

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_2_97

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ШАРНИРОВ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА КОВША ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЦИКЛА «ПОГРУЗКА-ПОДЪЕМ-РАЗГРУЗКА»

И.В. ЧичекинORCID: 0000-0001-7632-7657 e-mail: chichekin_iv@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Я.Ю. Левенков**ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: levenkov_yy@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Ф.А. Нырков**ORCID: 0000-0003-3431-8116 e-mail: nfa18m127@student.bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Представлена математическая модель динамики механизма подъема ковша фронтального погрузчика для получения значений нагрузок, действующих на раму и стрелу ковша. Определение данных нагрузок с высокой степенью точности является важной задачей на ранних стадиях проектирования, что позволяет в дальнейшем добиться рациональной конструкции элементов подъемного механизма ковша фронтального погрузчика за счет оптимизации расположения его узлов передачи нагрузок. В качестве нагрузочного режима выбран типовой режим «загрузка-подъем-разгрузка». Представлены результаты оптимизации на каждом из этапов. Математическая модель разработана в системе расчета динамики связанных тел (*Multi Body Dynamics – MBD*).

Ключевые слова: фронтальный погрузчик, механизм подъема ковша, динамика твердых тел, виртуальный прототип, оптимизация, энергозатраты, нагрузки.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чичекин, И.В. Оптимизация положения шарниров механизма подъема ковша фронтального погрузчика при выполнении цикла «погрузка-подъем-разгрузка» / И.В. Чичекин, Я.Ю. Левенков, Ф.А. Нырков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 2. С. 97-108. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_2_97

OPTIMIZATION OF THE LAYOUT OF THE HINGES OF THE FRONT LOADER BOWL LIFTING MECHANISM DURING A «LOADING-LIFTING-UNLOADING» CYCLE

I.V. ChichekinORCID: 0000-0001-7632-7657 e-mail: chichekin_iv@bmstu.ruBauman Moscow State Technical University
*Moscow, Russia***Ya.Yu. Levenkov**ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: levenkov_yy@bmstu.ruBauman 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

Abstract. Proposed is a mathematical model of the dynamics of the front loader bowl lifting mechanism helping to obtain the values of the loads impacting on the bowl frame and boom. In the long term, highly accurate defining of these loads allows to achieve an efficient design of the elements of the front loader bowl lifting mechanism by optimizing the location of its load transfer units, so this is an important task in the early stages of design. For loading mode, the standard mode of «loading-lifting-unloading» is used. The paper represents the optimization results for each stage. Mathematical model is developed in the system for calculating the dynamics of coupled bodies.

Key words: front loader, bucket lifting mechanism, rigid body dynamics, virtual prototype, optimization, energy consumption, loads.

FOR CITATION: Chichekin I.V., Levenkov Ya.Yu., Nyrkov F.A. Optimization of the layout of the hinges of the front loader bowl lifting mechanism during a «loading-lifting-unloading» cycle. Transaction of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 2. Pp. 97-108. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_2_97

Введение

Погрузка и выгрузка сыпучих грузов и полезных ископаемых в открытых карьерах, на производственных и строительных площадках производится с использованием фронтальных погрузчиков (ФП) [1-9]. Кроме того, они применяются при уборке улиц от снега в зимний период, для работы на лесозаготовке и т.п. Повышение эффективности использования ФП можно добиться за счет, например, выбора рациональных параметров механизма изменения положения ковша. Для ФП важно минимизировать энергозатраты на 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. Также важно обеспечить долговечность деталей и узлов, выбрать рациональные размеры, обеспечивающие работоспособность деталей под действием максимально возможных усилий, возникающих в процессе эксплуатации. Готовых методов расчета, учитывающих все многообразие нагрузочных режимов, в которых эксплуатируются ФП, в настоящее время не существует. Решить эти задачи можно с использованием компьютерного моделирования. Для оптимизации 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 сейчас используют имитационные модели динамики транспортных средств, разработанные в приложениях расчета динамики твердых тел [10,11]. Данный подход позволяет автоматизировано получить нагрузки на все элементы транспортного средства в любой момент моделирования и подобрать оптимальные параметры для каждой из систем. Также по результатам моделирования можно оценить энергозатраты в заданном нагрузочном режиме.

Целью работы является повышение эксплуатационных свойств ФП за счет оптимизации положения шарниров механизма подъема и опрокидывания ковша. Для ее достижения разработана методика оптимизации положения узлов передачи нагрузок элементов механизма ковша для выбранного нагрузочного режима, которая основана на использовании имитационной модели динамики механизма подъема ковша фронтального погрузчика, созданная в программе расчета динамики твердых тел. Представлены результаты оптимизации.

Описание динамической модели механизма подъема ковша фронтального погрузчика

Общий вид динамической модели фронтального погрузчика с массой груза в ковше равной 3 500 кг, разработанной в системе расчета динамики тел, представлен на рис. 1.

