

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОРОДЫ НА РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА

Веревочкин Н.Г.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва

Ключевые слова: динамическое моделирование, гидравлический экскаватор, цифровая модель, метод дискретных элементов, совместное моделирование, взаимодействие частиц, кинематическая схема, цифровой двойник.

Аннотация. В научной статье для оценки производительности экскаватора представлены исследование динамического моделирования твердых тел гидравлического экскаватора и метод дискретных элементов (МДЭ) для гранулированных материалов, а также совместное моделирование на основе функционального интерфейса макета, которое может охватить как обновленное поведение материала, так и поведение оборудования и предсказать его работу. Полный рабочий цикл экскаватора может быть отражен методом совместного моделирования для того, чтобы получить данные по изменению давления, потребляемой мощности и расхода жидкости в зависимости от положения гидроцилиндров. Представленные результаты показывают, что данный вид моделирования подходит для определения производительности экскаватора, позволяя проводить раннее исследование, которое демонстрирует достоверную оценку нагрузки с изменением плотности материала.

ANALYSIS OF DYNAMIC IMPACT OF ROCK ON THE WORKING EQUIPMENT OF HYDRAULIC EXCAVATOR

Verevochkin N.G.

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow

Keywords: dynamic modeling, hydraulic excavator, digital model, discrete element method, joint modeling, particle interaction, kinematic scheme, digital twin.

Abstract. The research paper presents the dynamic solid modeling study of hydraulic excavator dynamic simulation and discrete element method (DEM) for granular materials to evaluate the performance of excavator, and the joint simulation based on functional layout interface is presented, which can cover both the updated material behavior and equipment behavior and predict the performance. The full duty cycle of the excavator can be reflected by the co-simulation method in order to obtain the pressure variation, power consumption and fluid flow rate as a function of the position of the hydraulic cylinders. The presented results show that this type of modeling is suitable for determining the performance of the excavator, allowing an early study that demonstrates a reliable estimation of the load with changes in material density.

Введение. Горные машины и оборудование, эксплуатируемые на открытых разработках [1], работают в крайне неблагоприятных условиях, к которым можно отнести: как высокие, так и низкие температуры окружающей среды, значительная загрязненность рабочих элементов, высокий абразивный износ рабочего инструмента, большие динамические нагрузки.

Современные карьерные гидравлические экскаваторы [2], в основном иностранного производства, являются весьма технологичными и высокопроизводительными горными машинами, имеющими хорошие показатели надежности и безотказности работы. В тоже время, себестоимость добычи полезного ископаемого остается достаточно высокой. В таких условиях важными задачами для горной промышленности являются: разработка новых моделей карьерных гидравлических экскаваторов, модернизация уже существующих. В настоящее время начинает активно применяться реверс-инжиниринг. Также важными задачами являются оптимизация технологий изготовления и ремонта горных машин и оборудования. Перед учеными и горными инженерами стоит задача при разработке новых моделей и модернизации существующих увеличить их производительность, повысить надежность, ремонтпригодность, увеличить время безотказной работы [3].

Совершенствованием конструкций горных машин различного назначения занимаются многие отечественные ученые [4-6]. Безусловно, при проведении новых исследований необходимо опираться на опыт наших научных школ, полученный за последние годы. В тоже время, при анализе научных работ, как отечественных, так и зарубежных, становится ясно, что добиться дальнейшего повышения вышеуказанных показателей практически невозможно, если применять только классические подходы к их достижению. Данная статья является первым шагом к научному исследованию, направленному к достижению вышеуказанных показателей.

Кинематическая схема. Определение кинематических параметров необходимо для проведения следующих этапов при создании симуляции между твердыми телами. В данной работе экскаватор рассматривается как система, состоящая из твердых тел и приводимая в движение гидравлическими цилиндрами, а также вращением вокруг оси y (рис. 1). Цель данной работы заключается в воспроизведении и получении достоверной оценки нагрузки при взаимодействии ковша с породой [7].

