

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 625.144

doi: 10.30987/2782-5957-2023-10-39-46

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА ВЫРЕЗАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ЩЕБНЕОЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ LS-DYNA И FESTOHYDROLIC

Маргарита Юрьевна Чалова^{1✉}, Павел Александрович Григорьев², Алексей Николаевич Неклюдов³, Илья Васильевич Трошко⁴

^{1, 2, 3, 4} Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ margarita_chalova@mail.ru

² grigorievpavel1996@yandex.ru

³ neklyudov.an@gmail.com

⁴ troshko_iv@mail.ru

Аннотация

Для снижения удельной энергоемкости привода щебнеочистительных машин необходимо провести оценку нагрузки, действующей на привод барового устройства, так как он является наиболее нагруженным в процессе вырезки балласта. Для получения и оценки параметров привода в процессе выполнения работ предлагается использование методов компьютерного моделирования с применением программных комплексов. Для формирования исходных данных при моделировании привода необходимо проводить исследование процесса взаимодействия балласта с баровой цепью вырезающего устройства, что позволит установить характер

резания. ПО *LS-Dyna* позволило определить, что нагрузка при моделировании является синусоидальной, что соответствует проведенным экспериментальным исследованиям в данной области, кроме того установлено, что при работе барового рабочего органа происходит снижение сил резания при волочении подошвы скребка по балластному слою. Использование ПО *FestoHydrolic* позволило установить синусоидальную нагрузку, действующую на привод вырезающего устройства, а также оценена амплитуда изменения его параметров.

Ключевые слова: машина, устройство, балластный слой, моделирование.

Ссылка для цитирования:

Чкалова М.Ю. Моделирование параметров привода вырезающего устройства щебнеочистительной машины с использованием программных комплексов LS-dyna и festohydrolic / М.Ю. Чкалова, П.А. Григорьев, А.Н. Неклюдов, И.В. Трошко // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 10. – С. 39-46. doi: 10.30987/2782-5957-2023-10-39-46.

Original article

Open Access Article

SIMULATION OF THE PARAMETERS OF THE CUTTING TOOL DRIVE OF A BALLAST CLEANING MACHINE USING LS-DYNA AND FESTOHYDROLIC SOFTWARE COMPLEXES

Margarita Yuryevna Chalova^{1✉}, Pavel Aleksandrovich Grigoriev², Aleksey Nikolaevich Neklyudov³, Ilya Vasilyevich Troshko⁴

^{1, 2, 3, 4} Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ margarita_chalova@mail.ru

² grigorievpavel1996@yandex.ru

³ neklyudov.an@gmail.com

⁴ troshko_iv@mail.ru

Abstract

To reduce the energy density of the ballast cleaning machine drive, it is necessary to evaluate the load affecting the drive of the bar device, since it is the most loaded while cutting the ballast. To obtain and evaluate the drive parameters during operation, it is proposed to use computer modeling methods using software complexes. To form the initial data when modeling the drive, it is necessary to study the process of interaction of the ballast with the bar chain of the cutting tool, which will allow to find out the nature of cutting. According to LS-Dyna, it was possible to de-

termine that the load during modeling is sinusoidal, which corresponds to the experimental studies conducted in this area. In addition, it was found that during the operation of the bar working body, cutting forces decrease when dragging the scraper sole along the ballast layer. The use of FestoHydrolic software made it possible to find a sinusoidal load affecting the drive of the cutting tool, and the amplitude of changes in its parameters is also evaluated.

Keywords: machine, device, ballast layer, modeling.

Reference for citing:

Chalova My, Grigoriev PA, Neklyudov AN, Troshko LV. Simulation of the parameters of the cutting tool drive of the ballast cleaning machine using LS-dyna and FestoHydrolic software complexes. *Transport Engineering*. 2023;10:39-46. doi: 10.30987/2782-5957-2023-10-39-46.