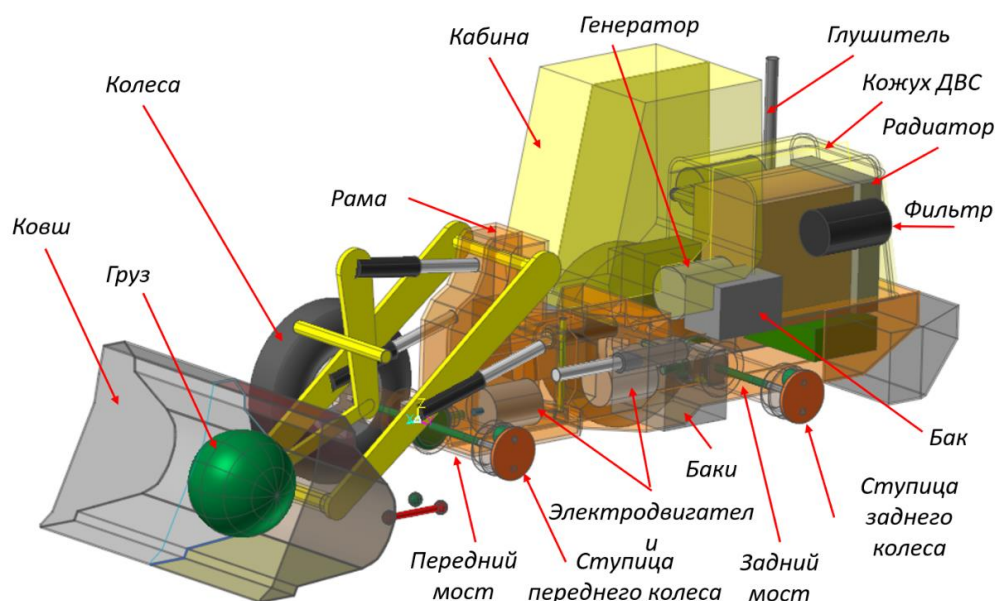


Рис. 1. Компоненты математической модели фронтального погрузчика

Fig. 1. Components of the mathematical model of the front loader

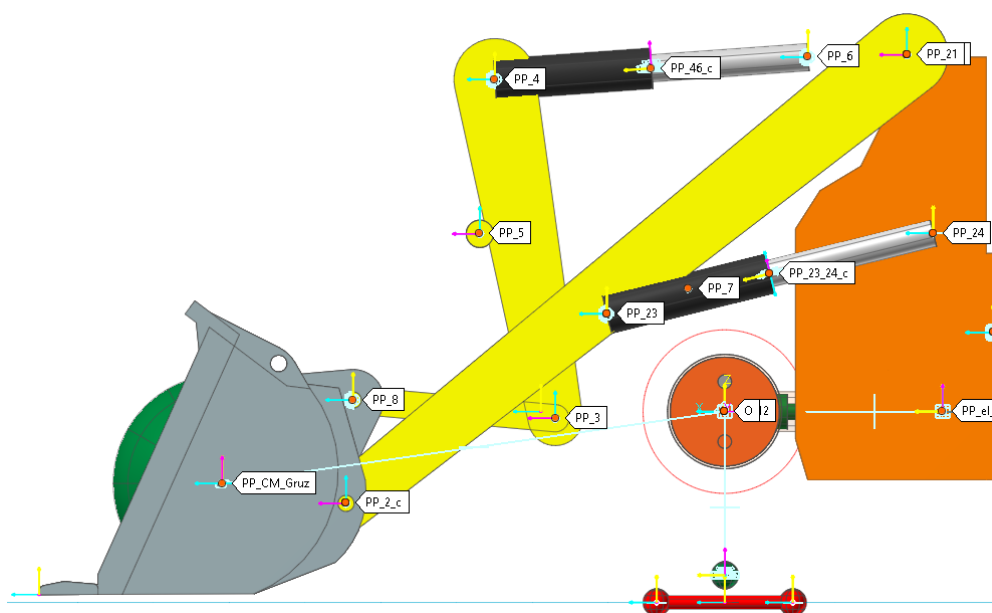


Рис. 2. Параметрические точки механизма подъема ковша

Fig. 2. Parametric points of the bucket lifting mechanism

Математическая модель КМ 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. Звенья механизма подъема и опрокидывания ФП связаны друг с другом шарнирами и силовыми связями. Звенья построены с помощью графических примитивов (сфера, цилиндр и т.п.) из стандартной библиотеки по расчету динамики связанных тел. Шарниры, силовые связи и звенья модели привязаны к параметрическим точкам (рис. 2). Координаты этих точек можно задать с помощью переменных. Таким образом, меняя значения переменных, задающих координаты параметрических точек, можно получить дру-

гую геометрию механизма подъема и опрокидывания ковша и расположение шарниров и силовых связей. Более подробное описание математической модели ФП с примерами моделирования представлено в работе авторов [12].

Общий вид модели механизма подъема ковша со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели фронтального погрузчика показан на рис. 3. Звенья механизма связаны между собой: шарнирами вращения; шаровыми шарнирами; шарнирами поступательного движения, силовыми связями типа упругая втулка.

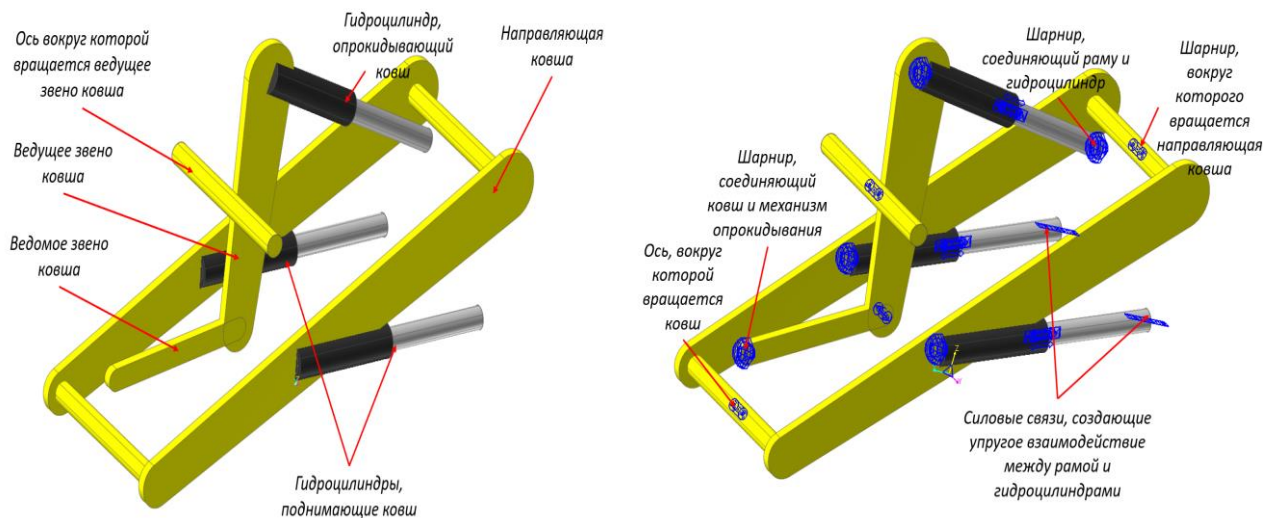


Рис. 3. Общий вид модели со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели фронтального погрузчика

