

Научная статья
УДК 625.08:519.876.5
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-28-39>
EDN: YCKMUF



ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗОК НА ВЕДУЩИХ КОЛЕСАХ ГУСЕНИЧНОГО БУЛЬДОЗЕРА

И.В. Лесковец¹ ✉, А.А. Грачев²

¹Белорусско-Российский университет,
г. Могилев, Республика Беларусь

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ ответственный автор
leskovets1966@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье отмечается, что при проведении прочностных расчетов сборочных единиц и деталей бульдозеров, в том числе ведущих колес, используются коэффициенты динамичности. Анализ результатов исследований других авторов показывает, что изучение динамических процессов, проходящих во время движения гусеничных машин разного назначения, вызывает большой интерес.

Материалы и методы. Для анализа динамических нагрузок на ведущие колеса во время копания грунта авторами предлагается использовать динамическую, математическую и имитационную модели бульдозера, разработанные на основе системного подхода, включающие двигатель трансмиссию, движитель рабочего оборудования, внешнюю среду. С использованием программного обеспечения, разработанного на основе математических моделей и позволяющего имитировать движение бульдозера, заглупление отвала, увеличение толщины стружки, рост призмы волочения, транспортировку грунта, проведен ряд численных экспериментов, имитирующих движение машины в режиме копания грунта с разными толщинами стружки.

Результаты. Результаты имитационных экспериментов, моделирующих процесс копания с разными толщинами стружки, показывают, что значения коэффициентов динамичности достигают 20% при меньших толщинах стружки и, соответственно, более низком уровне нагружения по сравнению с более высокими толщинами стружки, когда значения коэффициентов динамичности не превышают трех процентов при более высоком уровне нагружения.

Обсуждение и заключение. Таким образом, при прочностных расчетах ведущих колес гусеничного движителя бульдозера и максимальных нагрузках на рабочем оборудовании использование коэффициентов динамичности не требуется в связи с тем, что расчеты на прочность предполагают использование коэффициентов запаса, которые составляют около 20% от статических нагрузок. Необоснованное использование высоких значений коэффициентов динамичности приводит к увеличению металлоемкости конструкций, и, соответственно, увеличиваются стоимость проектируемой техники.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бульдозер, гусеничный движитель, динамические нагрузки, математическая модель, имитационная модель

Статья поступила в редакцию 27.11.2025; одобрена после рецензирования 16.12.2025; принята к публикации 16.02.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Лесковец И.В., Грачев А.А. Имитационная модель формирования нагрузок на ведущих колесах гусеничного бульдозера // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 1. С. 28-39. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-28-39>

© Лесковец И.В., Грачев А.А., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-28-39>
EDN: YCKMUF

SIMULATION MODEL OF THE FORMATION OF LOADS ON THE DRIVING WHEELS OF A TRACKED BULLDOZER

Igor' V. Leskovets¹ ✉, Aleksey A. Grachev²

Interstate Educational Institution of Higher Education

¹«Belarusian-Russian University»,

Mogilev, Republic of Belarus

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

St. Petersburg, Russia

✉ corresponding author

leskovets1966@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The scientific article notes that dynamic coefficients are used for strength calculations of bulldozer units and parts, including the driving wheels. The analysis of the research results shows that the studying of dynamic processes appearing during the movement of various types of tracked vehicles evokes great interest.

Materials and Methods. To analyze the dynamic loads on the driving wheels during cutting and pushing soil, the authors proposed to use dynamic, mathematical, and simulation models of bulldozer. They are based on a comprehensive systemic approach and include the engine, transmission, tracks, working equipment, and the external environment. Using specialized software based on mathematical models and capable to simulate bulldozer movement, blade penetration, chip thickness increase, drag prism growth, and soil transportation, a series of numerical experiments have been conducted simulating the machine operation while moving soil with varying chip thickness.

Results. The results of simulation experiments modeling the cutting and pushing soil process with different chip thickness show that working with a smaller chip thickness (which implies a relatively low load level), the coefficients of dynamism reach significant values - up to 20%. Conversely, when working with a larger chip thickness and, accordingly, under a high load level, the values of these coefficients are insignificant - no more than 3%.

Discussions and Conclusions. Therefore, performing strength calculations for driving wheels of bulldozer caterpillar tracks and maximum loads on the working equipment, the use of dynamic factors is not needed, as strength calculations include safety factors that make approximately 20% of the static loads. Unjustified use of high dynamic coefficients leads to the increase in the metal consumption of the structure, and, as a result, to the increase in the cost of the designed equipment.

