Оригинальная статья

УДК 622.684 © Д.М. Дубинкин✉[1], И.П. Попов[1,2], А.И. Бокарев[2], В.А. Дианов[2], Л.А. Зайцев[2], 2025

[1] ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия
[2] ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 105005, г. Москва, Россия
✉ e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Original Paper

UDC 622.684 © D.M. Dubinkin✉[1], I.P. Popov[1,2], A.I. Bokarev[2], V.A. Dianov[2], L.A. Zaitsev[2], 2025

[1] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation
[2] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation
✉ e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Разработка цифровой и многозвенной модели карьерного самосвала методом обратного проектирования для проведения имитационного моделирования*

Development of a digital and multi-body model of a dump truck by reverse engineering for simulation modeling

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-12-51-57

В статье представлены результаты разработки электронной и многозвенной моделей самой распространенной и широко используемой модели карьерного самосвала БЕЛАЗ-7513 методом обратного проектирования. Целью работы являлось создание комплекса математических моделей, адекватно отражающих геометрические, массогабаритные, физико-механические, кинематические и динамические свойства реального объекта для проведения последующего имитационного моделирования.

В условиях отсутствия доступности конструкторской документации цифровая CAD-модель была разработана на основе технических рисунков из руководств по ремонту и эксплуатации, а также опытных контрольных замеров значимых размеров и приведения их в полное соответствие в модели. Особое внимание уделено точному моделированию элементов ходовой части (рамы, балки передней оси, картера моста) и расположению точек крепления ключевых компонентов. На основе цифровой модели была разработана многозвенная имитационная модель в специализированной среде, включающая подсистемы передней и задней подвесок, рамы с кузовом и рулевого управления. Модель учитывает кинематические точки, силовые связи, линейные и нелинейные характеристики упругих и демпфирующих элементов (пневмогидравлических рессор), а также массогабаритные и инерционные свойства компонентов. Разработанный комплекс моделей предназначен для проведения дальнейших

ДУБИНКИН Д.М.
Канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 г. №075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. № 1144-р в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.*

ПОПОВ И.П.
Ведущий конструктор НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»
ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 105005, г. Москва, Россия,
аспирант ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: popovip@bmstu.ru

БОКАРЕВ А.И.
Старший научный сотрудник НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»
ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 105005, г. Москва, Россия,
e-mail: bokarev@bmstu.ru

ДИАНОВ В.А.
Конструктор НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»
ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 105005, г. Москва, Россия,
e-mail: vadianov@bmstu.ru

ЗАЙЦЕВ Л.А.
Конструктор НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН»
ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 105005, г. Москва, Россия,
e-mail: zaitsev@bmstu.ru

исследований напряженно-деформированного состояния несущих конструкций и оценки их долговечности путем имитации реальных нагрузочных режимов эксплуатации на виртуальном стенде.

Ключевые слова: *карьерный самосвал, электронная модель, обратное проектирование, имитационное моделирование, многозвенная модель.*

Для цитирования: Разработка цифровой и многозвенной модели карьерного самосвала методом обратного проектирования для проведения имитационного моделирования / Д.М. Дубинкин, И.П. Попов, А.И. Бокарев и др. // Уголь. 2025;(12):51-57. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-51-57.

Abstract

The article presents the results of developing electronic and multi-body models of the most common and widely used BELAZ-7513 mining dump truck using reverse engineering methods. The aim of the work was to create a complex of mathematical models that adequately reflect the geometric, mass-dimensional, physical-mechanical, kinematic, and dynamic properties of the real object for subsequent simulation modeling.

Given the unavailability of design documentation, the digital CAD model was developed based on technical drawings from repair and operation manuals, as well as empirical control measurements of critical dimensions, ensuring their full compliance within the model. Particular attention was paid to the accurate modeling of undercarriage components (frame, front axle beam, axle housing) and the placement of attachment points for key components.

Based on the digital model, a multi-body simulation model was developed in a specialized environment, including subsystems of the front and rear suspension, the frame with the body, and the steering system. The model considers kinematic points, force interactions, linear and nonlinear characteristics of elastic and damping elements (pneumatic-hydraulic springs), as well as the mass-dimensional and inertial properties of the components.

The developed model complex is intended for further research into the stress-strain state of load-bearing structures and assessing their durability by simulating real operational loading modes on a virtual test rig.