Введение

В настоящее время происходит стремительное усовершенствование сети железных дорог на территории Российской Федерации, заключающееся в улучшении их качества, что позволяет увеличить установленную нормативную скорость подвижного состава. Качество балластного пути напрямую связано с текущим состоянием щебеночного балласта, который должен обеспечивать равномерность распределения нагрузки от проходящих поездов на основную площадку земляного полотна. Обеспечивается должное состояние пути проведением текущего содержания и ремонтов [1]. Важным фактором при проведении работ данного типа является удельная энергоемкость используемых машин и комплексов. Для очистки балластного слоя от засорителей в настоящее время широко используются щебнеочистительные комплексы нового поколения, при которых наибольшую удельную энергоемкость имеет процесс вырезки щебня [2]. При разработке эффективных методов снижения удельной энергоемкости данного процесса необходимо провести оценку влия-

ния параметров резания балластного слоя на работу гидропривода баровой цепи, для этого целесообразно определить характер отделения стружки от массива с использованием математической модели балласта.

С целью проведения оценки влияющих факторов на состояние балластной призмы были предложены конструкция лабораторного стенда и компьютерная модель, позволяющие определить поперечные силы в щебеночном балласте различных фракций и влажности [3]. В результате проведенных исследований установлены зависимости поперечных сил, возникающих в балластной призме от вертикальных поездных нагрузок с учетом фактического состояния, но с помощью данной модели не представляется возможным провести оценку усилий, действующих на баровую цепь щебнеочистительной машины.

Наиболее полно математическая модель балластного слоя для возможности моделирования процесса его вырезки представлена в работе «Компьютерное моделирование железнодорожного балласта в твердотельной постановке» [4].

Материалы, модели, эксперименты и методы

Для оценки параметров гидропривода при разработке балластного слоя баровым рабочим органом необходимо определить характер и величину усилий, действующих на один скребок в процессе работы. С этой целью рассмотрим модель балластной призмы, которая представляет собой совокупность элементов, между ко-

торыми в процессе перемещения могут возникать контактные силы. В плоской постановке каждое тело системы имеет три степени свободы. Положение i -й гранулы балласта однозначно определятся в любой момент времени по координатам центра масс x_{ci} , y_{ci} , и по углам поворота φ_i . Таким образом, состоящая из N -гранул балласт-

ная среда имеет $3N$ степени свободы, а уравнения ее движения имеют вид [4]:

$$m_i \ddot{x}_{ci} = \sum_j F_{xij}^c; \quad (1)$$

$$m_i \ddot{y}_{ci} = -mg + \sum_j F_{yij}^c; \quad (2)$$

$$J_{zi} \ddot{\phi}_i = \sum_j m_z (F_{ij}^c); \quad (3)$$

где m_i – масса i -й частицы; J_i – момент инерции i -й частицы; F_{yij}^c – контактная сила, возникающая между i -й и j -й гранулами.

В основе контактного взаимодействия лежит модель, в соответствии с которой силы контактного взаимодействия возникают только в вершинах ограничивающих многоугольников при их внедрении внутрь многоугольника ограничивающего соседнюю гранулу [5].

Представленная математическая модель позволяет осуществить переход к *SPH*-модели балласта. Метод *SPH* – гидродинамики сглаженных частиц – вычислительный метод, широко применяемый для динамики жидкости и газов. Однако полученные модели материалов метода *SPH* значительно шире [6]. В частности, он позволяет бессеточным методом конечно-

$$\rho_i = \rho(r_i) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(|r - r_i|, h) = \sum_j m_j W(|r - r_i|, h), \quad (5)$$

где j – включает все частицы в симуляции.

Моделирование процесса отделения элементарной стружки балластного слоя одним скребком от массива можно осуществить с использованием программного комплекса *LS-Dyna* [5, 6], создав модель материала в *SPH* представлении и модель резца (скребка баровой цепи) в классической сеточной структуре. Характер резания материала при проведении моделирования типа *SPH* представлен на рис. 1.

При рассмотрении полученной модели резания *SPH*-материала установлено, что в определенный момент происходит отделение стружки. При осуществлении процесса очистки балласта современными щебнеочистительными машинами длину, на которой происходит отделение элементарной стружки балласта, целесообразно считать равной длине шага цепи – 250 мм. Для оценки влияния переменной нагрузки, действующей в процессе резания балластного слоя на гидропривод вырезающего устройства щебнеочистительных машин,

элементного анализа производить анализ взаимодействия пар металл-металл и взаимодействия большинства сыпучих материалов с твердыми (задача внедрения), что позволяет проводить расчет взаимодействия балласта с баровой цепью вырезающего устройства, с целью установления характера резания.

