

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_4\_121

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА МЕХАНИЗМ ПОДЪЕМА И ОПРОКИДЫВАНИЯ КОВША ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**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**Ф.А. Нырк**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**В.С. Григорьев**ORCID: 0000-0003-3437-9541 e-mail: [wsgrig@chuvsu.ru](mailto:wsgrig@chuvsu.ru)Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова  
Чебоксары, Россия

Описана математическая модель динамики фронтального погрузчика для получения нагрузок, действующих на механизм подъема и опрокидывания ковша. Разработанная динамическая модель универсальна и позволяет определять нагрузки на все звенья фронтального погрузчика, а также оценивать его эксплуатационные свойства. Приведен список типовых нагрузочных режимов, для определения максимальных нагрузок, которые могут возникнуть при эксплуатации. Представлены примеры результатов расчетов для разных нагрузочных режимов, а также использования полученных нагрузок при проведении прочностных расчетов и топологической оптимизации. Разработка математической модели фронтального погрузчика для определения нагрузок в шарнирах и силовых связях, для последующих прочностных расчетов и анализа долговечности, является актуальной задачей на ранних стадиях проектирования. Математическая модель разработана в системе расчета динамики связанных тел (*Multi Body Dynamics – MBD*).

**Ключевые слова:** фронтальный погрузчик, динамика связанных тел, виртуальный прототип, прочностной расчет, нагрузки, нагрузочные режимы.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Чичекин, И.В. Определение нагрузок на механизм подъема и опрокидывания ковша фронтального погрузчика на ранних стадиях проектирования с использованием динамической модели / И.В. Чичекин, Ф.А. Нырк, О.И. Чудаков, В.С. Григорьев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 121-130. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_4\_121

# DETERMINATION OF LOADS ON LIFTING AND TIPPING MECHANISM OF WHEEL LOADER BUCKET AT THE EARLY STAGES OF DESIGN USING A DYNAMIC MODEL

**I.V. Chichekin**

ORCID: **0000-0001-7632-7657** e-mail: **chichekin\_iv@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*

**V.S. Grigoryev**

ORCID: **0000-0003-3437-9541** e-mail: **wsgrig@chuvsu.ru**

I.N. Ulianov Chuvash State University

*Cheboksary, Russia*

**Abstract.** The paper describes a mathematical model of the dynamics of a wheel loader to obtain loads acting on the mechanism of lifting and tipping the bucket. The developed dynamic model is universal and allows to determine the loads on all parts of the front loader, as well as to evaluate its operational properties. A list of typical load conditions is given to determine the maximum loads that may occur during operation. Examples of calculation results for different load conditions are presented, as well as the use of the obtained loads during strength calculations and topological optimization. The development of a mathematical model of a wheel loader for determining loads in hinges and power connections is an urgent task at the early stages of design for subsequent strength calculations and durability analysis. The mathematical model is developed in the system of calculation of Multi Body Dynamics (MBD).

**Key words:** wheel loader, multi body dynamics, virtual prototype, strength analysis, loads, load modes

**FOR CITATION:** I.V. Chichekin, F.A. Nyrkov, O.I. Chudakov, V.S. Grigoryev. Determination of loads on lifting and tipping mechanism of wheel loader bucket at the early stages of design using a dynamic model. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 121-130. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_4\_121

## Введение

Погрузка и выгрузка сыпучих грузов и полезных ископаемых в открытых карьерах, на производственных и строительных площадках производится с использованием фронтальных погрузчиков (ФП). Кроме того, ФП применяются при уборке улиц от снега в зимний период, для работы на лесозаготовке и т.п. [1-7]. Загрузка ковша, подъем и выгрузка – самые часто выполняемые операции ФП. Время выполнения одного такого цикла может не превышать 1 минуты [6], соответственно, даже в одну рабочую смену совершается не менее 480 циклов. При проектировании механизма подъема и опрокидывания ковша важно обеспечить требуемую кинематику звеньев, определить нагрузки, действующие во всех шарнирах и гидроцилиндрах. Используя аналитические способы расчета [8], можно выполнить расчеты простых нагрузочных режимов (НР), при необходимости расчета пространственного нагружения эти расчеты становятся очень трудоемкими. Для решения этих задач применяется компьютерное моделирование. В настоящее время для проектирования несущих систем, элементов ходовой части, рулевого управления и т.п., для получения нагрузок в шарнирах и силовых связях, соединяющих звенья в динамических моделях, на ранней стадии проектирования используют