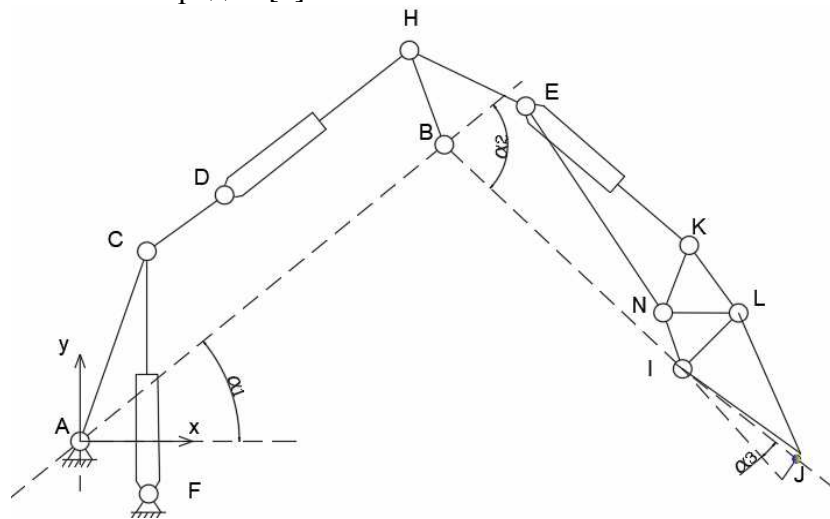


Рис. 1. Кинематическая схема для определения траектории движения рабочего оборудования гидравлического экскаватора

Задается начальное положение гидравлических элементов. Далее определяются габариты гидравлических приводов, которые зависят от модуля эквивалента нагрузки. Уравнения, которые вычисляют относительные углы поворота стрелы, манипулятора и ковша, следующие:

$$\alpha_1 = \angle CAF - \angle CAB - \angle FAX, \tag{1}$$

$$\alpha_2 = \angle DBH + \angle ABD + \angle HBI - \pi, \tag{2}$$

$$\alpha_3 = \angle JIL + \angle NIL + \angle BIN - \pi. \tag{3}$$

Цифровая модель. Для проведения симуляции был взят действующий гидравлический экскаватор Cat 390F L 2017г. Дальнейшим шагом было создание 3D-модели рабочего оборудования в САПР Solidworks согласно реальной модели (рис. 1, табл. 1).

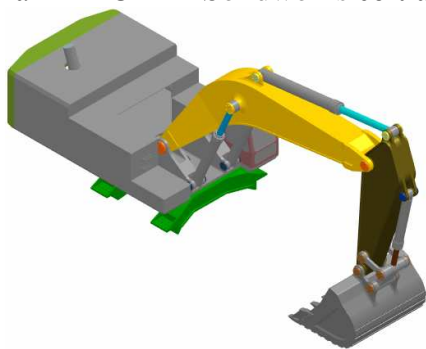


Рис. 2. Цифровая модель гидравлического экскаватора Cat390F L

Табл. 1. Параметры рабочего оборудования

Оборудование	Масса, кг	Величина
Стрела	8447	7,25 м
Рукоять	5447	3,4 м
Ковш	7647	6 м ³

Динамическое моделирование. Динамика нескольких тел исследует движение твердых тел, которые взаимодействуют между собой [8]. Поступательные и вращательные, сферические кинематические пары используются между рабочими органами и гидравлическими цилиндрами в соответствии с геометрическими ограничениями. Для проведения анализа динамики импортируем цифровую модель из САПР в RecurDyn. На основе трехмерной модели каждой детали можно получить массу твердого тела, центр масс и инерцию, которые затем используются в качестве входных данных. Положение каждой точки шарнира в глобальной системе координат и траектория копания могут быть определены путем комбинирования относительных углов поворота с конструктивными элементами экскаватора. Для этого создается алгоритм движения к 4 кинематическим парам: вращение платформы вокруг оси y , перемещение поршней гидроцилиндров стрелы, рукояти, ковша от времени. Тогда прописываются следующие выражения с функцией STEP:

$$\text{STEP}(\text{TIME}, .01, 0, 1.3, -30D) + \text{STEP}(\text{TIME}, 6.5, 0, 8, 60D) + \text{STEP}(\text{TIME}, 9.5, 0, 10, -30D), \quad (4)$$

$$\text{STEP}(\text{TIME}, 0.2, 0, 1.2, 500) + \text{STEP}(\text{TIME}, 4.5, 0, 7, -700) + \text{STEP}(\text{TIME}, 8.8, 0, 9.5, 100), \quad (5)$$

$$\text{STEP}(\text{TIME}, .01, 0, 1, -200) + \text{STEP}(\text{TIME}, 1.5, 0, 6, 400) + \text{STEP}(\text{TIME}, 6.5, 0, 8, -100) + \text{STEP}(\text{TIME}, 8.8, 0, 9.5, -300), \quad (6)$$

$$\text{STEP}(\text{TIME}, .01, 0, 0.5, -300) + \text{STEP}(\text{TIME}, 1.5, 0, 5.5, 700) + \text{STEP}(\text{TIME}, 8, 0, 9.5, -850) + \text{STEP}(\text{TIME}, 9.6, 0, 9.9, 300). \quad (7)$$

Учитывая направление движения поршня в цилиндре, механические части приходят в действие. Для того чтобы отразить динамическое взаимодействие ковша с материалами в процессе работы, силы и крутящие моменты материалов из расчета МДЭ используются в качестве входных данных для ковша, а положение ковша, моменты инерции, скорость и угловая скорость передаются в качестве входных данных для моделирования МДЭ. Согласованное движение стрелы, рукояти и ковша необходимо для управления положением режущей кромки ковша и траектории ее движения [9].

Метод дискретных элементов. Моделирование взаимодействия сыпучих материалов и оборудования служит для определения динамических нагрузок в конкретный момент времени. Согласно МДЭ, частица участвует в двух движениях: равномерно вращается вокруг вектора со скоростью и движется поступательно со скоростью перпендикулярно плоскости вращения. Силы и моменты взаимодействия частиц к ковшу накапливаются и передаются ковшу в динамическом моделировании [10].

В научной работе для моделирования используются частицы, объединенными тремя сферами (рис. 2). Физика взаимодействия частицы к частице: теория когезии по Герцу-Миндлина с JKR (Джонсон-Кендалл-Робертс). Это модель обеспечивает сцепление, даже если частицы не находятся в физическом контакте. Для их появления была выбрана статическая фабрика с количеством 300000 частиц. После они будут использоваться в качестве параметров свойств грунта для системы имитации нагрузки (табл. 2).

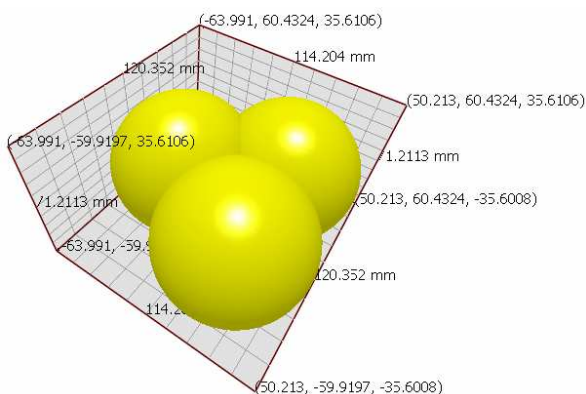


Рис. 2. Геометрическая форма частицы

Табл. 2. Свойства материала частиц

Параметр	Значение
Количество частиц	300000
Диаметр частиц	$(0,85-1,15) \cdot D$
Плотность	$600-3000 \text{ кг/м}^3$
Модуль сдвига	$1e+10 \text{ Па}$
Коэффициент Пуассона	0,25
Коэффициент трения	0,45
Коэффициент трения качения	0,15

Совместное моделирование. Применение совместной симуляции (рис. 3, 4) над общей цифровой моделью в реальном времени способствует взаимодействию механических систем с гранулированными материалами, учитывая их динамические и физические характеристики.

