

УДК 629.023

А.В. ШМЕЛЁВ, канд. техн. наук, доц.
заместитель генерального директора по научной работе¹
E-mail: shmeliiov.alexei@gmail.com

А.М. НАСКОВЕЦ
генеральный конструктор – начальник НТЦ им. А.Н. Егорова²
E-mail: 7653828@gmail.com

С.В. ХИТРИКОВ
заместитель начальника отдела моделирования и виртуальных испытаний РКЦМП¹
E-mail: krom_hsv@bk.ru

Ал-р Л. КРАВЧЁНОК
научный сотрудник сектора виртуальных испытаний отдела моделирования и виртуальных испытаний РКЦМП¹
E-mail: kravchenoks@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 09.10.2024.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ПОВРЕЖДАЮЩИХ ПО КРИТЕРИЮ УСТАЛОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КУЗОВА КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

Разработана методика расчетно-экспериментальной оценки повреждающего воздействия эксплуатационных режимов на несущую конструкцию кузова карьерного самосвала. Методика позволяет определять наиболее опасные по критерию многоциклового усталости зоны несущей конструкции, а также оценивать повреждающее действие отдельных эксплуатационных режимов, формирующих рабочий цикл самосвала. Апробация методики выполнена на примере исследования нагруженности и накопления усталостных повреждений несущих конструкций кузова карьерного самосвала БЕЛАЗ-7558. Нагруженность конструкций определена в ходе полигонных испытаний самосвала для восьми режимов нагружения, включающих загрузку и разгрузку кузова сыпучим грузом. Процессы изменения механических осевых напряжений в ходе испытаний зарегистрированы в восьми зонах. Результаты анализа экспериментальных данных выявили две наиболее нагруженные зоны конструкции, в которых накопление усталостных повреждений происходит более чем в 2 раза быстрее, чем в остальных. Установлено, что режимы движения самосвала по технологической дороге и дороге в отвале характеризуются наибольшим накоплением усталостных повреждений конструкций. Наибольшее усталостное повреждение за рабочий цикл самосвала в рассматриваемых зонах кузова формируется при движении по технологической дороге. При этом наибольшее удельное эквивалентное усталостное повреждающее действие создается при движении по дороге «отвал» и больше соответствующего значения для технологической дороги примерно в 1,5 раза. Это объясняется тем, что протяженность технологической дороги в рассматриваемом рабочем цикле самосвала больше протяженности дороги «отвал» в 7 раз.

Ключевые слова: карьерный самосвал, кузов, несущая конструкция, методика, испытания, расчет, усталость, режим нагружения, накопление повреждений

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-17-27>

Введение. Несущие конструкции карьерных самосвалов должны сохранять работоспособность на протяжении сотен тысяч километров пробега при непрерывном циклическом воздействии высоких нагрузок. Обеспечение же эксплуатационной эффективности процесса перевозки полезных ископаемых требует снижения соотношения мас-

сы снаряженного самосвала к массе перевозимого груза (коэффициент тары), что достигается минимизацией массы несущих конструкций. Поэтому разработчики уделяют особое внимание поиску эффективных решений, обеспечивающих требуемые показатели ресурса при оптимальных весовых характеристиках конструкций.

Одними из наиболее ответственных несущих конструкций карьерного самосвала являются несущие конструкции кузова. Они непосредственно воспринимают нагрузки как со стороны груза при загрузке, так и при взаимодействии кузова с грузом и рамой самосвала при движении по неровной дорожной поверхности, в поворотах и торможениях. Масса грузовой платформы карьерного самосвала составляет порядка 20–30 % от массы снаряженного самосвала, что показывает особую значимость результатов по снижению ее веса.

Основными причинами выхода из строя кузова карьерного самосвала являются износ в результате абразивного воздействия перевозимого груза и усталостные разрушения наиболее нагруженных несущих конструкций в результате циклического воздействия высоких нагрузок. Минимизация или исключение последнего обеспечивается наиболее сложными, комплексными решениями всего строения конструкций кузова, применяемыми материалами и технологиями изготовления. Поэтому данная работа посвящена вопросам совершенствования конструкций кузовов карьерных самосвалов по критерию усталости.

Анализ работ по проектированию кузовов транспортных средств. Отечественные работы [1–9], посвященные проектированию автомобилей и их кузовов, как правило, содержат общее описание их конструкций, в том числе самосвальных, включающих тип (особенности геометрии и формы), наличие специальных конструктивных элементов (например, козырька для защиты кабины), крепления на раме, применяемых подъемных механизмов, материалов, краткое описание применяемых технологий изготовления.

Отдельный комплекс работ [10–16] посвящен изучению показателей нагруженности, прочности и долговечности рам грузовых автомобилей-самосвалов с учетом установки на них кузова и, соответственно, нагрузок, возникающих в результате их взаимодействия.

Особенности расчета динамических нагрузок, действующих при загрузке, а также разгрузке кузова железнодорожного вагона-самосвала крупногабаритной породой, описаны в работе [17]. Применяемые методы расчетов нагрузок при загрузке основываются на использовании коэффициентов динамичности в зависимости от загружаемой породы. В работе также описаны особенности расчета кузова при действии продольных, поперечных нагрузок, распирающих нагрузок от сыпучего груза, а также нагрузок, возникающих при ремонтных работах. Приводятся расчетные схемы основных силовых элементов платформы с описанием зависимостей для расчета действующих нагрузок, прикладываемых граничных условий и кинематических ограничений.

Современные требования к вагонам-самосвалам изложены в ГОСТ 34764-2021 «Вагоны-само-

свалы. Требования к прочности и динамическим качествам» [18]. Норматив содержит описание по расчету сил и формированию нагрузочных режимов для оценки прочности и сопротивления усталости несущей конструкции вагона-самосвала, в частности самосвальной платформы. Расчет значений действующих сил выполняется с использованием нормированных значений силовых факторов, а также расчетных зависимостей, подобных описанным в работе [17].

Информация по особенностям конструкции кузовов карьерных самосвалов приведена в источнике [19]. Описываются требования к механическим характеристикам применяемых материалов и советующие марки сталей. Даны методические рекомендации по расчету напряженно-деформированного состояния обшивки днища кузова с использованием аналитических и эмпирических зависимостей с целью определения схемы расположения поперечин и толщины обшивки.

В публикациях [20–23] приводятся примеры применения современных программных комплексов как для моделирования нагрузок, действующих при загрузке кузова самосвала сыпучим грузом и его разгрузке с использованием метода частиц, так и для последующей оценки показателей напряженно-деформированного состояния, выявления наиболее нагруженных зон грузовой платформы с использованием метода конечных элементов.

Зарубежные исследования [24, 25], представленные в открытых источниках, посвящены расчетной оценке прочности и совершенствованию конструкций самосвальных платформ грузовых автомобилей, содержат примеры расчетов различных вариантов конструкций платформ с использованием метода конечных элементов. Расчеты усталости и соответствующие режимы нагружения не рассматриваются.