Keywords

Mining dump truck, electronic model, reverse engineering, simulation modeling, multi-body model.

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement dated 30.09.2022 № 075-15-2022-1198 with the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev's "Comprehensive scientific and technical program for a full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the fields of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to the life of the population" (KNTP "Clean coal – Green Kuzbass") approved by the decree of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022. No. 1144-r within the framework of the event "Development and creation of an unmanned shuttle-type mining dump truck with a lifting capacity of 220 tons" in terms of carrying out research and development work.

For citation
Dubinkin D.M., Popov I.P., Bokarev A.I., Dianov V.A., Zaitsev L.A. Development of a digital and multi-body model of a dump truck by reverse engineering for simulation modeling. *Ugol'*. 2025;(12):51-57. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-51-57.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование конструкции существующих карьерных самосвалов или проектирование новых образцов неразрывно связаны с созданием комплекса математических моделей, отражающих как геометрию и физико-механические свойства машины, так и особенности ее кинематики и динамики. Такой комплекс моделей позволяет воспроизводить реальные режимы работы и служит основой для проведения многоуровневых расчетов – от модального и динамического анализа отдельных узлов до имитации полного рабочего цикла эксплуатации. В данной статье представлены результаты разработки цифровой и многозвенной моделей карьерного самосвала БЕЛАЗ-7513, которые используются в качестве базы для дальнейших исследований и апробации методик.

Технология обратного проектирования представляет собой комплексный процесс создания цифровой модели физического объекта на основе данных, полученных с помощью 3D-сканирования. В отношении требования обеспечения конкурентоспособности это стало ключевым инструментом для сложных компонентов, для которых отсутствует исходная конструкторская документация. Современный процесс начинается с использования высокоточных сканеров, которые генерируют облако точек, с последующей обработкой в специализированном программном обеспечении для преобразования в параметрическую CAD-модель. Применение данной технологии широко используется отечественными и зарубежными производителями в машиностроительной сфере, что подтверждается литературными источниками [1, 2].

В то же время в статье [3] для понятия «обратное проектирование» (ОП) применена следующая интерпретация: ОП – процесс параметризации частных структурных и поведенческих моделей исследуемой системы с помощью анализа информации, добытой непосредственно из данной системы. Обратное проектирование в общем случае не преследует цель построить полную модель исследуемого объекта, что соответствует поставленной в рамках данного исследования задаче.

Таким образом, цель работы – разработка электронной и многозвенной модели карьерного самосвала, отражающей геометрические и физико-механические свойства объекта, необходимые для проведения имитационного моделирования процесса эксплуатации.

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ БЕЛАЗ-7513

В качестве объекта исследования выбран карьерный самосвал БЕЛАЗ-7513 грузоподъемностью 130 т (*рис. 1, а*). Данные самосвалы занимают значительную долю мирового рынка (около 70%) схожей грузоподъемности, активно эксплуатируются на разрезах российских горнодобывающих предприятий, при этом за время эксплуатации собран большой объем данных по отказам элементов шасси (несущей системы (рамы), картера моста, балки передней оси [4, 5, 6] как выбранной модели самосвала, так и ее конструктивных аналогов большей грузоподъемности.

Получить электронную модель карьерного самосвала БЕЛАЗ-7513 из открытых источников в полном объеме не представляется возможным, так как это конфиденциальная информация, права владения которой принадлежат ОАО «БЕЛАЗ». На основании информации из доступных источников [7, 8, 9] авторами статьи было принято решение о разработке электронной модели, отражающей массогабаритные свойства прототипа, необходимые для проведения имитационного моделирования.

Разработанная 3D-модель (*рис. 1, б*) включает в себя основные компоненты карьерного самосвала. Данные по габаритным размерам и расположению в компоновке машины были получены из упомянутой ранее эксплуатационной документации.

Особое внимание уделено разработке элементов шасси: раме, балке передней оси и картера заднего моста. Элементы системы подрессоривания и рулевого управления выполнены согласно техническим рисункам экс-

Рис. 1. Разработка электронной модели самосвала:
а – карьерный самосвал БЕЛАЗ-7513;
б – электронная модель самосвала

Fig. 1. Development of an electronic dump truck model:
a – BelAZ-7513 mining dump truck;
b – electronic dump truck model

плуатационной документации таким образом, чтобы точки крепления гидроцилиндров поворота и рулевых тяг соответствовали кинематике поворота самосвала.