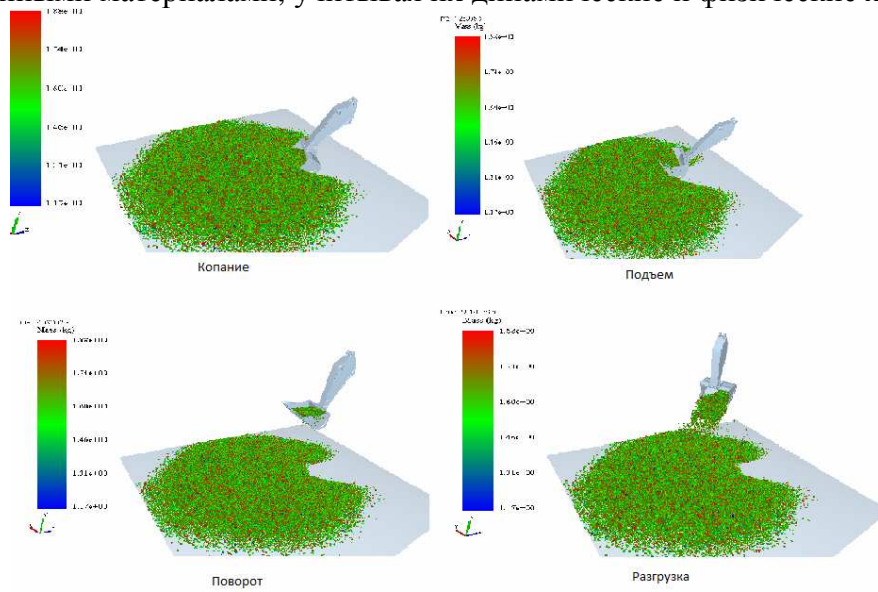


Рис. 3. Симуляция, проведенная в Altair EDEM

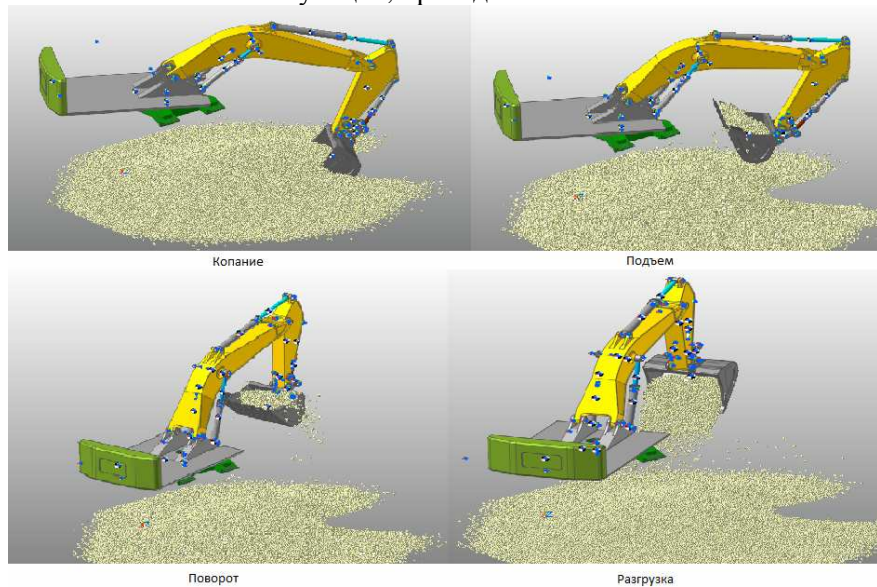


Рис. 4. Симуляция, осуществленная в RecurDyn

Результаты. Для количественного представления изменения силы и взаимодействия частиц с ковшом за время цикла работы экскаватора был создан график (рис. 5).

