

УДК (UDC) 625.08

НАГРУЖЕННОСТЬ ОПОРНЫХ КАТКОВ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ
БУЛЬДОЗЕРАLOADING OF THE SUPPORT ROLLERS OF THE CRAWLER MOVER OF
THE BULLDOZERЛесковец И. В.¹, Бойко Г. В.², Федин А. П.²
Leskovets I. V.¹, Boyko G. V.², Fedin A.P.²¹ – Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)² – Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Россия)¹ – Belarusian-Russian University (Mogilev, Belarus)² – Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

Аннотация. В статье представлен анализ исследований, посвященных определению сил, нагружающих элементы гусеничного движителя машин технического сельскохозяйственного и военного назначения. Отмечается, что исследования последних лет направлены на использование комплексного моделирования, позволяющего учитывать влияние систем и механизмов, оказывающих наиболее существенное влияние на исследуемый элемент. Авторами проведены виртуальные эксперименты с моделированием режима копания грунта на основе использования имитационной модели. Полученные результаты позволили установить особенности нагружения отдельных катков, величины средних нагрузок и значения коэффициентов динамичности. Представленные результаты показывают важность этапа функционального проектирования, позволяющего без дорогостоящих экспериментальных исследований установить величины динамических нагрузок, действующих на механизмы проектируемых машин.

Ключевые слова: гусеничный бульдозер, гусеничный движитель, опорный каток.

Дата получения статьи: 13.01.2026
Дата принятия к публикации: 17.05.2026
Дата публикации: 25.06.2026

Сведения об авторах:

Лесковец Игорь Вадимович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Транспортные и технологические машины», Белорусско-Российский университет,
e-mail: leskovets1966@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6411-6809>

Бойко Григорий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, проректор, доцент кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей», Волгоградский государственный технический университет, e-mail: boyko@vstu.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4957-8516>

Федин Алексей Павлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техническая

Abstract. The article presents an analysis of studies devoted to the determination of forces loading the elements of the caterpillar propulsion of technical agricultural and military vehicles. It is noted that research in recent years has been aimed at using integrated modeling, which allows taking into account the influence of systems and mechanisms that have the most significant impact on the element under study. The authors conducted virtual experiments with modeling the regime of soil digging based on the use of a simulation model. The results obtained made it possible to establish the loading characteristics of individual rollers, the values of average loads and the values of dynamic coefficients. The presented results show the importance of the functional design stage, which makes it possible to determine the values of dynamic loads acting on the mechanisms of the designed machines without expensive experimental studies.

Keywords: crawler bulldozer, crawler mover, roller bearing.

Date of manuscript reception: 13.01.2026
Date of acceptance for publication: 17.05.2026
Date of publication: 25.06.2026

Authors' information:

Igor V. Leskovets – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department “Transport and Technological Machines” at Belarusian-Russian University, e-mail: leskovets1966@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6411-6809>

Grigory V. Boyko – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector, Associate Professor of the Department “Operation and Maintenance of the Vehicles” at Volgograd State Technical University, e-mail: boyko@vstu.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4957-8516>

Alexey P. Fedin – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor, of the Depart-

эксплуатация и ремонт автомобилей», Волгоградский государственный технический университет, e-mail: falexey2005@yandex.ru.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0495-0516>

ment “Operation and Maintenance of the Vehicles”, Volgograd State Technical University, e-mail: falexey2005@yandex.ru.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0495-0516>

1. Введение

Анализ современного состояния исследований в области определения и прогнозирования нагрузок на опорные катки позволяет выявить основные тренды и технологические подходы, преобладающие в данной области.

Одним из основных направлений является переход от анализа работы отдельных механизмов и систем к комплексному моделированию на основании системного подхода. Авторы современных исследований переходят от упрощённых расчётных схем к созданию высокодетализированных цифровых двойников. Фундаментальный обзор [1] определяет общие направления, подчёркивая, что точная оценка нагрузок невозможна без учёта нелинейного взаимодействия в системе «двигатель — подвеска — грунт». Это направление реализуется через два основных взаимодополняющих подхода. Первый – это многомассовое динамическое моделирование (multi-body dynamic MBD), которое стало стандартом для анализа динамики машины в целом. Работы [2, 3] показывают применение MBD для тяжёлой техники, в том числе гусеничной, позволяя количественно связать микропрофиль пути и эксплуатационные режимы с амплитудно-частотными характеристиками нагрузок на катки. В русскоязычных исследованиях аналогичный системный подход прослеживается в модели «трактор-грунт» [4] и в построении спектров циклических нагрузок на имитационной модели [5]. Второй подход – это углублённый анализ отдельных явлений и компонентов с помощью метода конечных элементов (МКЭ). В то время авторы [6] используют МКЭ для классического анализа напряженно-деформированного состояния самого катка, наиболее прогрессивные работы интегрируют МКЭ (FEA) в системные расчёты. Например, в исследованиях [7] применяется ко-симуляция MBD-FEA для передачи динамических сил прямо в модель прочности кронштейна, а авторы [8] разрабатывают высоко-

точные нелинейные модели контакта для детального изучения взаимодействия в паре «каток-гусеница».