При проведении моделирования процесса резания балластного слоя значение любой физической величины A в точке r задается следующей формулой:

$$A(r) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(|r - r_i|, h), \quad (4)$$

где m_j – масса j -й частицы; A_j – значение величины A для частицы j ; ρ_j – плотность связанная с частицей j ; W – функция ядра, описанная функцией Гаусса (нормальное распределения) – оценивает влияние каждой частицы.

Одним из важнейших параметров при моделировании процесса разработки балластного слоя является плотность частицы i (ρ_i), которая может быть выражена как:

было проведено моделирование в программе *FestoHydrolic* [9, 10]. В качестве элемента, моделирующего усилие при резании балластного слоя, выбран гидроцилиндр, так как он позволяет задать различную нагрузку, что наиболее полно характеризует его синусоидальный характер (рис. 2).

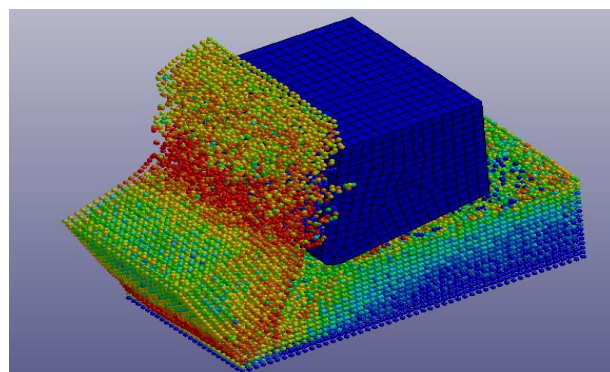


Рис. 1. Характер резания материала при использовании модели *SPH*

Fig. 1. The nature of material cutting when using the *SPH* model

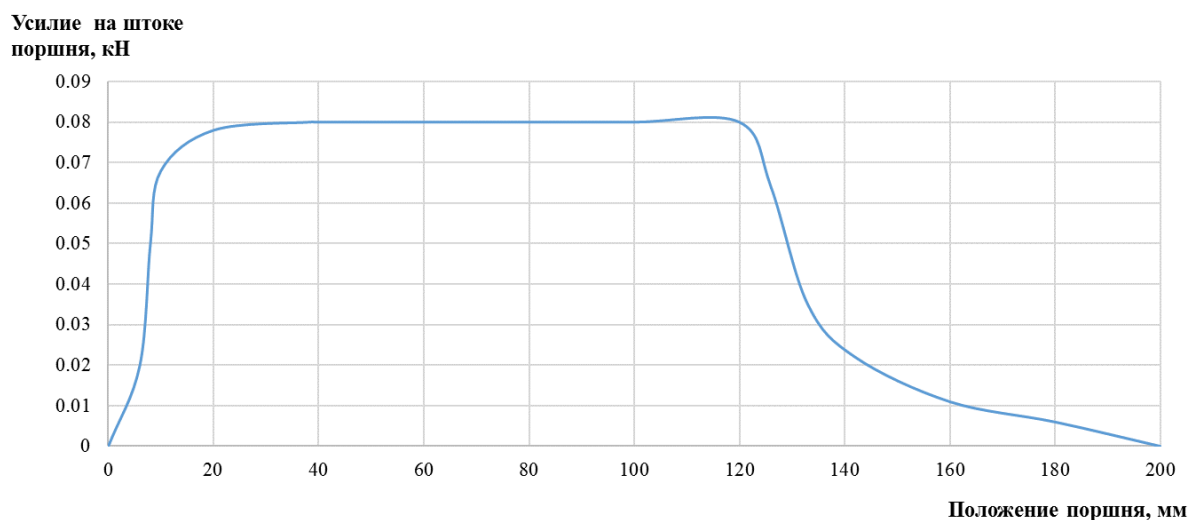


Рис. 2. Характер нагрузки гидроцилиндра
Fig. 2. Hydraulic cylinder load character

При проведении оценки давления, действующего в рассматриваемой гидросистеме привода вырезающего устройства, при синусоидальной нагрузке была выбра-

на типовая гидросхема, в которой гидронасос представляет собой упрощенный независимый гидроэлемент (рис. 3).