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

Разработка алгоритма проведения оптимизации механизма подъема ковша

Данный алгоритм отражает процесс подготовки модели, формирования требуемых условий работы и непосредственно получения оптимальных значений. В качестве ПО использовался программный комплекс по расчету динамики твердых и деформируемых тел (*MBFD*) *RecurDyn V9R5* [13]. В качестве выходных параметров получены оптимальные положения шарниров и, как следствие, измененные длины звеньев. Алгоритм имеет следующую структуру: формулировка задач оптимизации – создание параметрической модели ФП (формирование переменных и параметрических точек) – подготовка уравнений движения и требуемых параметров оптимизации – проведение оптимизации – анализ полученных результатов. При соответствии результатов требуемым параметрам полученную геометрию можно применять. В противном случае вносятся корректировки в параметрическую модель, и оптимизация проводится снова. При проведении оптимизации положений шарниров механизма подъема и опрокидывания ковша ФП меняются также и шарниры гидроцилиндров, а следовательно, их длина и рабочие хода. На ранних этапах проектирования, как правило, нет конкретной модели ГЦ, и их подбирают после проведенных силовых расчетов. Поэтому в математическую модель необходимо добавить систему управления положением ковша по высоте и углу опрокидывания. Для проведения цикла «погрузка-подъем-разгрузка» была создана схема во встроенном программном комплексе *CoLink* (рис. 4).

Создание системы управления

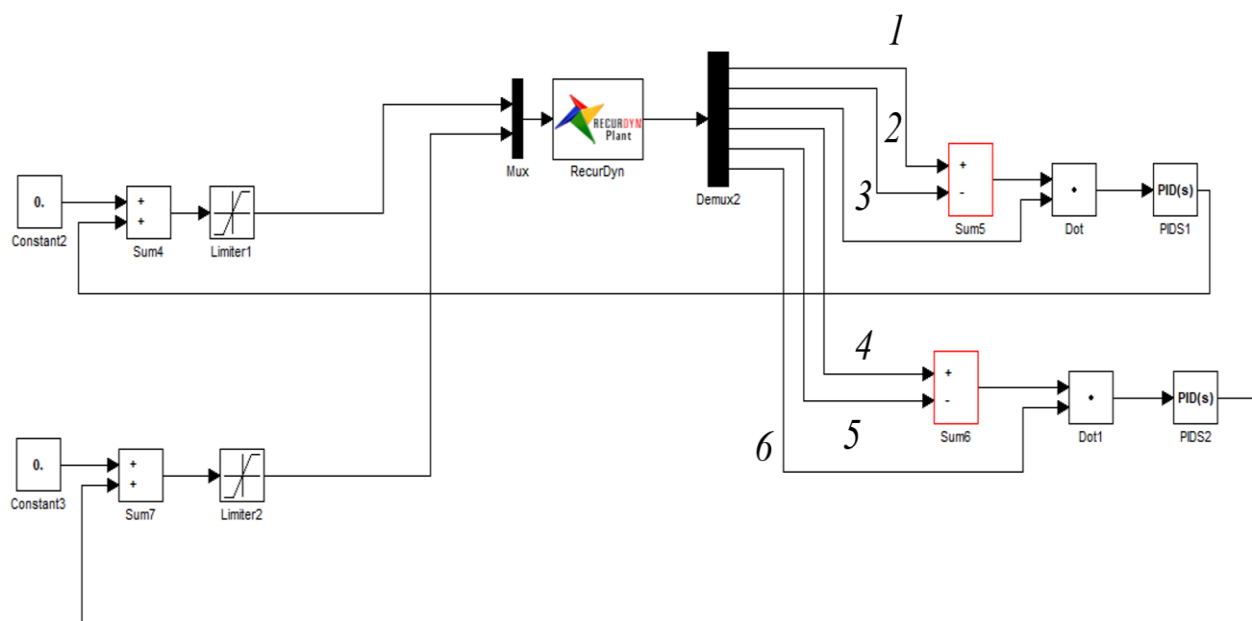


Рис. 4. Схема управления в подпрограмме CoLink

Fig. 4. Control scheme in the CoLink subroutine

Данная система управления позволяет обеспечить соблюдение требуемых геометрических параметров для высоты подъема ковша, угла поворота ковша при погрузке и разгрузке при любых положениях параметрических точек. Рабочие хода ГЦ высчитываются в зависимости от расстояния между шарнирами с учетом ограничения длины перемещения штоков ГЦ. Система управления каждого контура содержит PID-регулятор, который определяет требуемый ход ГЦ в зависимости от разницы требуемой и текущей высоты подъема ковша (рис. 4, связи 1 и 2), требуемого и текущего значения угла поворота ковша (рис. 4, связи 4 и 5) и сигналов управления (рис. 4, связи 3 и 6). Предельные значения рабочих ходов ГЦ ограничиваются блоками Limiter 1 и 2 для ГЦ подъема и опрокидывания соответственно. Коэффициенты PID регуляторов системы управления были подобраны опытным путем.

Верхний контур схемы отвечает за регулировку хода ГЦ подъема стрелы, нижний – за регулировку хода ГЦ поворота ковша. Максимальные возможные ходы ГЦ при растяжении и сжатии, вычислены по следующей формуле:

$$h_{ГЦ} = L_{ГЦ \text{ под}} \cdot k,$$

где, $L_{ГЦ \text{ под}}$ – расстояние между левым и правым шарнирами ГЦ подъема стрелы; $k = 0.7$ – коэффициент допустимого хода ГЦ от его длины при подъеме ковша; $k = 0.5$ – коэффициент допустимого хода ГЦ от его длины при повороте ковша для загрузки; $k = 0.3$ – коэффициент допустимого хода ГЦ от его длины при повороте ковша для разгрузки.

