирован абсолютно жестким единым телом, жестко связанным с ковшом. Для удобства моделирования различных нагрузочных режимов, вес груза, а также горизонтальная составляющая силы сопротивления движению моделируются как внешняя сила из стандартной библиотеки приложения по расчету динамики связанных тел;
- деформация колес учтена в модели взаимодействия колеса с опорной поверхностью, реакции на колесо от опорной поверхности приложены в центре колеса.

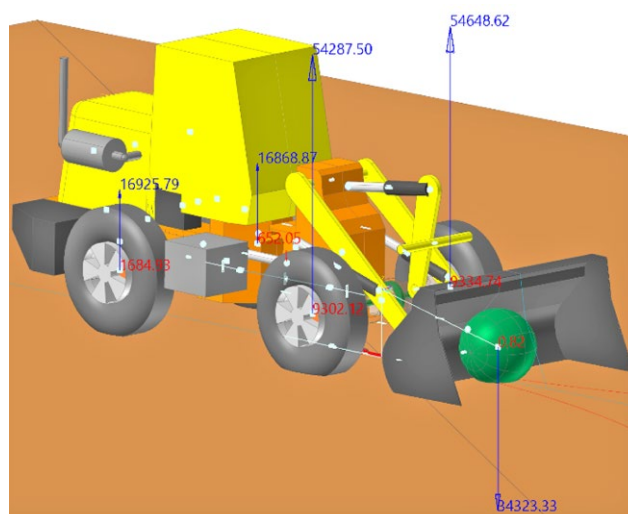


Рис. 1. Общий вид модели фронтального погрузчика в статическом положении при полной массе на горизонтальной ОП.
Fig. 1. General view of the front loader model in a static position with full weight on a horizontal support surface.

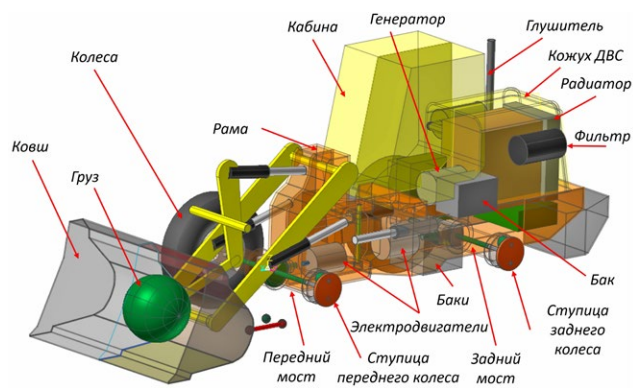


Рис. 2. Компоненты математической модели фронтального погрузчика.

Fig. 2. Components of the mathematical model of the front loader.

Имитационные модели, созданные в приложениях по расчету динамики твердых тел, позволяют определять нагрузки в шарнирах для последующих прочностных расчетов [11], определять нагрузки для расчета долговечности деталей [12], подбирать компоненты колесной машины. Также разработанная математическая

модель позволяет определить тягово-динамические свойства машины, топливную экономичность, оценить работу рулевого управления.

Общий вид модели ведущего моста со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели фронтального погрузчика показан на рис. 3. Модели переднего и заднего мостов одинаковые. Задний мост повернут вокруг вертикальной оси ФП на 180 градусов. Звенья ведущего моста связаны между собой (рис. 3): шарнирами, ограничивающими все степени свободы (*Fixed*); пружинами кручения (*Rotational Spring*), имитирующими шлицы и блокировку дифференциала; цилиндрическими шарнирами, моделирующими подшипники (*Revolute*); шарнирами, моделирующими зубчатое зацепление ГП, дифференциала и колесного редуктора (*Gear*).

Как правило, в реальных конструкциях ФП передний мост жестко крепится к несущей системе, а задний мост может поворачиваться на $\pm 15^\circ$ относительно продольной оси ФП. В разработанной модели передний мост жестко соединяется с рамой шарниром *Fixed*, задний мост соединяется с рамой шарниром *Revolute* (рис. 4). Передаточные числа компонентов моста