имитационные модели динамики транспортных средств, разработанные в приложениях расчета динамики твердых тел [2, 9, 10]. Используемый подход позволяет автоматизировать получение нагрузки на все элементы транспортного средства в любой момент моделирования при любых положениях звеньев и любых направлениях векторов сил и моментов. Полученные нагрузки могут быть легко импортированы в приложения по проведению прочностных расчетов методом конечных элементов. Также по результатам моделирования можно оценить энергозатраты в заданном НР.

Цель работы – определение нагрузок, действующих в шарнирах и силовых связях на звенья механизма подъема и опрокидывания ковша при работе в выбранных НР. Для ее достижения разработана и представлена имитационная модель динамики ФП, а также выбраны типовые НР. Проведены расчеты в среде моделирования динамики твердых тел. Представлены примеры результатов расчета для некоторых НР. Показаны примеры использования полученных нагрузок.

### Описание динамической модели фронтального погрузчика

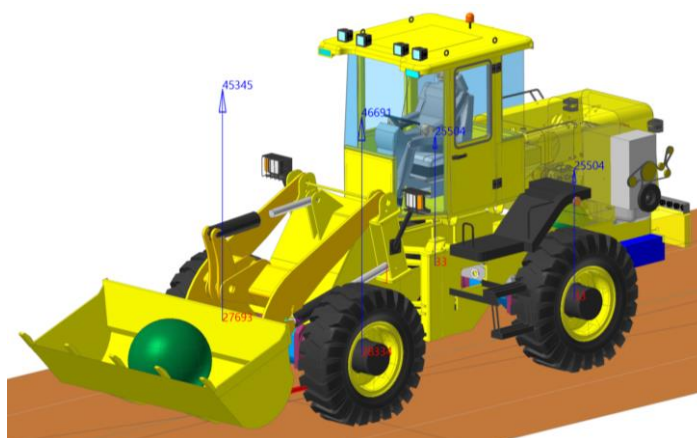


Рис. 1. Общий вид модели ФП в статическом положении при полной массе на горизонтальной ОП

Fig. 1. General view of the front loader model in a static position with full weight on a horizontal supporting surface