Работа [24] содержит общее описание процесса подготовки расчетной модели и проведения расчета напряженно-деформированного состояния трех вариантов конструкции кузова самосвала. Расчет обоснован вариант конструкции, обеспечивающий снижение массы на 19,6 % по отношению к базовому варианту. Особенности прикладываемых нагрузок в статье не раскрываются. По описанию результатов можно сделать предположение, что рассматривается статическое нагружение платформы от располагаемого в ней груза.

Методы многокритериальной оптимизации применены в [25] для поиска оптимальных по критерию массы конструктивных параметров грузовой платформы автомобиля-самосвала, имеющей U-образную форму поперечного сечения, при заданных ограничениях для частоты первой собственной формы колебаний и показателей прочности / максимизации первой собственной формы колебаний и минимизации максимальных напря-

жений. В качестве режима нагружения рассматривалось приложение давления на стенки платформы от грунта, размещаемого в кузове. Таким образом, учитывалось линейное изменение по высоте платформы распирающих нагрузок на ее стенки.

Результаты анализа динамики и содержания публикуемых патентов по конструкциям кузовов карьерных самосвалов [26] показывают активизацию появления новых документов с 2013 г. Отмечено, что США является самым крупным патентообладателем, а 54 % патентов принадлежат 5 крупным мировым компаниям, выпускающим карьерные самосвалы, и 3 — изготовителям оборудования для горных разработок. Защищаемые решения направлены на снижение материалоемкости при обеспечении требуемого ресурса конструкций.

Новостные сообщения крупных компаний Austin Engineering (Австралия), Duratray International (США), Metso Outotec (Финляндия), Ground Force (США), Schlam Group (Австралия), NewSteel Global Pty Ltd (Австралия), выпускающих различное оборудование для горнорудных разработок (среди которого особой линейкой идут оптимизированные по весу кузова карьерных самосвалов), показывают стабильный рост производства этого вида продукции. Необходимо отметить активность в разработке и выпуске на рынок инновационной продукции именно таких специализированных компаний. Объем ежегодной реализации кузовов, например, Austin Engineering достигает до 600 шт. [27].

Примером активного вывода за последние годы на рынок упомянутыми компаниями новых оптимизированных конструкций кузовов могут служить конструкции: Duratray SDB для самосвала CAT 796AC (Duratray International, 2020 г.), Hercules EXO (Schlam Group, 2022 г.), High Performance Truck Tray (Austin Engineering Ltd, 2022 г.), MTB 171 (Metso Outotec, 2019 г.). На рисунке 1 приведены фото указанных инновационных конструкций кузовов, которые позволяют увидеть их отличие от традиционных конструкций.

В новостных сообщениях указанных выше инжиниринговых компаний также содержится информация о неудовлетворенности собственников карьерной техники конструкциями кузовов, поставляемых изготовителями самосвалов, в первую очередь по таким критериям, как масса и ресурс [32, 33]. По заявлениям альтернативных поставщиков кузовов их конструкции позволяют повысить грузоподъемность на 10–15 % за счет снижения собственной массы кузова при обеспечении высоких показателей ресурса [33].

Отдельные публикации разработчиков инновационных конструкций кузовов показывают [28, 30, 34, 35], что одним из основных критериев оптимизации конструкции являются усталостные характеристики. В этих целях незаменимо использование численных методов расчета показателей



a



b



c



d

Рисунок 1 — Инновационные кузова карьерных самосвалов: a — Duratray SDB для самосвала CAT 796AC [28]; b — Hercules EXO [29]; c — High Performance Truck Tray [30]; d — MTB 171 [31]
Figure 1 — Innovative dump truck bodies: a — Duratray SDB for CAT 796AC dump truck [28]; b — Hercules EXO [29]; c — High Performance Truck Tray [30]; d — MTB 171 [31]

прочности и оценки усталостной долговечности. Для валидации расчетных подходов используются экспериментальные исследования показателей нагруженности в эксплуатационных условиях. При этом публикаций, содержащих описание проводимых компаниями исследований наиболее значимых нагрузочных режимов при оптимизации конструкций, в открытой печати не найдено.

Проведенный анализ литературных данных показывает, что традиционные методы расчета и исследования грузовых платформ в основном представлены аналитическими и полуэмпирическими зависимостями для оценки нагруженности кузова при взаимодействии с сыпучим грузом, динамическом воздействии падающего груза, а также абразивном износе. Последнее десятилетие

тие развивается применение численного моделирования процессов загрузки и разгрузки кузовов самосвалов с применением метода частиц (Discrete Element Method — DEM) с целью оценки нагруженности как конструкции грузовой платформы, так и несущей системы самосвала. При этом в открытой печати практически не представлены работы по исследованию особенностей накопления усталостных повреждений в несущих элементах кузовов карьерных самосвалов, разработке методик их оценки. Значительная неопределенность заключается в описании режимов эксплуатации, оказывающих наиболее повреждающее действие по критерию многоциклового усталости для несущих конструкций кузова карьерного самосвала, что существенно снижает эффективность мероприятий по оптимизации конструкций с целью минимизации массы при обеспечении требуемых ресурсных и эксплуатационных характеристик. Ведущие мировые компании, занимающиеся разработкой и выпуском оптимизированных кузовов, активно применяют методы численного моделирования для определения наиболее эффективных решений, а также экспериментальных исследований для валидации применяемых моделей и методик исследований. При этом сами методики и детали подходов представляют ноу-хау компаний и в открытой печати не публикуются. Поэтому актуально формирование методической базы по оценке конструкций кузовов самосвалов по критерию усталости. Для реализации этой цели необходимо проведение экспериментальных исследований по оценке повреждающего воздействия различных эксплуатационных режимов на несущую конструкцию платформы по критерию многоциклового усталости. Такое исследование в первую очередь должно основываться на методике исследований, определяющей применяемые методы и средства измерений, а также обработки и анализа результатов испытаний.

Методика расчетно-экспериментальной оценки повреждающего воздействия эксплуатационных режимов на несущую конструкцию кузова самосвала. Методика расчетно-экспериментальной оценки повреждающего воздействия эксплуатационных режимов на несущую конструкцию кузова самосвала (далее — методика) предназначена для выявления наиболее повреждающих эксплуатационных режимов на несущую систему кузова по критерию многоциклового усталости. Таким образом, результатом применения методики должны быть численные показатели, позволяющие дать оценку величине повреждающего воздействия на конструкцию конкретного режима эксплуатации. Методика включает следующие основные этапы.

1. Выбор объекта исследования.
2. Определение методов исследования.
3. Определение зон конструкции для исследования процессов нагружения.

4. Определение состава исследуемых режимов нагружения.

5. Подготовка объекта исследования к испытаниям.

6. Проведение испытаний.

7. Анализ результатов испытаний.

Приведем краткое описание перечисленных выше этапов методики.

1. Выбор объекта исследования должен основываться на том, что получаемые с его использованием результаты должны распространяться на наибольшее число подобных изделий. Поэтому кузов и самосвал, выбираемые в качестве объекта испытаний, а также кузова и самосвалы, на которые могут быть распространены результаты испытаний, должны иметь одинаковые:

- тип конструкции кузова;
- конструкцию установки кузова на самосвале;
- конструкцию подвески самосвала;
- условия эксплуатации;
- режимы эксплуатации.