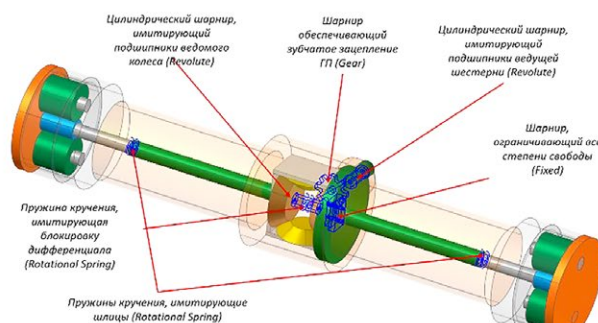
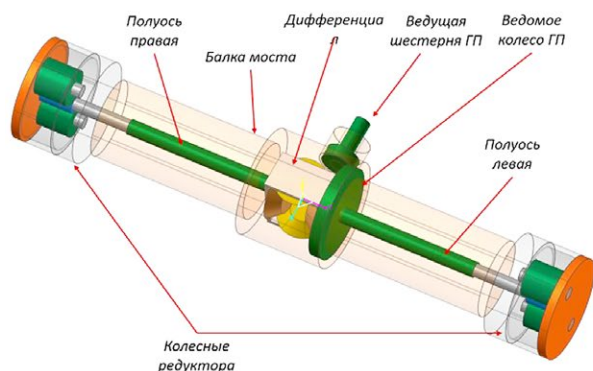


Рис. 3. Общий вид модели переднего моста со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели фронтального погрузчика.

Fig. 3. General view of the front axle model with the layout of hinges and force connections in the front loader model.

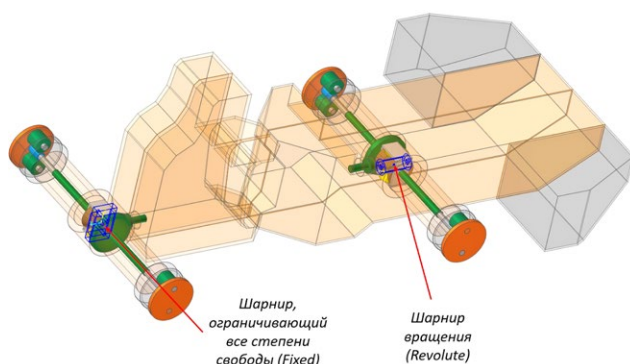


Рис. 4. Схема размещения шарниров, связывающих ведущие мосты с несущей системой.

Fig. 4. Scheme of placement of hinges connecting drive axles with a carrier system.

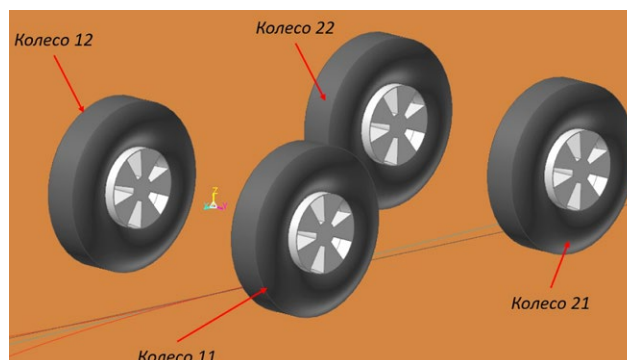


Рис. 5. Модели колесного движителя.

Fig. 5. Wheel mover models.