Результаты

При работе вырезающего устройства щебнеочистительной машины и наблюдаемом характере отделения стружки с использованием модели *SPH*, характеристика усилия, действующего на один скребок баровой цепи, будет иметь вид, представленный на рис. 4.

Для оценки параметров привода вырезающего устройства при действии нагрузки, полученного характера, было использовано моделирование элементов типового гидравлического привода в программе *FestoHydrolic* и получены зависимости, приведенные таблице.

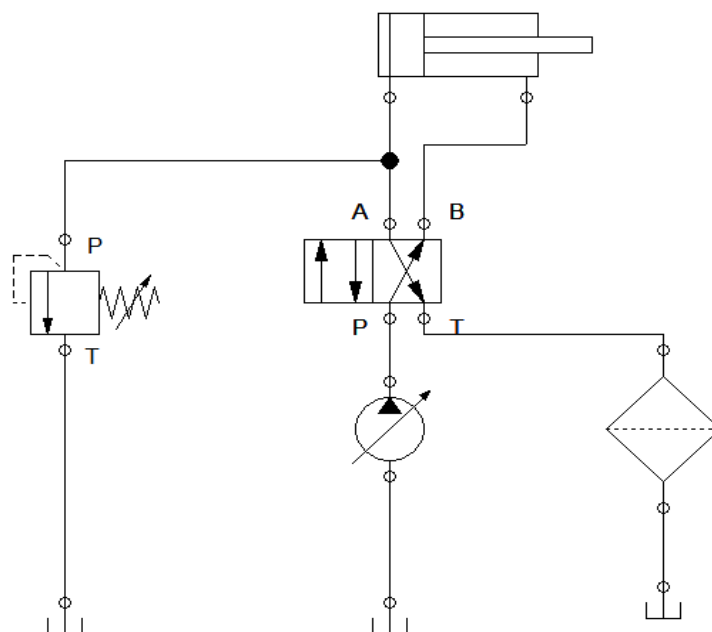


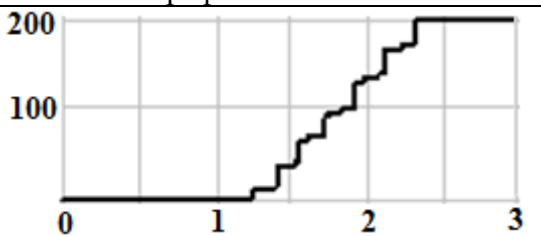
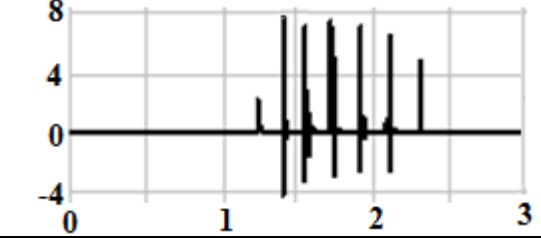
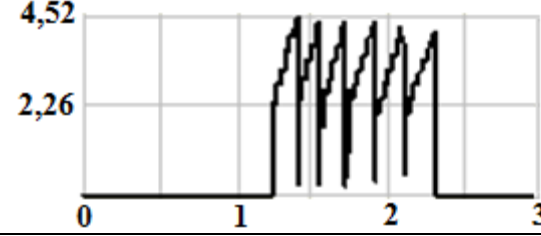
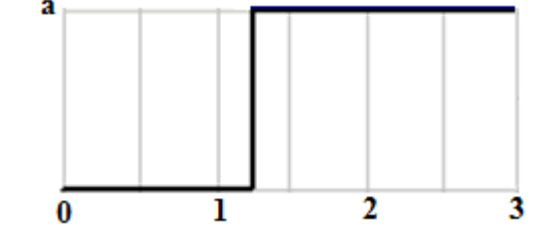
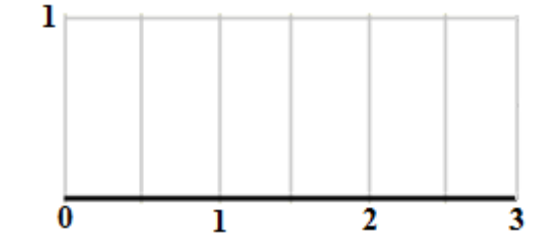
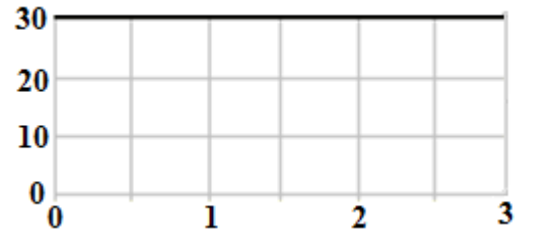
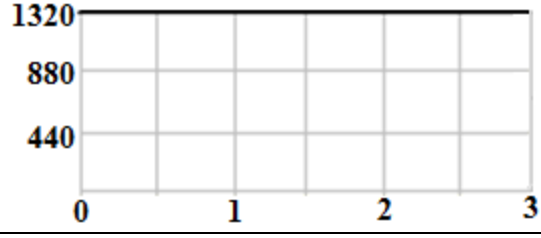
Рис. 3. Гидросхема с элементарным гидроэлементом
Fig. 3. Hydraulic system with an elementary hydraulic element