2. Предметом исследования являются процессы нагружения элементов несущей конструкции кузова карьерного самосвала. Критерием достижения предельного состояния таких элементов является многоцикловая усталость, которая характеризуется величиной переменных амплитуд механических напряжений, возникающих в высоконагруженных зонах или элементах конструкции. Поэтому экспериментальные методы исследований должны позволять проводить измерение переменных во времени локальных механических напряжений, учитывать как амплитудный, так и частотный состав процессов.

Реальный процесс эксплуатационного нагружения, регистрируемый в ходе испытаний, представляется в аналоговой форме в виде непрерывной зависимости «измеряемая величина — время». Для возможности его хранения, обработки и анализа с применением цифровых средств и методов он подвергается дискретизации с частотой w_d , позволяющей с достаточной точностью отразить амплитудную структуру случайного нагружения. С учетом того, что особый интерес представляют амплитуды процесса, частота w_d может быть определена с использованием зависимости, указанной в ГОСТ 25.101-83 «Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов»:

$$w_d = (5 - 10) \cdot w_{\max} \quad (1)$$

где w_d — частота дискретизации, Гц; w_{\max} — максимальная частота учитываемой высокочастотной составляющей процесса, Гц.

В свою очередь, зарубежные исследователи рекомендуют использовать:

$$w_d = (10 - 20) \cdot w_{\max} \quad (2)$$

3. В качестве исследуемых зон конструкции кузова для регистрации процессов нагружения выбираются наиболее опасные по критерию усталости либо наиболее нагруженные зоны несущих конструкций кузовов карьерных самосвалов. Примером расположения таких зон могут служить зоны разрушений конструкций-аналогов либо зоны, определенные по результатам численных расчетов и виртуальных испытаний.

4. Определение состава исследуемых режимов нагружения, формирующих рабочий цикл самосвала, должно выполняться с учетом того, что включаемые режимы должны быть способны вызывать в несущих конструкциях кузовов карьерных самосвалов циклическое изменение механических напряжений, достаточное для накопления и развития усталостных повреждений.

Работа карьерного самосвала характеризуется регулярным повторением рабочего цикла «загрузка — движение в груженом состоянии к месту разгрузки — разгрузка — движение в снаряженном состоянии к месту погрузки». В рабочем цикле самосвала могут быть выделены элементы, описываемые длиной пройденного пути (например, движение в груженом состоянии со скоростью 10 км/ч в отвале), а также элементы, которым свойственно постоянное присутствие в эксплуатации (загрузка, разгрузка).

При составлении программы и описании режимов испытаний должны учитываться:

- весовое состояние самосвала;
- тип и особенности используемого груза;
- способ и особенности загрузки груза;
- способ и особенности разгрузки груза;
- тип и особенности дорожного покрытия;
- уклоны и радиусные переходы дорог;
- скорости движения самосвала;
- атмосферные и погодные условия.

5. Перед испытаниями исследуемая несущая конструкция кузова карьерного самосвала должна быть оборудована необходимыми измерительными датчиками и аппаратурой. Установка такого оборудования не должна вносить изменения в рабочие режимы кузова и характеристики локальной нагруженности исследуемых элементов конструкций. Основными характеристиками локальной нагруженности конструкций являются механические напряжения.

Таким образом, применяемая аппаратура, методы и средства измерений должны обеспечивать измерение и регистрацию случайно изменяющихся показателей механических напряжений с достаточной точностью и частотой дискретизации.

Подготовка к дорожным испытаниям включает следующие этапы:

- выбор схемы расположения тензорезисторов и их наклейка на исследуемый объект;
- монтаж, наладка и тарировка измерительного оборудования;

- определение статических напряжений от веса перевозимого груза.

6. Испытания проводятся в условиях, приближенных к эксплуатационным, согласно режимам, которые были выделены для изучения показателей нагруженности исследуемых несущих конструкций кузова. С учетом этого, испытания можно разделить на полигонные и эксплуатационные, проводимые в реальных условиях эксплуатации.

Преимуществом полигонных испытаний при наличии соответствующих условий является относительная простота их организации, неизменность условий (повторяемость) и, следовательно, сопоставимость результатов, возможность детального изучения, как анализируемых процессов, так и влияния возможных изменений конструкций на исследуемые показатели.

Эксплуатационные испытания в полной степени описывают реальные условия работы машины, однако с учетом особенностей организации добычи полезных ископаемых в карьере и вида добываемых ископаемых исследуемые нагрузочные режимы могут иметь значительные отличия от карьера к карьере. При этом дорожные условия в карьере непрерывно изменяются, что значительно усложняет проведение исследований и сопоставление результатов. С точки зрения организации испытаний достаточно сложно обеспечить подготовку машины, проведение измерений на определенных участках дорог, режимах при минимальном влиянии на режим работы предприятия.

Таким образом, целесообразно проводить комбинированные испытания. Основную часть информации получать из полигонных испытаний. Недостающую информацию по режимам, изученным не в полной мере, или режимам, которые невозможно реализовать в полигонных условиях, получают из эксплуатационных испытаний ограниченного объема и продолжительности.

7. Анализ результатов испытаний включает обработку процессов эксплуатационного нагружения, зарегистрированных в исследуемых зонах кузова, состоящих из следующих этапов [36].

7.1. Схематизация процессов случайного нагружения включает:

- подготовку исходного процесса нагружения к схематизации;
- выделение экстремумов процесса нагружения;
- выделение отдельных циклов процесса нагружения;
- учет асимметрии нагружения (приведение асимметричных циклов нагружения к эквивалентным по повреждению циклам с постоянной асимметрией цикла, как правило, симметричного нагружения);
- формирование вариационного ряда эквивалентных по повреждающему действию напряжений.

Одна из наиболее важных стадий схематизации случайного нагружения — выделение отдельных циклов процесса нагружения.

Наибольшее распространение для выполнения этой задачи сегодня получил метод «потоков дождя» [37].

7.2. Расчет повреждающего действия процессов случайного нагружения. Для этого необходимо наличие следующих исходных данных:

- угол наклона кривой усталости (показатель степени m);
- протяженность участка, на котором был зарегистрирован исследуемый процесс нагружения l (в тех единицах измерения, в которых будет сопоставляться повреждение). Для нагрузочных режимов, исчисляемых единичными повторениями, например таких составных режимов рабочего цикла, как загрузка, разгрузка, поворот, значение l принимается равным единице.

Вычисление удельного эквивалентного усталостного повреждающего действия режима эксплуатации в рассматриваемой зоне конструкции осуществляется с использованием формул:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{\sigma_i}^m}{l} \quad (3)$$

или

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{\sigma_i}}{\sigma_{-1}} \right)^m}{l}, \quad (4)$$

где n — число выделенных циклов случайного процесса; σ_{σ_i} — эквивалентная по повреждению i -я амплитуда, приведенная к симметричному циклу нагружения; σ_{-1} — предел выносливости рассматриваемого элемента конструкции при симметричном цикле нагружения.

