

УДК (UDC) 629.3.015.4

## КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ КУЗОВА ПРИ ФРОНТАЛЬНОМ СИЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

## COMBINED STRENGTH ANALYSIS OF DEFORMATION CAPABILITY OF A BODY UNDER FRONTAL FORCE IMPACT

ЗЫКОВ С.Н.

Zykov S.N.

Удмуртский государственный университет (Ижевск, Россия)  
Udmurt State University (Izhevsk, Russian Federation)

**Аннотация.** Использование численного прочностного анализа на современном этапе развития компьютерной техники и прикладного программного обеспечения является обычной практикой проектной деятельности в отношении деталей и узлов транспортных средств. При комбинированном использовании натурных экспериментов и численных методов исследования приобретают актуальность вопросы согласования результатов, их качественной и количественной интерпретации. Целью представленной работы является рассмотрение и изучение частных вопросов корреляции данных, полученных при натурных испытаниях (столкновение автомобиля со сминаемым препятствием) с результатами численного прочностного эксперимента. В рамках изучения деформационного отклика конструкции на фронтальное силовое воздействие были рассмотрены результаты стендовых испытаний на соответствие правилам безопасности, которые показали недостаточную деформационную податливость кузовных элементов, что привело к значительным разрушениям салона. Полученные данные, а именно, глубина смещения переднего торца лонжерона, вошли в состав рабочих параметров при проведении последующего численного прочностного исследования. Показано, что назначение обоснованных начальных и граничных условий задачи, а также введения ряда допущений позволяет существенно ограничить размеры расчетной задачи. Виртуальная картина деформаций, в целом, оказалась визуально сходной к результатам натурных стендовых испытаний. Компьютерный анализ подробно раскрыл динамику и характер разрушений, выявил недостатки конструкции: наличие в лонжероне массивной несминаемой центральной области, передающей в салонную часть основную энергию ударного воздействия. По итогу можно резюмировать, что результаты натурных испытаний и численного эксперимента показали визуально сходную картину. При этом данные численного эксперимента являются более детальными, что дало основание для продолжения исследований модифицированных вариантов конструкции численными методами, существенно сократив количество натурных опытов.

**Abstract.** The use of numerical strength analysis at the current stage of development of computer technology and application software is a common practice in design activities with respect to vehicle parts and units. With the combined use of full-scale experiments and numerical research methods, the issues of results coordination, their qualitative and quantitative interpretation become relevant. The objective of the presented work is to consider and study particular issues of data correlation obtained during full-scale tests (a car collision with a crumpled obstacle) with the results of a numerical strength experiment. As part of the study of the deformation response of the structure to the frontal force impact, the results of bench tests for compliance with safety regulations were considered, which showed insufficient deformation compliance of the body elements, which led to significant damage to the passenger compartment. The obtained data, namely, the depth of displacement of the front end of the side member, were included in the working parameters during the subsequent numerical strength study. It is shown that the assignment of reasonable initial and boundary conditions of the problem, as well as the introduction of a number of assumptions, allows us to significantly limit the size of the calculation problem. The virtual picture of deformations, in general, turned out to be visually similar to the results of full-scale bench tests. Computer analysis revealed in detail the dynamics and nature of destruction, revealed design flaws: the presence of a massive, non-crushable central region in the spar, transmitting the main energy of the impact to the cabin part. As a result, it can be summarized that the results of full-scale tests and the numerical experiment showed a visually similar picture. At the same time, the data of the numerical experiment are more detailed, which provided grounds for continuing studies of modified design options using numerical methods, significantly reducing the number of full-scale experiments.

**Ключевые слова:** кузов автомобиля, передний лонжерон, прочностные исследования, деформационная способность.

**Keywords:** car body, front side member, strength studies, deformation capacity.

**Дата получения статьи:** 01.12.2024  
**Дата принятия к публикации:** 10.01.2025  
**Дата публикации:** 25.03.2025

**Date of manuscript reception:** 01.12.2024  
**Date of acceptance for publication:** 10.01.2025  
**Date of publication:** 25.03.2025

**Сведения об авторах:**

**Зыков Сергей Николаевич** – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры дизайна, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», e-mail: zikov.sergei@yandex.ru.