Во многом направления исследований определяются типами исследуемой техники, что определяет специфику нагрузочных режимов и приоритеты анализа. В области военной и высокоскоростной техники исследования [9,10] фокусируются на экстремальных режимах, инерционных нагрузках при манёврах и усталостной долговечности в условиях высоких динамических перегрузок. Аналогичный прикладной военный контекст, но с акцентом на экспериментальное определение нагрузочных режимов, присутствует у авторов [11].

Для тяжёлых машин, таких как карьерные самосвалы и краны, критически важны методики измерения и учёт уникальных рабочих циклов. Исследования [12] предлагают методику натуральных измерений для горного самосвала. Авторы [13] исследуют актуальное направление адаптации методик для беспилотных платформ, чьи алгоритмы управления формируют уникальный спектр нагрузок. Исследования в области сельскохозяйственной техники, такие как работы [14, 4], сконцентрированы на взаимодействии с деформируемым грунтом. Их цель – не только анализ прочности, но и оптимизация энергозатрат и минимизация вредного уплотнения почвы, что позволяет рассмотреть в работе гусеничной техники экологические аспекты. Значительная часть публикаций посвящена не просто констатации нагрузок, а их использованию для инженерных задач повышения надёжности и эффективности. Важным инструментом становится построение и анализ спектров нагружения (блок-гистограмм) [15, 5], что позволяет применять методы расчёта усталости для прогнозной оценки долговечности. Работа [16] представляет полноценный цикл оптимизационного проектирования, где с помощью метода поверхности отклика (RSM) геометрия катка оптимизируется для снижения пиковых на-

пряжений. Это напрямую соотносится с рекомендациями по оптимизации, которые дают [6] на основе своего анализа МКЭ.

Авторы исследований [13], предлагают диагностику усталости по кинематическим параметрам во время стендовых испытаний, что указывает на тренд перехода от констатации разрушения к прогнозированию и мониторингу состояния узла. Наблюдается соответствие между расчётными и экспериментальными методами. Практически все авторы, предлагающие сложные модели подчёркивают необходимость их валидации натурными данными. Российский исследователь делает значительный вклад в разработку методик таких экспериментов: Симонов [11, 12] детально описывают организацию полигонных испытаний и оснащение датчиками массивных катков в жёстких условиях. Авторы [17] рассматривают методику расчёта для критического подшипникового узла, адаптируя общепринятые стандарты к специфике гусеничного движителя.

Анализ показывает, что современные исследования нагрузок на опорные катки носят междисциплинарный характер [18 - 20], объединяя теорию машинной динамики, механики грунтов, контактного взаимодействия и усталости материалов. Основным трендом является отказ от изолированного рассмотрения компонента в пользу его анализа как части сложной нелинейной системы «машина-среда». Англоязычные публикации в большей степени ориентированы на фундаментальные методологические разработки (модели контакта, оптимизационные алгоритмы) и анализ специфической техники (высокоскоростной, беспилотной). Русскоязычные работы демонстрируют сильную прикладную направленность, глубокую проработку экспериментальных методик и фокус на традиционных секторах — сельскохозяйственном, карьерном и специальном (военном) машиностроении. Проанализированные публикации взаимно дополняют друг друга, формируя комплексное представление о современных подходах к обеспечению прочности, долговечности и эффективности гусеничных движителей.

2. Постановка задачи

На стадии функционального проектирования гусеничных бульдозеров важной задачей является определение нагрузок на опорные катки машины с целью дальнейшего использования результатов расчетов для определения прочности и надежности элементов ходового оборудования.

2. Разработанные модели и методы

Авторами предлагается использовать имитационную модель гусеничного бульдозера для расчета характеристик подвесок при работе в режиме копания грунта. Имитационная модель основана на математической и динамической моделях, разработанных на основе системного подхода, который учитывает опорную поверхность, разрабатываемую среду, рабочее оборудование, раму, гусеничный движитель, трансмиссию, двигатель и действия оператора. Динамическая модель, представляющая взаимодействие опорной поверхности с траками и опорными катками представлена на рис. 1.