Отличие зависимости (4) от (3) заключается в том, что в (4) вычисляется относительное эквивалентное повреждающее действие процесса нагружения относительно величины предела выносливости σ_{-1} рассматриваемого элемента конструкции. Это позволяет учитывать фактические особенности конструкции, технологии изготовления или нагружения конкретной зоны или элемента конструкции.

Приведение цикла с некоторой асимметрией R_i к эквивалентному по повреждению симметричному циклу с амплитудой σ_{σ_i} выполняется с использованием зависимости [36]:

$$\sigma_{\sigma_i} = \sigma_{\sigma_i} \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{R_i}}, \quad (5)$$

где σ_{σ_i} — i -я выделенная амплитуда цикла процесса нагружения; σ_{R_i} — предел выносливости рассматриваемого i -го цикла нагружения с асимметрией R_i .

На основе диаграммы предельных амплитуд Гудмана расчет амплитуды σ_{R_i} выполняется по формуле:

$$\sigma_{R_i} = \frac{1}{1 - R_i} \cdot \frac{\sigma_{-1} \sigma_b}{\sigma_b + \sigma_{-1} \left(\frac{1 + R_i}{1 - R_i} \right)}, \quad (6)$$

где σ_b — предел прочности материала конструкции.

Значение эквивалентного усталостного повреждающего действия D , вычисленное по выражению (3) или (4), приведено к одному километру пробега или единичному нагружению в соответствующих условиях эксплуатации.

7.3. Расчет повреждающего действия для рабочего цикла самосвала.

После определения удельного эквивалентного усталостного повреждающего действия процессов нагружения для отдельных режимов эксплуатации рассчитывается усталостное повреждающее действие для принятого типового рабочего цикла самосвала. Выражение для расчета суммарного усталостного повреждающего действия типового рабочего цикла самосвала имеет вид:

$$D_{\Sigma} = \sum_{j=1}^k s_j D_{uj} + \sum_{z=1}^f b_z D_{cz}, \quad (7)$$

где D_u — удельное эквивалентное усталостное повреждающее действие режима эксплуатации (вычисляется по выражению (3) или (4) и приведено к одному километру пробега), длительность которого описывается длиной пройденного пути s ; k — число режимов эксплуатации, описываемых длиной пройденного пути; D_c — удельное повреждающее действие единичных составляющих режима эксплуатации; f — число единичных составляющих режима эксплуатации; b — количество повторений z -й постоянной составляющей. Произведение $s_j D_{uj}$ или $b_z D_{cz}$ представляет эквивалентное усталостное повреждающее действие j -го или z -го режима эксплуатации.

Значения D_{Σ} рассчитываются для каждой исследуемой зоны конструкции. Зоны с наибольшими значениями D_{Σ} будут иметь наибольшее усталостное повреждение. Величина D_{Σ} также позволяет систематизировать эксплуатационные режимы по величине повреждающего воздействия в рассматриваемой зоне конструкции.

Апробация методики. Апробация разработанной методики выполнена на примере определения наиболее повреждающих по критерию усталости эксплуатационных режимов нагружения, а также выявления наиболее нагруженных зон несущих конструкций кузова карьерного самосвала БЕЛАЗ-7558 грузоподъемностью 90 т.

Карьерный самосвал БЕЛАЗ-7558 представляет собой одну из наиболее распространенных моделей с классической конструкцией универсального кузова ковшевого типа, имеющего козырек, соответствующий системе безопасности FOPS и ROPS (ГОСТ 27719 и ГОСТ ИСО 3471). Несущая конструкция кузова имеет сварное осно-

вание, образованное лонжеронами и поперечинами, изготавливаемыми из П-образных профилей. К основанию крепятся плоское днище, передний и боковые борта из листового проката, также усиленные гнутыми П-образными профилями.

Исследование локальной нагруженности несущих конструкций кузова выполнялось методом электротензометрии с использованием многоканального измерительного усилителя MGCplus (НВМ, Германия). Он был укомплектован восьмиканальными сменными измерительными модулями ML801 (НВМ, Германия).

Регистрация процессов изменения механических напряжений во время проведения испытаний выполнялась с использованием одноосных тензорезисторов модели FLA-5-11 (TML, Япония) сопротивлением $R = 120$ Ом и измерительной базой $L = 3$ мм. Тензорезисторы подключались к системе сбора и обработки данных по полумостовой схеме. На несущих конструкциях кузова было установлено 8 тензорезисторов. Зоны установки и соответствующая им нумерация датчиков приведены на рисунке 2.

Регистрация напряжений выполнялась с частотой 200 Гц, определенной согласно зависимости (2), исходя из частоты порядка 9 Гц [14] колебания кузова карьерного самосвала с грузом при установке на резиновых амортизаторах.

Определение нагруженности выполнялось для груженого состояния самосвала. Было принято, что движение без полезной нагрузки не создает повреждающего воздействия на несущие конструкции. В качестве груза использовался гранитный щебень фракции 40–70 мм. Погрузка осуществлялась экскаватором емкостью ковша 12 м^3 . Необходимая номинальная масса была загружена семью ковшами. Контроль массы груза выполнялся с использованием бортовой системы контроля загрузки до номинального значения с погрешностью ~5 %.

Испытания проводились на дорогах и спецучастках автополигона ОАО «БЕЛАЗ» — управ-

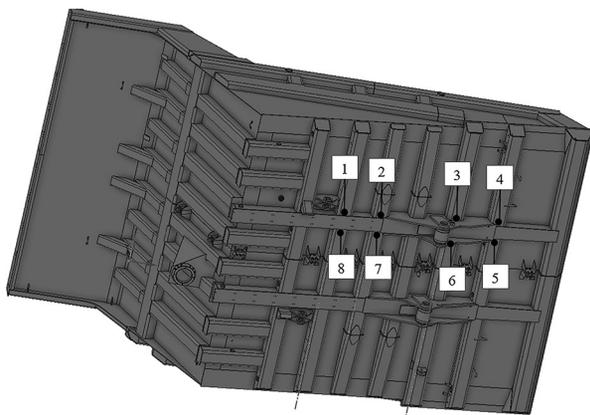


Рисунок 2 — Зоны установки тензорезисторов на несущих конструкциях кузова карьерного самосвала
Figure 2 — Areas of strain gauges installation on the load-bearing structures of the dump truck body

Таблица — Анализируемые нагрузочные режимы (рабочий цикл)
Table — Analyzed loading modes (working cycle)

№ режима	Описание режима	Протяженность участка s_j / число повторений режима b_z
1	Движение по спецучастку «отвал»	s_1
2	Движение по спецучастку «технологическая дорога»	s_2
3	Поворот налево 180°	s_3
4	Поворот направо 180°	s_4
5	Подъем под уклон 16 %	s_5
6	Подъем под уклон 25 %	s_6
7	Разгрузка	b_1
8	Загрузка	b_2

ляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» (г. Жодино). Описание исследуемых и отобранных для анализа нагрузочных режимов, формирующих рассматриваемый типовой рабочий цикл самосвала, приведено в таблице.