KEYWORDS: bulldozer, tracks, dynamic loads, mathematical model, simulation model

The article was submitted: November 27, 2025; approved after reviewing: December 16, 2025; accepted for publication: February 16, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Leskovets I.V., Grachev A.A. Simulation model of the formation of loads on the driving wheels of a tracked bulldozer. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (1): 28-39. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-1-28-39>

© Leskovets Igor' V., Grachev Aleksey A., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование гусеничных бульдозеров было и остается сложной технической задачей. Обеспечение необходимой силы тяги по движителю и по двигателю требуется для реализации мощности двигателя в полном объеме при проведении земляных работ. Реализация требуемой силы тяги обеспечивается ведущими колесами, которые испытывают значительные нагрузки. Определение статических моментов на колесах производится на основании известных методик и не представляет сложности. Как правило, при применении статических зависимостей в динамических расчетах используют коэффициенты динамичности. При движении гусеничного бульдозера различные детали и механизмы гусеничного обвода испытывают разные динамические нагрузки. Значения коэффициентов динамичности для разных частей гусеничного движителя могут иметь разные величины и требуют обоснования.

Исследования в данной области проводятся многими учеными в разных организациях, что говорит об их важности и актуальности. Автором фундаментального учебника¹ рассматриваются основы динамики гусеничных машин, представлены ключевые теории взаимодействия движителя с грунтом, включая методику для расчета тяги и сопротивления качению. Для многих исследований это издание является основой для формирования новых научных подходов.

Авторами [1] проведены расчетно-экспериментальные исследования, которые позволили установить особенности динамических процессов в гусеничном движителе, выявить основные закономерности процесса формирования поперечных колебаний, их зависимости от конструктивных параметров обвода и различных эксплуатационных факторов.

Авторами [2] представлено исследование, посвященное совершенствованию математической модели динамики гусеничного движителя специальной машины. Особенностью исследования является учет реального разброса технологических параметров и износа элементов гусеницы (звеньев, пальцев, втулок), что делает модель более адекватной реальным эксплуатационным условиям. Практическая ценность работы заключается в том, что она предоставляет инструмент для более точного

прогнозирования нагрузок и оптимизации конструкций гусениц с учетом неизбежных производственных допусков и износа.

В работе [5] проведены исследования наезда первого опорного катка на неровность. Практика исследований показывает, что именно первый каток инициирует силовое воздействие на всю последующую цепь элементов движителя, определяя динамику нагружения. Установлено, что ударное воздействие на первый каток вызывает сложные колебательные процессы в гусеничной цепи и элементах трансмиссии.

Авторами [6] представлено исследование, проведенное с помощью механико-математической модели гусеничного движителя с аналитическим описанием взаимодействия гусеницы с треугольным обводом. Проведенные исследования позволили установить, что динамическое давление и уровень вертикальных колебаний движителя для гусеницы с катками ниже, чем для модели без гусеницы, но выше, чем для движителя с реальной гусеницей.

Значительное количество исследований, проведенных другими авторами в разное время, посвящено динамике гусеничных движителей [7, 8, 9, 10], в том числе динамике взаимодействия гусеничных движителей с опорной поверхностью [11].

Немногие авторы предлагают рассматривать математические модели гусеничных движителей и их частей на основании системного подхода, т.е. во взаимодействии с другими системами и механизмами исследуемых машин и с окружающей средой [10].

Исследование [12] посвящено созданию сложной многомассовой модели гусеничного транспорта для анализа его взаимодействия с микропрофилем опорной поверхности. Авторы используют методы моделирования многомассовых систем для изучения системы «ходовая часть-корпус» и оценки вибрационных нагрузок. Результаты имитационного моделирования позволяют прогнозировать динамику машины и улучшать комфорт и управляемость.

Научное исследование [13] представляет собой комплексное моделирование, охватывающее ряд этапов от создания динамической модели до разработки систем управления машиной. В работе представлена полная нелинейная модель, верифицированная путем имитационных экспериментов, и предложены

¹ Wong, J. Y. 2008. Theory of Ground Vehicles. 4th ed. Hoboken, N.J.: Wiley.

алгоритмы управления для движения по траектории. Эта работа в целом посвящена изучению связей динамики движения и автоматического управления.

Исследование [14] направлено на разработку модели динамики гусеничной машины с симметричной подвеской, используя сочетание многотельной динамики и метода дискретных элементов. Такой подход позволил учесть взаимодействие гусеницы с грунтом на микроуровне, включая деформацию и проскальзывание. Результаты показали, что симметричная подвеска снижает вибрации и повышает устойчивость движения, особенно на мягких поверхностях.

Работа [15] посвящена реализации методики анализа характеристик гусеничного движителя, на примере представлено создание и анализ модели гусеничного движителя в специализированном программном комплексе RecurDyn. Модель включает детализированное описание контактов между гусеницей, катками и грунтом, что позволило получить характеристики движения гусеничной машины.

Исследование [16] анализирует влияние жесткости гусеничной ленты на общую динамику машины. Авторы сравнивают модели с жесткой и гибкой гусеницей, показывая важность учета ее податливости для точности прогнозирования. Работа подчеркивает необходимость использования усложненных моделей для достоверных результатов.

В работе [2²] рассматривается влияние динамических процессов на характеристики движения беспилотных гусеничных транспортных средств. На работу движителя значительное влияние оказывают окружающая среда в виде

опорной поверхности и в виде разрабатываемого грунта.