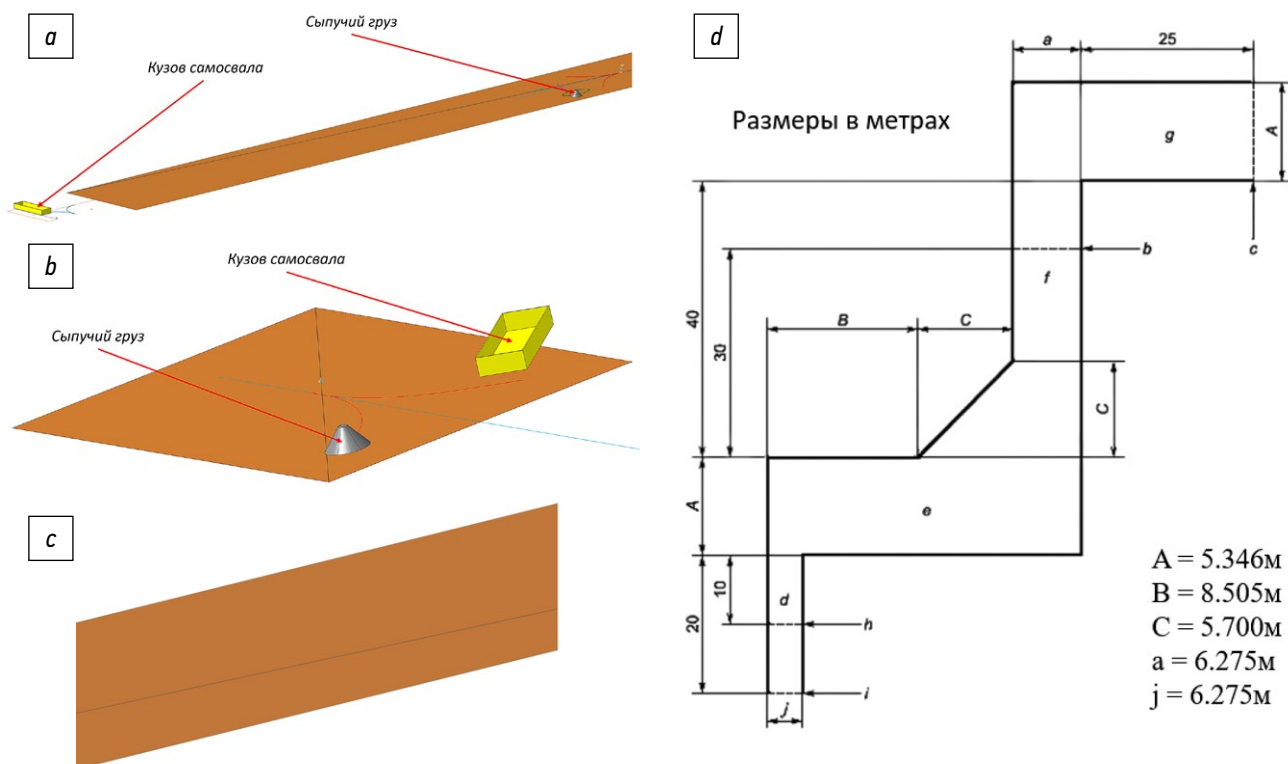


Рис. 6. Общий вид моделей ОП: *a* – испытательная площадка для моделирования длинного цикла; *b* – испытательная площадка для моделирования короткого цикла; *c* – прямая плоская трасса; *d* – трасса для прохождения коридора.

Fig. 6. General view of the support surface models: *a* – a test site for simulating a long cycle; *b* – test site for simulation of a short cycle; *c* – straight flat track; *d* – route for passing the corridor.

для всех нагрузочных режимов оставались одинаковыми.

Опорная поверхность (ОП) задана поверхностью, параметры которой считываются из внешнего файла. При моделировании используется стандартная модель взаимодействия шины с опорной поверхностью из библиотеки приложения по расчету динамики твердых тел [13, 14, 15].

Общий вид модели колесного движителя представлен на рис. 5. Принята следующая нумерация звеньев, шарниров и силовых соединений: элементы, относящиеся к левому переднему движителю, имеют индекс 11; элементы, относящиеся к правому переднему движителю, – индекс 12; элементы, относящиеся к левому заднему движителю, – индекс 21; элементы, относящиеся к правому заднему движителю, – индекс 22. Шины размерностью 17.5–25, номинальной грузоподъемностью 50 000 Н. Масса одного колеса в сборе составляет 200 кг.

Моделирование нагрузочных режимов фронтального погрузчика производилось на различных ОП. Общий вид основных моделей ОП, использованных при моделировании, представлен на рис. 6. Коэффициент сцепления колес с ОП задавался равным 0.6, коэффициент сопротивления движению равен 0.02.

Модель электродвигателя задана в отдельном подключаемом *dll* файле. В качестве исходных данных в модели двигателя используются скоростные, силовые (мощностные) параметры, а также поле КПД (рис. 7).

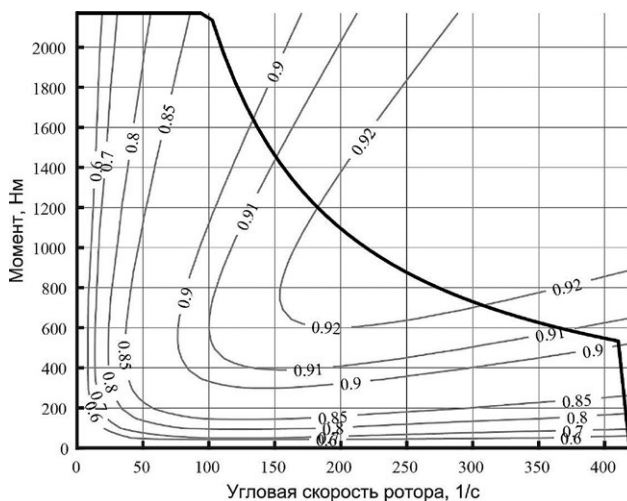


Рис. 7. Характеристики электродвигателя: динамическая характеристика и КПД электродвигателя.

Fig. 7. Motor characteristics: dynamic behavior and efficiency of the electric motor.

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СЛУЧАЕВ

В работе проведен анализ условий эксплуатации фронтальных погрузчиков [6, 7, 8]. По результатам анализа составлен список расчетных случаев, приведенный в табл. 1.