Схематизация зарегистрированных процессов изменения напряжений выполнялась по методу «потоков дождя» с использованием компьютерной программы собственной разработки Resurs-BelAZ [37]. Далее по выделенным амплитудам процессов рассчитывалось их повреждающее действие с использованием зависимостей (3) и (5). Учитывалось, что анализируемые зоны содержат сварные соединения, которые могут иметь остаточные напряжения (в зависимости (5) принимается $\sigma_{-1} / \sigma_{Ri} = 1$).

Суммарное усталостное повреждающее действие типового рабочего цикла самосвала для исследуемых конструкций кузова рассчитывалось с использованием формулы (7). Для возможности публикации результатов в открытой печати полу-

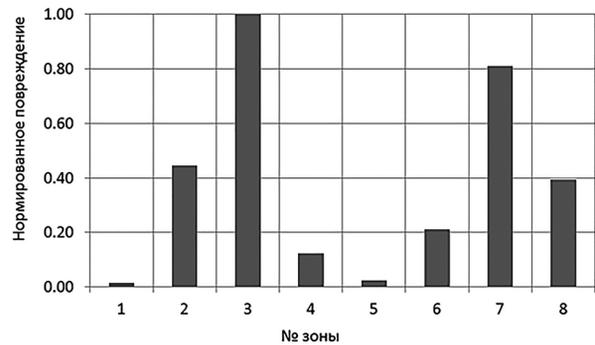


Рисунок 3 — Сравнение расчетных нормированных значений суммарных усталостных повреждений от действия типового рабочего цикла самосвала в исследуемых зонах несущей конструкции кузова

Figure 3 — Comparison of calculated normalized values of total fatigue damage from the effect of a typical operating cycle of a dump truck in the investigated zones of the load-bearing body structure

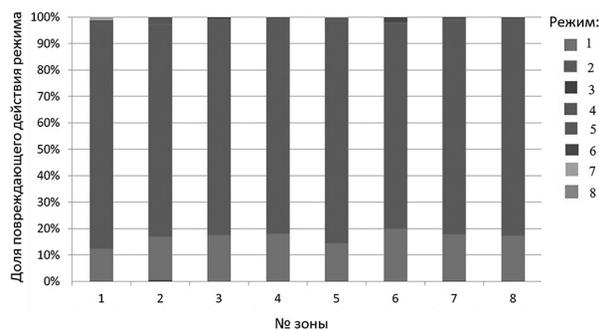


Рисунок 4 — Сравнение расчетных значений эквивалентного усталостного повреждающего действия рассматриваемых режимов нагружения для исследуемых зон несущей конструкции кузова

Figure 4 — Comparison of calculated values of the equivalent fatigue damaging effect of the considered loading modes for the investigated zones of the load-bearing body structure

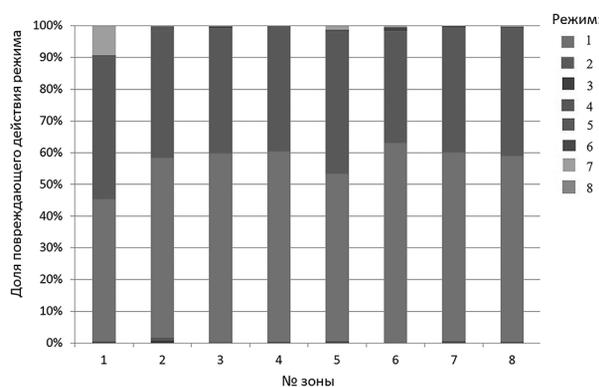


Рисунок 5 — Сравнение удельного эквивалентного усталостного повреждающего действия отдельных единичных режимов и режимов, представленных участками равной протяженности

Figure 5 — Comparison of specific equivalent fatigue damaging effect of individual modes and modes represented by sections of equal extent

ченные значения нормировались относительно значений наиболее повреждающих процессов. Расчетные нормированные значения суммарных накопленных усталостных повреждений (за единицу принималась величина максимального повреждения) для рассматриваемого типового рабочего цикла, вычисленные в исследуемых зонах несущей конструкции кузова, приведены на рисунке 3 в виде гистограммы.

Сравнение расчетных значений эквивалентного усталостного повреждающего действия рассматриваемых режимов нагружения в составе рассматриваемого рабочего цикла самосвала для исследуемых зон несущей конструкции кузова приведено на рисунке 4.

Результаты расчетной оценки значений удельного эквивалентного усталостного повреждающего действия отдельных режимов и режимов, представленных участками равной протяженности, приведены на рисунке 5 с целью сравнения в относительном формате.

Заключение. Разработана методика расчетно-экспериментальной оценки усталостного по-

вреждающего воздействия эксплуатационных режимов на несущую конструкцию кузова карьерного самосвала. Методика позволяет определять наиболее опасные по критерию многоциклового усталости зоны несущей конструкции, а также оценивать повреждающее действие отдельных эксплуатационных режимов, формирующих рабочий цикл самосвала. Экспериментальная часть исследований представлена полигонными или эксплуатационными испытаниями с фиксацией процессов изменения механических напряжений в наиболее нагруженных зонах конструкций методом электротензометрии. Расчетная часть состоит в схематизации зарегистрированных процессов изменения напряжений и расчета эквивалентного накопленного усталостного повреждения в рассматриваемой зоне несущей системы с применением параметров кривой усталости элемента конструкции.

Апробация методики выполнена на примере исследования нагруженности и накопления усталостных повреждений несущих конструкций кузова карьерного самосвала БЕЛАЗ-7558. Нагруженность конструкций определена в ходе полигонных испытаний самосвала для восьми режимов нагружения, включающих загрузку и разгрузку кузова сыпучим грузом. Процессы изменения механических осевых напряжений в ходе испытаний зарегистрированы в восьми зонах.

Результаты анализа экспериментальных данных позволили выявить две наиболее нагруженные зоны конструкции, в которых накопление усталостных повреждений происходит в два и более раза быстрее, чем в остальных. Важным результатом является определение режимов, создающих наибольшее усталостное повреждение конструкций. Это режимы движения самосвала по технологической дороге и дороге в отвале.

Наибольшее усталостное повреждение за рабочий цикл самосвала в рассматриваемых зонах кузова формируется при движении по технологической дороге. При этом наибольшее удельное эквивалентное усталостное повреждающее действие создается при движении по дороге «отвал» и больше соответствующего значения для технологической дороги в 1,5 раза. Это объясняется тем, что протяженность технологической дороги в рассматриваемом рабочем цикле самосвала больше протяженности дороги «отвал» в 7 раз.

Один из важных выводов проведенных исследований — основное усталостное повреждение формируется режимами движения по неровной дорожной поверхности. Режимы загрузки и разгрузки создают незначительное повреждающее воздействие.

Необходимо отметить, загрузка выполнялась сыпучим грузом относительно малой дисперсности, что может объяснить относительно небольшое силовое воздействие на несущую систему.