Обзорная статья [18] систематизирует различные методологии и подходы к моделированию гусеничных машин. В работе рассматриваются как классические методы, так и современные подходы, включая мягкие вычисления. Источник служит отличной отправной точкой для ознакомления с текущим состоянием дел в области. На формирование законов динамического нагружения оказывают большое влияние характеристики движителя и трансмиссии.

В статье [19] проводится сравнительный анализ различных математических моделей динамики транспортных средств, включая гусеничные машины. Авторы рассматривают линейные и нелинейные модели, оценивают их применимость для симуляций движения по сложным поверхностям и предлагают критерии выбора оптимальной модели для инженерных расчетов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При анализе нагруженности ведущих колес авторами предлагается рассматривать гусеничный бульдозер, как систему «оператор – двигатель – трансмиссия – движитель – опорная поверхность – рабочее оборудование – разрабатываемый грунт».

Рассматриваемая модель ведущего колеса бульдозера представлена для случая, когда это колесо поднято над грунтом и не испытывает нагрузок от опорной поверхности, а нагружается траками, входящими в зацепление с колесом (рисунок 1).

² Лесковец И.В. Имитационное моделирование гусеничного бульдозера. Могилев, 2022.

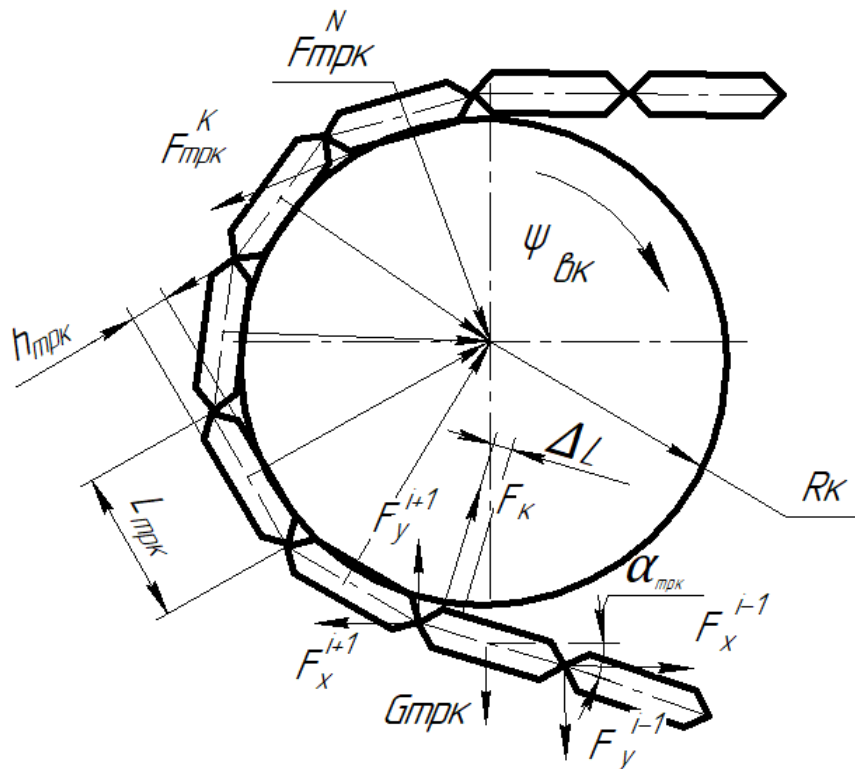


Рисунок 1 – Схема взаимодействия траков с колесом
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The scheme of interaction of the tracks with the wheel
 Source: compiled by the authors.

На ведущее колесо действуют силы от траков, находящихся в зацеплении, входящих в зацепление и выходящих из него, это силы F_{mpk}^N – нормальная и F_{mpk}^K – касательная. На траки, кроме силы взаимодействия с колесом, действуют сила тяжести G_{mpk} , силы взаимодействия с предыдущим траком F_x^{i-1} и F_y^{i-1} и силы взаимодействия с последующим траком F_x^{i+1} и F_y^{i+1} .

По мере продвижения траков вдоль колеса направления и действия сил меняются из-за изменения геометрических координат трака, которые определяются относительно центра тяжести машины в локальных полярных координатах с учетом угла поворота трака вокруг собственного центра тяжести [19].