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате проведенных расчетов во всех нагрузочных режимах получены усилия в шарнирах и силовых связях фронтального погрузчика.

Примеры результатов по некоторым нагрузочным режимам приведены на рис. 8 (*a* – движение ФП в бульдозерном режиме; *b* – общий вид модели ФП при максимально сложенных рамах; *c* – определение опрокидывающего усилия; *d* – движение по кругу с минимальным радиусом поворота; *e* – движение на подъеме; *f* – расчет нормальных реакций на косогоре).

По показаниям на рис. 8 в направлениях и цифровых значениях магнитуд реакций в пятне контакта можно определить режим качения колес, значение реакций и т. п. Например, на рис. 8, *a* показан скриншот

с состоянием модели при преодолении заданного бульдозерного сопротивления равного 49 658.58 Н. Также с помощью модели можно определить вес груза в ковше, вызывающего опрокидывание модели относительно передней оси – опрокидывающая нагрузка (рис. 8, *b*). Для описанной модели ФП эта нагрузка составила 89 500 Н. Кроме того, модель позволяет оценить траектории движения любых звеньев. Так на рис. 8, *d* линиями показаны траектории движения колес передней оси, по которым можно определить, например, минимальные радиусы поворота ФП. В результате моделирования получены реакции в пятне контакта в любой момент времени для каждого нагрузочного режима. Например, для нагрузочного режима «расчет момента и мощности привода складывания звеньев» (рис. 8, *c*).

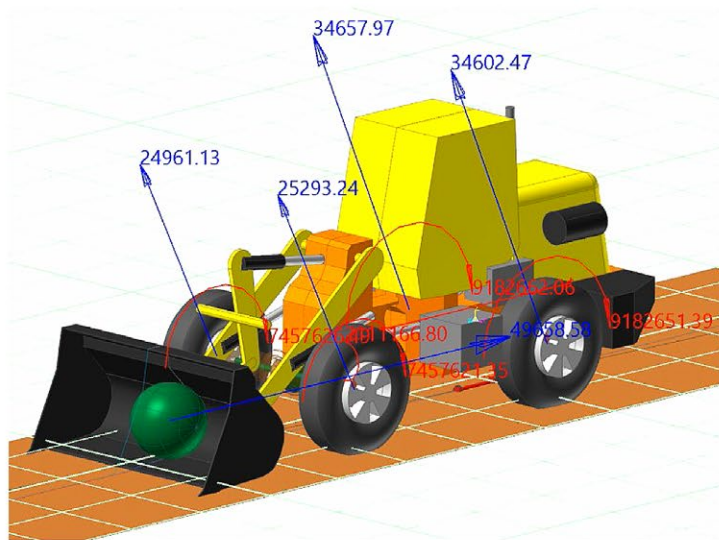
На рис. 9 представлен пример изменения реакций в пятне контакта фронтального погрузчика при моделировании движения по неровной ОП для всех колес.

Также с помощью разработанной динамической модели производилась оценка работоспособности рулевого управления. Для этого был задан коридор [16], в котором должен был двигаться исследуемый ФП. В результате моделирования получена визуальная информация, о том, что ФП не вышел за границы заданного коридора (рис. 10), а также получены усилия в гидроцилиндрах

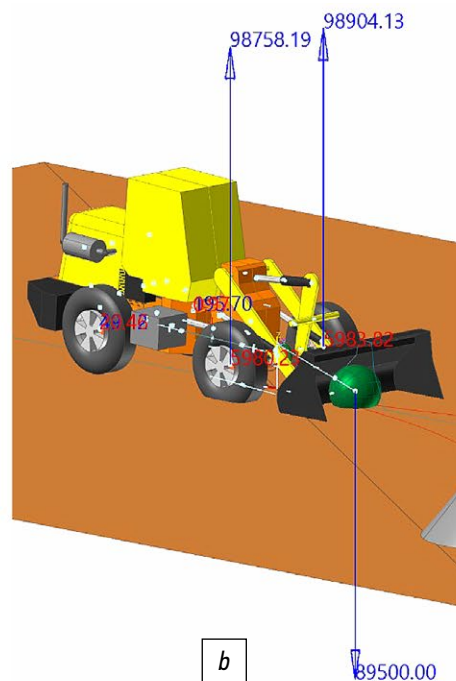
Таблица 1. Список расчетных режимов для определения эксплуатационных свойств и нагрузок в шарнирах несущей системы фронтального погрузчика

Table 1. List of design modes for determining the operational properties and loads in the hinges of the front loader carrier system