**Authors' information:**

**Sergei N. Zikov** – Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Design, Udmurt State University, e-mail: zikov.sergei@yandex.ru.

## 1. Введение

Использование численного прочностного анализа на современном этапе развития компьютерной техники и прикладного программного обеспечения при организации конструкторских и технологических процессов является обычной практикой проектной деятельности. Созданные в виртуальном пространстве систем автоматизированного проектирования электронные геометрические модели в настоящее время являются основой технической документации. Такую цифровую информацию в автоматическом и полуавтоматическом режиме можно также трансформировать в виртуальную структуру конечно-элементных моделей для осуществления различного вида численных инженерных исследований. Это повышает эффективность проектных работ при разработке новых инженерных решений, выявлению недостатков в уже существующих изделиях, созданию технологической оснастки, и прочих видах инженерной деятельности. Проблематике практических аспектов численного прочностного анализа конструкций транспортных средств посвящено множество научных работ. Среди них имеются работы авторских коллективов ученых, которые, в частности, посвящены анализу прочностных характеристик силового каркаса квадроцилов и унифицированной машины технологического электротранспорта [1 - 3]. В ряде работ поднимается проблематика пассивной безопасности конструкции [4, 5], а также особенностей прочностных свойств несущих конструкций [6, 7].

Численный прочностной анализ в отношении конструкции транспортного средства,

либо его отдельных элементов, широко используется в комплексе с натурными прочностными испытаниями. Это необходимо для проверки адекватности получаемых результатов.

Практика проведения исследований натуральных образцов на предмет изучения деформационного отклика конструкции на внешнее силовое воздействие является обязательной при проектировании таких транспортных средств повышенной опасности как легковые автомобили. Организация подобных экспериментов является материально затратным мероприятием, поскольку используется сложное испытательное оборудование и множество датчиков различного назначения. Кроме того, дорогостоящие объекты, участвующие в испытании (такие как специальное деформируемое препятствие, манекены, имитирующие водителя и пассажира, а также сам автомобиль) подвергаются безвозвратному разрушению.

Внедрение в испытательный процесс цифровых технологий с возможностью проведения многократных численных прочностных экспериментов над виртуальными моделями деталей и узлов автомобилей позволяет заметно сократить количество натуральных экспериментов. Однако, в контексте совместной реализации численного инженерного анализа и натуральных исследований, необходимо обратить внимание и на имеющуюся специфику получаемых расчетных данных, влияющих на согласованность с результатами натуральных испытаний. Поэтому необходимо обращать внимание на необходимость корреляции вычисляемых данных с результатами натуральных экспериментов.

Метод конечных элементов, используемый в компьютерном прочностном анализе конструкции, построен на итерационном принципе приближения к искомым значениям. Другими словами, он генерирует не точный, а приближенный результат в рамках заданной погрешности. Потому имеется проблема точности и сходимости численного решения при анализе напряженно-деформированного состояния [8].

Также одной из проблем является факт имеющейся погрешности результатов, получаемых в результате расчетных процедур, где свою роль в увеличении погрешности вносит фактор геометрического отличия исходной электронной геометрической модели и конечно-элементной модели, созданной на ее основе, где сложная математика поверхностной геометрии преобразуется в связанный, но фрагментированный полигональный набор конечных элементов.

Среди обстоятельств, влияющих на погрешность расчетных процедур, безусловно стоит отметить ряд ограничений и допущений, которые, как правило, имеют место быть при генерации расчетной цифровой модели: допущение о равномерности физических свойств материала в исследуемой области; допущение об отсутствии технологического брака в изготовлении; ограниченное исследование в конструкции только локализованных областей с установкой соответствующих ограничений и допущений расчетной модели, и др.