Математическая модель трака, расположенного на ведущем колесе, представляет собой систему уравнений:

$$\frac{dv_{mpk}^x}{dt} = (F_x^{i-1} - F_x^{i+1} - F_k \cdot \sin(\alpha_{mpk})) / m_{mpk}, \quad (1)$$

$$\frac{dv_{mpk}^y}{dt} = (F_y^{i+1} + F_y^{i-1} - m_{mpk}g + R_k \cos(\alpha_{mpk})) / m_{mpk}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_{mpk}}{dt} = & (F_y^{i+1} \cdot \sin(\alpha) \frac{L_{mpk}}{2} - F_y^{i-1} \cdot \sin(\alpha) \frac{L_{mpk}}{2} - F_x^{i+1} \cdot \cos(\alpha_{mpk}) \frac{h_{mpk}}{2} + \\ & + F_x^{i-1} \cdot \cos(\alpha_{mpk}) \frac{h_{mpk}}{2} - R_k \cdot (L_{mpk} - \Delta L)) / J_{mpk}, \end{aligned} \quad (3)$$

где F_x^{i-1} – сила, действующая на рассматриваемый трак со стороны предыдущего трака в направлении оси абсцисс;

F_x^{i+1} – сила, действующая на текущий трак со стороны последующего трака в направлении оси абсцисс;

F_k – касательная сила, действующая на трак со стороны ведущего колеса;

α – угол наклона трака относительно локальной системы координат трака;

m_{mpk} – масса трака;

F_y^{i+1} – сила, действующая на рассматриваемый трак со стороны предыдущего трака в направлении оси ординат;

F_y^{i-1} – сила, действующая на текущий трак со стороны последующего трака в направлении оси ординат;

R_k – нормальная сила, действующая на трак со стороны ведущего колеса;

L_{mpk} – длина трака;

h_{mpk} – высота трака;
 ΔL – расстояние от центра координат трака до точки взаимодействия с колесом;

J_{mpk} – момент инерции трака.
 Каждый трак, который входит в зацепление с ведущим колесом, формирует касательную силу, действующую на колесо. Сумма этих сил создает вращающий момент сопротивления, преодолеваемый моментом, который развивается ДВС, увеличивается в трансмиссии и зависит от мощности двигателя и передаточного числа трансмиссии.

С помощью программного обеспечения, разработанного авторами, проведена серия вычислительных экспериментов, моделирующих движение бульдозера в условиях копания грунта с различными толщинами стружки.

В качестве исследуемого объекта выступает модель гусеничного бульдозера типа «БЕЛАРУС 1502» со следующими основными параметрами:

- масса базовой машины – 13600 кг;
- высота отвала – 1,028 м;
- ширина отвала – 3,63 м;
- двигатель типа Д-260 (максимальный вращающий момент на коленчатом валу 521 Нм при частоте вращения 1500 мин⁻¹;
- общее передаточное число трансмиссии при включенной во время эксперимента передаче 175.

В серии экспериментов использовались параметры грунта, представленные в таблице 1.

Таблица 1
Параметры грунта
 Источник: составлено авторами.

Table 1
Soil parameters
 Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	Значение		
	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3
Угол внутреннего трения, град	28	28	28
Угол трения грунта по металлу	26	26	26
Угол наклона призмы волочения к горизонту, град	38	38	38
Удельное сцепление грунта ненарушенной структуры, кПа	2	2	2
Удельное сцепление грунта в призме волочения, кПа	0,5	0,5	0,5
Удельное сопротивление резанию, аПа	12	12	12
Плотность грунта на рабочем органе и в призме волочения, т/м ³	1,8	1,8	1,2
Коэффициент жесткости, кПа/м	2000	2000	2000
Толщина стружки, мм	100	150	200

Имитационный эксперимент проведен в следующей последовательности:

- расчет исходных статических данных;
- установка рычага акселератора в положение 80%;
- включение текущей передачи;
- начало динамического расчета, имитирующего начало движения: включение сцепления, разгон до скорости 1 м/с;
- опускание отвала до заданной толщины стружки;
- набор призмы волочения, выглубление отвала для снижения сил сопротивления копанью;

– набор призмы волочения и движение в заданных условиях в течение 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе проведения эксперимента анализировались величины толщины стружки, сил суммарного сопротивления передвижению, моментов на ведущих колесах с целью выявления основных факторов, оказывающих влияние на динамическую составляющую передвижению и определение коэффициента динамичности.

Результаты имитации процесса копания представлены на рисунках 2, 3, 4.

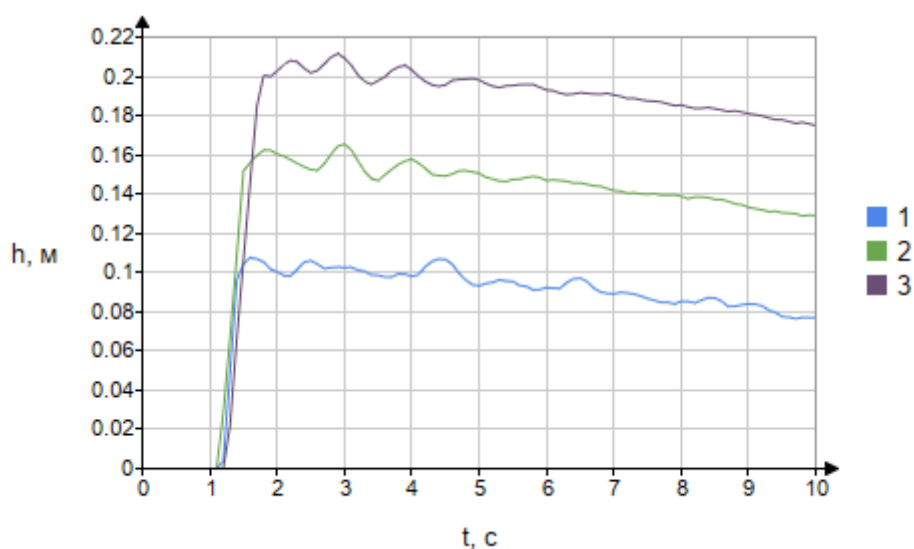


Рисунок 2 – Толщины стружки: 1 – 100 мм, 2 – 150 мм, 3 – 150 мм
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Chip thickness: 1 – 100 mm; 2 – 150 mm; 3 – 150 mm
Source: compiled by the authors.