Диапазон значений коэффициентов k получен в результате анализа конструкций реальных силовых ГЦ.

Подготовка параметров оптимизации

Для проведения оптимизации были выявлены допустимые диапазоны перемещения параметрических точек вдоль координатных осей X и Z ГСК. Они выбирались, исходя из ограничений обзора водителя из кабины, конструктивных особенностей (отсутствие зацеплений и засечений элементов друг за друга). Данные диапазоны были внесены в модель. В раздел параметров вносятся текущие координаты точек по каждой из осей. Затем, исходя из ограничений, вводятся предельные максимальное и минимальное значения координат точек вдоль

выбранных координатных осей. Управление подъемом стрелы и поворотом ковша осуществлялось при помощи комплекса уравнений и требуемых параметров. Вылет ковша при полностью поднятой стреле и ковше в положении «разгрузка» показан на рис. 5. Переменная $L_{x\text{ разг}}$, описывающая вылет, меняется на каждом шаге моделирования. Подъем стрелы на максимальную (требуемую) высоту показан на рис. 5. Переменная $L_{z\text{ под}}$, описывающая вылет, также меняется на каждом шаге моделирования.

Для удобства вывода данных цикл был разбит на три этапа: загрузка груза в ковш, подъем стрелы с грузом и разгрузка груза из ковша. Рассматриваемого цикла были приняты следующие временные рамки каждого этапа:

- 7 с – 10 с – загрузка ковша;
- 10 с – 17 с – подъем стрелы;
- 20 с – 24 с – опрокидывание ковша.

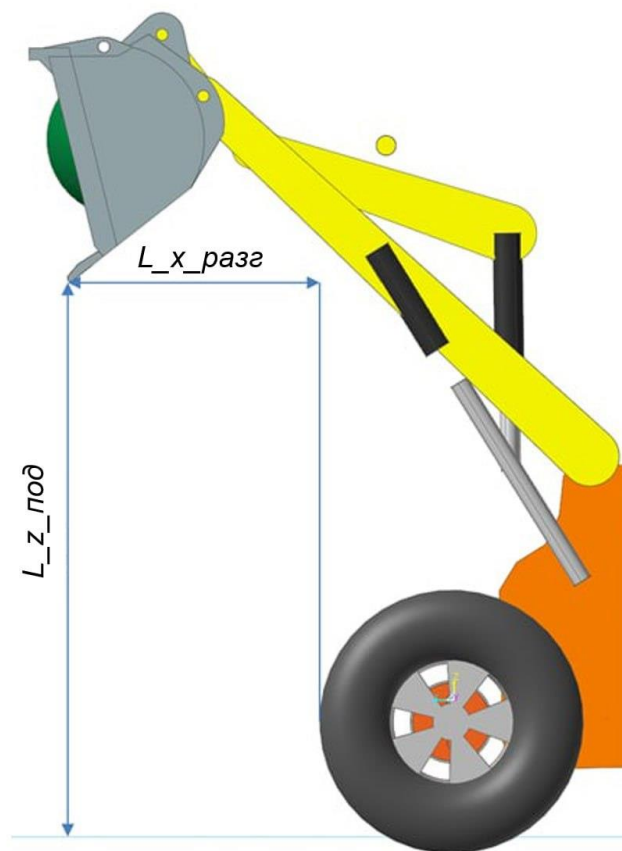


Рис. 5. Геометрические переменные

Fig. 5. Geometric variables

Проведение оптимизации

Оптимизация проводится при помощи функции *Design Optimization* из стандартной библиотеки по расчету динамики связанных тел [13]. В качестве вводных данных используются координаты каждой параметрической точки и абсолютное максимальное возможное изменение координаты по каждой из осей. Требования к оптимизации задаются в виде целевых функций: минимизация усилий, ходов гидроцилиндров подъема стрелы и поворота ковша, увеличение вылета ковша и высоты подъема стрелы по сравнению с исходным или их сохранение на прежнем уровне. Критериями проведения оптимизации служат геометрические параметры – высота подъема и вылет ковша. В работе в качестве целевых функций выбрано ми-

нимизация абсолютных значений усилий, развиваемых гидроцилиндрами. Процесс оптимизации проводился в два этапа. На первом этапе оптимизировались усилие в ГЦ подъема стрелы, на втором – усилие в ГЦ поворота ковша. Сделано это по причине того, что при попытке оптимизации всех геометрических и силовых параметров, из-за большого количества параметров алгоритмы оптимизации программного комплекса *RecurDyn* приводят к противоречивым взаимно исключающим результатам.

Ниже в табл. 1 приведены координаты точек для каждого этапа.

Таблица 1.
Координаты параметрических точек ГСК для каждого этапа

Table 1.
Coordinates of GCS parametric points for each stage

Точка	Исходная координата (x, y, z)	Координата на первом этапе (x, y, z)	Координата на втором этапе (x, y, z)
PP_11	-668.8, 530, 1308.5	-737.2, 530, 1345.3	-737.2, 530, 1345.3
PP_12	1390.4, 506.7, -336.7	1390.4, 506.7, -336.7	1390.4, 506.7, -336.7
PP_13	432.8, 515, 358.5	477.3, 515, 424.4	477.3, 515, 424.4
PP_14	-765.4, 515, 653.9	-685.8, 515, 709.2	-685.8, 515, 709.2
PP_21	-668.8, -530, 1308.5	-737.2, -530, 1345.3	-737.2, -530, 1345.3
PP_22	1390.4, -506.7, -336.7	1390.4, -506.7, -336.7	1390.4, -506.7, -336.7
PP_23	432.8, -515, 358.5	477.3, -515, 424.4	477.3, -515, 424.4
PP_24	-765.4, -515, 653.9	-685.8, -515, 709.2	-685.8, -515, 709.2
PP_3	622, 0, -24.4	622, 0, -24.4	622, 0, -24.4
PP_4	844, 0, 1218	844, 0, 1218	944, 0, 1318
PP_5	899, 0, 652	899, 0, 652	999, 0, 552
PP_6	-305.8, 0, 1300	-305.8, 0, 1300	-324.7, 0, 1400
PP_8	1364, 0, 42.4	1364, 0, 42.4	1364, 0, 42.4