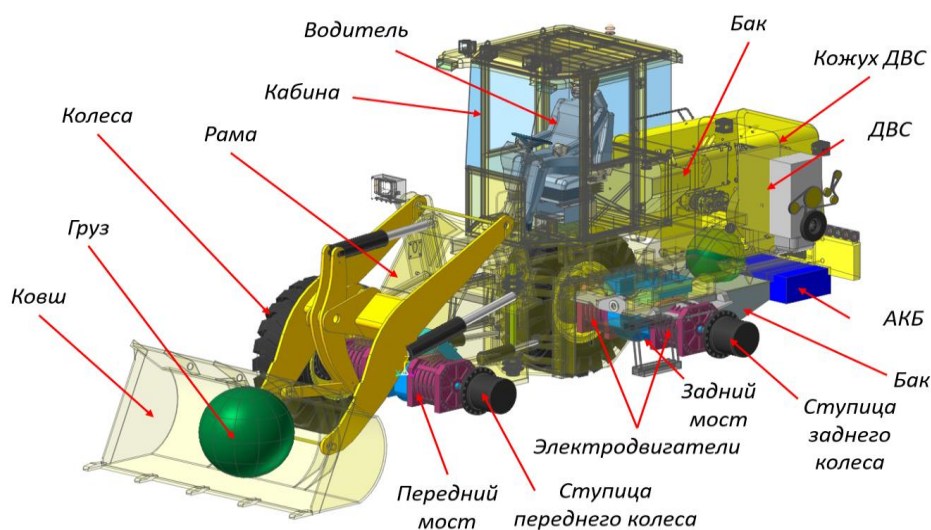


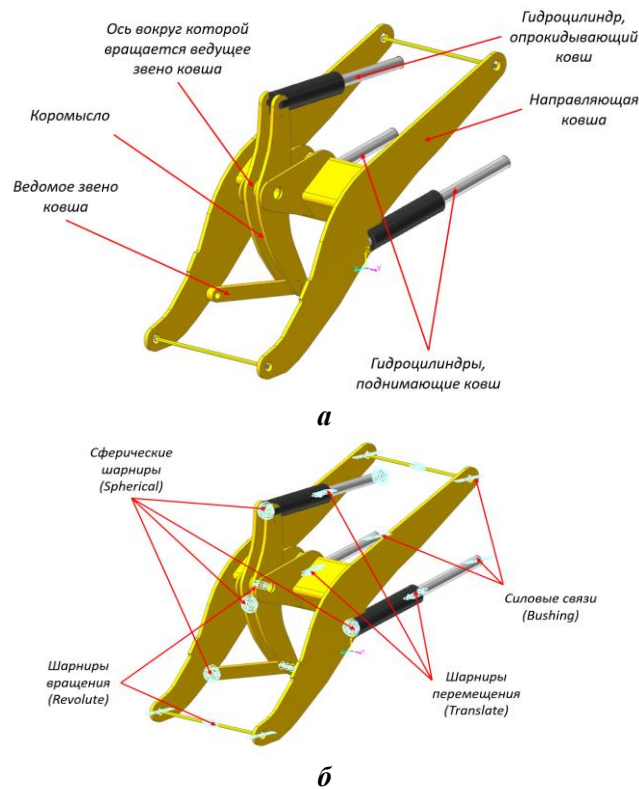
Рис. 2. Компоненты математической модели ФП

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

Общий вид динамической модели ФП, разработанной в системе расчета динамики тел, представлен на рис. 1. Модель ФП (рис. 2) включает в себя баки, ведущие мосты, ДВС, генератор, гидроцилиндры рулевого управления, груз (массой 3500 кг), ковш, задний мост, кабину, колеса, механизм подъема и опрокидывания ковша, несущую систему (две полурамы), опорную поверхность (ОП), тяговые электродвигатели (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;
- деформация колес учтена в модели взаимодействия колеса с ОП, реакции на колесо от ОП приложены в центре колеса, перенесенные реакции из пятна контакта в центр колеса компенсируются крутящими моментами.



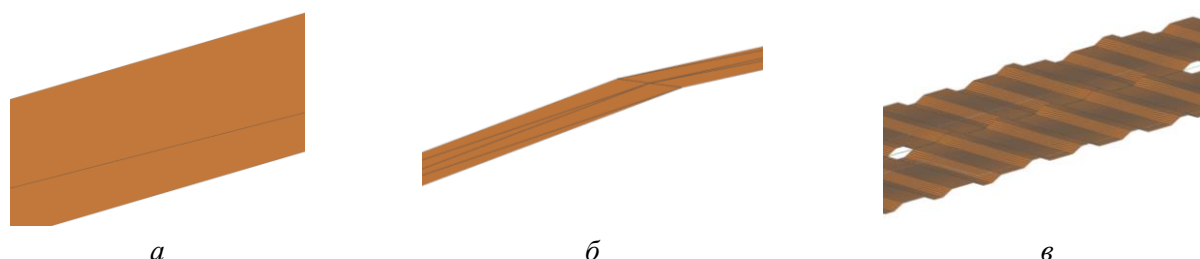
**Рис. 3. Общий вид модели (а) и расположение шарниров и силовых связей в динамической модели (б) механизма подъема и опрокидывания ФП**

**Fig. 3. General view of the model (a) and the location of hinges and force connections in the dynamic model (b) of the mechanism for lifting and tipping a front loader**

Имитационные модели, созданные в приложениях по расчету динамики твердых тел, позволяют определять нагрузки в шарнирах для последующих прочностных расчетов [11], а также нагрузки для расчета долговечности деталей [12]. Кроме того, разработанная модель позволяет оценивать эксплуатационные свойства – тягово-динамические, тормозные, топливную экономичность, оценить работу элементов и систем ФП – рулевого управления, кинематики заднего моста и т.п. Общий вид модели механизма подъема ковша со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели ФП показан на рис. 3. Звенья механизма связаны между собой: шарнирами вращения; шаровыми шарнирами; шарнирами поступательного движения, силовыми связями типа упругая втулка из стандартной библиотеки приложения по расчету динамики связанных тел.