Необходимо также заметить, что если в отношении деталей простой формы численные прочностные исследования дают относительно невысокую погрешность результатов, то при работе со сложной пространственной геометрии кузовных деталей автомобиля, где необходимо создавать сложную по структуре и плотности конечных элементов конечно-элементную модель, погрешность может оказаться значительной.

В контексте изучения конструкции транспортного средства (легкового автомобиля) на предмет прочностного отклика на силовое деформационное воздействие и в силу вышеизложенного можно резюмировать, что при комбинированном использова-

нии натуральных экспериментов и численных методов прочностного анализа приобретают актуальность вопросы согласования результатов, их качественной и количественной интерпретации, что и является предметом данного исследования.

## 2. Постановка задачи

Целью представленного исследования является рассмотрение и изучение частных вопросов корреляции данных, полученных при натуральных испытаниях (столкновение автомобиля со сминаемым препятствием) с результатами численного прочностного эксперимента (в отношении передней части кузова легкового автомобиля).

Комбинированный анализ состоял из двух этапов: натуральный эксперимент и численный прочностной анализ.

В ходе подготовки к компьютерному исследованию по определению деформационного поведения конструкции под действием фронтальной сминающей нагрузки с использованием программного комплекса инженерного анализа «ANSYS/LS-DYNA» необходимо было решить следующие частные вопросы: общая постановка и конкретизация задачи, подготовка цифровых данных и расчетной модели для проведения численного эксперимента.

## 3. Разработанные модели и подходы

Для изучения деформационного отклика конструкции передней части кузова на фронтальное силовое воздействие был проведен комплексный инженерный анализ. Он включал в себя натуральный эксперимент и численный прочностной анализ (с последующей сравнительной интерпретацией полученных результатов).

Для дальнейшего освещения проблематики рассмотрим подробно и последовательно особенности подготовки и проведения каждого из этих исследований.

### 1. Натурный эксперимент.

Условия организации всего процесса натурального эксперимента регламентируются соответствующими нормативными актами рос-



сийского и международного уровня. К такому, например, относятся правила ЕЭК ООН № 94 [9], устанавливающие нормы проведения эксперимента на фронтальное столкновение транспортного средства со сминаемым препятствием, имитирующим встречное транспортное средство. На рис. 1 представлена примерная схема испытаний.

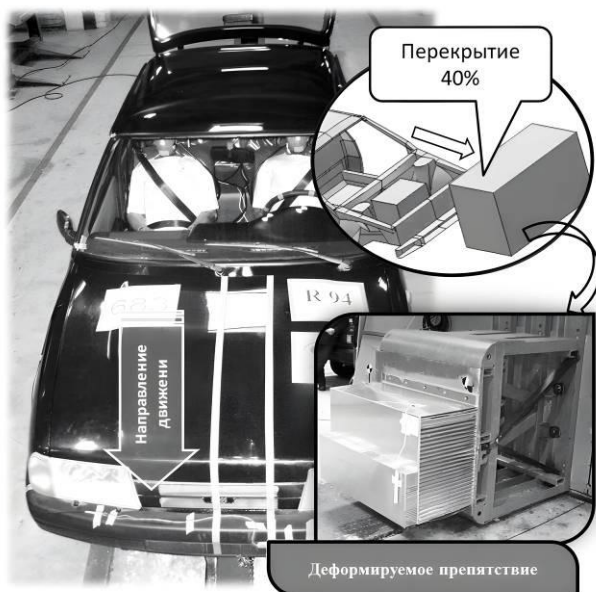


Рис. 1. Схема проведения натурных испытаний

При осуществлении эксперимента автомобиль (с помещенными внутрь манекенами «Гибрид 3», в качестве водителя и пассажира на переднем сидении) на скорости 56.6 км/ч сталкивается со специальным барьером (алюминиевое сотовое препятствие, имеющее основную и бамперную часть и имитирующее встречное транспортное средство).