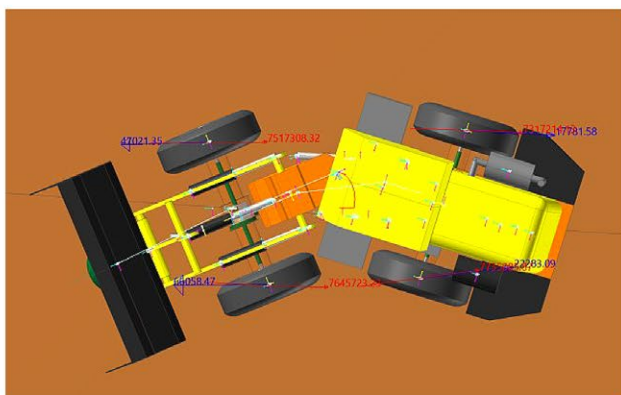
№	Название
1.	Расчет нормальных реакций на горизонтальной опорной поверхности с номинальной массой груза в ковше
2.	Расчет нормальных реакций на горизонтальной опорной поверхности при снаряженной массе
3.	Расчет нормальных реакций на спуске и подъеме с номинальной массой груза в ковше
4.	Расчет нормальных реакций на спуске и подъеме при снаряженной массе
5.	Расчет нормальных реакций на косогоре с номинальной массой груза в ковше
6.	Расчет нормальных реакций на косогоре при снаряженной массе
7.	Расчет максимально возможного угла преодолеваемого подъема при заданном коэффициенте сцепления колес с ОП
8.	Движение по «короткому циклу» и определение энергозатрат
9.	Движение по «длинному циклу» и определение энергозатрат
10.	Движение ФП в бульдозерном режиме
11.	Движение ФП в транспортном режиме
12.	Расчет потребной мощности на складывание звеньев на месте
13.	Расчет потребной мощности на подъем ковша
14.	Расчет минимального радиуса поворота
15.	Расчет опрокидывающей нагрузки в прямом положении рамы
16.	Расчет опрокидывающей нагрузки при полностью сложенных полурамах
17.	Проезд коридора



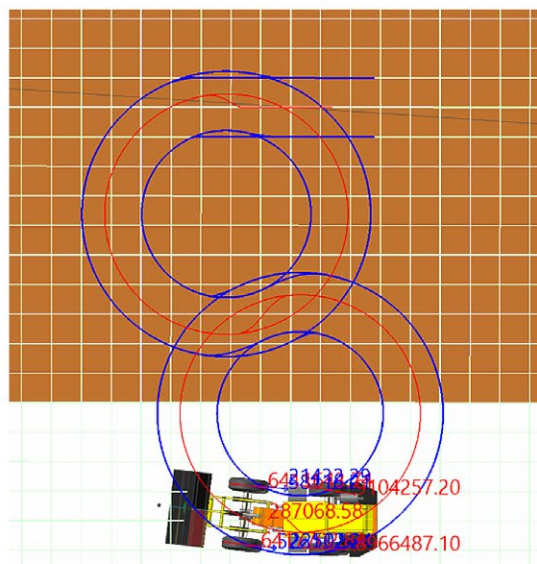
a



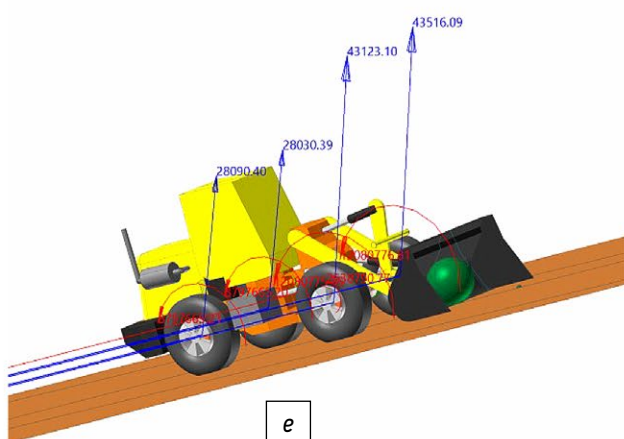
b



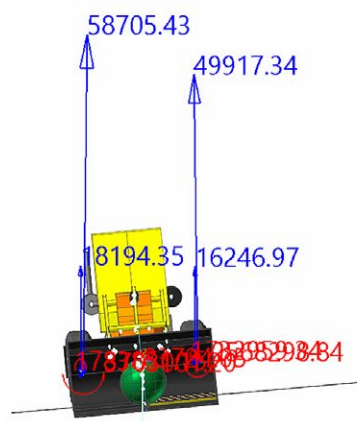
c



d



e



f

Рис. 8. Примеры моделирования нагрузочных режимов.
Fig. 8. Examples of simulation of load modes.