Поэтому целесообразно продолжить подобные исследования в реальных эксплуатационных условиях с загрузкой породой со значительными единичными размерами частиц.

Список литературы

1. Долматовский, Ю.А. Основы конструирования автомобильных кузовов / Ю.А. Долматовский. — М.: МАШГИЗ, 1962. — 320 с.
2. Кац, А.М. Автомобильные кузова / А.М. Кац. — М.: Транспорт, 1972. — 117 с.
3. Тесер, Е. Кузова большегрузных автомобилей / Е. Тесер; пер. с польск. Г.В. Коршунова. — М.: Машиностроение, 1979. — 232 с.
4. Автомобиль: основы конструкции: учебник для студентов вузов по спец. «Автомобили и автомобильное хозяйство» / Н.Н. Вишняков, В.К. Вахламов, А.Н. Нарбут [и др.]. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 304 с.
5. Автомобили: конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть: учеб. пособие для вузов / А.И. Гришкевич, Д.М. Ломако, В.П. Автушко [и др.]; под ред. А.И. Гришкевича. — Минск: Выш. шк., 1987. — 200 с.
6. Автомобили-самосвалы / В.Н. Белокуров, О.В. Гладков, А.А. Захаров, А.С. Мелик-Саркисянц; под общ. ред. А.С. Мелик-Саркисянца. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
7. Кудрявцев, С.М. Кузов современного автомобиля: монография / С.М. Кудрявцев, Г.В. Пачурин, Д.В. Соловьев; под общ. ред. С.М. Кудрявцева. — Нижний Новгород, 2010. — 236 с.
8. Родичев, В.А. Грузовые автомобили: учебник для нач. проф. образования / В.А. Родичев. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 240 с.
9. Акулова, А.А. Основы конструкции автомобилей: учеб. пособие / А.А. Акулова, Ю.Н. Строганов; под общ. ред. Ю.Н. Строганова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 168 с.
10. Павленко, П.Д. Влияние силового взаимодействия кузова и шасси на прочность рамы большегрузного автомобиля-самосвала: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Павленко Петр Дмитриевич; Завод-ВТУЗ при Моск. авто-моб. з-де им. И.А. Лихачева. — М., 1984. — 26 с.
11. Прочность и долговечность корпусных деталей карьерных автосамосвалов: операт.-инф. матер. / А.К. Бернацкий [и др.]. — Минск: Ин-т проблем надежности и долговечности машин, 1989. — 53 с.
12. Вихренко, Д.В. Совершенствование методов проектирования несущих узлов шасси грузового автомобиля для повышения их прочностных характеристик: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Дмитрий Вячеславович Вихренко; БНТУ. — Минск, 2008. — 161 с.
13. Сибгатуллин, К.Э. Разработка методов расчета на прочность несущих систем грузовых автомобилей с учетом пластических деформаций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Камилль Эмерович Сибгатуллин; Камская гос. науч.-технич. акад. — Набережные Челны, 2009. — 20 с.
14. Испеньков, С.А. Моделирование динамической нагруженности рам карьерных самосвалов для оценки и повышения их долговечности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Сергей Анатольевич Испеньков; Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси. — Минск, 2013. — 20 с.
15. Расчетная оценка усталостной долговечности несущих конструкций карьерного самосвала на основе комплексного компьютерного моделирования процессов нагружения и накопления повреждений / А.В. Шмелёв, Э.В. Лисовский, С.А. Шляжко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 1(50). — С. 33–44.
16. Проектная оценка конструкции рамы на стадии эскизной компоновки четырёхосного автомобиля-самосвала / П.П. Капуста, О.Н. Лебедев, М.П. Дилух [и др.] // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр. / Бел. нац. техн. ун-т; редкол.: В.К. Шелег (гл. ред.) [и др.]. — Минск: БНТУ, 2021. — Вып. 33. — С. 106–127.
17. Логинов, А.И. Вагоны-самосвалы / А.И. Логинов, Н.Е. Афанасовы. — М.: Машиностроение, 1975. — 192 с.
18. Вагоны-самосвалы. Требования к прочности и динамическим качествам: ГОСТ 34764-2021. — Введ. 01.02.2022. — М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. — 36 с.
19. Карьерные самосвалы особо большой грузоподъемности. Проектирование, технологии, маркетинг / П.Л. Мариев, А.Н. Егоров, В.И. Моисеенко [и др.]. — Минск: Интеграл-полиграф, 2008. — 320 с.
20. Разработка имитационной модели динамики карьерного автосамосвала для определения нагрузок, действующих на несущую систему и грузовую платформу при загрузке и разгрузке дисперсного груза / Д.М. Дубинкин, И.В. Чичекин, Я.Ю. Левенков, Г.А. Арутюнян // Горная промышленность. — 2021. — № 6. — С. 117–126. — DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-117-126>.
21. Дубинкин, Д.М. Методика определения нагрузок, действующих при погрузке и разгрузке грузовой платформы (кузова) карьерного самосвала / Д.М. Дубинкин // Горное оборудование и электромеханика. — 2022. — № 3(161). — С. 31–49. — DOI: <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-3-31-49>.
22. Барышников, Ю.Н. Силовое взаимодействие узлов автомобиля-самосвала при разгрузке / Ю.Н. Барышников // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. — 2015. — № 2. — С. 35–43.
23. Исследование нагруженности и долговечности платформы самосвала при моделировании загрузки сыпучим грузом / П.С. Литвинюк, А.Л. Кисельков, А.С. Хацкевич, А.М. Насковец // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2023. — Вып. 12. — С. 248–254.
24. Sankar, N.B. Optimization of material usage in the fabrication of dump body / N.B. Sankar, M.L. Sramika // International journal of innovative technology and research. — 2016. — Vol. 4, iss. 5. — P. 3596–3604.
25. Hybrid multi-objective optimization method based on NSGA-II algorithm and entropy weighted TOPSIS for lightweight design of dump truck carriage [Electronic resource] / R. Jiang, S. Ci, D. Liu [et al.] // Machines. — 2021. — Vol. 9, iss. 8. — DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9080156>.
26. Тенденции развития грузовых платформ карьерных самосвалов / Д.М. Дубинкин, А.В. Ялышев, Ш.Я. Исмаилова // Горная промышленность. — 2023. — № 3. — P. 72–76. — DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-72-76>.
27. Austin's lightest-ever truck tray launched // Austin. — URL: <https://www.austineng.com/austins-lightest-ever-truck-tray-launched/> (date of access: 20.08.2024).
28. New ultraclass Duratrax SDB models designed and commissioned for CATERPILLAR 796AC mining trucks // Duratrax. — URL: <https://www.duratrax.com/post/new-ultraclass-duratrax-sdb-models-designed-and-commissioned-for-cat-796ac-trucks> (date of access: 20.08.2024).
29. Schlam launches Hercules EXO Dump Body // Trucksales Staff. — URL: <https://www.trucksales.com.au/editorial/details/schlam-launches-hercules-exo-dump-body-134140> (date of access: 20.08.2024).
30. Austin's High-Performance Truck Tray (HPT) at cutting-edge of design and engineering // Austin. — URL: <https://www.austineng.com/austins-high-performance-truck-tray-hpt-at-cutting-edge-of-design-and-engineering/> (date of access: 20.08.2024).
31. First Central Europe deliveries of Metso Truck Bodies // Aggregates Business. — URL: <https://www.aggbusiness.com/ab1/news/first-central-europe-deliveries-metso-truck-bodies> (date of access: 20.08.2024).
32. Hercules open cut dump bodies // Schlam. — URL: <https://schlam.com/payload-apac/hercules-open-cut-dump-bodies/> (date of access: 20.08.2024).
33. Body upgrade for haul trucks // Austin. — URL: <https://www.austineng.com/body-upgrade-for-haul-trucks/> (date of access: 20.08.2024).
34. DT hload industrial equipment // Simuserv. — URL: https://www.simuserv.de/fileadmin/user_upload/downloads/Branchen/T_M/3DS_2015_CS_Tray_Optimisation_DTHiLoad_CF.pdf (date of access: 20.08.2024).
35. How to analyze the structural strength of dump truck body during loading and unloading using EDEM +OS one-way coupling // Altair Community. — URL: <https://community.altair.com/discussion/39642/how-to-analyze-the-structural-strength-of-dump-truck-body-during-loading-and-unloading-using-edem-os-one-way-coupling> (date of access: 20.08.2024).
36. Шмелёв, А.В. Совершенствование методов схематизации случайных процессов нагружения и расчета усталостной долговечности несущих конструкций грузовых автомобилей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Алексей Васильевич Шмелёв; Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси. — Минск, 2010. — 20 с.
37. Jono, M. Fatigue damage and crack growth under variable amplitude loading with reference to the counting methods of stress-strain ranges / M. Jono // International Journal of Fatigue. — 2005. — Vol. 27, iss. 8. — P. 1006–1015. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.09.011>.