По требованиям испытаний зона контакта с препятствием должна быть не полной и составлять 40% с левой стороны в проекции фронтальной плоскости столкновения. Во время проведения испытания для детализации картины происходящих процессов проводилась фиксация различных параметров при помощи специализированного стендового оборудования:

- контрольные метки и датчики, установленные на манекенах, измеряли положение точки «Н», наклона таза и др.;

- акселерометры фиксировали возникающее при столкновении ускорение замедления;

- высокоскоростная съемка фиксировала в деталях весь процесс деформации конструкции и перемещения манекенов;

- фотосъемка объектов после испытаний зарегистрировала итоговые повреждения и разрушения;

- датчики смещения произвели фиксацию абсолютных и относительных перемещения контрольных меток, расположенных на отдельных элементах конструкции кузова и манекенах.

В сумме эти параметры составили общую картину по степени деформированию кузова, а также возможных непосредственных травм и травмах внутренних органов, получаемых водителем и пассажиром при ударе испытываемого автомобиля о препятствие.

## 2. Численный прочностной анализ.

Для реализации численных исследований в настоящее время имеется достаточное количество программных продуктов, где множество трудоемких подготовительных процедур (таких как генерация конечно-элементной модели и др.) можно провести в автоматическом и полуавтоматическом режиме. Однако качество и форма получаемых при этом результатов всецело зависит человека, от корректной постановки им расчетной задачи, задания начальных и граничных условий. Например, при непосредственном участии специалиста-расчетчика производится процедура оптимизация размеров расчетной модели. Осуществлять оптимизацию необходимо, потому что:

- вовлекать в расчеты виртуальную модель всего кузова автомобиля представляется нецелесообразным, поскольку при фронтальном столкновении значительные деформации происходят только в его передней части;

- целесообразно минимизировать общее количество конечных элементов, участвующих в решении задачи для сокращения времени расчетных процедур.

В силу этого инженерный анализ имеет смысл проводить только в отношении передней части кузова. Более того, основыва-

ясь на том, что при фронтальном столкновении (по условиям натурных испытаний) значительно большие повреждения получает левая (по сравнению с правой) сторона конструкции, можно принять допущение о возможности включить в расчетную систему только виртуальную модель левой передней части кузова. Поэтому для целей последующего конечно-элементного прочностного анализа было произведено моделирование именно этой части кузова, которая состояла из лонжерона, брызговика и бруса левого брызговика: на рис. 2 представлена электронная сборка из обозначенных деталей.

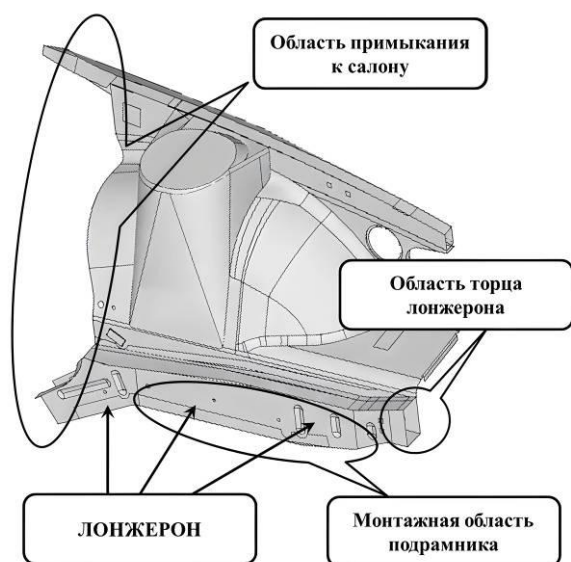


Рис. 2. ЭГМ передней боковой части кузова

Главным элементом, определяющим деформационное поведение этого комплекса, безусловно, является лонжерон – один из компонентов силовой несущей системы кузова в целом. При ударе он деформируясь должен поглощать значительное количество энергии ударного воздействия [10].

Лонжерон представляет собой сварной профилированный корб (изготовленный из штампованных деталей толщиной 1,5 мм), по нижним плоскостям усиленный дополнительными элементами и несущим подрамником (на рис. 2 выделена область расположения этих элементов).