Анализ результатов оптимизации

В результате проведенной оптимизации были получены следующие результаты (табл. 2). Проведенный сравнительный анализ полученных результатов моделирования с результатами ФП-аналога показывает, что полученные результаты превосходят средние значения параметров ФП на рынке.

Таблица 2.
Сравнение параметров с ФП-аналогами

Table 2.
Comparison of parameters with FP analogs

Параметр	Рекомендуемые размеры, мм			Полученное при моделировании, мм
	Минимум	Максимум	Среднее	
Высота подъема	3560	3995	3806	3875
Вылет	850	1100	984	1013
Глубина резки грунта	50	191	95	96

Положение ковша на каждой технологической операции показано ниже (рис. 6).

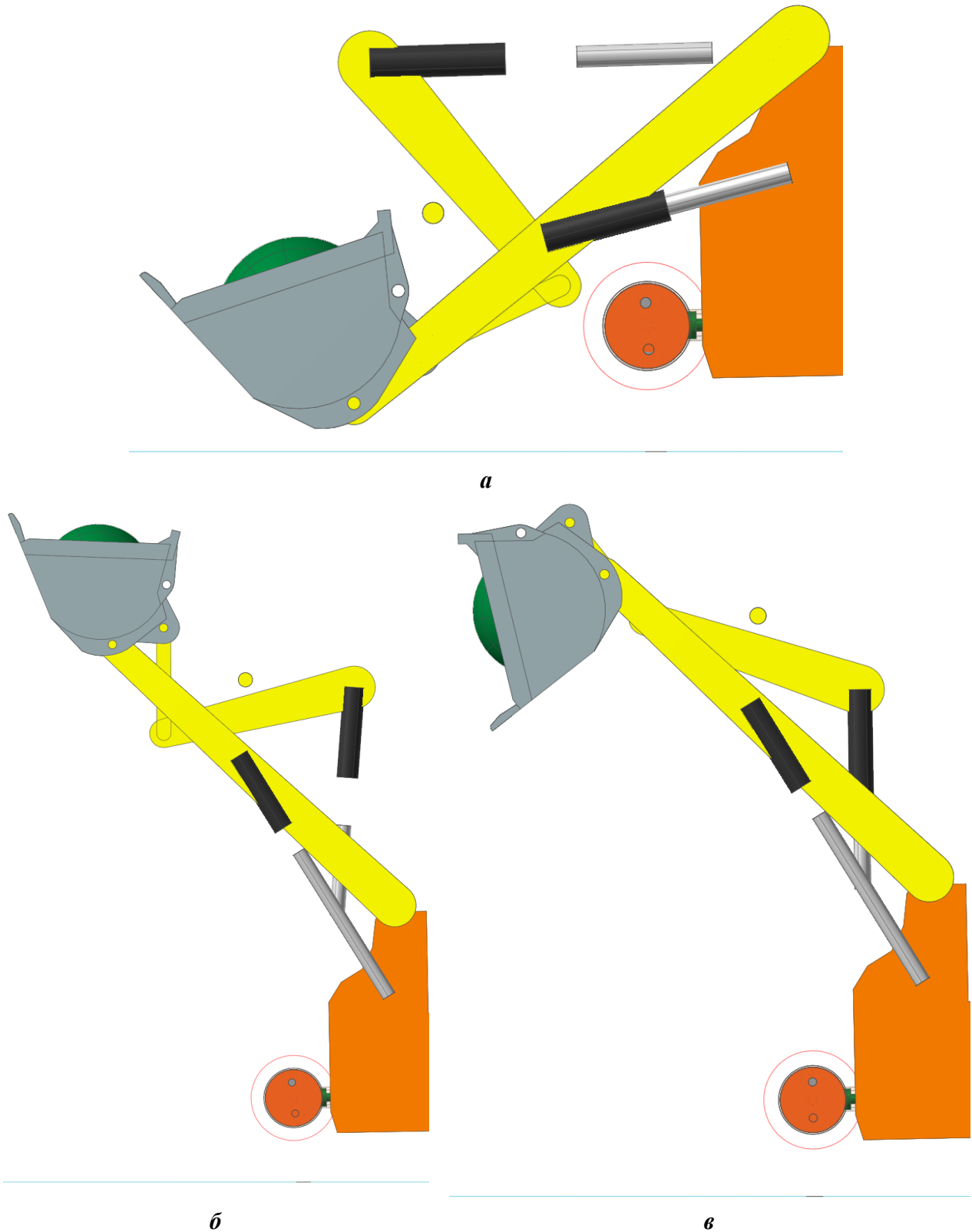


Рис. 6. Положения механизма подъема и поворота ковша:
a – загрузка, б – подъем на максимальную высоту, в – разгрузка

Fig. 6. The positions of the mechanism for lifting and turning the bucket:
a – loading, b – lifting to the maximum height, c – unloading

Зависимости изменения длин гидроцилиндров также соответствуют требованиям (рис. 7): ход ГЦ поворота ковша (синий график) при подъеме стрелы (10-16 с) постоянный.