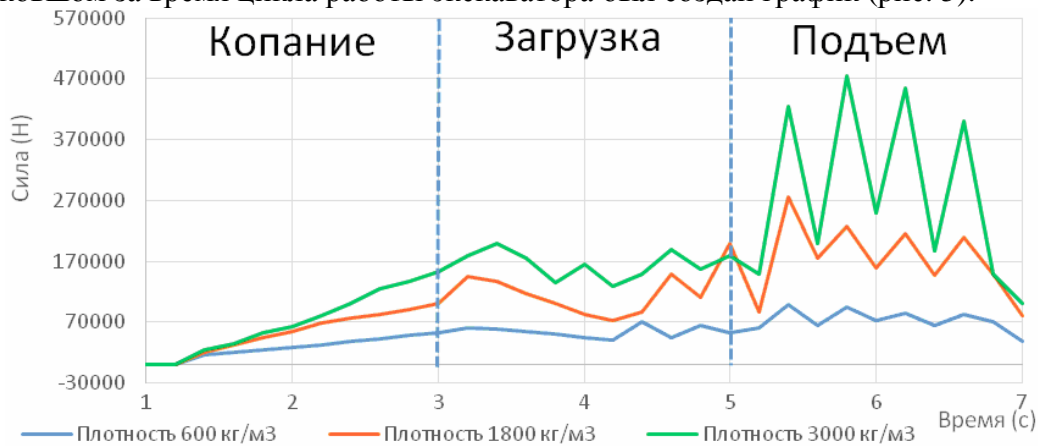


Рис. 5. Изменение величины силы воздействия частиц на ковш с течением времени

В результате, с увеличением плотности материала силы возрастают, действующие на ковш. Силы накапливаются в процессе копания от 0 до 3 с и имеют почти линейную характеристику в виду выбора одного вида плотности и небольшой размерности частиц, чего в реальности нет. По мере загрузки сила немного увеличивается и достигает пика в 3,5 с, после чего испытывает колебания по мере выпадения частиц из ковша до окончания процесса подъема в 7 с. На 3,5 с сила в 4 раза больше при плотности материала 3000 кг/м³, чем при 600 кг/м³, поэтому ковш должен обладать высокой прочностью, чтобы справиться с неблагоприятными условиями выемки грунта. Ниже представлены скорости рабочего оборудования (рис. 6, 7).