В локальной системе координат гусеничного движителя каток может перемещаться только в вертикальном направлении, т.к. рассматривается свечная подвеска. Таким образом, перемещение катка рассматривается в направлении оси ординат в относительной системе координат движителя и описывается уравнением

$$\frac{dy_k}{dt^2} m_k = (C_{np} \Delta y_{mk} - r_{np} \frac{dy_{mk}}{dt} - C_k \Delta L_{np} + r_k \frac{dy_{mk}}{dt} - m_k g), \quad (1)$$

где m_k — масса колеса; C_{np} — приведенный коэффициент жесткости трака и катка; Δy_{mk} — взаимное перемещение трака и катка; r_{np} — приведенный коэффициент демпфирования трака и катка; ΔL_{np} — величина деформации пружины подвески катка.

На рис. 1 представлены: C_k — коэффициент жесткости подвески катка; r_k — коэффициент демпфирования подвески катка; G_k — сила тяжести катка; R_k — радиус катка; R_{mk} — сила взаимодействия трака и катка; Δl —

расстояние от центра тяжести трака до точки взаимодействия его с катком; l – длина трака; h – высота трака; $G_{\text{трк}}$ – сила тяжести трака; $\varphi_{\text{трк}}$ – угол наклона трака относительно локальной системы координат трака.

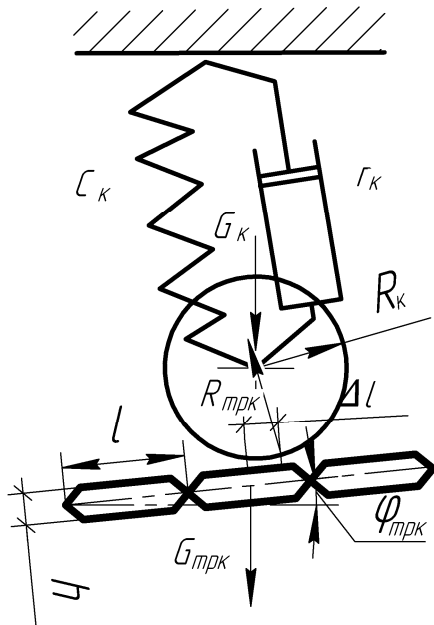


Рис. 1 Динамическая модель опорного катка

На основе математических моделей механизмов и систем бульдозера авторами разработана имитационная модель бульдозера в виде программного обеспечения, позволяющая получить параметры и характеристики исследуемой машины с помощью имитации рабочего процесса.

4. Результаты и их анализ

В качестве модели для проведения виртуальных экспериментов принят прототип бульдозера массой 13 т. Количество опорных катков – пять, отсчет катков начинается слева в декартовой системе координат, расстояние между первым и вторым катками 0,58 м, вторым и третьим 0,68 м, третьим и четвертым 0,54 м, четвертым и пятым 0,58 м диаметр опорного катка – 0,4 м, коэффициент жесткости подвески 80000 Н/м, коэффициент демпфирования подвески 8000 Н·м/с, длина пружины в свободном состоянии 0,4 м, ход пружины 0,2 м, длина пружины в механизме подвески 0,356 м, масса катка 64 кг, коэффи-

циент радиальной жесткости катка 200000 Н·м, коэффициент демпфирования 2000 Н·м/с.

Вычислительный эксперимент проводился для режима копания грунта второй категории с параметрами: угол внутреннего трения 28° угол трения грунта по металлу 26° , угол наклона призмы волочения к горизонту 35° , удельное сцепление грунта ненарушенной структуры составляет 25 кПа, удельное сцепление грунта в призме волочения 0,2 кПа, удельное сопротивление резанию 48 кПа, плотность грунта на рабочем органе и в призме волочения 1200 кг/м^3 Эксперименты проводились для толщин стружек 100, 150 и 200 мм.

Перед проведением вычислительного эксперимента программное обеспечение проводит расчет начальных параметров, который включает выбор заранее определенных механизмов и систем из соответствующей база данных, формирование геометрических характеристик бульдозера, построение визуального изображения имитационной модели, формирование гусеничного обвода, определение начальных параметров подвесок опорных и поддерживающих катков, расчет натяжения гусеничного обвода, сравнение динамических параметров со статическими, определенными по известным, апробированным статическим методикам, определение геометрических координат и угла стабилизации машины относительно глобальной системы координат.