В частности, авторы статьи планируют использовать данную цифровую модель для потенциального решения следующих задач проектирования, разработки и исследований:

1. Задачи исследования динамической и квазистатической нагруженности основных силовых элементов ходовой части и сварных соединений;

2. Задачи исследования вибронагруженности при динамическом поведении самосвала;

3. Задачи исследования износостойкости грузовой платформы;

4. Решения нетривиальных задач в направлении проектирования гидравлических систем и другое.

При выполнении модели рамы важно правильно расположить крепления для элементов системы подрессоривания, так как их положение определяет кинематические точки, которые в дальнейшем будут использоваться для построения имитационной модели. Модель учитывает толщину листов, измеренную с помощью ультразвуковых толщиномеров, что позволяет повысить точность расположения центра масс рамы. Разработанная модель рамы показана на *рис. 2*, *а* точки крепления основных компонентов представлены в *табл. 1*.

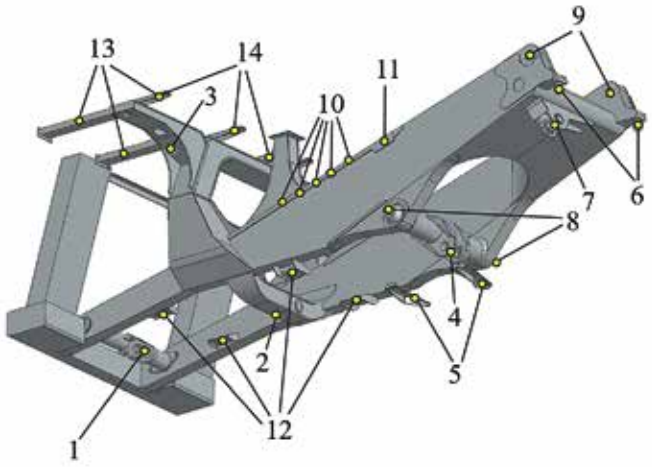

Рис. 2. Электронная модель рамы БЕЛАЗ-7513

Fig. 2. Electronic model of the BelAZ-7513 frame

Таблица 1

Обоснование точек крепления основных компонентов самосвала

Justification of the mounting points for the dump truck's main components

№ поз.	Название компонента, который крепится в данной точке
1	Центральный шарнир передней балки
2	Поперечная тяга передней оси
3	Пневмогидравлическая рессора передней оси
4	Центральный шарнир ведущего моста
5	Крепление топливного бака
6	Пневмогидравлическая рессора заднего моста
7	Тяга Панара
8	Гидроцилиндр подъема самосвальной платформы
9	Ось опрокидывания самосвальной платформы
10	Лонжерон самосвальной платформы (указан лист, на который он опирается)
11	Боковые упоры самосвальной платформы
12	Дизель-генераторная установка
13	Кабина
14	Шкаф управления тяговым приводом

Разработанная модель рамы по массе (12960 кг) практически не отличается от значения, заявленного в руководстве по эксплуатации – погрешность составила около 1%, что косвенно свидетельствует о точности выполнения электронной модели.

Для верификации электронной модели самосвала, разработанной по техническим рисункам, были проведены контрольные замеры некоторых элементов прототипа (*рис. 3*). При этом были уточнены геометрические размеры штока, диаметры поршня, величина хода для гидроцилиндров рулевого управления, гидроцилиндров подъема самосвальной платформы и пневмогидравлических рессор.

На этом этапе электронная модель карьерного самосвала готова к дальнейшей проработке для создания многозвенной модели в программном комплексе для моделирования динамики твердых тел.

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ БЕЛАЗ-7513

Разработка математических моделей проводится в специализированных средах имитационного многозвенного моделирования, таких как: ADAMS, RecurDyn, NX, SIMPAC, IPG, DADS, EULER, Universal mechanism и другие [10, 11]. Сборка разрабатываемой математической модели, как правило, содержит подсистемы, выбор количества которых определяет уровень универсальности модели. Соблюдение правила деления моделей на простейшие подсистемы делает их адаптивными к использованию для широкого круга задач. Характерные особенности таких моделей заключаются в том, что несущая система неподвижно фиксируется, и моделирование нагруженности происходит относительно неподвижной рамы (имитация закрепления к неподвижной оснастке), а колеса при этом взаимодействуют с контактными площадками виртуального стенда. Виртуальный стенд обеспечивает нагружение исследуемого модуля реакциями, возникающими в пятне контакта шины с опорными площадками стенда. Кроме того, к подрессоренным компонентам и системам, которые крепятся на несущую систему, следует прикладывать силы инерции.