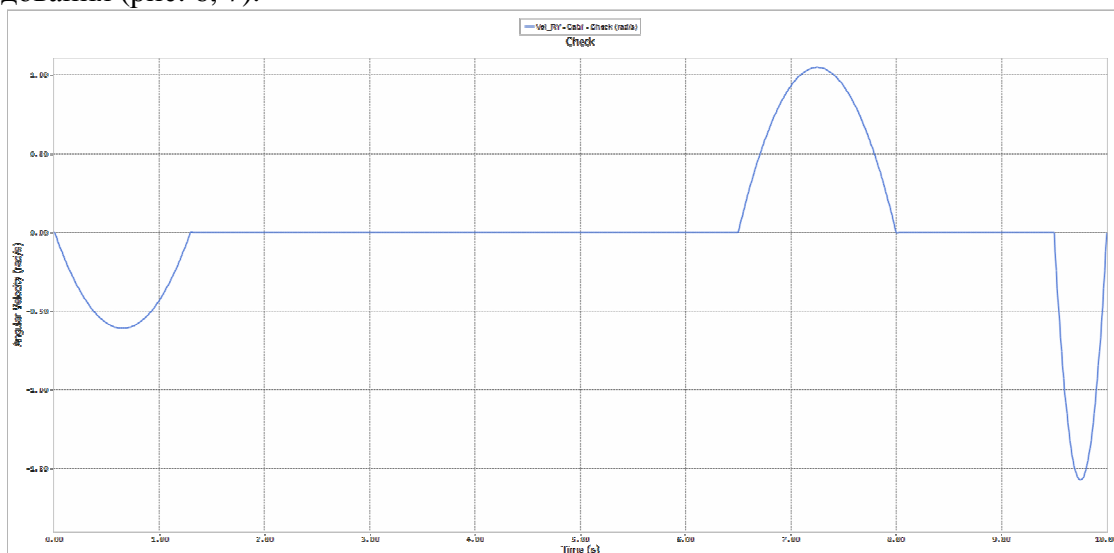


Рис. 6. Угловая скорость вращения кабины, рад/с

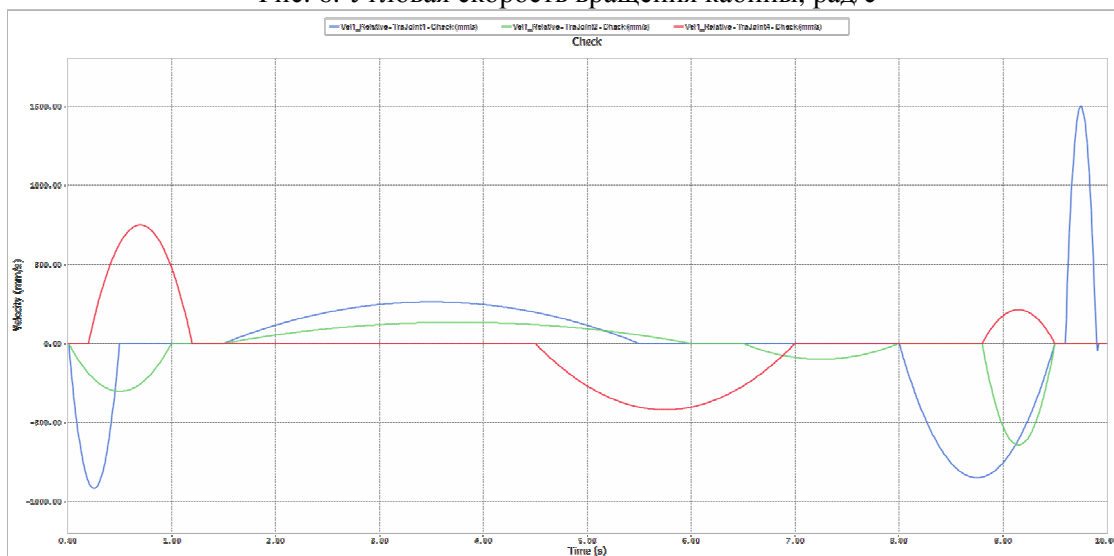


Рис. 7. Линейная скорость перемещения поршней, мм/с

Заключение. В научной статье применяется метод совместного моделирования динамики твердых тел и метода дискретных элементов для исследования динамического взаимодействия машины и материала. Различные условия выемки грунта были смоделированы путем изменения плотности материала. Интенсивное силовое взаимодействие на ковш в основном происходит в процессе копания. Созданная цифровая модель по сути является цифровым двойником процесса копания гидравлическим экскаватором сыпучих грунтов. Результаты позволяют определять динамические нагрузки в каждый момент времени рабочего цикла экскаватора. Полученные значения можно использовать при проектировании новых моделей экскаваторов с изменением их конструктивных параметров с целью оптимизации процесса копания.