Условия проведения экспериментов: положение рычага акселератора 80%, включена передача, соответствующая суммарному передаточному числу трансмиссии 175, время полного включения сцепления 1 с, после начала движения бульдозер разгоняется до скорости 1 м/с, после чего начинается опускание рабочего оборудования до образования заданной толщины стружки, призма волочения набирается до полной высоты отвала, копание продолжается в течение 10 с.

Во время проведения экспериментов рассчитывались характеристики сил возникающих на всех катках бульдозера.

Полученные характеристики представлены на рис. 2 - 4. На рис. 2 представлены ха-

рактические характеристики сил, действующих в подвесках колес во время процесса копания при толщине стружки 100 мм.

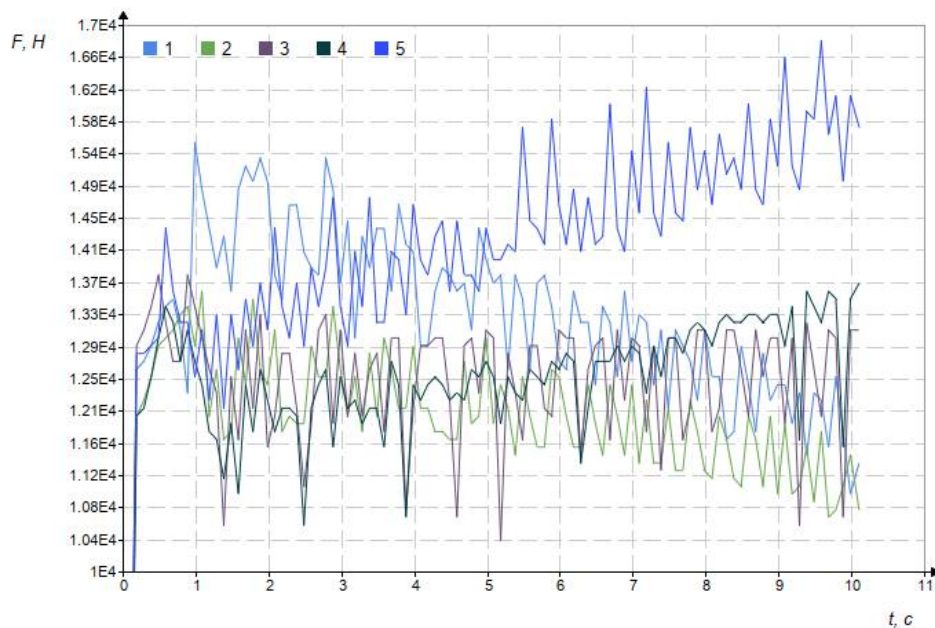


Рис. 2. Характеристики сил, действующих в подвесках опорных катков при толщине стружки 100 мм

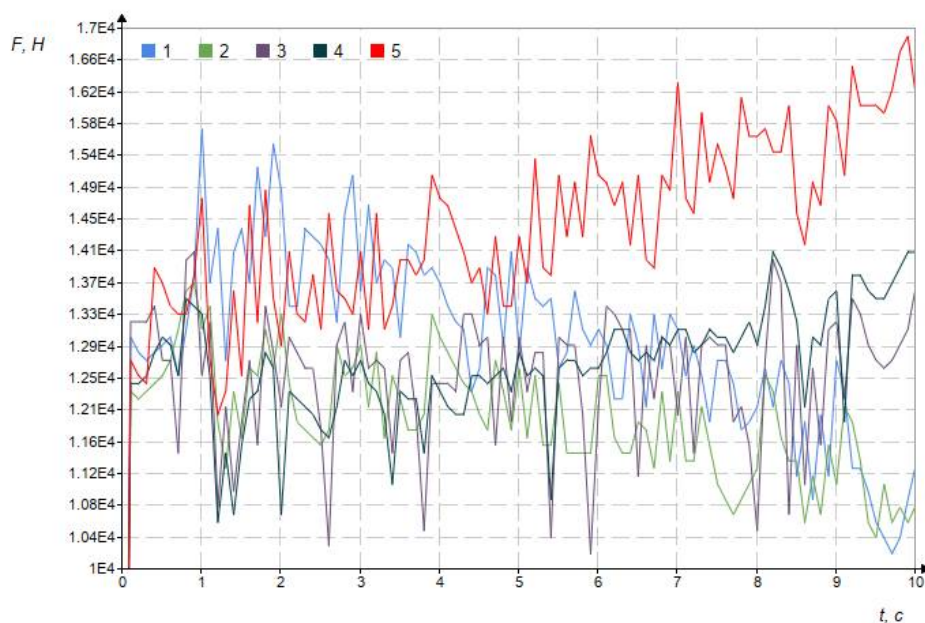


Рис. 3 Характеристики сил, действующих в подвесках опорных катков при толщине стружки 150 мм

Линией 1 отмечена характеристика сил на первом катке, линией 2 – на втором, 3- на третьем, для четвертого и пятого катков номера линий соответствующие.