SHMIALIOU Aliaksei V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Deputy Director General for Research¹

E-mail: shmeliiov.alexei@gmail.com

NASKOVETS Alexander M.

General Designer – Head of the Scientific and Technical Center named after A.N. Egorov²

E-mail: 7653828@gmail.com

KHITRIKOV Sergey V.

Deputy Head of the Department of Computer Modelling and Virtual Testing of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: krom_hsv@bk.ru

KRAUCHONAK Aliaksandr L.

Researcher of the Division Virtual Testing of the Department of Computer Modelling and Virtual Testing of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: kravchenoks@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²OJSC “BELAZ” — Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Republic of Belarus

Received October 9, 2024.

DETERMINATION OF THE MOST DAMAGING OPERATIONAL LOADING MODES OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF THE DUMP TRUCK BODY BY FATIGUE CRITERION

A procedure is developed for the calculation and experimental assessment of the operational modes damaging effect on the load-bearing structure of a dump truck body. The procedure makes it possible to determine the most dangerous zones of the load-bearing structure according to the multicycle fatigue criterion, as well as to assess the damaging effect of individual operational modes forming the dump truck working cycle. Analysis of the loading and fatigue damage accumulation of the load carrying structures of the BELAZ 7558 dump truck body was used for the procedure testing. Structure loadings have been determined for eight operating modes, including loading and unloading the body with bulk cargo during field tests. Processes of change of mechanical axial stresses during the tests were registered in eight zones. Experimental data analysis revealed two zones of the structure where the fatigue damage accumulation happens more than twice as fast as in the others. It is established that dump truck movement modes for technological road and the road in the dump area are characterized by the greatest fatigue damage accumulation. For the truck whole working cycle the most damaging movement mode for body is moving on the technological road. At the same time, the greatest unit equivalent fatigue damaging effect is formed by moving on the dump road and is greater than the corresponding value for the technological road by about 1.5 times. This is explained by the fact that the length of the technological road in the considered working cycle of the dump truck is 7 times more than the length of the dump road.

Keywords: dump truck, body, load-bearing structure, procedure, testing, calculation, fatigue, loading mode, damage accumulation

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-17-27>

References

1. Dolmatovskiy Yu.A. *Osnovy konstruirovaniya avtomobilnykh kuzovov* [The basics of designing car bodies]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1962. 320 p. (in Russ.).
2. Kats A.M. *Avtomobilnye kuzova* [Car bodies]. Moscow, Transport Publ., 1972. 117 p. (in Russ.).
3. Teisseyre J. *Nadwozia samochodow ciezkiego transportu*. Warsaw, Komunikacji i Laczności, 1976.
4. Vishnyakov N.N., et al. *Avtomobil: osnovy konstruktsii* [Car: the basics of construction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 304 p. (in Russ.).
5. Grishkevich A.I., et al. *Avtomobili: konstruktsiya, konstruirovaniye i raschet. Sistemy upravleniya i khodovaya chast* [Cars: construction, construction and calculation. Control systems and chassis]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1987. 200 p. (in Russ.).
6. Belokurov V.N., Gladkov O.V., Zakharov A.A., Melik-Sarkisyants A.S. *Avtomobili-samosvaly* [Dump trucks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 216 p. (in Russ.).
7. Kudryavtsev S.M., Pachurin G.V., Solovev D.V. *Kuzov sovremennogo avtomobilya* [Modern car body]. Nizhniy Novgorod, 2010. 236 p. (in Russ.).
8. Rodichev V.A. *Gruzovye avtomobili* [Trucks]. Moscow, Izdatelskiy tsentr “Akademiya” Publ., 2005. 240 p. (in Russ.).