Таблица

Table

Контроль параметров гидропривода по средствам программы *FestoHydrolic*

Monitoring hydraulic drive parameters using the FestoHydrolic program

Наименование	Параметр	График зависимости
Цилиндр двойного действия	Положение, мм	
Цилиндр двойного действия	Скорость, м/с	
Цилиндр двойного действия	Усилие, кН	
Четырехканальный клапан	Положение	
Клапан сброса давления	Положение	
Клапан сброса давления	Давление, Мпа	
Регулируемый насос	Частота вращения, 1/мин	

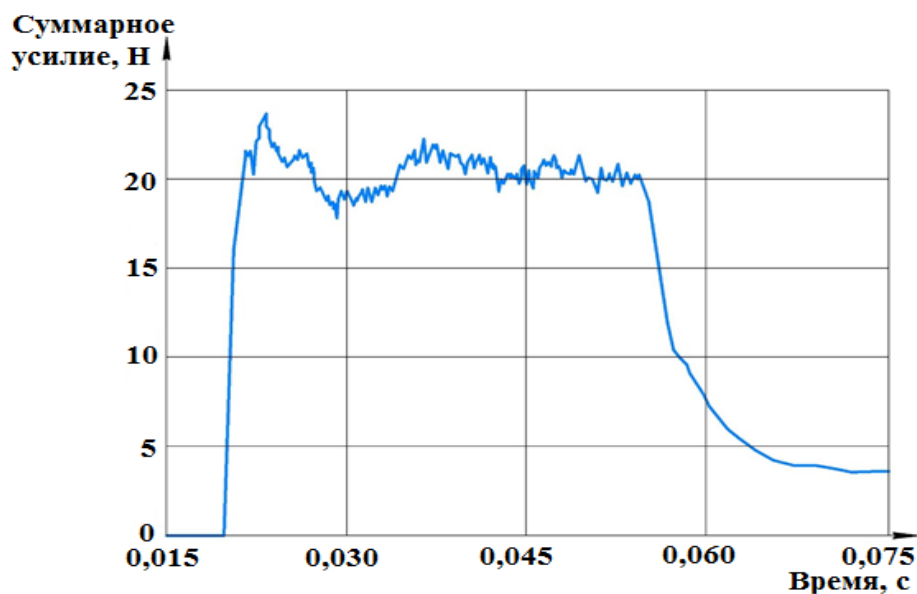


Рис. 4. Усилие, действующее на один скребок баровой цепи
 Fig. 4. Force acting on one bar chain scraper

Заключение

В процессе проведения исследований с использованием предлагаемого метода моделирования было установлено, что характеристика нагрузки, действующей на один скребок, полученной при взаимодействии твердого элемента сеточной структуры с материалом, заданным методом *SPH*, соотносится с синусоидальным характером нагрузки, действующей на гидропривода вырезающего устройства щебнеочистительных машин, который был представлен в исследованиях профессора В.Ф. Ковальского [11, 12]. Кроме того, следует отметить важность использования *SPH*-модели для подтверждения предположений о снижении сил резания при волочении подошвы скребка баровой цепи по балластному слою, так как поверхность, образованная после среза материала, обладает достаточно малыми характеристиками неровности.

