



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.423.25:62-214.6

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-135-145>EDN: <https://elibrary.ru/lhcfuk>

Оценка ударной прочности корпуса тягового редуктора высокоскоростного электропоезда с учетом скорости деформации материала

Е. К. Рыбников, С. В. Володин, Т. О. Вахромеева✉

Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен актуальный для высокоскоростного железнодорожного сообщения вопрос решения широкого спектра задач по сохранению прочности элементов экипажной части поезда под ударным воздействием частиц балласта, например кусков льда в холодный период года. Твердые предметы поднимаются с поверхности пути в результате аэродинамического взаимодействия с турбулентным воздушным потоком от поезда, следующего с высокой скоростью. Возникают механические повреждения ходовых частей и узлов в их подвагонном пространстве, которые могут оказаться значительными и создать угрозу безопасности движения. Цель данного исследования — оценка вероятности существенных разрушений корпуса редуктора от сторонних предметов, находящихся на пути, и разработка способа защиты.

Материалы и методы. Возможность разрушения корпуса рассчитывается методом численного моделирования в среде MSC.Nastran_SOL700, позволяющей выполнять анализ динамических событий короткой продолжительности с серьезными геометрическими и материальными нелинейностями. Описана методика оценки прочности конструкции корпуса редуктора при динамическом воздействии на него стороннего объекта.

Результаты. Выполнена отработка расчетной методики на упрощенной модели корпуса редуктора; методика применена на моделях, близких к реальному корпусу редуктора. Для этого были рассмотрены две модели задания свойств материала: обычная (General) и модель Купера — Саймондса (Cowper — Simonds), учитывающая зависимость динамических деформаций материала от скорости деформации. Проведена оценка влияния сторонних предметов с разной массой и относительной скоростью на вероятность возникновения повреждения стенок редуктора при разных значениях их толщины.

Обсуждение и заключение. Расчеты подтверждают вероятность разрушения корпусов тяговых редукторов высокоскоростных и скоростных электропоездов при динамическом воздействии на корпус сторонних предметов. Проанализированы конструктивные решения для защиты корпусов тяговых редукторов высокоскоростных поездов от воздействий сторонних предметов и выбран наиболее рациональный вариант. Статья написана на основе доклада авторов, представленного на Московском форуме «XXII Российской конференции MSC Software (HxGN Live Design & Engineering Russia 2021)», прошедшего 16–19 ноября 2021 г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокоскоростной электропоезд, тяговый редуктор, динамическое воздействие, численное моделирование, разрушение, модель Cowper — Simonds

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рыбников Е. К., Володин С. В., Вахромеева Т. О. Оценка ударной прочности корпуса тягового редуктора высокоскоростного электропоезда с учетом скорости деформации материала // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 135–145. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-135-145>.

✉ vakhromeeva.tatiana@yandex.ru (Т. О. Вахромеева)

© Рыбников Е. К., Володин С. В., Вахромеева Т. О., 2023



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.423.25:62-214.6

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-135-145>

EDN: <https://elibrary.ru/lhcfuk>



Evaluation of the impact strength of the traction gearbox housing for the traction of a high-speed electric train in terms of deformation rate of the material

Evgeniy K. Rybnikov, Sergey V. Volodin, Tatiana O. Vakhromeeva✉

Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Solving a wide range of problems to maintain the strength of train undercarriage under the impact of ballast particles, such as ice chunks, during the cold season is considered a topical issue for high-speed railways. Solid objects are lifted off the track surface as a result of aerodynamic interaction with the turbulent airflow of a high-speed train. This causes mechanical damage to the bogie and its components, which could be significant and endanger road safety. The aim of this study is to assess the probability of significant damage to the traction gearbox housing from foreign objects on the way and to develop a method of protection.

Materials and methods. Housing failure potential is calculated using numerical simulation in MSC.Nastran_SOL700 environment, allowing analysis of short duration dynamic events with severe geometry and material non-linearity. The method of assessment of the structural strength of a traction gearbox housing under the dynamic action of a foreign object is described.

Results. The calculation methodology is tested on a simplified traction gearbox housing model. The methodology is then applied to models that are close to the real traction gearbox housing. The General model and the Cowper—Simonds model, which incorporates the strain rate dependence of the dynamic deformation of the material, are considered for specifying the material properties. The effect of foreign objects of different masses and relative speed on the probability of damage to the traction gearbox walls at different thicknesses is assessed.

Discussion and conclusion. Calculations confirm the probability of destruction of housings of traction gearboxes of high-speed and high-speed electric trains under the dynamic impact on the body of third-party objects. Structural solutions for protecting housings of traction gearboxes of high-speed trains from the effects of foreign objects are analysed and the most rational option is chosen. This article was written based on the authors' paper presented at the XXII Russian MSC Software Conference (HxGN Live Design & Engineering Russia 2021), November 16–19, 2021.

KEYWORDS: high-speed electric train, traction gearbox, dynamic action, numerical simulation, destruction, Cowper — Simonds model

FOR CITATION: Rybnikov E. K., Volodin S. V., Vakhromeeva T. O. Evaluation of the impact strength of the traction gearbox housing for the traction of a high-speed electric train in terms of deformation rate of the material. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):135-145. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-135-145>.

✉ vakhromeeva.tatiana@yandex.ru (T. O. Vakhromeeva)

© Rybnikov E. K., Volodin S. V., Vakhromeeva T. O., 2023

Введение. На российских железных дорогах в настоящее время эксплуатируются скоростные электропоезда серий ЭС1П, ЭС2Г, ЭС2ГП и высокоскоростные электропоезда ЭВС1/ЭВС2 с конструкционной скоростью 250 км/ч. Проектируется электропоезд для высокоскоростной линии Москва – Санкт-Петербург на 380–400 км/ч.

Эксплуатация высокоскоростного электропоезда «Сапсан» показала, что при большой скорости движения возникают воздушные потоки, которые способны поднимать камни щебеночного покрытия железнодорожного пути, и эти камни повреждают окраску частей тягового привода, находящихся под вагоном и на оси колесной пары [1–4]. Также имеются случаи разрушения нижней части рамы кузова вагона и окраски корпуса тягового редуктора на оси колесной пары (рис. 1).