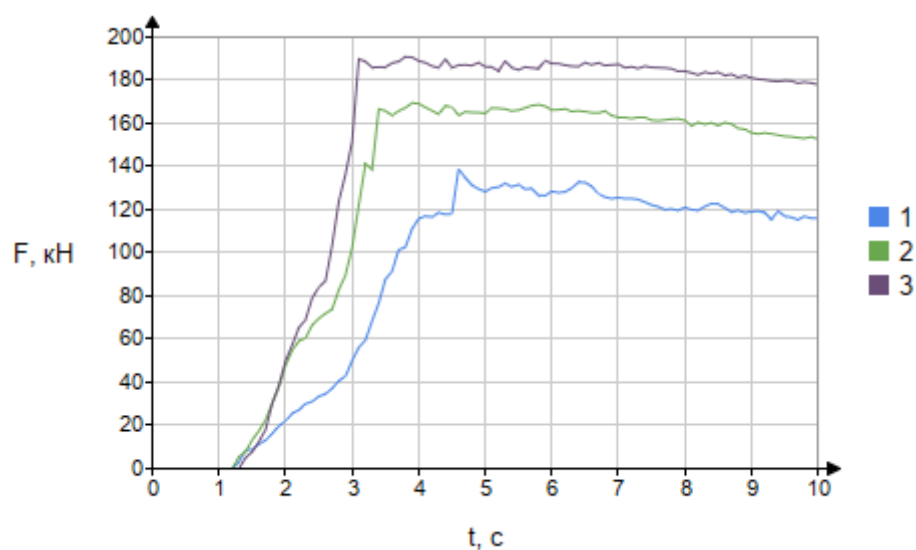


Рисунок 3 – Силы сопротивления передвижению при толщинах стружки: 1 – 100 мм, 2 – 150 мм, 3 – 150 мм
 Источник: составлено авторами.

Figure 3. – Resistance forces to movement with chip thickness: 1 – 100 mm; 2 – 150 mm; 3 – 150 mm
 Source: compiled by the authors.

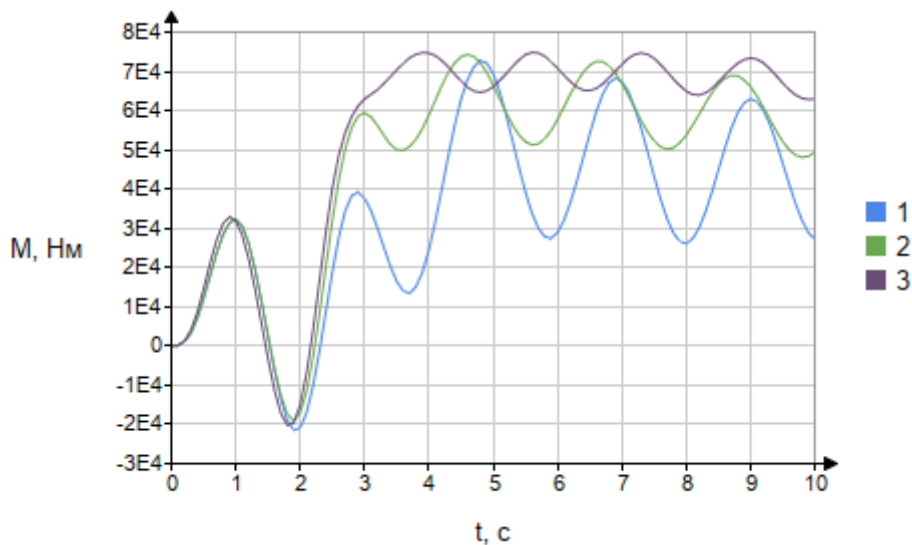


Рисунок 4 – Моменты на ведущих колесах при толщинах стружки: 1 – 100 мм, 2 – 150 мм, 3 – 150 мм
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Torques on the driving wheels with chip thickness: 1 – 100 mm; 2 – 150 mm; 3 – 150 mm
 Source: compiled by the authors.

Таблица 2

Статистические параметры сил, действующих в процессе копания грунта
Источник: составлено авторами.

Table 2

Statistical parameters of the forces acting during the soil cutting and moving process
Source: compiled by the authors.