ОП задана поверхностью, параметры которой считываются из внешнего файла. При моделировании используется стандартная модель взаимодействия шины с ОП из библиотеки приложения по расчету динамики твердых тел [13-15]. Принята следующая нумерация зве-

ньев, шарниров и силовых соединений – элементы, относящиеся к колесным движителям, имеют индексы «11» (передний левый), «12» (передний правый), «21» (задний левый) и «22» (задний правый). Шины размерностью 17.5-25, номинальной грузоподъемностью 50000 Н. Масса одного колеса в сборе составляет 200 кг. Моделирование НР производилось на различных ОП. Общий вид основных моделей ОП, использованных при моделировании, представлен на рис. 4. Коэффициент сцепления колес с ОП задавался равным 0.6, коэффициент сопротивления качению равен 0,02.



**Рис. 4. Общий вид моделей ОП:**

*a – прямая плоская трасса; б – спуск 5 °; в – трапециевидные неровности высотой 500 мм*

**Fig. 4. General view of the supporting surface models:**

*a – straight flat route; b – descent 5 °; c – trapezoidal irregularities 500 mm high*

Модель ТЭД задана в отдельном подключаемом dll-файле. В качестве исходных данных в модели двигателя используются скоростные и силовые (мощностные) параметры, а также поле КПД.

**Описание расчетных случаев**

В работах [1-9] представлены условия эксплуатации и параметры отдельных нагрузочных режимов. По результатам анализа составлен список расчетных случаев, для определения сил и моментов действующих в шарнирах и силовых связях механизма подъема и опрокидывания ковша (табл. 1).