9. Akulova A.A., Stroganov Yu.N. *Osnovy konstruktсии avtomobily* [Basics of car construction]. Yekaterinburg, Uralskiy universitet Publ., 2017. 168 p. (in Russ.).
10. Pavlenko P.D. *Vliyaniye silovogo vzaimodeystviya kuzova i shassi na prochnost ramy bolshegruznogo avtomobilya-samosvala*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Effect of the force interaction of the body and chassis on the strength of the frame of a heavy-duty dump truck. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Moscow, 1984. 26 p. (in Russ.).
11. Bernatskiy A.K., et al. *Prochnost i dolgovechnost korpusnykh detaley karernykh avtosamosvalov* [Strength and durability of body parts of quarry dump trucks]. Minsk, Institut problem nadezhnosti i dolgovechnosti mashin Publ., 1989. 53 p. (in Russ.).
12. Vikhrenko D.V. *Sovershenstvovanie metodov proektirovaniya nesushchikh uzlov shassi gruzovogo avtomobilya dlya povysheniya ikh prochnostnykh kharakteristik*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of design methods for load-bearing components of a truck chassis to improve their strength characteristics. Ph. D. Thesis]. Minsk, 2008. 161 p. (in Russ.).
13. Sibgatullin K.E. *Razrabotka metodov rascheta na prochnost nesushchikh sistem gruzovykh avtomobilye s uchetom plasticheskikh deformatsiy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of methods for calculating the strength of load-bearing systems of trucks taking into account plastic deformations. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Naberezhnye Chelny, 2009. 20 p. (in Russ.).
14. Ispenkov S.A. *Modelirovaniye dinamicheskoy nagruzhenosti ram karernykh samosvalov dlya otsenki i povysheniya ikh dolgovechnosti*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Modeling of dynamic loading of dump truck frames to assess and improve their durability. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Minsk, 2013. 20 p. (in Russ.).
15. Shmialiou A.V., Lisouski E.V., Shliazhka S.A., Litviniuk P.S., Hachevich A.S. Raschetnaya otsenka ustalostnoy dolgovechnosti nesushchikh konstruktсий karernogo samosvala na osnove kompleksnogo kompyuternogo modelirovaniya protsessov nagruzheniya i nakopleniya povrezhdeniy [Calculated estimation of fatigue life of bearing structures of a mining dump truck based on complex computer modeling of loading and damage accumulation processes]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 1(50), pp. 33–44 (in Russ.).
16. Kapusta P.P., Lebedev O.N., Didukh M.P., Shinkevich V.S., Grikhno A.A. Proektnaya otsenka konstruktсии ramy na stadii eskiznoy kompanovki chetyrekhosnogo avtomobilya-samosvala [Design evaluation of frame structure at the stage of preliminary design of a four-axle dump truck]. *Mashinostroenie*, 2021, iss. 33, pp. 106–127 (in Russ.).
17. Loginov A.I., Afanaskin N.E. *Vagony-samosvaly* [Dump cars]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 192 p. (in Russ.).
18. State Standard 34764-2021. *Vagony-samosvaly. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [Dump cars. Requirements to structural straight and dynamic qualities]. Moscow, Rossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2021. 36 p. (in Russ.).
19. Mariev P.L., Egorov A.N., Moiseenko V.I., Zotov A.A., Kuleshov A.A. *Karernye samosvaly osobo bolshey gruzopodemnosti. Proektirovaniye, tekhnologii, marketing* [Quarry dump trucks of particularly high load capacity. Design, technology, marketing]. Minsk, Integralpoligraf Publ., 2008. 320 p. (in Russ.).
20. Dubinkin D.M., Chichekin I.V., Levenkov Ya.Yu., Arutyunyan G.A. Razrabotka imitatsionnoy modeli dinamiki karernogo avtosamosvala dlya opredeleniya nagruzok, deystvuyushchikh na nesushchuyu sistemu i gruzovuyu platformu pri zagruzke i razgruzke dispersnogo gruzha [Development of a simulation dump truck dynamics model to estimate loads acting on its carrier and load platform when loading and dumping bulk loads]. *Russian mining industry*, 2021, no. 6, pp. 117–126. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-117-126> (in Russ.).
21. Dubinkin D.M. Metodika opredeleniya nagruzok, deystvuyushchikh pri pogruzke i razgruzke gruzovoy platformy (kuzova) karernogo samosvala [Method of determining the loads acting during loading and unloading of the cargo platform (body) of quarry dump truck]. *Mining equipment and electromechanics*, 2022, no. 3(161), pp. 31–49. DOI: <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-3-31-49> (in Russ.).
22. Baryshnikov Yu.N. Silovoe vzaimodeystvie uzlov avtomobilya-samosvala pri razgruzke [Force interaction of dump truck components during unloading]. *Machines and plants: design and exploiting*, 2015, no. 2, pp. 35–43 (in Russ.).
23. Litviniuk P.S., Kiselkov A.L., Khatskevich A.S., Naskovets A.M. Issledovanie nagruzhenosti i dolgovechnosti platformy samosvala pri modelirovani i zagruzki sypuchim gruzom [Investigation of loading and durability of a dump truck platform when simulating bulk cargo loading]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2023, iss. 12, pp. 248–254 (in Russ.).
24. Sankar N.B., Sramika M.L. Optimization of material usage in the fabrication of dump body. *International journal of innovative technology and research*, 2016, vol. 4, iss. 5, pp. 3596–3604.
25. Jiang R., Ci S., Liu D., Cheng X., Pan Z. Hybrid multi-objective optimization method based on NSGA-II algorithm and entropy weighted TOPSIS for lightweight design of dump truck carriage. *Machines*, 2021, vol. 9, iss. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9080156>.
26. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V., Ismailova Sh.Ya. Tendentsii razvitiya gruzovykh platform karernykh samosvalov [Trends in the development of unmanned mining dump trucks]. *Russian mining industry*, 2023, no. 3, pp. 72–76. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-72-76> (in Russ.).
27. *Austin's lightest-ever truck tray launched*. Available at: <https://www.austineng.com/austins-lightest-ever-truck-tray-launched/> (accessed August 20, 2024).
28. *New ultraclass Duratray SDB models designed and commissioned for CATERPILLAR 796AC mining trucks*. 2023. Available at: <https://www.duratray.com/post/new-ultraclass-duratray-sdb-models-designed-and-commissioned-for-cat-796ac-trucks> (accessed August 20, 2024).
29. *Schlam launches Hercules EXO dump body*. Available at: <https://www.trucksales.com.au/editorial/details/schlam-launches-hercules-exo-dump-body-134140> (accessed August 20, 2024).
30. *Austin's high-performance truck tray (HPT) at cutting-edge of design and engineering*. 2023. Available at: <https://www.austineng.com/austins-high-performance-truck-tray-hpt-at-cutting-edge-of-design-and-engineering/> (accessed August 20, 2024).
31. *First Central Europe deliveries of Metso Truck Bodies*. 2020. Available at: <https://www.aggbusiness.com/ab1/news/first-central-europe-deliveries-metso-truck-bodies> (accessed August 20, 2024).
32. *Hercules open cut dump bodies*. Available at: <https://schlam.com/payload-apac/hercules-open-cut-dump-bodies/> (accessed August 20, 2024).
33. *Body upgrade for haul trucks*. 2020. Available at: <https://www.austineng.com/body-upgrade-for-haul-trucks/> (accessed August 20, 2024).
34. *DT HiLoad industrial equipment*. Available at: https://www.simuserve.de/fileadmin/user_upload/downloads/Branchen/T_M/3DS_2015_CS_Tray_Optimisation_DTHiLoad_CF.pdf (accessed August 20, 2024).
35. *How to analyze the structural strength of dump truck body during loading and unloading using EDEM +OS one-way coupling*. Available at: <https://community.altair.com/discussion/39642/how-to-analyze-the-structural-strength-of-dump-truck-body-during-loading-and-unloading-using-edem-os-one-way-coupling> (accessed August 20, 2024).
36. Shmialiou A.V. *Sovershenstvovanie metodov skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya i rascheta ustalostnoy dolgovechnosti nesushchikh konstruktсий gruzovykh avtomobilye*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of methods for schematization of random loading processes and calculation of fatigue life of load-bearing structures of trucks. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Minsk, 2010. 20 p. (in Russ.).
37. Jono M. Fatigue damage and crack growth under variable amplitude loading with reference to the counting methods of stress-strain ranges. *International journal of fatigue*, 2005, vol. 27, iss. 8, pp. 1006–1015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.09.011>.