Однако в такой случайной по своей структуре системе, каким является железнодорожный путь и изменяющаяся окружающая среда, по закону редких событий могут возникнуть условия, при которых происходят значительные разрушения неподрессоренных частей электропоезда, и эти разрушения могут угрожать безопасности движения на железных дорогах.

На рис. 2 показан результат совпадения неблагоприятных условий (по закону Э.А. Мэрфи) при движении электропоезда зимой, когда произошло значительное разрушение корпуса редуктора с образованием отверстия в картере (выделено на рисунке). При этом произошло вытекание смазки, разрушение подшипников и дальнейшее разрушение зубчатой муфты.

Такое разрушение могло привести к тяжелым последствиям. Точно определить предмет воздействия на конструкцию не представлялось возможным, особенно если учесть, что от момента воздействия до остановки поезд проходит порядка 2600 м. Можно предположить, что воздействие на корпус редуктора оказал кусок льда значительной массы, движущийся с большой скоростью, или металлический предмет от разрушения элементов рельсового пути или ходовых частей тележки, например тормозных дисков.

Разработка эффективной защиты от подобных разрушений предполагает понимание механики разрушения конструкционных материалов корпуса редуктора, условий его эксплуатации. Для решения данной задачи были смоделированы процессы динамического воздействия твердых предметов на корпус редуктора с помощью расчетного метода.

Разработка методики оценки прочности корпуса редуктора при динамическом воздействии. В технических требованиях на разработку нового электропоезда [5] предусмотрена расчетная проверка прочности



Рис. 1. Разрушения окраски корпуса редуктора из-за ударного воздействия щебня

Fig. 1. Damage to the paintwork on the traction gearbox housing caused by the impact of crushed stone



Рис. 2. Разрушение картера корпуса редуктора с образованием отверстия (выделено кружком) и последующим разрушением узлов тяговой передачи

Fig. 2. Destruction of the traction gearbox housing crankcase with the formation of a hole (circled) and subsequent destruction of the traction components

неподрессоренных ходовых частей (колесные пары, тяговые редукторы, тормозное оборудование). При этом прочность должна оцениваться при динамическом воздействии куска льда массой 5 кг. Это условие и было принято при моделировании динамического

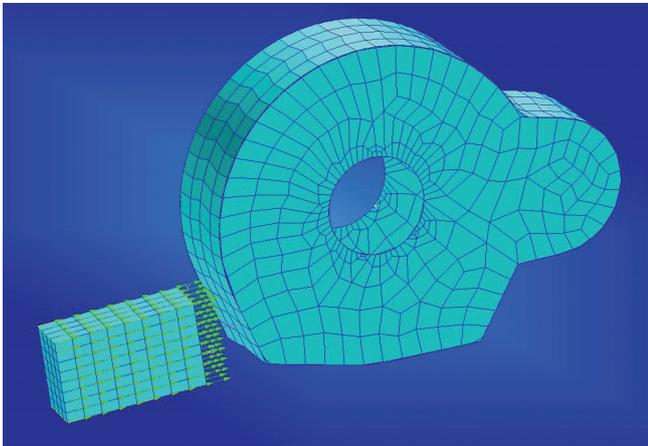


Рис. 3. Конечно-элементные модели куска льда и корпуса редуктора

Fig. 3. Finite element models of the ice chunk and the traction gearbox housing

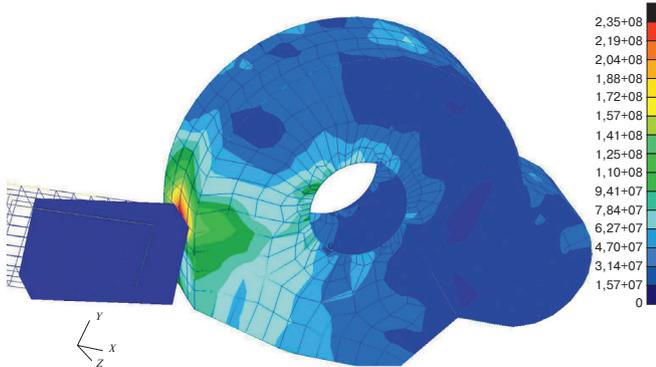


Рис. 4. Эффективные напряжения в месте удара куска льда при скорости 40 км/ч и толщине стенок редуктора 5 мм

Fig. 4. Effective stresses at the point of impact of a chunk of ice at 40 km/h and a traction gearbox wall thickness of 5 mm

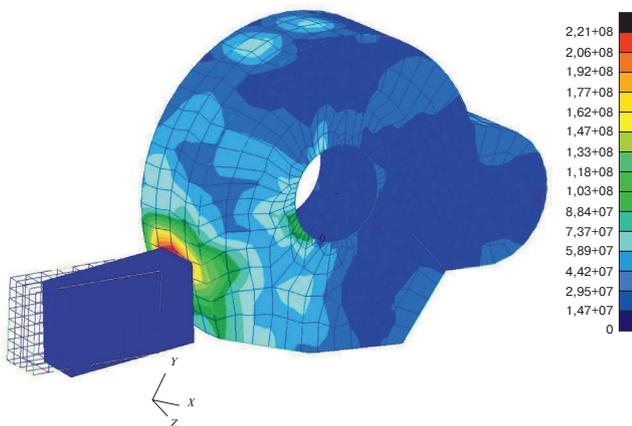


Рис. 5. Эффективные напряжения в месте удара куска льда при скорости 360 км/ч и толщине стенок редуктора 5 мм

Fig. 5. Effective stresses at the point of impact of a chunk of ice at 360 km/h and a traction gearbox wall thickness of 5 mm

воздействия на корпус редуктора для оценки его прочности и факта возникновения подобного разрушения.

Для моделирования использовались программные продукты фирмы MSC.Software Patran/Dytran.

Методика моделирования. Моделирование состоит из двух этапов. На первом этапе происходит разработка моделей и предварительная оценка методики моделирования. На втором этапе назначаются расчетные режимы моделирования по скорости, модели корпуса редуктора и предмета воздействия. Назначаются характеристики материалов моделей, размеры толщины стенок корпуса редуктора.

В качестве куска льда была принята форма прямоугольного параллелепипеда с объемом $0,0054 \text{ м}^3$, который был определен по массе 5 кг и средней плотности льда 920 кг/м^3 . Размеры параллелепипеда — $0,3 \times 0,18 \times 0,1 \text{ м}$. Модель куска льда принята абсолютно жесткой, ее свойства задаются по модели материала Rigid (MATRIG) в Dytran [6, 7].