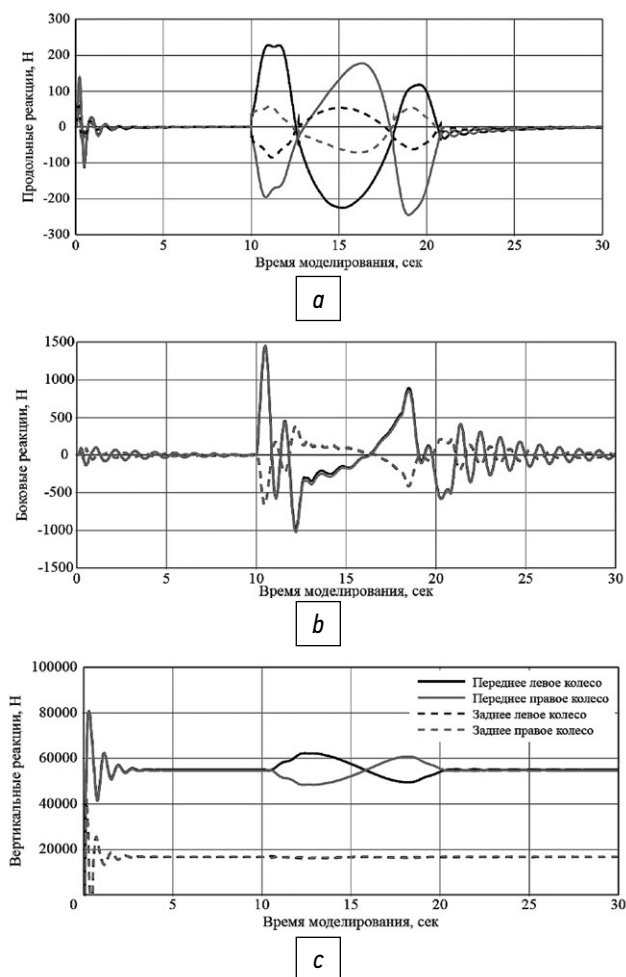


Рис. 9. Изменение реакций в пятне контакта фронтального погрузчика при движении по неровной ОП: *a* – продольные реакции; *b* – поперечные реакции; *c* – вертикальные реакции.

Fig. 9. Change in reactions in the contact patch of a front-end loader when driving on an uneven support surface: *a* – longitudinal reactions; *b* – transverse reactions; *c* – vertical reactions.

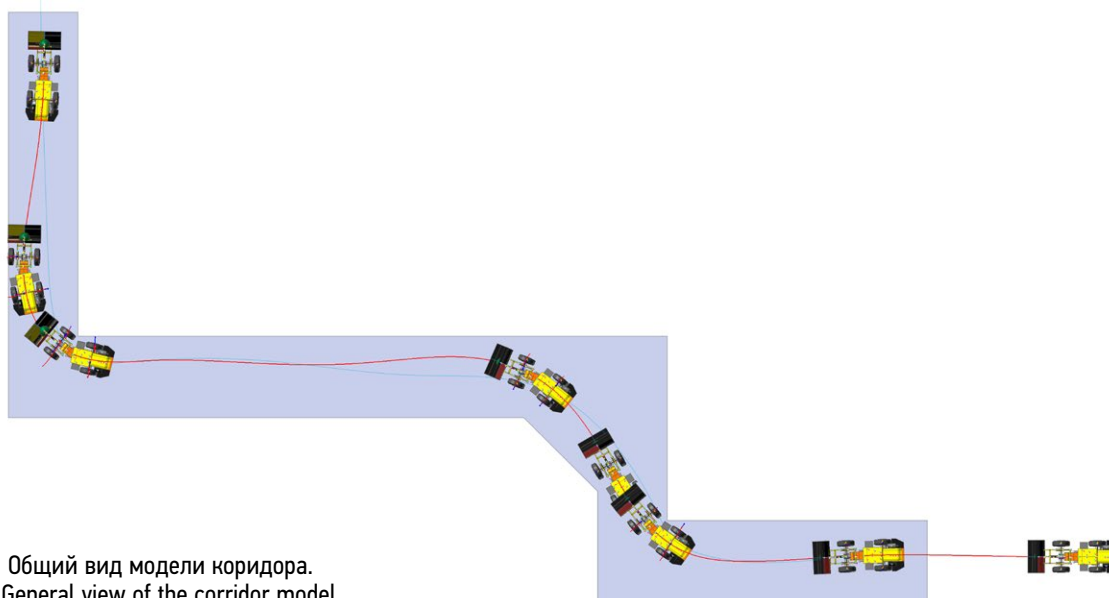


Рис. 10. Общий вид модели коридора.