В математической модели требуется учитывать следующее:

– кинематические точки;

– кинематические и силовые связи в узловых точках;

– линейные и нелинейные характеристики упругих и демпфирующих элементов (например, основные упругие и демпфирующие элементы, резинометаллические шарниры, опоры, буферы сжатия и отбоя, шарнирные и болтовые соединения);

– массогабаритные и инерционные свойства основных деталей;

– неучтенную массу;

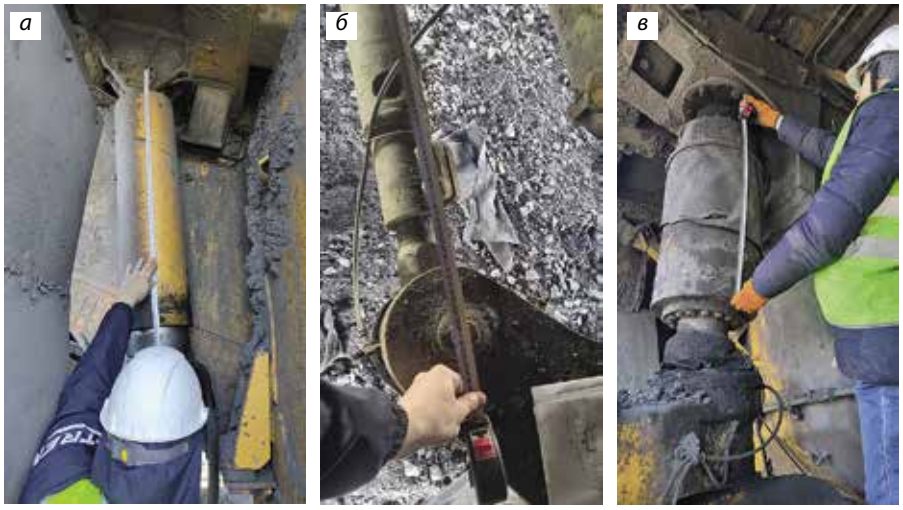

Рис. 3. Контрольные замеры элементов шасси и самосвальной платформы: а – замер длины гидроцилиндра подъема самосвальной платформы; б – замер длины рулевой тяги и положения ее точек крепления; в – замер пневмогидравлической рессоры передней оси

Fig. 3. Control measurements of the chassis and dump platform elements: a – measurement of the dump platform lift hydraulic cylinder length; b – measurement of the steering tie rod length and the position of its attachment points; c – measurement of the pneumo-hydraulic spring of the front axle