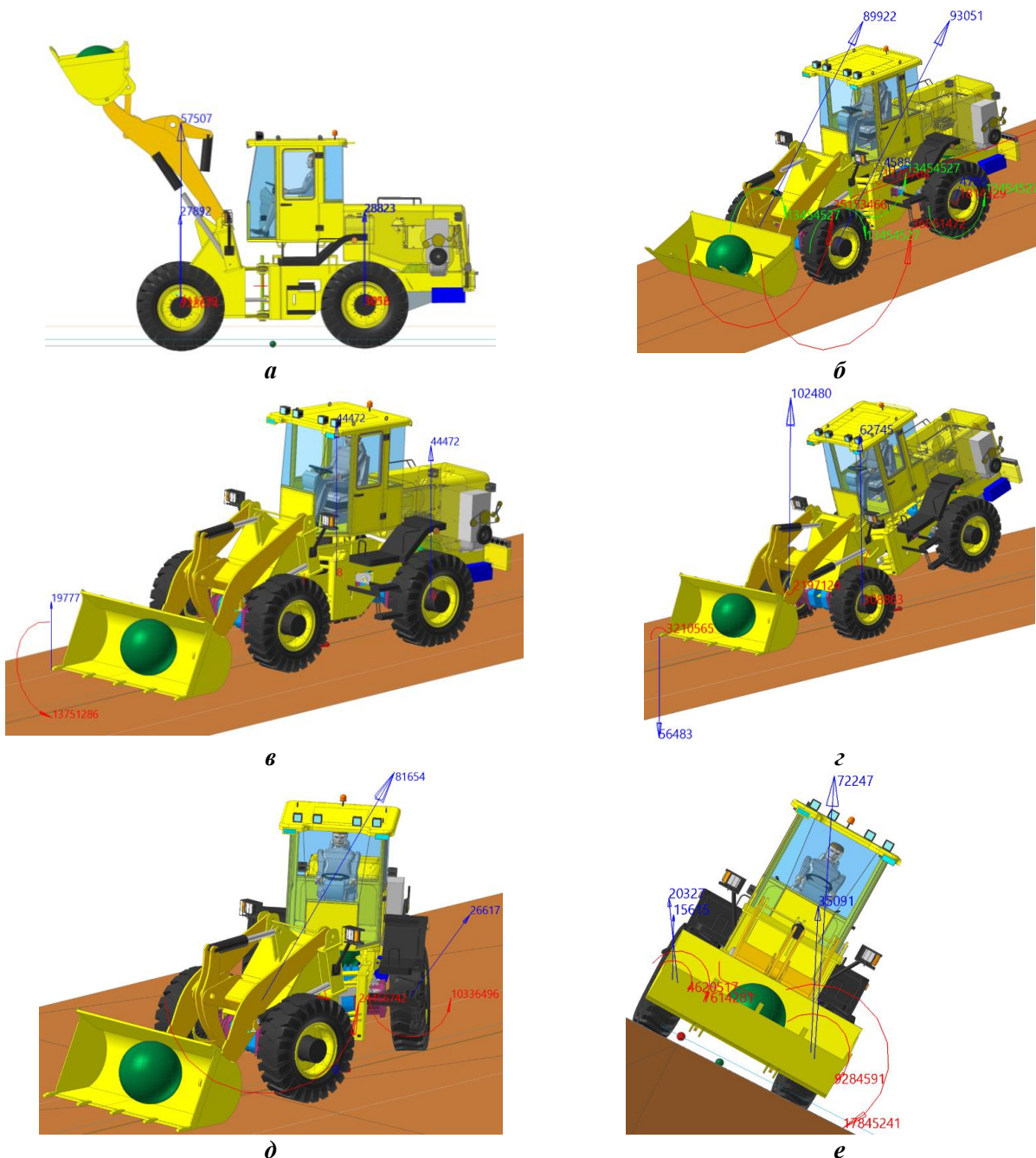
*Таблица 1.*

**Список НР для определения нагрузок в шарнирах механизма подъема и опрокидывания ковша**

*Table 1.*

**List of load modes for determining the loads in the hinges of the bucket lifting and tipping mechanism**

№	Название
1.	ФП на горизонтальной ОП с грузом
2.	Определение вырывного усилия при прямом положении ФП
3.	Подъем груза 3500 кг со смещением ЦМ груза
4.	Экстренное торможение на спуске с ковшом в транспортном положении
5.	Движение ФП на косогоре
6.	Криволинейное движение с заданным радиусом и заданной скоростью
7.	Преодоление бульдозерного сопротивления на горизонтальной ОП
8.	Прямолинейное движение по случайному профилю с постоянной скоростью с возможностью отрыва колес от ОП
9.	Удар в труднопреодолимое препятствие краем ковша
10.	Внедрение краем ковша в массу материала с вывешиванием погрузчика ковшовыми гидроцилиндрами относительно передних колес
11.	Заглубление краем ковша при движении вперед и вывешивание погрузчика на режущей кромке и задних колесах
12.	Складывание на месте ФП с боковым упором ковша и вывешиванием передней оси



**Рис. 5. Иллюстрации примеров моделирования нагрузочных режимов**

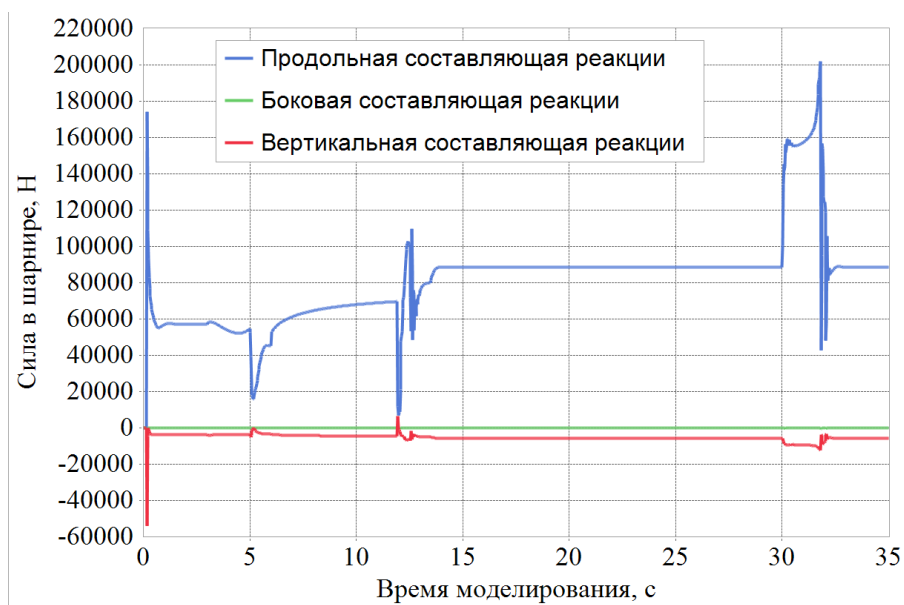
*а – подъем груза массой 3500 кг со смещением ЦМ груза; б – экстренное торможение на спуске с ковшом в транспортном положении; в – заглубление краем ковша при движении вперед с вывешиванием погрузчика на режущей кромке и задних колесах; г – внедрение краем ковша в массу материала с вывешиванием погрузчика ковшовыми гидроцилиндрами относительно передних колес; д – складывание на месте ФП с боковым упором ковша и вывешиванием передней оси; е – движение ФП на косогоре*