Наименование силового фактора	Эксперимент 1			Эксперимент 2			Эксперимент 3		
	t_{mo}	min	max	t_{mo}	min	max	t_{mo}	min	max
Силы сопротивления передвижению, кН	120	50	138	163	102	169	185	151	190
Момент на ведущих колесах, Нм	76452	33472	97218	59078	48093	74294	69032	76285	62852

Анализ рисунков показывает, что силы сопротивления передвижению находятся в функциональной зависимости от толщины стружки. В процессе копания силы сопротивления передвижению имеют колебания, обусловленные колебаниями сил сопротивления копанию и особенностями процесса копания. С набором призмы волочения силы сопротивления передвижению увеличиваются, что обусловлено ростом призмы волочения. Относительная составляющая от сил сопротивления резанию снижается, соответственно амплитуда сил сопротивления передвижению невысока. Изменения вращающего момента на ведущих колесах (см. рисунок 4) обусловлены не столько периодическим изменением сил сопротивления копанию, сколько силами инерции бульдозера и временем реакции двигателя на изменение текущего нагружения вследствие постоянно меняющихся сил сопротивления перемещению. Статистические параметры сил, возникающих в процессе копания грунта, представлены в таблице 2. Учитывая, что в период до 3 сек происходит набор призмы волочения, в выборку для анализа вошло время движения бульдозера с 3 до 10 сек.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изменении колебаний сил сопротивления передвижению отсутствует гармонический характер, а в изменении колебаний момента на ведущих колесах имеется явно выраженный гармонический характер. Независимо от толщины стружки период колебаний составляет примерно 2 сек. Таким образом, величины моментов на ведущих колесах определяются собственными колебаниями машины и зависят от её массово-геометрических характеристик. Часто при проведении прочностных расчетов используют статические величины сил

сопротивления передвижению и корректируют их с помощью коэффициентов динамичности. Для рассматриваемого случая коэффициенты динамичности изменяются от 1,15 при толщине стружки 100 мм до 1,03 при толщине стружки 150 и 200 мм.

Таким образом, коэффициенты динамичности не имеют постоянных значений, стремятся к максимальным значениям при небольших нагрузках и снижаются при увеличении нагрузок. Вследствие этого если для расчета конструкций принимать максимальные значения статических нагрузок, то коэффициенты динамичности можно принимать минимальными. В то же время при проведении прочностных расчетов, как правило, используются коэффициенты запаса, которые часто рекомендуется принимать равными 20% по отношению к статическим нагрузкам, и в этом случае от использования коэффициентов динамичности можно отказаться.

Результаты имитационных исследований показывают, что гусеничный движитель испытывает динамический режим нагружения в процессе выполнения бульдозером технологических операций. Использование математической и имитационных моделей процесса копания грунта бульдозером позволяет установить диапазон значений коэффициента динамичности. Полученные значения коэффициентов динамичности соответствуют установленным величинам, используемым в практике проектирования. Новыми результатами можно считать величины коэффициентов динамичности в различных режимах нагружения, а также снижение величин коэффициентов динамичности при увеличении нагрузок на рабочее оборудование бульдозера.

Полученные результаты позволяют предположить, что проведение прочностных расче-

тов при максимальных нагрузках на рабочее оборудование можно проводить, не учитывая коэффициенты динамичности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные материалы исследования позволяют получить значения моментов, возникающих на ведущих колесах бульдозера в процессе копания грунта при разных толщинах стружки. Динамическая, математическая и имитационные модели, разработанные на основе системного подхода, учитывающие параметры двигателя, трансмиссии, движителя, рабочего оборудования и внешней среды позволяют путем проведения имитационных экспериментов смоделировать движение бульдозера в режиме копания с различными толщинами стружки и определить нагруженность исследуемых механизмов и систем. Исследование характеристик моментов, возникающих на ведущих колесах гусеничных бульдозеров, позволило установить, что величины коэффициентов динамичности зависят от уровня нагрузок на ведущих колесах. При максимальных нагрузках значения коэффициентов динамичности снижаются по сравнению со средними нагрузками и составляют не более 3% при максимальных нагрузках и до 20% при средних нагрузках.