Для настройки алгоритма задачи в качестве модели корпуса редуктора принята геометрическая модель с внешними габаритами реального редуктора, выполненная полностью тонкостенной [8]. Конечно-элементная модель состоит из элементов Quad 4 со свойствами оболочки Shell. По такой модели можно быстро ответить на вопрос о возможности разрушения стенки нижней части корпуса редуктора при воздействии куска льда.

На рис. 3 представлены модели куска льда и корпуса редуктора. На модели льда показаны векторы начальных скоростей.

Для корпуса редуктора принят эластопластичный (DMATER) материал из библиотеки Dytran со следующими параметрами: модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; коэффициент Пуассона — 0,3; предел текучести (Yield Stress) — $4,0 \cdot 10^8 \text{ Па}$; максимальная пластическая деформация (Max. Plastic Strain) — 0,5.

Корпуса реальных тяговых редукторов изготавливают с применением ряда технологий, которые зависят от требуемых по конструкции толщин стенок. Для тяговых редукторов их толщина меняется от 5 до 15 мм.

При моделировании был выполнен ряд предварительных расчетов с целью изучения влияния на показатели прочности таких параметров, как толщина стенок корпуса редуктора и относительная скорость движения модели куска льда. В результате расчетов было установлено, что при относительной скорости движения куска льда 40 км/ч и толщине стенок редуктора 5 мм не происходит сквозного разрушения стенки корпуса при эффективной величине напряжений 235 МПа (рис. 4). При толщине стенок редуктора 5 мм и относительной скорости куска льда 360 км/ч происходит сквозное разрушение стенки при эффективной величине напряжения 221 МПа (рис. 5 и 6).

При увеличении толщины стенок до 10 мм и относительной скорости перемещения куска льда 200 км/ч происходит деформация стенки в области удара, и кусок льда отбрасывается в противоположную сторону. Из-за значительной упругой деформации конструкции корпуса накапливается потенциальная энергия, которая превращается в кинетическую энергию движения куска льда.

На рис. 7 и 8 показаны перемещения куска льда в сторону от редуктора при деформации корпуса 37,9 мм. По верхнему листу корпуса распространяется бегущая волна, в результате энергия удара дополнительно расходуется на деформацию корпуса.

То же происходит и при увеличении толщины стенок корпуса редуктора до 15 мм и скорости движения куска льда 200 км/ч. На рис. 9 показано напряженно-деформированное состояние стенки в месте воздействия куска льда. Кусок льда отбрасывается в сторону, противоположную воздействию, при этом пластическая деформация составляет 37,9 мм, эффективные напряжения — 271 МПа. По верхнему листу также распространяется бегущая волна напряжений.

Выполненные расчеты на первом этапе исследования показали, что с помощью принятой упрощенной модели корпуса редуктора не удастся получить адекватного ответа о характере разрушений, которые произошли при эксплуатации скоростного электропоезда. При низкой скорости вся энергия удара расходуется на местное разрушение стенки, при увеличении скорости куска льда примерно в четыре раза кинетическая энергия удара расходуется на деформацию гибкого корпуса редуктора, место удара на стенке редуктора деформируется, но разрушения не происходит.

Для получения адекватных результатов необходимо выполнить расчеты с моделью, близкой к реальному корпусу редуктора.

Моделирование процесса разрушения конструкций корпусов тяговых редукторов. На втором этапе исследования были выполнены расчеты на модели, близкой к реальному корпусу редуктора [9, 10]. При этом для описания поведения материала рассматривались две модели [11, 12]: обычная (General) [13, 14] и модель Купера—Саймондса (Cowper—Simonds) [15]. Последняя позволяет учитывать зависимость динамических деформаций материала от скорости его деформации [6, 7, 16]. Это особенно важно при анализе работы конструкций в процессе ударного нагружения. Требуемые для реализации этой модели коэффициенты C , P (соответственно скорость пластического деформирования, s^{-1} и максимальное значение пластической деформации, %) были приняты на основании исследований, выполненных в [17] (см. таблицу).

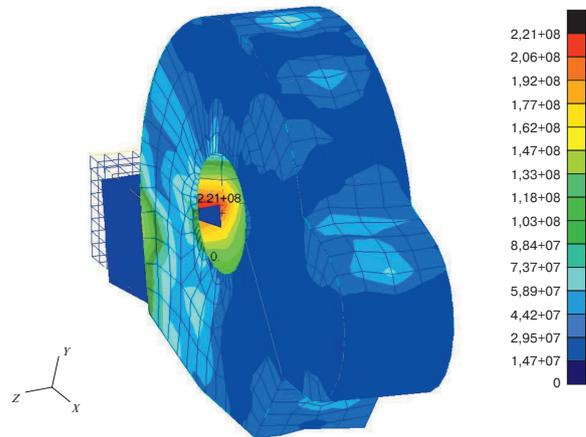


Рис. 6. Сквозное разрушение стенки корпуса редуктора в месте удара куска льда при скорости 360 км/ч и толщине стенок 5 мм

Fig. 6. Through-wall fracture of the traction gearbox housing wall at the point of impact with a chunk of ice at 360 km/h and a wall thickness of 5 mm

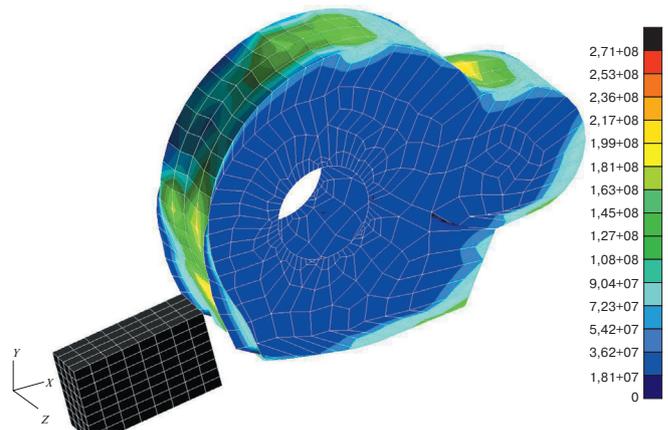


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние корпуса редуктора при скорости куска льда 200 км/ч и толщине стенок 10 мм