**Fig. 5. Illustrations of examples of load mode modeling**

*а – lifting a load weighing 3500 kg with a displacement of the center of mass of the load; б – emergency braking on a descent with the bucket in the transport position; в – deepening with the edge of the bucket when moving forward with the loader hanging on the cutting edge and rear wheels; г – insertion of the edge of the bucket into the mass of material with the loader suspended by bucket hydraulic cylinders relative to the front wheels; д – folding the front loader in place with the side support of the bucket and hanging the front axle; е – movement of a front loader on a slope*

### Описание результатов моделирования

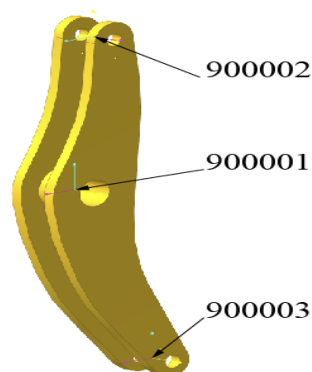
В результате расчетов во всех нагрузочных режимах (НР) получены усилия в шарнирах и силовых связях ФП. Примеры иллюстраций по некоторым нагрузочным режимам приведены на рис. 5. В результате моделирования программный комплекс по расчету динамики связанных тел позволяет получить изменения перемещений, скоростей, ускорений, как линейных, так и угловых, нагрузок во время моделирования. Например, для нагрузочного режима «экстренное торможение на спуске с ковшем в транспортном положении» (рис. 5, б) на рис. 6 представлено изменение компонентов реакций в сферическом шарнире, связывающем коромысло и гидроцилиндр опрокидывания ковша. По графикам можно определить изменения продольных и вертикальных реакций, определить наиболее опасный режим.



**Рис. 6.** Изменение компонентов реакций в сферическом шарнире, связывающем коромысло и гидроцилиндр опрокидывания ковша в НР «экстренное торможение на спуске с ковшем в транспортном положении»

**Fig. 6.** Changes in reaction components in the spherical joint connecting the rocker arm and the hydraulic cylinder for tipping the bucket in the load mode «emergency braking on a descent with the bucket in the transport position»

**Пример определения нагрузок в шарнирах и силовых связях, действующих на звенья механизма подъема и опрокидывания ковша**



**Рис. 7.** Положение узлов коромысла механизма опрокидывания ковша

**Fig. 7.** Position of the rocker arms of the bucket tipping mechanism

В результате моделирования получены временные реализации нагрузок для всех звеньев ФП. В качестве примера приводится сводная таблица с максимальными нагрузками, действующими на коромысло механизма опрокидывания ковша (табл. 2) для всех НР. Для некоторых НР нагрузки определялись в разное время моделирования или при различных положениях звеньев ФП. На рис. 7 показано положение узлов коромысла механизма опрокидывания ковша, в которых получены нагрузки.

Таблица 2.

Пример нагрузок в шарнирах механизма подъема и опрокидывания ковша ФП

Table 2.