Полученные графики характеристик элементарного гидропривода при моделировании в программном комплексе *FestoHydrolic* позволяют сделать вывод о синусоидальности нагрузки, действующей на привод барового устройства щебнеочистительной машины, а также оценить амплитуды изменения параметров привода при работе.

Предлагаемая методика совместного использования программных комплексов *LS-Dyna* и *FestoHydrolic* позволяет оценить характер действующей нагрузки на гидравлический привод вырезающего устройства при изменении характеристик балластного слоя, что возможно использовать для снижения удельной энергоемкости привода щебнеочистительных машин и усовершенствования существующих адаптивных систем мониторинга и управления процессом вырезки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чалова М.Ю. Совершенствование метода расчета параметров скребково-цепного исполнительного устройства щебнеочистительных машин нового поколения: специальность 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук /

- Чалова Маргарита Юрьевна. Москва, 2015. 22 с. – EDN ZPVOFT.
2. Ковальский В.Ф. Анализ и синтез динамических параметров гидропривода скребковой цепи путевых щебнеочистительных машин / В.Ф. Ковальский // Наука и техника транспорта. 2005. № 2. С. 86-94. – EDN HVEXYF.

3. Скутин А.И. Разработка модели возникновения поперечных сил в балластном слое под воздействием внешних нагрузок / А.И. Скутин, М.М. Мыльников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. – № 4(68). С. 220-230. DOI 10.26731/1813-9108.2020.4(68). – EDN QIPEFI.
4. Бидуля А.Л. Компьютерное моделирование железнодорожного балласта в плоской твердотельной постановке / А.Л. Бидуля, Д.Г. Агапов, Д.Ю. Погорелов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2004. – № 1(1). – С. 129-137. – EDN TKNFFR.
5. Агапов Д. Г. Моделирование остаточной осадки балластного слоя / Д. Г. Агапов, А. В. Илюшин, В. А. Показкий // Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – № 1(31). – С. 41-47. – EDN OZDACF.
6. Кибко М. О. Моделирование сплошной среды при помощи метода SPH / М. О. Кибко // Перспективы развития информационных технологий. – 2016. – № 30. – С. 12-23. – EDN WCNVNX.
7. Онищенко Д. А. Исследование особенностей процесса выпавания песчаного грунта киями ледяных образований с помощью трехмерного моделирования методом конечных элементов / Д. А. Онищенко, А. В. Слюсаренко, П. С. Шушпанников // Научно-технический сборник

Вести газовой науки. 2018. № 4(36). С. 180-191. – EDN YYTDVR.

8. Боровиков А. В. Исследование работы гидропривода с помощью программы fluidsим / А. В. Боровиков // Международный студенческий научный вестник. – 2019. – № 5-1. – С. 5. – EDN SANXJM.
9. A. Suwandi N. F. Alamsyah, Dede Lia Zariatn, B. Sulaksono, E. Prayogi; Simulated design of hydraulic systems for fishing deck machinery hydraulic type with FluidSIM® software. AIP Conf. Proc. 6 May 2020; 2227 (1): 020012. <https://doi.org/10.1063/5.0000914>.
10. Yang J., Lu W., Hu Y. et al. Numerical Simulation of Rock Mass Damage Evolution During Deep-Buried Tunnel Excavation by Drill and Blast. Rock Mech Rock Eng 48, 2045–2059 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0663-0>.
11. Ковальский В. Ф. Параметрическая оптимизация гидроприводов строительных и путевых машин / В. Ф. Ковальский, М. Ю. Чалова, Д. С. Федасов // Механизация строительства. 2017. Т. 78, № 2. С. 32-36. – EDN ZRRQLX.
12. Ковальский В. Ф. Методология синтеза оптимальных параметров путевых машин нового поколения / В. Ф. Ковальский, С. В. Ковальский, М. Ю. Чалова // Путь и путевое хозяйство. 2012. № 11. С. 21-24. – EDN PMDKFJ.