Fig. 7. Stress-strain state of the traction gearbox housing at 200 km/h ice chunk velocity and 10 mm wall thickness

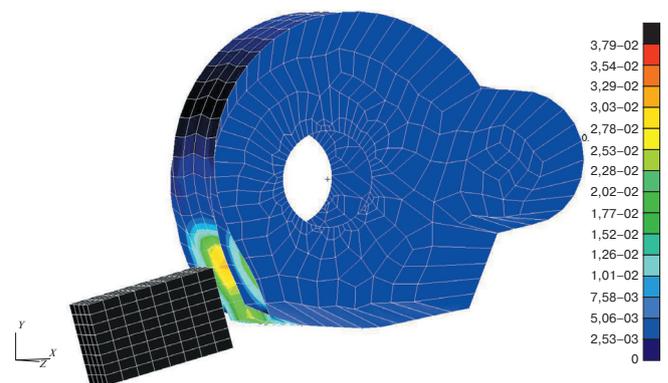


Рис. 8. Деформация корпуса редуктора при скорости куска льда 200 км/ч и толщине стенок 10 мм

Fig. 8. Deformation of the traction gearbox housing at 200 km/h ice chunk speed and 10 mm wall thickness

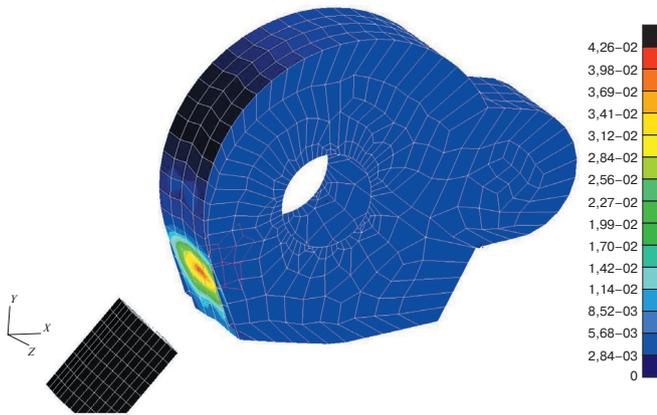


Рис. 9. Деформация корпуса редуктора при скорости куска льда 200 км/ч и толщине стенок 15 мм

Fig. 9. Deformation of the traction gearbox housing at 200 km/h ice chunk speed and 15 mm wall thickness

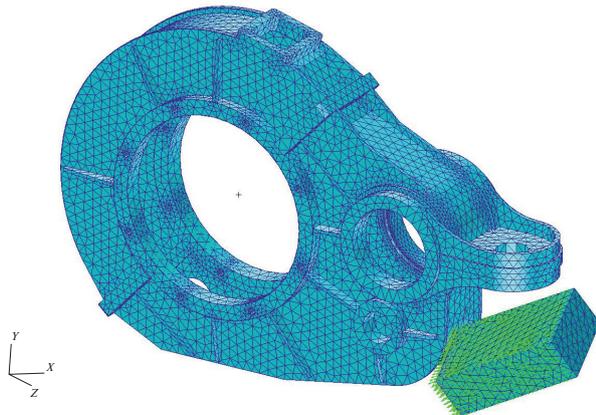


Рис. 10. Уточненная конечно-элементная модель корпуса редуктора и модель куска льда

Fig. 10. Fine element model of the traction gearbox housing and ice chunk model

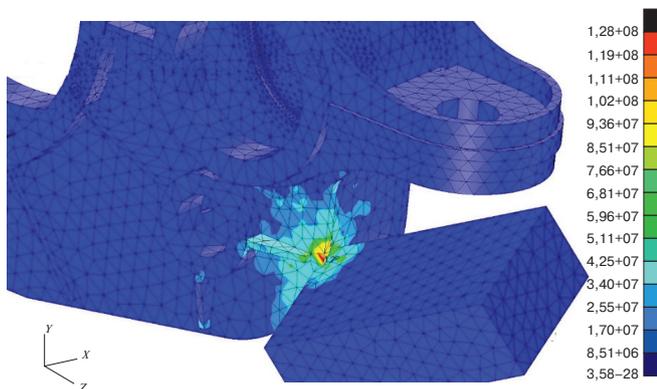


Рис. 11. Момент соприкосновения куска льда с корпусом редуктора, напряжение в месте контакта — 128 МПа (модель материала Cowper—Simonds)

Fig. 11. Moment of contact between the ice chunk and the traction gearbox housing, stress at the point of contact — 128 MPa (Cowper — Simonds material model)

Результаты расчета. На рис. 10 показана уточненная геометрическая модель корпуса тягового редуктора с моделью куска льда. Корпус изготавливается из сварных листов толщиной 10 мм. Конечно-элементная модель состоит из четырех узловых объемных конечных элементов с длиной ребра 10 мм. Расчеты выполнялись в среде MSC.Nastran_SOL700, представляющей собой интегрированный решатель существенно нелинейных быстропротекающих процессов LS-DYNA [18].

Для моделирования удара куска льда о корпус редуктора принималось два значения начальной скорости: 45 и 80 м/с. Это соответствует скоростям движения примерно 160 и 287 км/ч. При выполнении расчетов изменялось максимальное значение пластической деформации (Maximum Plastic Strain), которое в нормативных документах [14] рекомендуется принимать равным 5%. Величина напряжения в момент соприкосновения куска льда с корпусом редуктора составила 128 МПа (рис. 11).

На рис. 12 показано начало местного разрушения корпуса редуктора при скорости 45 м/с, а на рис. 13 — последняя фаза разрушения. Величина напряжения в окрестности области разрушения составляет 127 МПа.

Как видно из зависимостей $\sigma = f(\epsilon)$, где σ — динамическое напряжение, ϵ — величина пластической деформации в месте измерения напряжения (рис. 14), разрушение материала корпуса происходит при меньшем значении пластической деформации в обеих моделях. В модели Cowper—Simonds (рис. 14, б) виден увеличенный уровень напряжения по сравнению с обычной моделью за счет влияния скорости деформации.