An example of loads in the hinges of the lifting and tipping mechanism of a front loader bucket

№ НР	№ узла	Сила в шарнире, Н			Момент в шарнире, Н*мм		
		FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	900001	-139669	-2	-29875	559	0	353
	900002	73466	1	24464	0	0	0
	900003	65704	0	6592	12	0	-118
2	900001	-99797	-3	8437	442	0	69
	900002	56484	1	-3178	0	0	0
	900003	44583	0	-5420	-23	0	-183
3	900001	-40155	-43	3285	6779	0	4917
	900002	23105	15	-1256	0	0	0
	900003	18317	0	-2223	-315	0	-2602
4	900001	-354489	-10	-79378	-99	0	4528
	900002	186252	-10	62756	0	0	0
	900003	166659	0	17321	-7462	0	21512
5	900001	-126334	-885	-27056	129944	0	108537
	900002	66449	302	22137	0	0	0
	900003	59432	0	5965	5547	0	-54085
6	900001	-140622	-378	-30099	55505	0	46514
	900002	73986	132	24645	0	0	0
	900003	66140	0	6632	3230	0	-25618
7	900001	-25712	-2	1623	555	0	223
	900002	13958	1	-1415	0	0	0
	900003	11752	0	1073	12	0	-112
8	900001	-156042	490	-33490	-81935	0	-61795
	900002	82028	-269	27369	0	0	0
	900003	73451	0	7369	-32703	0	119552
9	900001	-846637	2710	-16704	1843651	0	-1308238
	900002	459943	-12485	-24160	0	0	0
	900003	382511	0	40331	3747051	0	10687019
10	900001	-376281	57	-13308	-7790	0	-7002
	900002	202864	-19	1182	0	0	0
	900003	173550	0	13399	-274	0	3505
11	900001	108185	-3	3230	674	0	320
	900002	-58088	1	3414	0	0	0
	900003	-50069	0	-5364	17	0	-164
12	900001	120726	10	3356	-2326	0	-4113
	900002	-64842	-12	3890	0	0	0
	900003	-55844	0	-5967	-2442	0	2211



Полученные нагрузки импортировались в программные продукты для проведения прочностных и оптимизационных расчетов с использованием МКЭ. Примеры проведенных прочностных расчетов и полученной в результате топологической оптимизации конструкции коромысла механизма опрокидывания ковша показано на рис. 8, а и б соответственно. Если положение шарниров не менялось – возможно использование одних и тех же полученных нагрузок для проведения прочностных расчетов различных конструкций.

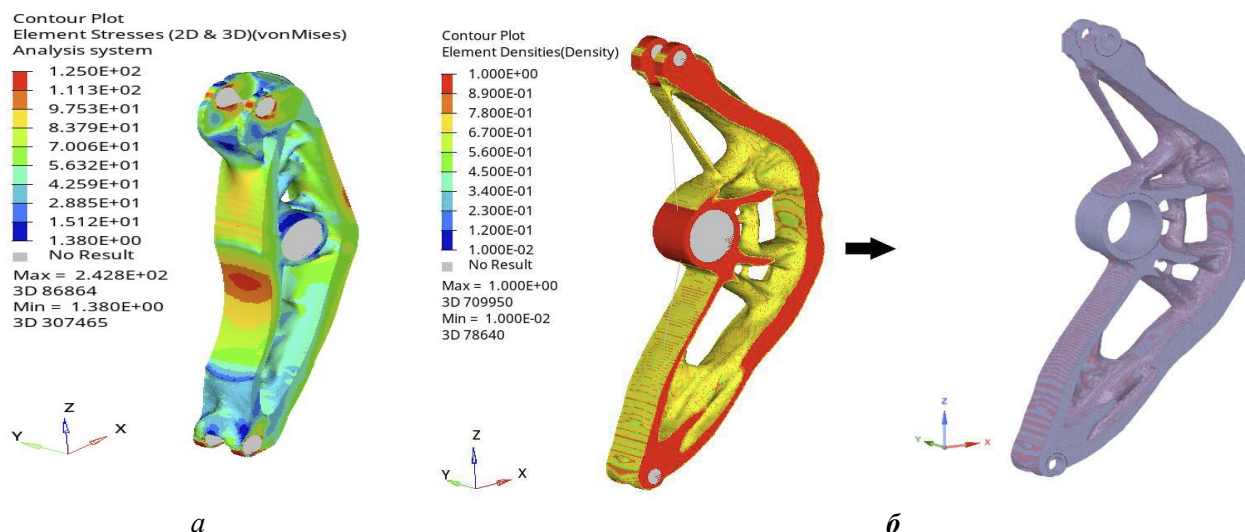


Рис. 8. Примеры использования полученных при моделировании нагрузок при проведении: а – прочностных расчетов; б – топологической оптимизации