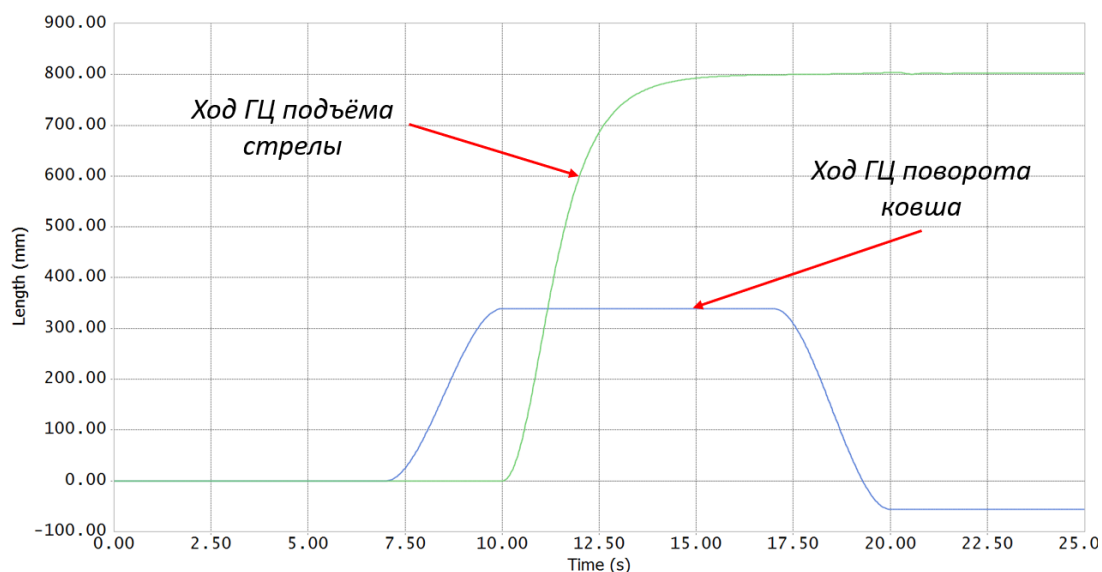


Рис. 7. Зависимости изменения длин ГЦ при моделировании для оптимизированного варианта геометрии

Fig. 7. Dependences of the change in the lengths of the HC in the simulation for the optimized variant of the geometry

Зависимости сил в ГЦ поворота ковша представлены на рис. 8. Наибольшее усилие в оптимизированном варианте уменьшилось на 10,5 % по сравнению с исходным.

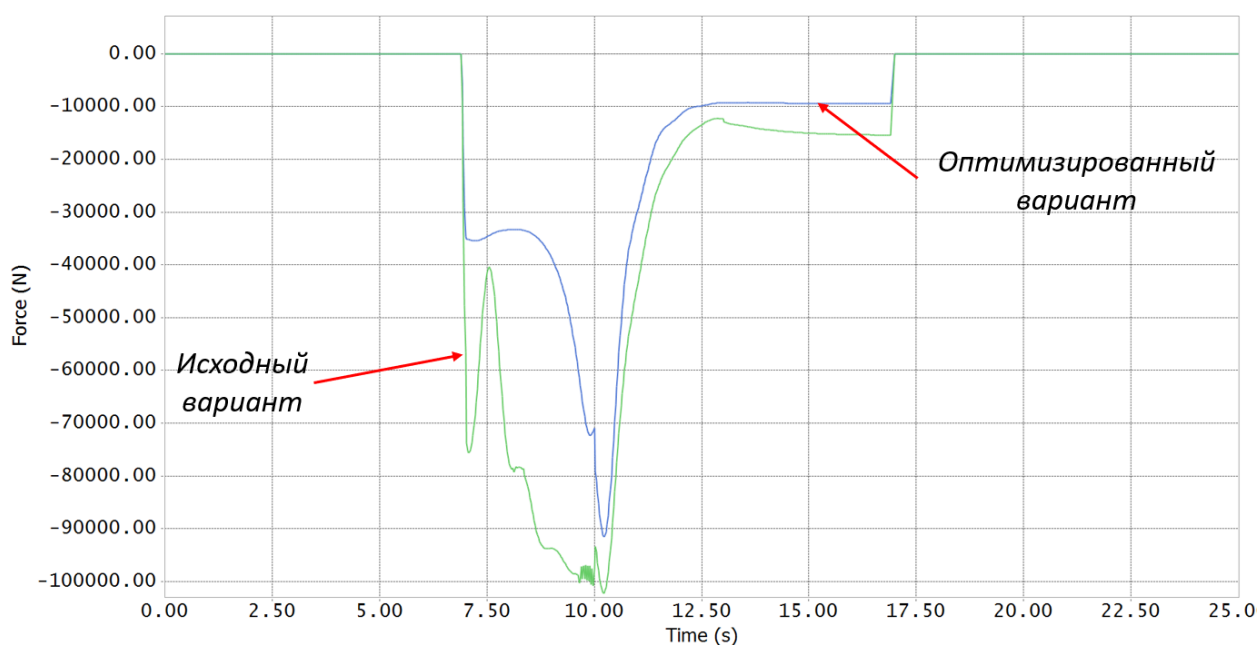


Рис. 8. Силы в ГЦ поворота ковша

Fig. 8. Forces in HC turning bucket

Зависимости сил в ГЦ подъема стрелы представлены на рис. 9. Наибольшее усилие в оптимизированном варианте уменьшилось на 14,6 % по сравнению с исходным.

Затрачиваемая мощность на цикл (загрузка, подъем и разгрузка) в исходном варианте геометрии составляет 61,24 Вт*ч, а в оптимизированном – 60,9 Вт*ч. Например, если принять что короткий цикл длится меньше 2 мин, подъем груза будет осуществляться 30 раз в час. Смена длится 8 рабочих часов, что соответствует 240 циклам. Если ФП работает в 2 смены, за сутки получается 480 циклов, тогда экономия составляет 163,2 Вт*ч.