На рис. 15 показана часть конструкции корпуса редуктора с резервуаром для масла. Такая конструкция обычно выполняется по технологии литья. На рис. 16

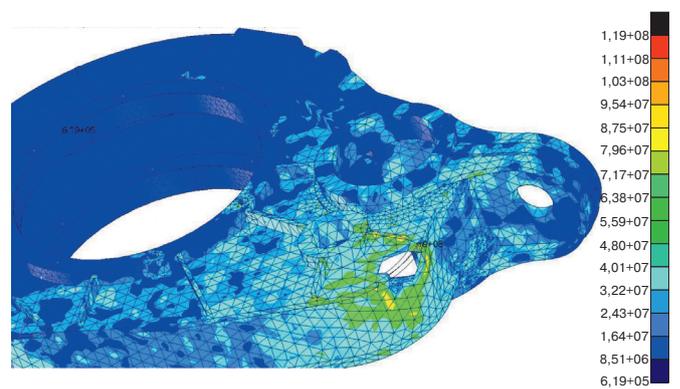


Рис. 12. Начало разрушения корпуса редуктора при скорости куска льда 45 м/с (160 км/ч) (модель материала Cowper—Simonds)

Fig. 12. Beginning of the traction gearbox housing fracture at an ice chunk velocity of 45 m/s (160 km/h) (Cowper — Simonds material model)

Таблица
 Характеристики материалов, используемых в моделях корпусов
 Table
 Characteristics of the materials used in the housing models

№ п/п	Характеристика	Эластопластич- ный материал по модели General	Эластопластич- ный материал по модели Cowper — Simonds
1	Плотность, кг/м ³	7800	7800
2	Модуль упругости, Н/м ²	2,0 · 10 ¹¹	2,0 · 10 ¹¹
3	Коэффициент Пуассона	0,3	0,3
4	Предел текучести	2,0 · 10 ⁸	2,0 · 10 ⁸
5	Касательный модуль	5,0 · 10 ⁹	5,0 · 10 ⁹
6	Максимальная пла- стическая дефор- мация	0,025	0,025
7	Коэффициент <i>C</i>	—	247
8	Коэффициент <i>P</i>	—	5

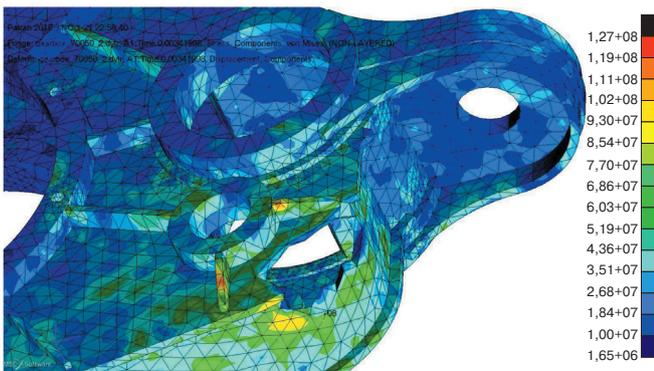


Рис. 13. Последняя фаза разрушения корпуса редуктора, максимальное напряжение в окрестности области разрушения — 127 МПа (модель материала Cowper—Simonds)

Fig. 13. Last fracture phase of the traction gearbox housing, maximum stress in the vicinity of the fracture area — 127 MPa (Cowper—Simonds material model)

показана зависимость $\sigma = f(\epsilon)$ для модели корпуса, изображенной на рис. 15 (модель материала Cowper—Simonds при значении пластической деформации 2,5%). Разрушение одного конечного элемента происходит при значении напряжения, близком к пределу текучести 125 МПа. На рис. 17 показан окончательный характер разрушения корпуса для этой модели материала.

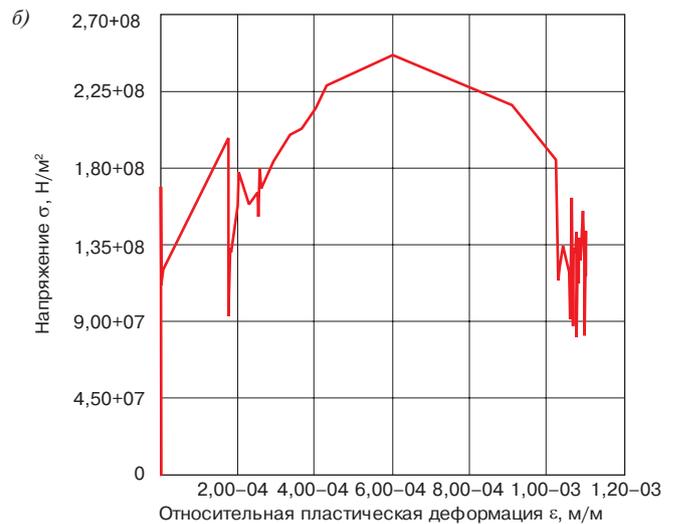
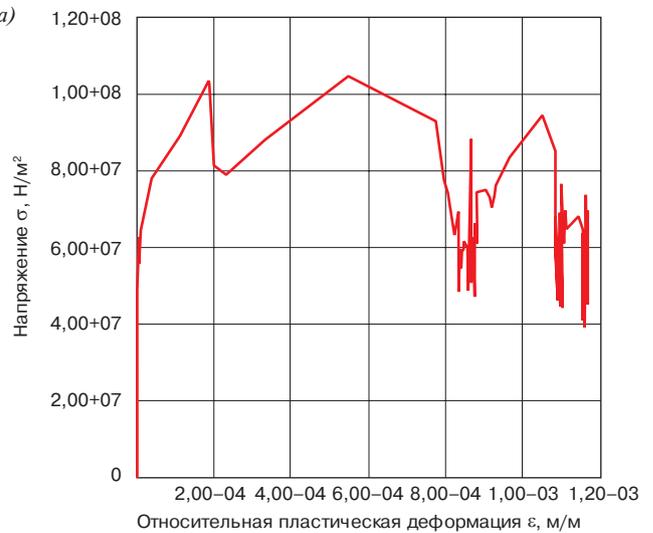


Рис. 14. Зависимость напряжения от пластической деформации для узла конечных элементов в окрестности области разрушения корпуса редуктора. Заданное максимальное значение пластической деформации 2,5%:
 а — по результатам расчета по модели General; б — по результатам расчета по модели Cowper—Simonds

Fig. 14. Stress dependence on dynamic strain for finite element node in the vicinity of the traction gearbox housing fracture area. The specified maximum value of plastic deformation is 2.5%:
 а — according to the results of calculation using the General model;
 б — according to the results of calculation using the Cowper—Simonds model

На рис. 18 представлены зависимости для двух разрушенных конечных элементов при значении принятой для модели материала Cowper—Simonds максимальной пластической деформации 2,5%. Видны значительные увеличения общего уровня напряжения и уровня разрушения.