Из рисунка видно, что силы, действующие на катки, находятся в зависимости от

времени копания, и соответственно, от высоты призмы волочения.

На катках с номерами один и два силы, действующие на катки, снижаются, т.к. во время копания в исследуемом режиме отвал бульдозера затягивается в грунт, и реакции

соответственно распределяются между катками, расположенными с противоположной стороны бульдозера.

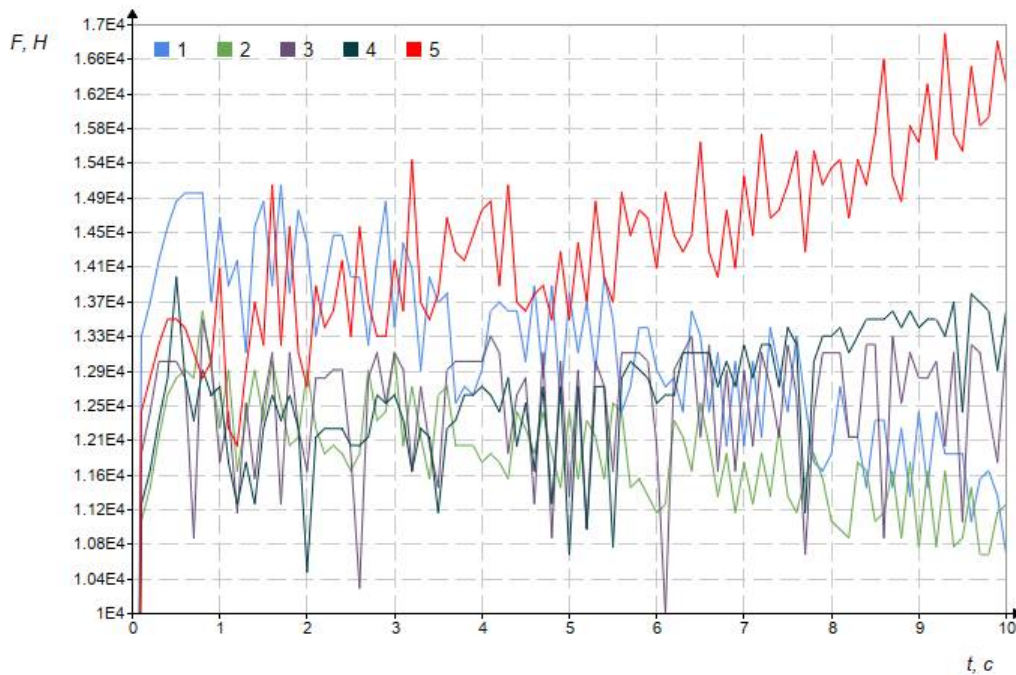


Рис. 4 Характеристики сил, действующих в подвесках опорных катков при толщине стружки 200 мм

Аналогичные процессы происходят при копании грунта с толщинами стружек 150 и 200 мм, результаты вычислительных экспериментов с данными толщинами стружек представлены на рис. 3 и 4.

Анализ рассмотренных экспериментов показывает, что во всех случаях нагрузки на ближний к отвалу каток увеличиваются во время транспортирования призмы волочения. Это говорит о том, что в процессе копания происходит самозатягивание отвала. Величины сил, нагружающих близлежащее к отвалу колесо, увеличиваются от 13 до 15,8 кН в первом эксперименте, до 16,2 – во втором и третьем экспериментах.

Во всех исследованных случаях наименее нагруженными являются первые и вторые катки, при отсчете слева в декартовой системе координат. Все катки испытывают динамическое нагружение. В процессе движения бульдозера вместе с изменением средних величин сил, нагружающих катки, присутствуют негармонические непериодические ко-

лебания. Каждый каток испытывает нагружения индивидуального характера с разной амплитудой и периодами колебаний. При проведении конструкторских расчетов в данном случае можно использовать статистические характеристики, в виде математического ожидания и коэффициентов динамичности.

Статистические характеристики сил, нагружающих катки, представлены в табл. 1.

Анализ результатов вычислительных экспериментов, представленных в табл. 1 показывает, что наибольшие нагружения испытывают катки расположенные ближе к рабочему оборудованию бульдозера.