Fig. 10. General view of the corridor model.

рулевого управления, необходимые для поворота ФП. По этим усилиям подбираются гидроцилиндры рулевого управления.

ВЫВОДЫ

В работе создана имитационная модель динамики фронтального погрузчика для получения нагрузок, действующих на несущую систему, элементы подвески и другие элементы колесной машины.

Произведенный анализ условий эксплуатации погрузчиков позволил сформировать список нагрузочных режимов, представленный в работе. В рассмотренных нагрузочных режимах определяются не только максимальные нагрузки, но и анализируются эксплуатационные свойства, производится анализ работы систем управления стрелой и ковшом, а также рассматриваются системы рулевого управления.

Разработанная модель динамики погрузчика универсальная. Она позволяет не только определять нагрузки в шарнирах и силовых связях, но и анализировать кинематику механизма подъема и опрокидывания ковша, кинематику механизма поворота, проводить анализ эксплуатационных свойств.

Задавая исходные данные, соответствующие различным моделям тяговых электродвигателей с помощью разработанной модели провести анализ энергоэффективности работы ФП в заданных нагрузочных режимах.

Исследования выполнены ФГБОУ ВО «ЧГУ 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.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. *И.В. Чичекин* – разработка динамической модели, написание текста рукописи; *Ф.А. Нырков* – проведение расчетов, оформление иллюстраций; *В.С. Григорьев* – редактирование текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

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

Источник финансирования. Исследования выполнены ФГБОУ ВО «ЧГУ 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 31555-2012. Погрузчики строительные фронтальные одноковшовые. Общие технические условия. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200102390>. Дата обращения: 13.06.2022
2. Смирнов А.Н., Авраменко П.В. Рекомендации по повышению энергоэффективности одноковшовых фронтальных погрузчиков при эксплуатации. Минск: БГАТУ, 2020.
3. Базанов А.Ф., Забегалов Г.В. Самоходные погрузчики. 2-е изд. Москва: Машиностроение, 1979.
4. Боровков Ю.А., Дробаденко В.П., Ребриков Д.Н. Основы горного дела: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. Москва: Издательский центр «Академия», 2012.
5. Кольга А.Д., Гавришев С.Е. Повышение эффективности и расширение области применения автомобильного транспорта на карьерах // Добыча, обработка и применение природного камня. Сборник научных трудов. Том 3. 2003. С. 179–191.
6. Grant M. Hydraulic Excavators vs Wheel loaders [Internet]. Quarry Academy. 2016. Available at: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/01/Hydraulic-Shovel-vs-Wheel-Loader.pdf>. Accessed: Jun 13, 2022.
7. Berry T. The first Articulated Wheel Loader [Internet]. Jan.25th, 2013. Available at: <https://www.constructionequipment.com/first-articulated-wheel-loader>. Accessed: Jun 13, 2022.
8. Metin Özdoğan, Hakkı Özdoğan. Wheel Loader Buckets & Digging Forces [Internet]. Sep 2019. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/335618855>. Accessed: Jun 13, 2022.

REFERENCES

1. GOST 31555-2012. Building front-end single-bucket loaders. Specifications. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200102390>. Accessed: Jun 13, 2022. (In Russ).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. *I.V. Chichekin* – development of a dynamic model, writing the text of the manuscript; *F.A. Nyrkov* – carrying out calculations, creating images; *V.S. Grigoruev* – editing the text of the manuscript, expert review, 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 (according to international *ICMJE* criteria).

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

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

9. Vdovin D., Chichekin I., Ryakhovsky O. Quad bike frame dynamic load evaluation using full vehicle simulation model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 589, N 1. doi: 10.1088/1757-899x/589/1/012025
10. Gorelov V.A., Komissarov A.I. Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire – Rigid Terrain Irregularities Interaction // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150, P. 1322–1328. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.309
11. Vdovin D., Chichekin I. Loads and Stress Analysis Cycle Automation in the Automotive Suspension Development Process // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150, P. 1276–1279. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.285
12. 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.
13. Pacejka H.B. Tyre and Vehicle Dynamics. Oxford: Butterworth Heinemann, 2006.
14. Pacejka H.B., Besselink I.J.M. Magic Formula Tyre Model with Transient Properties // Vehicle System Dynamics. 1997. Vol. 27 (sup001), P. 234–249. doi: 10.1080/00423119708969658
15. TNO Automotive: MF-Tool 6.1 User Manual. Netherlands, 2008.
16. ГОСТ ISO 5010:2011 Машины землеройные. Системы рулевого управления колесных машин. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200096396>. Дата обращения: 13.06.2022.