На рис. 19 показан начальный характер разрушения при значении максимальной пластической

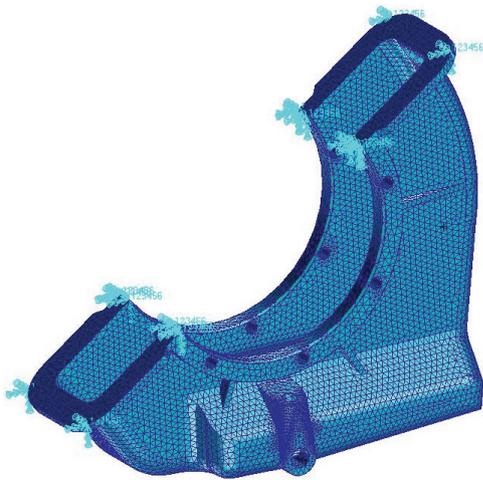


Рис. 15. Конечно-элементная модель части корпуса литого редуктора
Fig. 15. Finite element model of the cast traction gearbox housing component

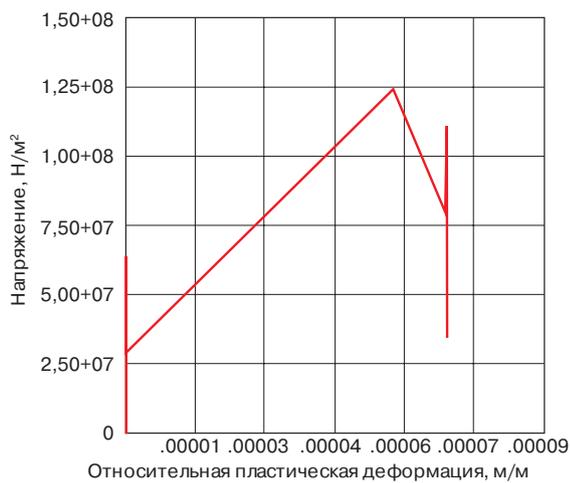


Рис. 16. Зависимость напряжения от пластической деформации для узла конечных элементов в области разрушения (модель материала Cowper—Simonds)

Fig. 16. Stress dependence on plastic strain for finite element node in the fracture area (Cowper—Simonds material model)

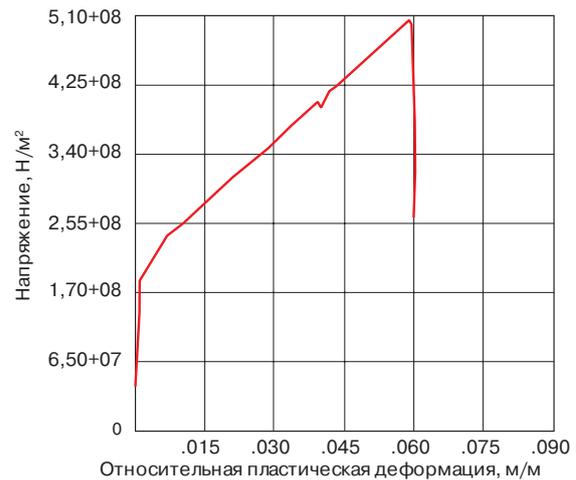


Рис. 18. Зависимость напряжения от пластической деформации для двух узлов конечных элементов в области разрушения при скорости воздействия 79 м/с

Fig. 18. Stress dependence on plastic strain for two finite element nodes in the fracture area at an impact velocity of 79 m/s

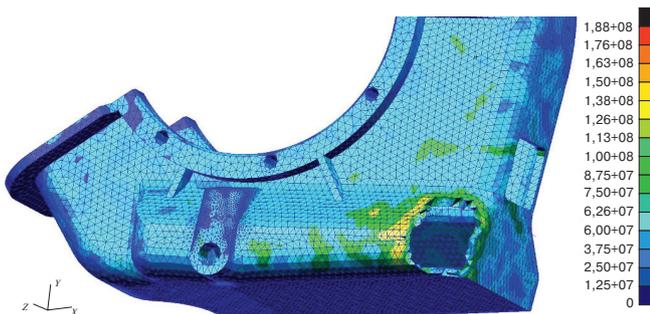


Рис. 17. Разрушение корпуса редуктора при начальной скорости куска льда 45 м/с (модель материала Cowper—Simonds)

Fig. 17. Traction gearbox housing fracture at initial ice block velocity of 45 m/s (Cowper—Simonds material model)

деформации материала около 15%, принятой для этой модели. Скорость куска льда при этом составит 79 м/с.

На рис. 20 показан вариант конструкции корпуса редуктора по модели Cowper—Simonds при значении максимальной пластической деформации 5% по рекомендации [14], показано взаимодействие куска льда и корпуса.

На рис. 21 представлена конечная фаза разрушения корпуса редуктора и зависимости для конечных элементов в окрестности области разрушения корпуса. Виден повышенный уровень напряжения из-за влияния скорости деформации, а разрушение начинается и происходит при значениях пластической деформации, близких к 1–2%.

На основании выполненных исследований следует ряд конструктивных решений для защиты корпуса редуктора высокоскоростных поездов от разрушения при воздействии сторонних предметов с пути.