Наибольшие коэффициенты динамичности приходятся на первый и последний катки.

Катки, расположенные в середине опорного контура, испытывают меньшие динамические нагрузки.

Таблица 1

Статистические параметры сил, нагружающих опорные катки

Параметр	Номер катка				
	1	2	3	4	5
толщина стружки 100 мм					
Максимум	15453,37	13578,72	13829,65	13662,12	16806,19
Минимум	11037,24	10728,65	10414,80	10635,11	12121,95
Среднее арифметическое	13312,95	12042,23	12512,51	12524,98	14308,18
Коэффициент динамичности	1,40	1,27	1,33	1,28	1,39
толщина стружки 150 мм					
Максимум	15726,49	13662,52	14093,07	14094,04	16859,81
Минимум	10179,20	10357,82	10230,71	10590,66	12026,01
Среднее арифметическое	12999,46	11948,47	12516,75	12647,52	14440,48
Коэффициент динамичности	1,54	1,32	1,38	1,33	1,40
толщина стружки 200 мм					
Максимум	15114,88	13609,79	13467,66	14034,90	16870,08
Минимум	10729,28	10297,39	10049,62	10514,13	12012,76
Среднее арифметическое	13131,64	11882,45	12485,75	12632,61	14447,09
Коэффициент динамичности	1,41	1,32	1,34	1,33	1,40

5. Заключение

Проведенные исследования показывают, что определение на стадии функционального проектирования нагрузок на системы и механизмы бульдозера, в том числе на опорные катки является важным этапом, предшествующим расчетам на прочность, усталость и долговечность. Использование при расчетах сил, соответствующих статическому нагружению не в полной мере отвечает реальным нагрузкам. Применение коэффициентов динамичности также не в полной мере отвечает картине нагрузок на опорные катки, которая возникает в процессе копания грунта отвалом бульдозера. Имитационные эксперименты, моделирующие процесс копания грунта и учитывающие взаимодействие систем и механизмов бульдозера, которые оказывают значительное влияние на выходные характеристики машины, показывают, что опорные катки испытывают одинаковые по характеру, но разные по величине нагрузки. Катки, расположенные ближе к рабочему оборудованию, испытывают более высокие по средней величине, нагрузки, которые действуют с меньшими коэффициентами динамичности. Средние значения сил нагружения отлича-

ются в зависимости от расположения катков почти на 10%. Наибольшие нагружения испытывают катки, расположенные непосредственно возле рабочего оборудования. На втором месте по величине нагружения находятся катки, расположенные максимально далеко от рабочего оборудования. Т.е. самыми нагруженными являются катки, расположенные по краям гусеничного обвода. Расположенные в середине катки испытывают меньшие нагружения, причем меньшими являются не только средние величины, но и коэффициенты динамичности.

Третий и четвертый каток, которые расположены в середине гусеничного обвода, нагружены примерно одинаково. Средние величины нагружающих эти катки реакций незначительно отличаются от статических нагрузок, а величины коэффициентов динамичности изменяются от 1,28 до 1,33.

Представленные результаты имеют интерес для проектирования механизмов бульдозера, т.к. необоснованное применение коэффициентов динамичности может привести либо к недостаточной прочности проектируемых конструкций, либо к необоснованному увеличению массы механизмов, и, соответственно, стоимости машин в целом.

Следует отметить, что конкретные величины средних и динамических нагружающих сил, полученных в результате проведенных экспериментов, в других случаях могут отличаться от полученных при использованных при подготовке представленных материалов данных.

Кроме выше сказанного представленные результаты представляют интерес, т.к. полу-

чены на основе имитационных экспериментов, что значительно сокращает стоимость проектирования, так как не требуют дорогостоящих практических экспериментов и требуют значительно меньшего количества временных ресурсов, чем при экспериментальных исследованиях.

Список литературы

1. Wong J.Y., Huang W. "Paths to the Future": The Evolution of Track Systems and the Analysis of Roadwheel Loads // *Journal of Terramechanics*. 2020. № 91. pp. 1-15.

2. Liu C., Zhang J., Wang P. Dynamic Load Prediction for Track Rollers of Heavy Tracked Vehicles Based on Multi-body Dynamics Simulation // *International Journal of Vehicle Design*. 2022. Vol. 88, № 1-4. pp. 64-83.

3. Ma Z., Li Y., Liu X. Experimental and Numerical Study on the Dynamic Load Characteristics of Track Rollers for a Large Crawler Crane // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021. Vol. 35, № 8. pp. 3465-3475.