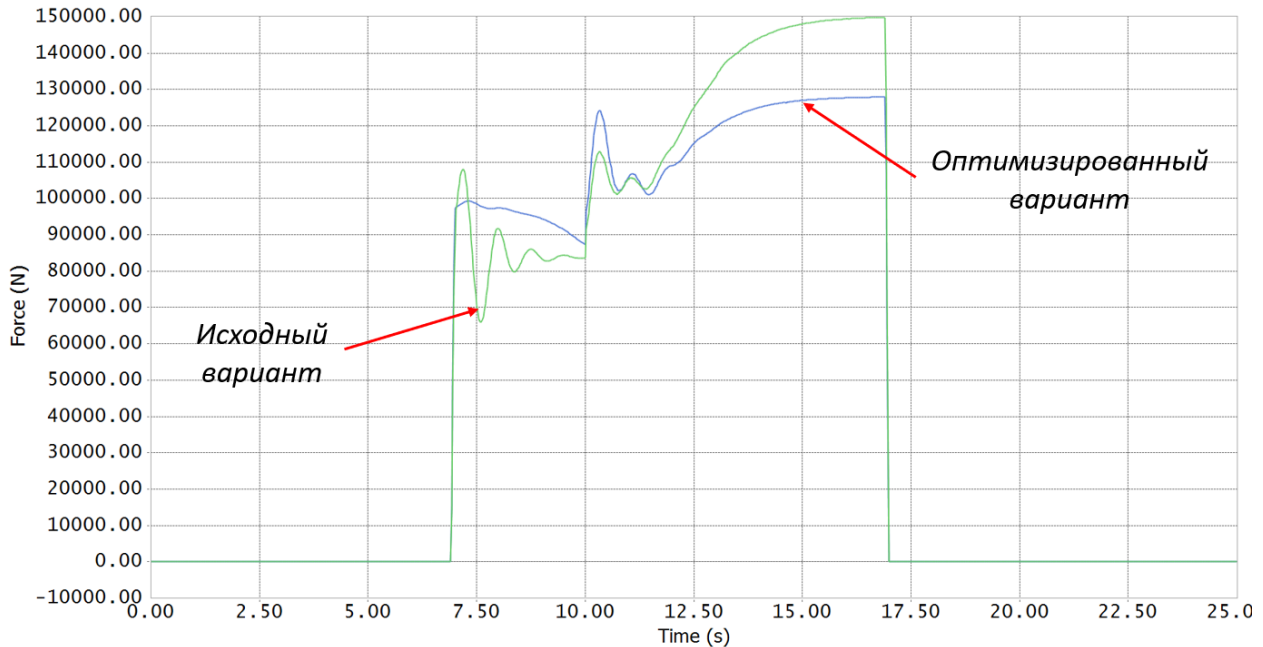


Рис. 9. Силы в ГЦ подъема стрелы

Fig. 9. Forces in HC boom lifting

Графики вылета ковша представлены на рис.10. Вылет в исходном варианте: 1047,5 мм; вылет в оптимизированном варианте: 1236 мм.

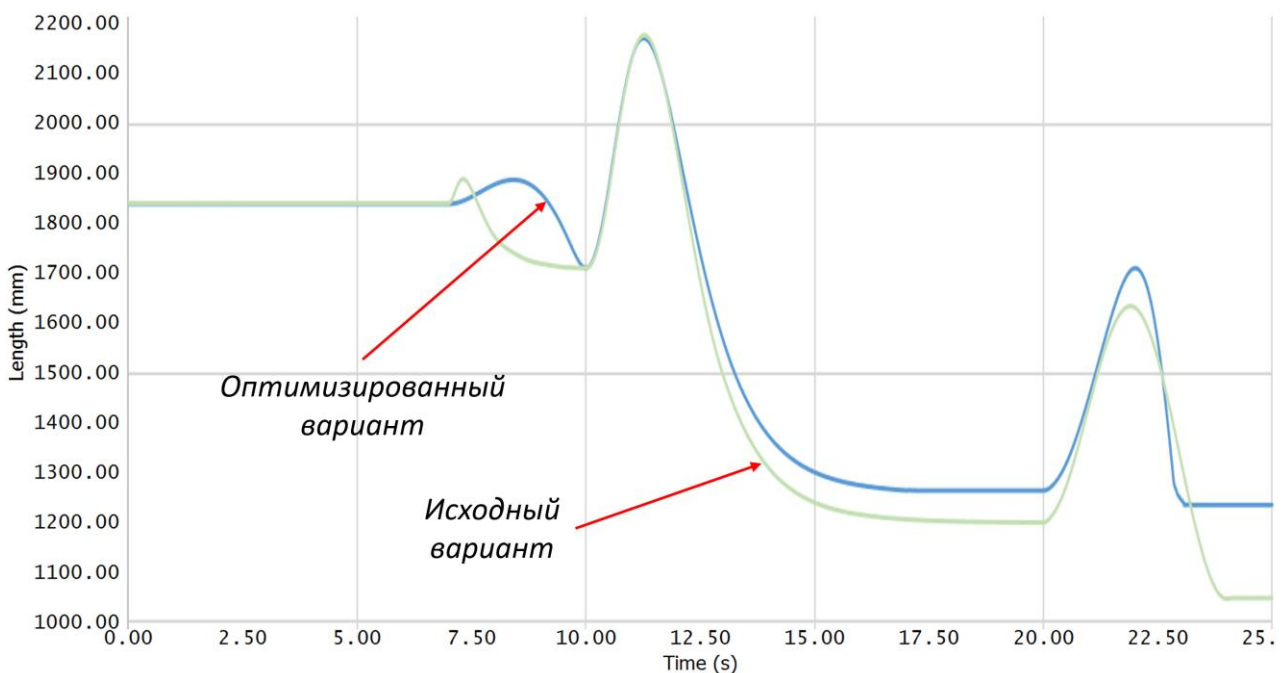


Рис. 10. Вылет ковша

Fig. 10. Bucket reach

Графики высоты подъема ковша показаны на рис. 11. В обоих вариантах достигнута требуемая высота подъема – 3800 мм.