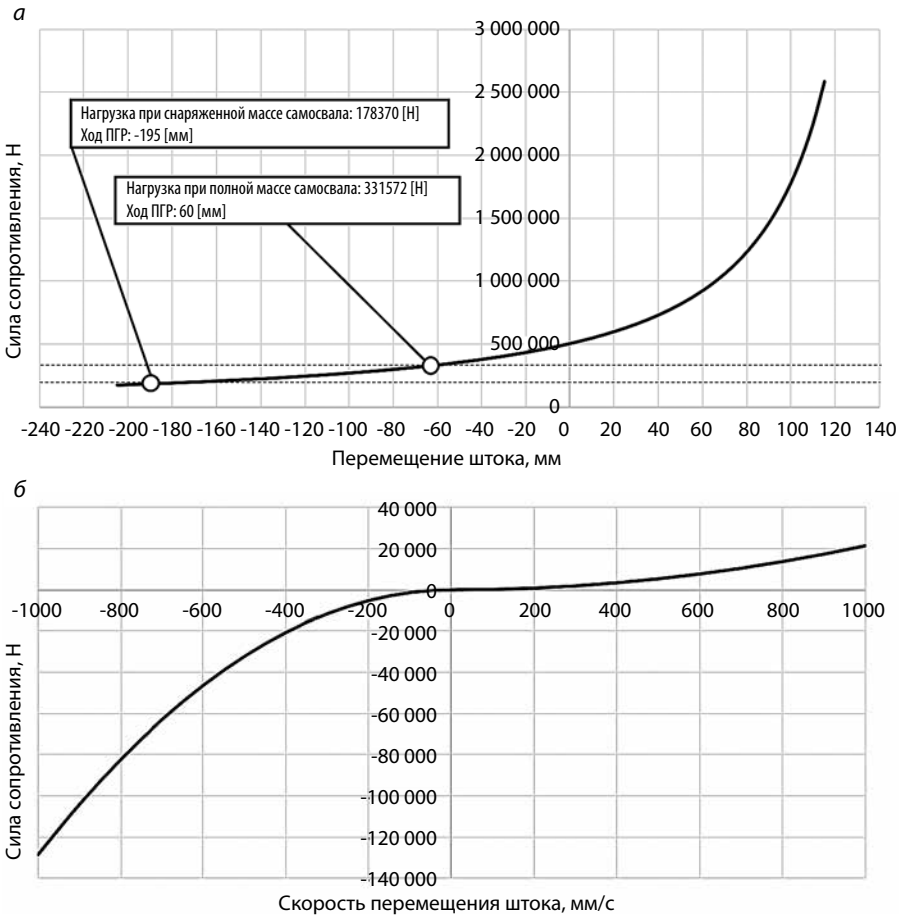

Рис. 4. Характеристики пневмогидравлических рессор передней подвески: а – упругая характеристика; б – демпфирующая характеристика

Fig. 4. Characteristics of the front suspension pneumo-hydraulic springs: a – elastic characteristic; b – damping characteristic

Таблица 2

Верификация разработки массовой сводки самосвала

Verification of the dump truck weight breakdown

Распределение масс	1 ось, %	2 ось, %
Распределение снаряженной массы (по массовой сводке)	48,9	51,1
	50,9	49,1
Распределение полной массы (по массовой сводке)	33	67
Распределение полной массы (по РЭ)	33	67

– характеристики приводов (например, гидроцилиндры управления положением платформы или гидроцилиндры поворота управляемых колес);

– упрощенную модель шины.

Линейные и нелинейные характеристики пневмогидравлических рессор были получены расчетным путем с использованием геометрических значений, полученных на этапе разработки электронных моделей, а также с применением методик расчета, приведенных разработчиками карьерной техники [12, 13]. Полученные характеристики для ПГР передней и задней осей представлены на *рис. 4, 5*.

Для определения массогабаритных и инерционных свойств основных компонентов самосвала разработана массовая сводка. Значения масс приведены в эксплуатационной документации производителя, центр масс для компонентов, обладающих сложной геометрией, определен по разработанным ранее электронным моделям. Результаты разработки массовой сводки представлены в *табл. 2*. Ввиду того, что при создании электронной модели учитывались только основные компоненты, снаряженная масса отличается от заявленной в руководстве по эксплуатации на 3,5 т. Массогабаритные и инерционные свойства этих компонентов в многозвенной модели будут предусмотрены как «неучтенная масса».

Результаты разработки многозвенной модели представлены на *рис. 6*.