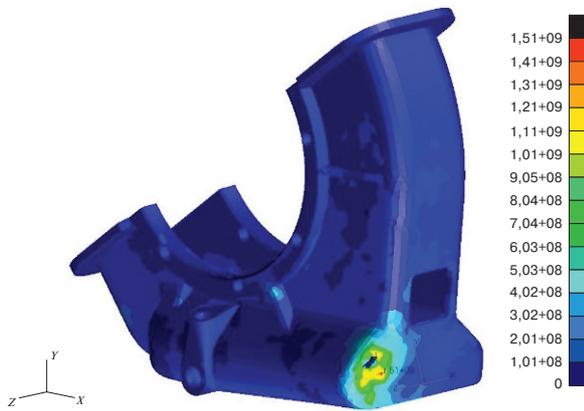


Рис. 19. Начальная фаза разрушения корпуса редуктора при скорости куска льда 79 м/с (максимальная пластическая деформация материала около 15%)

Fig 19. Initial fracture phase of the traction gearbox housing at ice chunk velocity of 79 m/s (maximum plastic deformation of material approx. 15%)

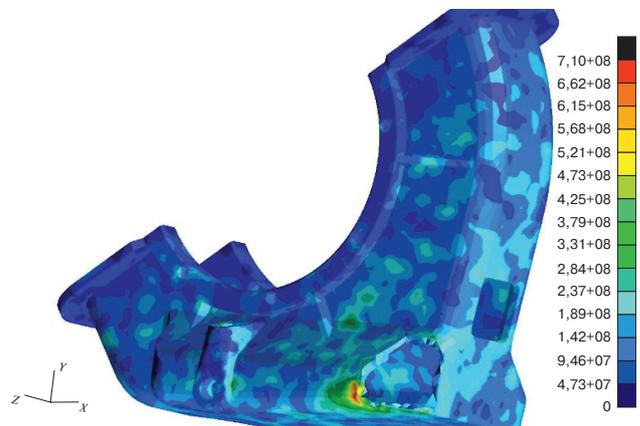


Рис. 20. Начальная фаза разрушения корпуса редуктора при скорости куска льда 79 м/с (максимальная пластическая деформация материала 5%)

Fig 20. Initial fracture phase of the traction gearbox housing at ice chunk velocity of 79 m/s (maximum plastic deformation of material approx. 5%)

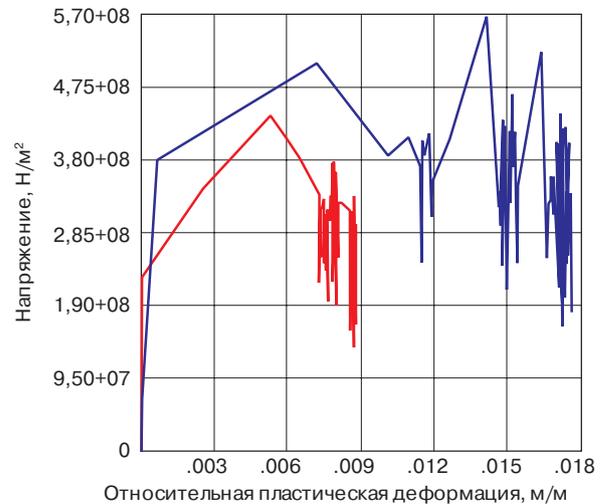


Рис. 21. Конечная фаза разрушения корпуса редуктора при скорости куска льда 79 м/с и зависимость напряжения от пластической деформации для узла конечных элементов в области разрушения. На графике синим цветом — деформация элемента конечно-элементной модели в окрестности области разрушения, красным — непосредственно в области разрушения

Fig 21. The final fracture phase of the traction gearbox housing at 79 m/s and the stress-strain dynamic relationship for the finite element node in the fracture area. The graph shows in blue the deformation of the finite element model element in the vicinity of the fracture area, and in red the deformation of the fracture area itself

1. Проектирование упругих корпусов. Это решение входит в противоречие с требованием жесткости корпусов для зубчатых передач.

2. Применение специального «жертвенного элемента» в конструкции корпуса редуктора, который разрушается, защищая корпус, и затем заменяется на новый элемент.

3. Проектирование корпуса с развитым в продольном направлении объемом картера с защитой его нижней части ребрами (рис. 22).

Обсуждение. Предлагаемая методика расчета корпусов редукторов с применением модели Cowper—

Simonds, учитывающей зависимость динамических деформаций материала от его скорости деформации, позволила выявить уязвимость конструкции корпусов от сторонних предметов на пути.

При этом в качестве рекомендации возможны два направления: изменение конструкции картера редуктора с введением ребер жесткости в его нижней части или применение «жертвенного элемента», выполненного из материала с повышенной прочностью. Первое направление потребует значительных изменений в конструкторской документации и приведет к удорожанию редуктора. Второе

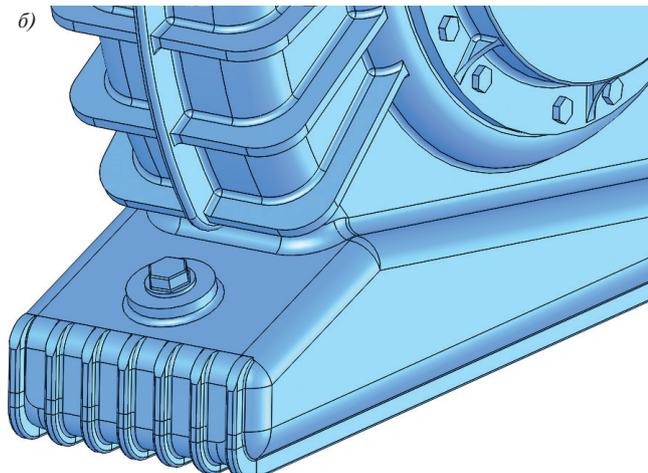


Рис. 22. Корпус редуктора с развитым в продольном направлении объемом картера:
а — внешний вид; б — модель нижней части корпуса

Fig. 22. Traction gearbox housing with a crankcase volume developed in the longitudinal direction:
а — appearance; б — model of the lower part of the housing

направление, подразумевающее съемное присоединение пластины повышенной прочности, проще в реализации в условиях разработки или модернизации скоростного подвижного состава.

Заключение. 1. Рассмотренный случай разрушения корпуса редуктора относится к редким событиям, но возможным.

2. Для учета упрочнения металла при больших скоростях его деформации в расчетах модели корпуса редуктора применена модель билинейного упрочнения материала Купера — Саймондса (Cowper — Simonds).

3. Выполненные расчеты подтверждают возможность разрушения корпусов опорно-осевых тяговых

редукторов скоростных и высокоскоростных электропоездов при воздействии на корпус сторонних предметов, в частности куска льда.