REFERENCES

1. Chalova MYu. Improvement of the method for calculating the parameters of the scraper-chain device of the ballast cleaning machines of a new generation [abstract of dissertation]. [Moscow (RF)]; 2015.
2. Kovalsky VF. Analysis and synthesis of dynamic hydraulic drive parameters of the scraper chain of ballast cleaning machines. Science and Technology in Transport. 2005;2:86-94.
3. Skutin AI, Mylnikov MM. Development of a model of transverse forces appearing in a ballast layer under the influence of external loads. Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2020;4(68):220-230. doi: 10.26731/1813-9108.2020.4(68). – EDN QIPEFI.
4. Bidulya AL, Agapov DG, Pogorelov DYU. Computer modeling of railway ballast in a flat solid-state production. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2004;1(1):129-137.
5. Agapov DG, Ilyushin AV, Pokatsky VA. Modeling of residual sediment of the ballast layer. Vestnik Transporta Povolzhya. 2012;1(31):41-47.
6. Kibko MO. Modeling of a continuous medium using SPH method. Perspektivi Razvitiya Informatsionnih Tekhnologii. 2016;30:12-23.
7. Onishchenko DA, Slyusarenko AV, Shushpannikov PS. Study of the peculiarities of plowing sandy soil process with ice keels using three-

dimensional modeling of the finite element method. Scientific and Technical Collection, 2018: Vesti Gazovoi Nauki. 2018;4(36):180-191.

8. Borovikov AV. Study of hydraulic drive operation using FluidSIM. International Student Scientific Bulletin. 2019; 5-1:5.
9. Suwandi A, Alamsyah NF, Dede Lia Zariatn, Sulaksono B, Prayogi E. Simulated design of hydraulic systems for fishing deck machinery hydraulic type with FluidSIM® software. AIP Conf. Proc. 6 May 2020; 2227 (1): 020012. <https://doi.org/10.1063/5.0000914>.
10. Yang J, Lu W, Hu Y. Numerical simulation of rock mass damage evolution during deep-buried tunnel excavation by drill and blast [Internet]. Rock Mech Rock Eng. 2015;48:2045–2059. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0663-0>.
11. Kovalsky, V.F. Parametric optimization of hydropri-waters of construction and track machines/V.F. Kovalsky, M. Yu. Chalova, D.S. Fedasov//Mechanization of construction. 2017. T. 78, NO. 2. S. 32-36. – EDN ZRRQLX.
12. Kovalsky, V.F. Methodology for the synthesis of optimal para-meters of new generation track machines/V.F. Koval-sky, S.V. Kovalsky, M.Yu. Chalova//Path and track ho-zaystvo. 2012. № 11. S. 21-24. – EDN PMDKFJ.

Информация об авторах:

Чалова Маргарита Юрьевна - доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», email: margarita_chalova@mail.ru.

Григорьев Павел Александрович - кандидат технических наук, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», email: grigorievpavel1996@yandex.ru.

Chalova Margarita Yuryevna - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Ground Transport and Technological Means at Russian University of Transport, email: margarita_chalova@mail.ru .

Grigoriev Pavel Aleksandrovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Ground Transport and Technological Means at Russian Transport University, email: grigorievpavel1996@yandex.ru .

Неклюдов Алексей Николаевич - доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», email: neklyudov.an@gmail.com.

Трошко Илья Васильевич - доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», email: troshko_iv@mail.ru.

Neklyudov Aleksey Nikolaevich - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Ground Transport and Technological Means at Russian University of Transport, email: neklyudov.an@gmail.com.

Troshko Ilya Vasilyevich - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Ground Transport and Technological Means at Russian University of Transport, email: troshko_iv@mail.ru .

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 10.09.2023; одобрена после рецензирования 21.09.2023; принята к публикации 27.09.2023. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 10.09.2023; approved after review on 21.09.2023; accepted for publication on 27.09.2023. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.