Разработанная имитационная модель самосвала будет использована

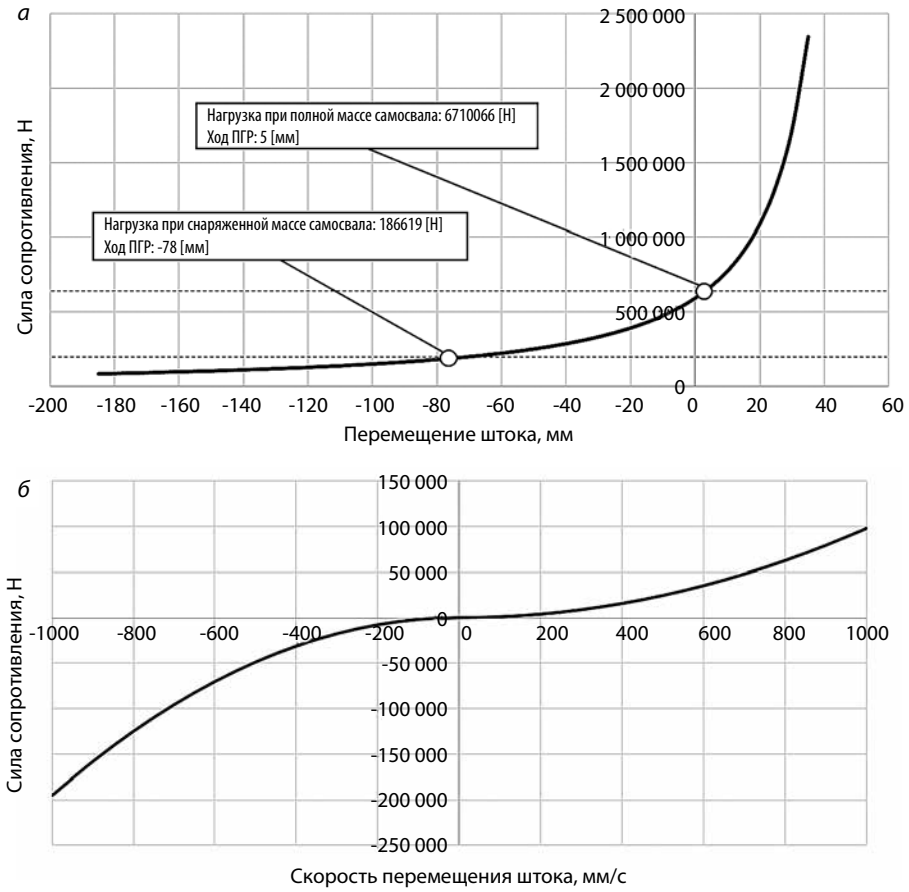

Рис. 5. Характеристики пневмогидравлических рессор задней подвески: а – упругая характеристика; б – демпфирующая характеристика

Fig. 5. Characteristics of the rear suspension pneumo-hydraulic springs: a – elastic characteristic; b – damping characteristic

для решения задач математического моделирования в рамках дальнейших исследований. Следующим этапом планируется разработка комплекса нагрузочных режимов самосвала, основанная на предварительном расчете реакций, возникающих в пятне контакта колес с опорными поверхностями, для комплекса событий, которые характеризуют штатную эксплуатацию в рамках предполагаемого ресурса. Рассчитанные реакции будут использованы в среде имитационного моделирования моделью виртуального стенда для осуществления нагружения моделей [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы создан комплекс математических моделей, отражающих как геометрию и физико-механические свойства машины, так и особенности ее кинематики и динамики. Такой комплекс моделей позволяет воспроизводить реальные режимы работы и служит основой для проведения многоуровневых расчетов – от модального и динамического анализа отдельных узлов до имитации полного рабочего цикла эксплуатации.