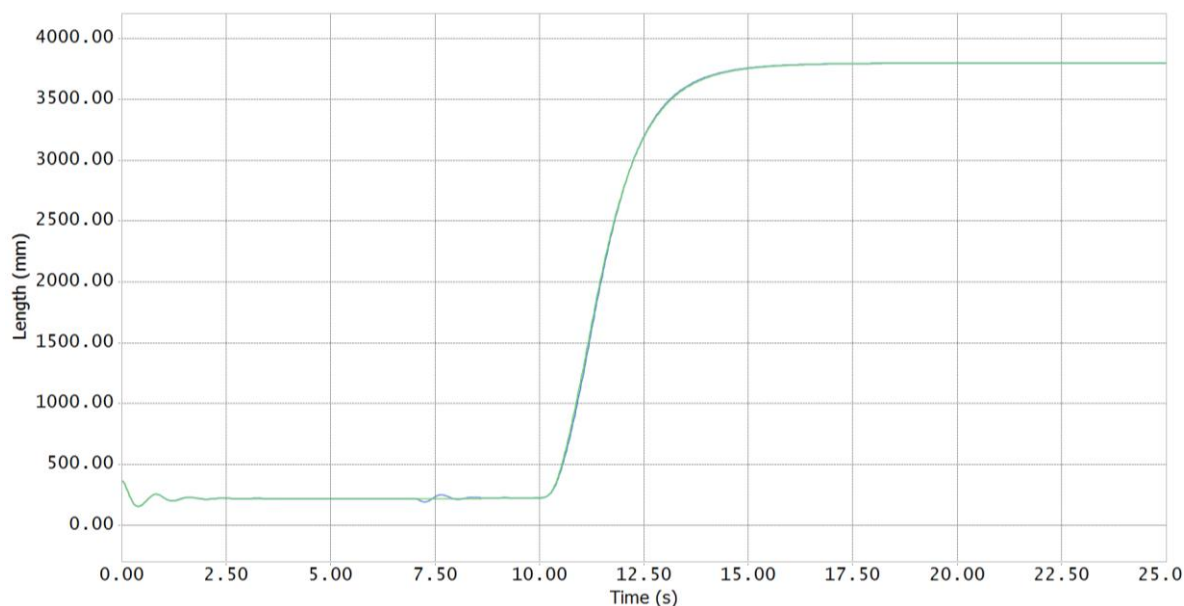


Рис. 11. Высота подъема ковша

Fig. 11. Bucket lifting height

Выводы

Представлен алгоритм проведения оптимизации конструкции механизма подъема и опрокидывания фронтального погрузчика. Разработана математическая имитационная модель динамики механизма подъема ковша фронтального погрузчика для оптимизации его параметров с целью минимизации нагрузок в шарнирах. Приведен пример проведения оптимизации конструкции в приложении по расчету динамики связанных тел. Описаны критерии оптимизации и целевые функции. На примере моделирования нагрузочного типового режима «загрузка-подъем-разгрузка» показано, что после проведения оптимизации усилия в ГЦ поворота ковша и подъема стрелы уменьшились на 10,5 и 14,6 % соответственно. Если предположить, что кривая Веллера материала имеет степенную зависимость, снижение напряжений на 15 % может привести к увеличению долговечности до двух раз.

Представленный подход позволяет комплексно оценивать кинематические и силовые характеристики механизма подъема и опрокидывания ковша ФП, что затруднительно при использовании аналитических методов расчета. Это позволяет повысить эффективность разработки путем уменьшения затрачиваемого времени, проработки большего количества вариантов и анализа полученных результатов.

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
2. **Смирнов, А.Н.** Рекомендации по повышению энергоэффективности одноковшовых фронтальных погрузчиков при эксплуатации / А. Н. Смирнов, П. В. Авраменко. – Минск: БГАТУ, 2020. – 76 с.: ил. – ISBN 978-985-25-0077-7.

3. **Базанов, А.Ф.** Самоходные погрузчики / А.Ф. Базанов, Г.В. Забегалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 406 с.
4. **Боровков, Ю.А.** Основы горного дела: учебник / Ю.А. Боровков, В.П. Дробаденко, Д.Н. Ребриков. – М.: «Академия»; «Академия-Медиа», 2012. – 432 с.
5. **Бояркина, И.В.** Технологическая механика одноковшовых фронтальных погрузчиков: монография / И.В. Бояркина. – Омск, СибАДИ, 2011. – 336 с.: ил.
6. **Забегалов, Г.В.** Методика расчета одноковшовых погрузчиков / Г.В. Забегалов, В.С. Клинин, Т.Л. Ратнер, Г.К. Лурье, А.А. Яркин. – Москва, ЦНИИТЭстроймаш, 1970. – 117 с.: ил.
7. **Grant, M.** Hydraulic Excavators vs Wheel loaders // Quarry Academy, [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/01/Hydraulic-Shovel-vs-Wheel-Loader.pdf> (дата обращения 13 01 2022 год)
8. **Berry, T.**, The first Articulated Wheel Loader [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.constructionequipment.com/first-articulated-wheel-loader>, Jan.25th, 2013. (дата обращения 13 01 2022 год)
9. **Metin, Ö.** Wheel Loader Buckets & Digging Forces / Ö. Metin, Ö. Nakkı // [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/335618855> (дата обращения 13 01 2022 год)
10. **Vdovin, D.** Quad bike frame dynamic load evaluation using full vehicle simulation model / D. Vdovin, I. Chichekin, O. Ryakhovsky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. С. 012025.
11. **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. P. 1322-1328.
12. **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: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-108869>
13. FunctionBay [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://functionbay.com/en> (дата обращения 26.01.2023)

*Дата поступления
в редакцию: 06.02.2023*

*Дата принятия
к публикации: 05.06.2023*