Fig. 8. Examples of using loads obtained from modeling during: a – strength calculations; b – topological optimization

### Заключение

Представлена универсальная имитационная модель динамики ФП для получения нагрузок, действующих звенья. Разработанная модель также пригодна для анализа эксплуатационных свойств. Показан список нагрузочных режимов, в которых определяются максимальные нагрузки, действующие на звенья механизма подъема и опрокидывания ковша ФП. Используя полученные нагрузки, были подобраны стандартные компоненты (гидроцилиндры и шарниры) механизма подъема и опрокидывания ковша разрабатываемого ФП и проведены прочностные и оптимизационные расчеты стрелы и коромысла с использованием МКЭ.

*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.*

### Библиографический список

1. **ГОСТ 31555-2012.** Погрузчики строительные фронтальные одноковшовые. – М.: Стандартинформ, 2013. – 13 с.
2. **Чичекин, И.В.** Разработка динамической модели фронтального погрузчика для анализа эксплуатационных свойств и определения нагрузок, действующих на его элементы / И.В. Чичекин, Ф.А. Нырков, В.С. Григорьев // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16. № 1. С. 71-80. DOI: 10.17816/2074-0530-108869
3. **Базанов, А.Ф.** Самоходные погрузчики / А.Ф. Базанов, Г.В. Забегалов. 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1979. – 406 с.

4. **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», 2012. – 432 с.
5. **Gottschalk, M.** Test Method for Evaluating the Energy Efficiency of Wheel Loaders / M. Gottschalk, G. Jacobs, A. Kramer // ATZ offhighw worldw. 2018. VI. 11. P. 44-49. Doi: 10.1007/s41321-018-0008-0.
6. **Чудаков, О.И.** Анализ условий эксплуатации фронтальных погрузчиков и синтез расчетных нагрузочных режимов // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022: материалы XXVI Международной научно-технической конференции, 12-14 октября 2022 г. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2022. С. 143-151.
7. **Özdoğan, M.** Wheel Loader Buckets & Digging Forces, September 2019 / M. Özdoğan, H. Özdoğan. Electronic resource, URL: <https://www.researchgate.net/publication/335618855> (дата обращения 13.01.2022).
8. **Бояркина, И.В.** Технологическая механика одноковшовых фронтальных погрузчиков: монография / И.В. Бояркина. – Омск: СибАДИ, 2011. – 336 с.
9. **Li, X.** Research on dynamic behaviors of wheel loaders with different layout of hydropneumatic suspension / X. Li, W. Lv, W. Zhang, H. Zhao. // JVE International LTD. Journal of Vibroengineering. Nov 2017, Vol. 19, Issue 7.
10. **Gorelov, V.A.** Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire-Rigid Terrain Irregularities Interaction / V.A. Gorelov, A.I. Komissarov // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1322-1328.
11. **Vdovin, D.** Loads and Stress Analysis Cycle Automation in the Automotive Suspension Development Process / D. Vdovin, I. Chichekin // Procedia Engineering. 2016. Т. 150. С. 1276-1279.
12. **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.
13. **Расејка, Н.В.** Tyre and Vehicle Dynamics. – Oxford, Butterworth Heinemann, 2006. 672 p.
14. **Расејка, Н.В.** Magic Formula Tyre Model with Transient Properties / Н.В. Расејка, I.Y. Besselink // Supplement to Vehicle System Dynamics. 1997. Vol. 27. P. 234-249.
15. TNO Automotive: MF-Tool 6.1 User Manual. – Netherlands, 2008.

*Дата поступления  
в редакцию: 14.04.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 31.10.2023*