Процесс создания комплекса моделей является частью большой работы

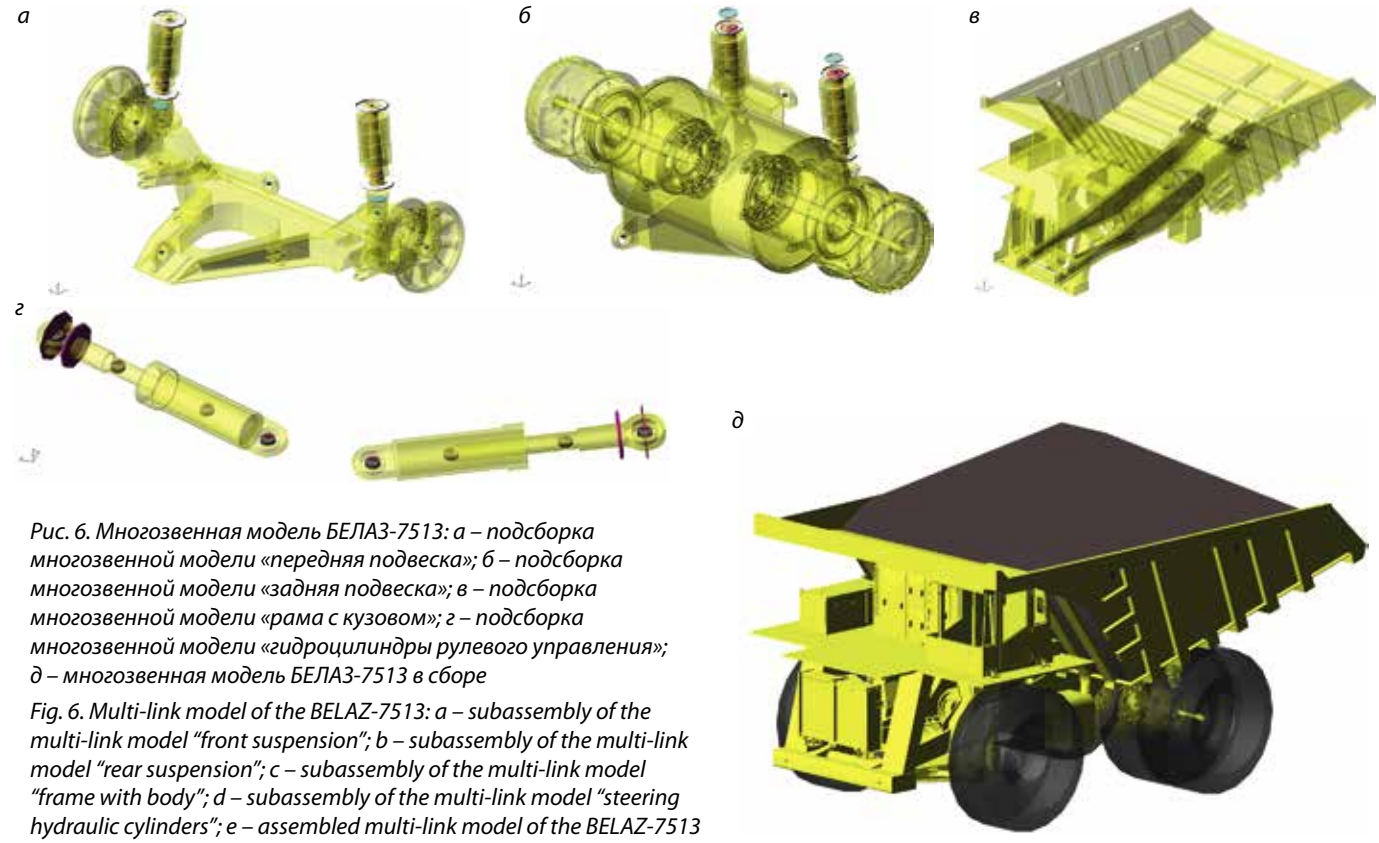

Рис. 6. Многозвенная модель БЕЛАЗ-7513: а – подсборка многозвенной модели «передняя подвеска»; б – подсборка многозвенной модели «задняя подвеска»; в – подсборка многозвенной модели «рама с кузовом»; г – подсборка многозвенной модели «гидроцилиндры рулевого управления»; д – многозвенная модель БЕЛАЗ-7513 в сборе

Fig. 6. Multi-link model of the BELAZ-7513: a – subassembly of the multi-link model "front suspension"; b – subassembly of the multi-link model "rear suspension"; c – subassembly of the multi-link model "frame with body"; d – subassembly of the multi-link model "steering hydraulic cylinders"; e – assembled multi-link model of the BELAZ-7513

по исследованию нагруженности несущих конструкций карьерной техники. Полученные результаты будут использованы в дальнейших исследованиях по разработке метода оценки долговечности несущей системы карьерных самосвалов. Проведенное исследование имеет практическую ценность для инженеров и исследователей, занимающихся вопросами проектирования карьерной техники и изучением вопроса их эксплуатационной надежности.