Список литературы

1. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2007. – 680 с.
2. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Проектирование карьерных экскаваторов. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 228 с.
3. Побегайло П.А. Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы: Выбор основных геометрических параметров рабочего оборудования на ранних стадиях проектирования. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 296 с.
4. Рахутин М.Г., Симба Наваррете В.Х. Влияние угла наклона экскаватора на запас прочности трака гусеницы // Горная промышленность. – 2023. – №2. – С. 141-146. – doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-141-146.
5. Джурраев Р.У., Райханова Г.Е., Губанов С.Г. Совершенствование конструкции режущих элементов ковша карьерных экскаваторов // Горный Журнал. – 2023. – №3. – С. 49-55. – doi.org/10.17580/gzh.2023.03.07.
6. Кривенко А.Е., Занг К.К. Исследование влияния температурного режима рабочей жидкости гидросистемы на эффективность работы карьерного гидравлического экскаватора // Горный журнал. – 2020. – №12. – С. 78-81. – doi.org/10.17580/gzh.2020.12.18.
7. Носенко А.С., Шемшюра Е.А., Алтунина М.С. Строительные и дорожные машины: методические указания к выполнению практических работ. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2016. – 64 с.
8. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Набиуллин Р.Ш., Хорошавин С.А. Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 4. – С. 156-68. – doi.org/10.25018/0236_1493_2022_4_0_156.
9. Bender F.A., Mitschke M., Braeunl T., Sawodny O. Predictive operator modeling for virtual prototyping of hydraulic excavators // Automation in Construction. 2017, no. 84, pp. 133-145. – doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.008.
10. Jieqing Gan, Zongyan Zhou, Aibing Yu, Dean Ellis, Reece Attwood, Wei Chen. Co-simulation of multibody dynamics and discrete element method for hydraulic excavators // Powder Technology. 2023, p. 118001. doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118001.

References

1. Poderni R.Yu. Mechanical equipment of open pits: Tutorial. 6th enlarged and revised edition. – М.: Publ. house of Moscow State Mining University, 2007. – 680 p.
2. Komissarov A.P., Lagunova Y.A., Shestakov V.S. Design of quarry excavators. – М: Innovative Engineering, 2017. – 228 с.
3. Pobegailo P.A. Powerful single-bucket hydraulic excavators: Selection of basic geometrical parameters of working equipment at early stages of design. – М.: LENAND, 2014. – 296 p.
4. Rakhutin M.G., Simba V.H. Navarrete. Influence of the excavator inclination angle on the track safety margin // Mining Industry. 2023, no. 2, pp. 141-146. – doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-141-146.
5. Dzhuraev R. U., Raikhanova G. E., Gubanov S. G. Design improvement for cutting elements of excavator buckets // Gornyi Zhurnal. – 2023. – №3. – С. 49–55. – doi10.17580/gzh.2023.03.07.
6. Krivenko A.E., Zhang K.K. Influence of power fluid temperature in hydraulics on operating efficiency of hydraulic mining excavators // Gornyi Zhurnal. 2020, no. 12, pp. 78-81. doi.org/10.17580/gzh.2020.12.18.
7. Nosenko A.S., Shemshura E.A., Altunina M.S. Construction and road machines: methodical instructions for practical work. – Novocherkassk: SRSTU (NPI), 2016. – 64 с.
8. Komissarov A.P., Lagunova Y.A., Nabiullin R.Sh., Khoroshavin S.A. Digital model of shovel work process // Mining information and analytical bulletin. 2022, no. 4, pp. 156-168. doi.org/10.25018/0236_1493_2022_4_0_156.
9. Bender F.A., Mitschke M., Braeunl T., Sawodny O. Predictive operator modeling for virtual prototyping of hydraulic excavators // Automation in Construction. 2017, no. 84, pp. 133-145. – doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.008.
10. Jieqing Gan, Zongyan Zhou, Aibing Yu, Dean Ellis, Reece Attwood, Wei Chen. Co-simulation of multibody dynamics and discrete element method for hydraulic excavators // Powder Technology. 2023, p. 118001. doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118001.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Веровочкин Николай Григорьевич – аспирант
nikmanver@gamil.com

Verevочкин Nikolay Grigorievich – postgraduate student

Получена 06.02.2024