4. Запрыгаев В.В., Филь А.А. Определение нагрузок на подвеску и опорные катки гусеничного трактора при движении по микрорельефу // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. № 7. С. 41-46.

5. Федоренко Р.В., Лебедев А.Т. Оценка долговечности опорных катков с учетом спектра циклических нагрузок, полученного при имитационном моделировании // *Тяжелое машиностроение*. 2021. № 5-6. С. 35-40.

6. Корж А.А., Волков А.В. Исследование НДС опорного катка методом конечных элементов // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 306-315. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-306-315

7. Guo L., He R., Chen W. Dynamic Stress Analysis of Track Roller Bracket of Mining Crawler Transporter Based on Co-simulation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1676. P. 012060.

8. Serban R., Freeman J.S., Taylor R.L. A High-Fidelity Contact Model for Tracked Vehicle Simulation: Application to Roller Load Analysis // *Nonlinear Dynamics*. 2023. Vol.

References

1. Wong J.Y., Huang W. "Paths to the Future": The Evolution of Track Systems and the Analysis of Roadwheel Loads. *Journal of Terramechanics*, 2020, No. 91, pp. 1-15.

2. Liu C., Zhang J., Wang P. Dynamic Load Prediction for Track Rollers of Heavy Tracked Vehicles Based on Multi-body Dynamics Simulation. *International Journal of Vehicle Design*, 2022, Vol. 88, No. 1-4, pp. 64-83.

3. Ma Z., Li Y., Liu X. Experimental and Numerical Study on the Dynamic Load Characteristics of Track Rollers for a Large Crawler Crane. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, Vol. 35, No. 8, pp. 3465-3475.

4. Zapryagaev V.V., Fil A.A. Opredelenie nagruzok na podvesku i opornye katki gusenichnogo traktora pri dvizhenii po mikorelefu. *Traktory i selkhoz mashiny*, 2020, No. 7, pp. 41-46. (In Russian)

5. Fedorenko R.V., Lebedev A.T. Otsenka dolgovechnosti opornykh katkov s uchetom spektra tsiklicheskikh nagruzok, poluchennogo pri imitatsionnom modelirovanii. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2021, No. 5-6, pp. 35-40. (In Russian)

6. Korzh A.A., Volkov A.V. Issledovanie NDS opornogo katka metodom konechnykh elementov. *Nauka i tekhnika*, 2019, Vol. 18, No. 4, pp. 306-315.

DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-306-315>. (In Russian)

7. Guo L., He R., Chen W. Dynamic Stress Analysis of Track Roller Bracket of Mining Crawler Transporter Based on Co-simulation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1676, P. 012060.

8. Serban R., Freeman J.S., Taylor R.L. A High-Fidelity Contact Model for Tracked Vehicle Simulation: Application to Roller Load

111, № 1. pp. 717-738.

9. Rubinstein D., Hitron R. A Detailed Model for Estimation of Loads Acting on a High-Speed Tracked Vehicle Suspension System // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2021. Vol. 235, № 5. pp. 1221-1233.

10. Dhasarathan C., Ganesan V. Fatigue Life Assessment of Track Roller Assembly in Military Tracked Vehicles Using Finite Element Analysis and Strain-Life Approach // *Engineering Failure Analysis*, 2023. № 148. P. 107223.

11. Симонов В.Г. Исследование нагрузочных режимов опорных катков гусеничного движителя специальной техники на основе полигонных испытаний // *Строительные и дорожные машины*. 2019. № 10. С. 18-24.

12. Павлов В.А., Сергеев Н.И., Тихонов А.А. Методика экспериментального определения динамических нагрузок на опорные катки горного самосвала // *Горное оборудование и электромеханика*. 2021. № 5 (156). С. 25-31.

13. Ткаченко И.В., Белов Д.А. Анализ результатов стендовых испытаний опорных катков на многоцикловую усталость с использованием метода диагностики по кинематическим параметрам // *Вести в машиностроении*. 2024. № 3. С. 44-49.

14. Mazzù A., Formentini M., Boschetti G. A Multibody Approach for the Study of Track-Terrain Interaction and Its Effect on Roller Loads in Agricultural Tracked Vehicles // *Biosystems Engineering*, 2019. № 188. pp. 276-289.

15. Kot T., Novák P. Measurement and Evaluation of Load Spectra on Undercarriage Components of Unmanned Ground Tracked Vehicle // *Measurement*, 2024. № 225. P. 114067.