Таким образом, при проведении прочностных расчетов ведущих колес и валов трансмиссии, когда используются максимальные нагружающие усилия и моменты при работе бульдозера, значения коэффициентов динамичности можно принимать минимальными или не учитывать. Необходимо отметить, что данные выводы нельзя распространять на все системы и механизмы бульдозера. Для определения коэффициентов динамичности, действующих в других механизмах и системах, необходимо проведение дополнительных исследований, позволяющих учитывать их влияние на основе системного подхода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тараторкин А.И., Абдулов С.В., Держанский В.Б., Волков А.А., Сарач Е.Б., Комиссаров А.И. Расчетно-экспериментальное исследование динамики обвода гусеничного движителя транспортной машины высокой проходимости // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2024. № 4 (69). С. 50–60.
2. Strutynskiy S. Mathematical modelling of a specialized vehicle caterpillar mover dynamic processes under condition of the distributing the parameters of the caterpillar // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, no. 4.3. Pp. 40–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19549>
3. Тараторкин И.А., Держанский В.Б., Абдулов С.В., Волков А.А., Тараторкин А.И. Динамика процессов взаимодействия элементов гусеничного движителя при наезде первого опорного катка на неровность // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Машиностроение. 2023. Т. 23, № 3. С. 27–38.
4. Поддубный В.И., Трехтлер А., Варкентин А., Хенке К. Механико-математическая модель гусеничного движителя с треугольным обводом для решения задач вертикальной динамики гусеничной машины // *Вестник машиностроения*. 2020. № 12. С. 26–29.
5. Гудков В.В., Сокол П.А., Могутнов Р.В., Колтаков А.А. Анализ динамики движения гусеничных машин // В сборнике: Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. Воронеж, 2021. С. 322–327.
6. Лесковец И.В., Леоненко О.В., Бужинский А.Д. Влияние параметров гусеничного обвода на давление опорных траков на грунт // В сборнике: *Интерстроймех-2014*. Материалы Международной научно-технической конференции. 2014. С. 45–48.
7. Балакин П.Д., Кузнецов Э.А., Скрипниченко Д.А., Рахимжанов Н.Е. Математическое моделирование динамики движения многоцелевых гусеничных машин // *Омский научный вестник*. 2012. № 3 (113). С. 40–44.
8. Алябьев В.А., Бердов Е.И. Особенности взаимодействия гусеничного движителя с деформируемой опорной поверхностью при неравномерном движении машины // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Машиностроение. 2021. Т. 21, № 4. С. 49–60.
9. L. Zhou, J. Gao, C. Hu, Q. Li. Numerical simulation and testing verification of the interaction between track and sandy ground based on discrete element method // *Journal of Terramechanics*. 2021. Vol. 95: 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.03.002>
10. Recuero A., Morales R., Nieto R., Aceituno J. F. Multi-body dynamics modelling and simulation of the ride behaviour of a tracked vehicle. *International Journal of Vehicle Design*, 2017. 73(4), 288–311.
11. Mohamed A. M., Wang D., Li D. Tracked Vehicle Dynamics Using Absolute Nodal Coordinate Formulation Nonlinear Finite Elements. *Machines*, 2021. 9(5): 91.
12. Lee J.-H., Yoo J.-H., Han C.-S. Dynamic Loads and Fatigue Analysis of a Tracked Vehicle. *International Journal of Automotive Technology*, 2002. 3(2), 47–53.
13. Lee S. H., Yoo J. H., Han C. S. Dynamic Simulation of a Tracked Vehicle using RecurDyn. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2005. 22(11), 136–143.
14. Tao J., Deng Z., Cao X., Hu G., Wang, P. Modeling and dynamic characteristics of tracked vehicle equipped with symmetrical suspensions based on multi-body dynamics and discrete element coupling method. *Applied Sciences*, 2024. 14(22), 10045. <https://doi.org/10.3390/app142210045>

15. Stankovic M.R., Madonski R., Manojlovic S.M. Systematic design of adrc-based unmanned tracked vehicle trajectory tracking with fpga-in-the-loop validation // *Military Technical Courier*. 2024. T. 72. № 4. С. 1700–1725.

16. Swadi M. A. K., Al-Gailani A. M. S. A Review on Modeling and Simulation of Tracked Vehicles. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. 870(1), 012115.

17. Лесковец И.В., Леоненко О.В., Бужинский А.Д. Нагруженность траков в гусеничном обводе // *Механизация строительства*. 2015. № 10 (856). С. 32–35.

18. Li J., Wang H., Chen Z. Comparative study of mathematical models in vehicle dynamics with applications to tracked vehicles // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 45678–45690.

REFERENCES

1. Taratorkin A.I., Abdulov S.V., Derzhanskii V.B., Volkov A.A., Sarach E.B., Komissarov A.I. Computational and experimental study of the dynamics of the bypass of a tracked propulsion system of a high-terrain transport vehicle // *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2024; № 4 (69): 50–60. (In Russ.)

2. Strutynskiy S. Mathematical modelling of a specialized vehicle caterpillar mover dynamic processes under condition of the distributing the parameters of the caterpillar // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018; Vol. 7, no. 4.3: 40–46. (In Russ.) <https://doi.org/https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19549>

3. Taratorkin I.A., Derzhanskii V.B., Abdulov S.V., Volkov A.A., Taratorkin A.I. Dynamics of the processes of interaction of the elements of the tracked propulsion system when the first support roller hits an unevenness // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*. 2023; T. 23. № 3: 27–38. (In Russ.)

4. Poddubnyi V.I., Trekhtler A., Varkentin A., Khenke K. A Mechanical and mathematical model of a tracked propulsion system with a triangular outline for solving problems of vertical dynamics of a tracked vehicle // *Vestnik mashinostroeniya*. 2020; № 12.: 26–29. (In Russ.)