4. Предложен ряд конструктивных решений для защиты корпусов тяговых редукторов высокоскоростных поездов от воздействия сторонних предметов.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Князев Д. А. Обоснование периодичности освидетельствования полых осей колесных пар высокоскоростного подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М., 2019. 138 с. [Knyazev D. A. *Justification for the frequency of inspection of hollow axles of wheel pairs of high-speed rolling stock*. Cand. Sci. (Eng.) thesis: 05.22.07. Moscow; 2019. 138 p. (In Russ.).]
2. Полякова Е. Я. Особенности аэродинамики подвагонного пространства высокоскоростного подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. СПб., 2021. 150 с. [Polyakova E. Ya. *Peculiarities of the aerodynamics of the undercarriage of high-speed rolling stock*. Cand. Sci. (Eng.) thesis: 05.22.07. St. Petersburg; 2021. 150 p. (In Russ.).]
3. Kwon H. B., Park C. S. An experimental study on the relationship between ballast flying phenomenon and strong wind under high speed train. In: *Proceedings of the World Congress on Rail Research, Montreal, QC, Canada, 4–8 June 2006*. [S. 1.]; 2006. p. 3–6.
4. Ido A., Saitou S., Nakade K., Iikura S. Study on under-floor flow to reduce ballast flying phenomena. In: *Proceedings of the World Congress on Rail Research, Seoul, South Korea, 18–22 May 2008*. Paper S2.3.4.2.
5. Высокоскоростной подвижной состав для ВСМ: технические требования: утв. первым вице-президентом ОАО «РЖД» А. С. Мишариным 08.06.2015. М., 2015. [*High-speed railway rolling stock for HS lines. Technical requirements*. Approv. First Vice-President of JSC Russian Railways Alexander Misharin of June 8, 2015. Moscow; 2015. (In Russ.).]
6. *MSC/Dytran™ 2008 r1. User's Guide*. MSC Software Corporation. 234 p.
7. *MSC/Dytran™ 2018. Reference Manual*. MSC Software Corporation. 849 p.
8. Ray R. G. *Elasto-plastic Analysis of Plate Using ABAQUS*. India: National Institute of Technology Rourkela; 2016. 61 p.
9. Islam M. M. R., Sakib-Ul-Alam M., Nazat K. K., Hassan M. M. Effect of Analysis Parameters on Non-Linear Implicit Finite Element Analysis of Marine Corroded Steel Plate. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1919(1):020025. <https://doi.org/10.1063/1.5018543>.
10. Ko Y. G., Kim S. J., Sohn J. M., Paik J. K. A practical method to determine the dynamic fracture strain for the nonlinear finite element analysis of structural crashworthiness in ship–ship collisions. *Ships and*

Offshore Structures. 2017;13(4):412-422. <https://doi.org/10.1080/17445302.2017.1405584>.

11. Selyutina N. S., Petrov Yu. V. Comparative Analysis of Dynamic Plasticity Models. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2018;57(2):199-211. <https://doi.org/10.1515/rams-2018-0065>.

12. Murugesan M., Jung D. W. Johnson Cook Material and Failure Model Parameters Estimation of AISI-1045 Medium Carbon Steel for Metal Forming Applications. *Materials*. 2019;12(4):609. <https://doi.org/10.3390/ma12040609>.

13. Márquez S. *Modelling the Constitutive Behaviour of Cast Iron*. Sweden: Linköping University; 2015. 41 p.

14. BS EN 1993-1-5. *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: General rules – Plated structural elements*. Brussels: CEN; 2006. 55 p.

15. Lobdell M., Croop B., Lobo H. Comparison of Crash Models for Ductile Plastics. In: *10th European LS-DYNA Conference, 15–17 June 2015, Würzburg, Germany*. [S. l.]; 2015.

16. Соболев А. В., Радченко М. В. Использование модели пластичности Джонсона–Кука в численном моделировании бросковых испытаний контейнеров для транспортирования ОЯТ // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2016. № 3. С. 82–93 [Sobolev A. V., Radchenko M. V. Using Johnson–Cook plasticity model to drop test numerical simulation containers for spent fuel transportation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016;(3):82-93 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.26583/npe.2016.3.09>.

17. Paik J. K. *Ultimate limit state analysis and design of plated structures*. 2nd edition. UK: Wiley; 2018. 672 p. <https://doi.org/10.1002/9781119367758>.

18. Kim Y. S., Samy Y., Serdar I., Kim S. J., Seo J. K., Kim B. J. Environmental consequences associated with collisions involving double hull oil tanker. *Ships and Offshore Structures*. 2015;10(5):479-487. <https://doi.org/10.1080/17445302.2015.1026762>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евгений Константинович РЫБНИКОВ,

канд. техн. наук, профессор, кафедра электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 795215, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3959>

Сергей Вячеславович ВОЛОДИН,

канд. техн. наук, доцент, кафедра электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 794923, <https://orcid.org/0000-0001-6887-9355>

Татьяна Олеговна ВАХРОМЕЕВА,

канд. техн. наук, доцент, кафедра электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 795098, <https://orcid.org/0000-0002-1705-8044>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy K. RYBNIKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994,

Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 795215, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3959>

Sergey V. VOLODIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 794923, <https://orcid.org/0000-0001-6887-9355>

Tatiana O. VAKHROMEeva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 795098, <https://orcid.org/0000-0002-1705-8044>

ВКЛАД АВТОРОВ

Евгений Константинович РЫБНИКОВ. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, разработка алгоритма исследования и расчетных моделей, структурирование исследования, анализ результатов, редактирование и подготовка текста рукописи (50%).

Сергей Вячеславович ВОЛОДИН. Изучение конструктивных особенностей корпусов тяговых редукторов, разработка геометрических моделей, анализ результатов расчета (25%).

Татьяна Олеговна ВАХРОМЕЕВА. Анализ и описание материалов для расчета, анализ результатов расчета (25%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Evgeniy K. RYBNIKOV. Formulation of areas of research, formulation of objectives, development of research algorithms and computational models, structuring of research, analysis of results, editing and preparation of the paper (50%).

Sergey V. VOLODIN. Study of the design features of traction gearboxes, development of geometric models, analysis of calculation results (25%).

Tatiana O. VAKHROMEeva. Analysis and description of calculation materials, analysis of calculation results (25%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 20.02.2023, рецензия от первого рецензента получена 23.03.2023, рецензия от второго рецензента получена 10.04.2023, принята к публикации 14.04.2023.

The article was submitted 20.02.2023, first review received 23.03.2023, second review received 10.04.2023, accepted for publication 14.04.2023.