2. Smirnov AN, Avramenko PV. *Rekomendatsii po povysheniyu energoeffektivnosti odnokovshovykh frontal'nykh pogruzchikov pri ekspluatatsii*. Минск: БГАТУ, 2020. (In Russ).

3. Bazanov AF, Zabegalov GV. *Samokhodnye pogruzchiki*. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1979. (In Russ).
4. Borovkov YA, Drobachenko VP, Rebrikov DN. *Osnovy gornogo dela: uchebnik dlya stud. uchrezhde-nii sred. prof. obrazovaniya*. Moscow: Izdatel'skii tsentr «Akademiya»; 2012. (In Russ).
5. Kolga AD, Gavrishev SE. Increase in efficiency and widening the field of use of automobile transport in pits. *Dobycha, obrabotka i primeneniye prirodnogo kamnya. Sbornik nauchnykh trudov. Tom 3*. 2003:179–191. (In Russ).
6. Grant M. Hydraulic Excavators vs Wheel loaders [Internet]. Quarry Academy. 2016. Available at: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/01/Hydraulic-Shovel-vs-Wheel-Loader.pdf>. Accessed: Jun 13, 2022.
7. Berry T. The first Articulated Wheel Loader [Internet]. Jan.25th, 2013. Available at: <https://www.constructionequipment.com/first-articulated-wheel-loader>. Accessed: Jun 13, 2022.
8. Metin Özdoğan, Hakkı Özdoğan. Wheel Loader Buckets & Digging Forces [Internet]. Sep 2019. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/335618855>. Accessed: Jun 13, 2022.
9. Vdovin D, Chichekin I, Ryakhovsky O. Quad bike frame dynamic load evaluation using full vehicle simulation model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;589(1). doi: 10.1088/1757-899x/589/1/012025
10. Gorelov VA, Komissarov AI. Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire – Rigid Terrain Irregularities Interaction. *Procedia Engineering*. 2016;150:1322–1328. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.309
11. Vdovin D, Chichekin I. Loads and Stress Analysis Cycle Automation in the Automotive Suspension Development Process. *Procedia Engineering*. 2016;150:1276–1279. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.285
12. Vdovin DS, Chichekin IV, Levenkov YY. Predicting the fatigue life of a semi-trailer suspension elements at the early stages of design. *Trudy NAMI*. 2019;(2):14–23. (In Russ).
13. Pacejka HB. *Tyre and Vehicle Dynamics*. Oxford: Butterworth Heinemann; 2006.
14. Pacejka HB, Besselink IJM. Magic Formula Tyre Model with Transient Properties. *Vehicle System Dynamics*. 1997; 27 sup001:234–249. doi: 10.1080/00423119708969658
15. TNO Automotive: MF-Tool 6.1 User Manual. Netherlands, 2008.
16. GOST ISO 5010:2011 Earth-moving machinery. Steering requirements for rubber-tyred machines. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200096396>. Accessed: Jun 13, 2022. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

*Чичекин Илья Викторович,

канд. техн. наук,
доцент кафедры «Колесные машины»;
адрес: Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-7657>;
eLibrary SPIN: 4060-0720;
e-mail: hiv2@mail.ru

Ныркв Филлипп Алексеевич,

студент кафедры «Колесные машины»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3431-8116>;
eLibrary SPIN: 8208-7643;
e-mail: nfa18m127@student.bmstu.ru

Григорьев Владимир Станиславович,

старший преподаватель
кафедры «Технология машиностроения»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3437-9541>;
eLibrary SPIN: 4989-7923;
e-mail: wsgrig@chuvsu.ru

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

*Ilya V. Chichekin,

Cand. Sci. (Engin.),
Associate Professor of the Department of Wheeled Vehicles;
address: 5 2-ya Baumanskaya av., Moscow, 105005, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-7657>;
eLibrary SPIN: 4060-0720;
e-mail: hiv2@mail.ru

Filipp A. Nyrkov,

student of the Department of Wheeled Vehicles;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3431-8116>;
eLibrary SPIN: 8208-7643;
e-mail: nfa18m127@student.bmstu.ru

Vladimir S. Grigoriev,

Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering
Technology;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3437-9541>;
eLibrary SPIN: 4989-7923;
e-mail: wsgrig@chuvsu.ru

* Corresponding author