16. Park W., Lee J., Choi B. Design Optimization of Track Roller for Minimizing Dynamic Loads Using Response Surface Method // *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022. Vol. 65. № 3. P. 85.

17. Сапрон С.М., Медведев А.Л. Расчет эквивалентной нагрузки на подшипники

† Analysis. *Nonlinear Dynamics*, 2023, Vol. 111, No. 1, pp. 717-738.

† 9. Rubinstein D., Hitron R. A Detailed Model for Estimation of Loads Acting on a High-Speed Tracked Vehicle Suspension System. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2021, Vol. 235, No. 5, pp. 1221-1233.

† 10. Dhasarathan C., Ganesan V. Fatigue Life Assessment of Track Roller Assembly in Military Tracked Vehicles Using Finite Element Analysis and Strain-Life Approach. *Engineering Failure Analysis*, 2023, No. 148, p. 107223.

† 11. Simonov V.G. Issledovanie nagruzochnykh rezhimov opornykh katkov gusenichnogo dvizhitelya spetsial'noy tekhniki na osnove poligonnykh ispytaniy. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2019, No. 10, pp. 18-24. (In Russian)

† 12. Pavlov V.A., Sergeev N.I., Tikhonov A.A. Metodika eksperimental'nogo opredeleniya dinamicheskikh nagruzok na opornye katki gornogo samosvala. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* 2021, No. 5 (156), pp. 25-31. (In Russian)

† 13 Tkachenko I.V., Belov D.A. Analiz rezul'tatov stendovykh ispytaniy opornykh katkov na mnogotsiklovuyu ustalost' s ispol'zovaniem metoda diagnostiki po kinematicheskim parametram. *Vesti v mashinostroenii*, 2024, No. 3, pp. 44-49. (In Russian)

† 14. Mazzù A., Formentini M., Boschetti G. A Multibody Approach for the Study of Track-Terrain Interaction and Its Effect on Roller Loads in Agricultural Tracked Vehicles. *Biosystems Engineering*, 2019, No. 188, pp. 276-289.

† 15 Kot T., Novák P. Measurement and Evaluation of Load Spectra on Undercarriage Components of Unmanned Ground Tracked Vehicle. *Measurement*, 2024, No. 225, p. 114067.

† 16. Park W., Lee J., Choi B. Design Optimization of Track Roller for Minimizing Dynamic Loads Using Response Surface Method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, Vol. 65, No. 3, P. 85.

† 17. Sapron S.M., Medvedev A.L. Raschet ekvivalentnoy nagruzki na podshipniki

опорных катков гусеничного транспортера в различных режимах эксплуатации // Проблемы прочности и ресурса машин и конструкций. 2020. № 1. С. 112-120.

18. Петров А.И., Соколов Д.А. Моделирование контактного взаимодействия опорного катка с гусеничной лентой для оценки нагрузок // Транспортные системы и технологии. 2022. Т. 8, № 2. С. 89-101. DOI: 10.17816/transsyst20228289-101

19. Андреев П.С., Григорьев М.А. Численное исследование влияния скорости движения на распределение давления в системе «опорный каток – гусеничная лента – грунт» // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 1 (754). С. 52-63.

20. Морозов И.В., Кузнецов К.А. Разработка методики расчёта пиковых ударных нагрузок на опорные катки гусеничного шасси при преодолении единичных препятствий // Вестник Брянского государственного технического университета. 2023. № 2 (95). С. 33-41.

opornykh katkov gusenichnogo transporter v razlichnykh rezhimakh ekspluatatsii. *Problemy prochnosti i resursa mashin i konstruktsiy*, 2020, No. 1, pp. 112-120. (In Russian)

18. Petrov A.I., Sokolov D.A. Modelirovanie kontaktnogo vzaimodeystviya opornogo katka s gusenichnoy lentoy dlya otsenki nagruzok. *Transportnyye sistemy i tekhnologii*, 2022, Vol. 8, No. 2, pp. 89-101.

DOI: <https://doi.org/10.17816/transsyst20228289-101>. (In Russian)

19. Andreev P.S., Grigorev M.A. Chislennoe issledovanie vliyaniya skorosti dvizheniya na raspredelenie davleniya v sisteme «opornyy katok – gusenichnaya lenta – grunt». *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2023, No. 1 (754), pp. 52-63. (In Russian)

20. Morozov I.V., Kuznetsov K.A. Razrabotka metodiki rascheta pikovykh udarnykh nagruzok na opornye katki gusenichnogo shassi pri preodolenii edinichnykh prepyatstviy. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2023, No. 2 (95), pp. 33-41. (In Russian)