5. Gudkov V.V., Sokol P.A., Mogutnov R.V., Koltakov A.A. Analysis of the dynamics of tracked vehicles // *V sbornike: Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremenom proizvodstve i obshchestve. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Voronezh*, 2021; С. 322–327. (In Russ.)

6. Leskovets I.V., Leonenko O.V., Buzhinskii A.D. The influence of the caterpillar track parameters on the pressure of the support tracks on the ground // *V sbornike: Interstroimekh* 2014. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. 2014; С. 45–48. (In Russ.)

7. Balakin P.D., Kuznetsov E.A., Skripnichenko D.A., Rakhimzhanov N.E. Mathematical modeling of motion dynamics of multi-purpose tracked vehicles

// *Omskii nauchnyi vestnik*. 2012; № 3 (113): 40–44. (In Russ.)

8. Alyab'ev V.A., Berdov E.I. Features of the interaction of the crawler with the deformable bearing surface during uneven movement of the machine // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*. 2021; T. 21. № 4: 49–60. (In Russ.)

9. L. Zhou J. Gao C. Hu Q.Li. Numerical simulation and testing verification of the interaction between track and sandy ground based on discrete element method // *Journal of Terramechanics*. 2021; Vol. 95: 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.tterra.2021.03.002>

10. Recuero A., Morales R., Nieto R., Aceituno, J.F. Multi-body dynamics modelling and simulation of the ride behaviour of a tracked vehicle. *International Journal of Vehicle Design*, 2017. 73(4): 288–311.

11. Mohamed A. M., Wang D., Li, D. Tracked Vehicle Dynamics Using Absolute Nodal Coordinate Formulation Nonlinear Finite Elements. *Machines*, 2021; 9(5), 91.

12. Lee J.-H., Yoo J.-H., Han C.-S. Dynamic Loads and Fatigue Analysis of a Tracked Vehicle. *International Journal of Automotive Technology*, 2002; 3(2): 47–53.

13. Lee S.H., Yoo J. H., Han C. S. Dynamic Simulation of a Tracked Vehicle using RecurDyn. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2005; 22(11): 136–143.

14. Tao J., Deng, Z., Cao, X., Hu, G., Wang, P. Modeling and dynamic characteristics of tracked vehicle equipped with symmetrical suspensions based on multi-body dynamics and discrete element coupling method. *Applied Sciences*, 2024; 14(22), 10045. <https://doi.org/10.3390/app142210045>

15. Stankovic M.R., Madonski R., Manojlovic S.M. Systematic design of adrc-based unmanned tracked vehicle trajectory tracking with fpga-in-the-loop validation // *Military Technical Courier*. 2024; T. 72. № 4: 1700–1725.

16. Swadi M. A. K., Al-Gailani, A. M. S. A Review on Modeling and Simulation of Tracked Vehicles. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 2020; 870(1), 012115.

17. Leskovets I.V., Leonenko O.V., Buzhinskii A.D. Loading of tracks in a tracked track // *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2015; № 10 (856): 32–35. (In Russ.)

18. Li J., Wang H., Chen Z. Comparative study of mathematical models in vehicle dynamics with applications to tracked vehicles // *IEEE Access*. 2024; Vol. 12: 45678–45690.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Лесковец И.В. Математический расчет, оформление графической и табличной информации, написание и оформление статьи.

Грачев А.А. Анализ трудов отечественных и зарубежных ученых по методикам, определения динамических характеристик гусеничных бульдозеров.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Leskovets I.V. Mathematical calculation, graphic and tabular design, writing and editing the article.

Grachev A.A. Analysis of domestic and foreign research works on methods for determining the dynamic characteristics of tracked bulldozers.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесковец Игорь Вадимович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Транспортные и технологические машины» Белорусско-Российского университета (212000, Республика Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43).

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

Scopus Author ID: 57214989692,

Researcher ID: MFI-1510-2025,

SPIN-код: 6160-5067,

e-mail: leskovets1966@mail.ru

Грачев Алексей Андреевич – канд. техн. наук, доц., директор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29б).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4550-7636>,

Scopus Author: 57203459807,

Researcher ID: AAN-1868-2021,

SPIN-код: 9015-8535,

e-mail: grachev_aa@spbstu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leskovets Igor' V. – Candidate of Technical Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, "Transport and Technological Machines", Interstate Educational Institution of Higher Education «Belarusian-Russian University» (43, Mira Avenue, Mogilev, Republic of Belarus, 212000).

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

Scopus Author ID: 57214989692,

Researcher ID: MFI-1510-2025,

SPIN-code: 6160-5067,

e-mail: leskovets1966@mail.ru

Grachev Aleksey A. – Candidate of Technical Sciences (Engineering), Director, Higher Transport School, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29 B, Politekhnicheskaya Street, Akademicheskoe, Municipal District, St. Petersburg, 195251).

Scopus Author ID: 57203459807,

Researcher ID: AAN-1868-2021,

SPIN-code: 9015-8535,

e-mail: grachev_aa@spbstu.ru