Список литературы • References

1. Полюшкин Н.Г., Батрак А.П., Полюшкина М.П. Общие методы решения задач обратного проектирования / Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. Материалы международной научно-практической конференции. Т. 1. Часть 2. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2023. С. 151-156.
2. Буканова И.В., Михеева Т.А. Обоснование эффективности использования методов обратного инжиниринга при конструкторско-технологическом проектировании / Транспорт. Горизонты развития: Труды 4-го Международного научно-промышленного форума. Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. С. 108.
3. Карбовский С.В. Несовершенство понятийного базиса технологий обратного проектирования в жизненном цикле сложных систем // International Journal of Open Information Technologies. 2023. Т. 11. № 6. С. 38-45.
   Karbovsky S.V. Business confidence in technological implementation in human life. *International Journal of Open Information Technologies*. 2023;11(6):38-45. (In Russ.).
4. Паначев И.А., Кузнецов И.В. О трещинообразовании в металлоконструкциях большегрузных автосамосвалов при эксплуатации на разрезах Кузбасса // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 3(36). С. 14-21. DOI: 10.5281/zenodo.1408217.
   Panachev I.A., Kuznetsov I.V. On cracking in metal structures of heavy-duty dump trucks during operation in the Kuzbass mines. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2018;3(36):14-21. (In Russ.). DOI: 10.5281/zenodo.1408217.
5. Садовец В.Ю., Тарасюк И.А. Обзор конструкции балки передней оси карьерных самосвалов БЕЛАЗ грузоподъемностью 240 т / Сборник трудов международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибириус – 2022». 2022.
6. Анализ причин низкой эксплуатационной надежности карьерных самосвалов / В.А. Власов, Е.Н. Спирин, А.Н. Ляпин и др. // Ночное обозрение. Технические науки. 2016. № 5. С. 37-44.
   Vlasov V.A., Spirin E.N., Lyapin A.N., Lyapina O.V., Chechulin K.N. Analysis of the causes of low operational reliability of mining dump trucks. *Technical sciences*. 2016;(5):37-44. (In Russ.).
7. Карьерные самосвалы серии БЕЛАЗ-7513: руководство по эксплуатации. Жодино, 2016. 234 с.
8. Карьерный самосвал БЕЛАЗ-75131 и его модификации: руководство по ремонту. Жодино, 2007. 208 с.
9. Карьерные самосвалы серии БЕЛАЗ-7513 и его модификации: руководство по монтажу, пуску и регулированию. Жодино, 2017. 71 с.
10. Дубинкин Д.М. Основы цифрового создания автономных карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 2(160). С. 39-50. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-2-39-50.
    Dubinkin D.M. Fundamentals of digital creation of autonomous mining dump trucks. *Mining equipment and electromechanics*. 2022; 2(160):39-50. (In Russ.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-2-39-50.
11. Испеньков С.А., Ракицкий А.А. Моделирование динамической нагруженности рам карьерных самосвалов // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10(129). С. 174-180.
    Ispenkov S.A., Rakitsky A.A. Modeling the dynamic loading of the frames of mining dump trucks. *Bulletin of the Orenburg State University*. 2011;10(129):174-180. (In Russ.).
12. Мариев П.Л., Егоров А.Н., Моисеенко В.И. Карьерные самосвалы особо большой грузоподъемности. Проектирование, технологии, маркетинг. Минск: Интегралполиграф, 2008. 320 с.
13. Синтез рациональных параметров систем телескопической подвески и рулевого управления карьерного автосамосвала грузоподъемностью до 240 тонн / А.Б. Карташов, Г.А. Арутюнян, П.И. Киселев и др. // Техника и технология горного дела. 2023. № 4(23). С. 56-75. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-56-75.
    Kartashov A.B., Arutyunyan G.A., Kiselev P.I. et al. Synthesis of rational parameters of telescopic suspension and steering systems of a mining dump truck with a lifting capacity of up to 240 tons. *Engineering and technology of mining*. 2023;4(23):56-75. (In Russ.). DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-56-75.
14. Mi Chengji, Gu Zhengqi, Yang Qingquan, Nie Duzhong. Frame fatigue life assessment of a mining dump truck based on finite element method and multibody dynamic analysis. *Engineering Failure Analysis*. 2012;(23):18-26. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.01.014.

Authors Information

Dubinkin D.M. – PhD (Engineering), Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Popov I.P. – Lead Designer, R&D "KAMAZ-BAUMAN", Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, Postgraduate, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: popovip@bmstu.ru

Bokarev A.I. – Senior Researcher, R&D "KAMAZ-BAUMAN", Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: bokarev@bmstu.ru

Dianov V.A. – Designer, R&D "KAMAZ-BAUMAN", Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: vadianov@bmstu.ru

Zaitsev L.A. – Designer, R&D "KAMAZ-BAUMAN", Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: zaitsev@bmstu.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 3.10.2025
Поступила после рецензирования: 15.11.2025
Принята к публикации: 28.11.2025

Paper info

Received October 3, 2025
Reviewed November 15, 2025
Accepted November 28, 2025