Вычленение из полной конструкции кузова при подготовке к численному экспери-

менту одной локальной области влечет за собой необходимость решения частной промежуточной задачи определения специфических начальных и граничных условий с установлением ряда допущений, наличие которых приводило бы к получению адекватных результатов расчетов, близких к результатам натурных экспериментов.

Перечислим принятые в данном случае допущения и ограничения:

1. Допускалось, что геометрия деталей в области примыкания к салону при ударе сохраняла свою форму (рис. 2). Следовательно, здесь узлы конечно-элементной сетки расчетной модели жестко ограничивались от перемещения и вращения относительно всех координатных осей.

2. Допускалось, что при столкновении с препятствием область торца лонжерона во время всего процесса деформации имела постоянный контакт с препятствием и повторяла траекторию его движения. При этом не испытываемый объект двигался в сторону препятствия, а передняя часть расчетной модели, где располагается передний срез лонжерона, перемещался внутрь конструкции, имитируя деформационное воздействие препятствия. В расчетной модели это было достигнуто разрешением узловых перемещений по фронту модели исключительно вдоль оси приложения нагрузок.

3. Было принято предположение, что параметр величины скорости прохождения деформационных процессов не оказывает существенного влияния на форму и характер изменения геометрии. Поэтому эффект взаимодействия с препятствием моделировался путем задания фиксированного узлового перемещения фронтальной части модели за расчетный интервал времени.

#### 4. Результаты и их анализ

В табл. 1 приведены частные результаты натурального эксперимента: показатели деформационного смещения торца лонжерона и оси передних колес. Проведем оценку этих данных, а также рассмотрим визуальные результаты натурального эксперимента, представленные на рис. 3, с позиции изучения гео-

метрических трансформаций левой передней части кузова, возникшие в процессе ударного воздействия.

Таблица 1

Частные результаты натурного эксперимента

Конструктивные элементы	Горизонтальное перемещение, мм
Торец лонжерона	617
Ось передних колес	435

Выявлено, что в результате столкновения со сминаемым препятствием левое переднее колесо до половины зашло за переднюю стойку и продавало салонную переборку. При этом линейное (по ходу движения) остаточное смещение оси переднего колеса составило 435 мм (рис. 3).

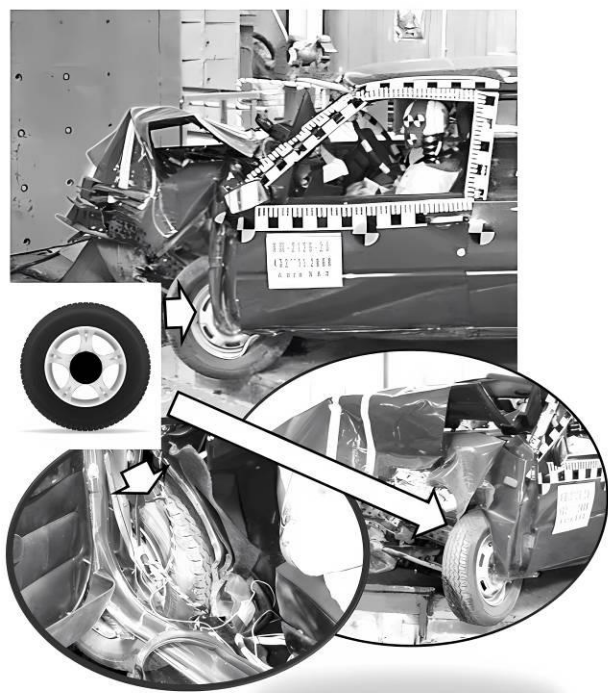


Рис. 3. Воздействие левого переднего колеса на салонную область автомобиля

По результатам визуального осмотра разрушений также было отмечено, что колесом зажало левую ногу манекена, что говорило о серьезных травмах, которые мог получить при аварии человек.

Был сделан вывод, что к такой форме повреждений салона привели перемещения узлов и механизмов, непосредственно связанных с основным силовым несущим элемен-

том конструкции кузова в этой области – лонжероном. Который имел обширную центральную часть, где монтировался подрамник и элементы усиления (рис. 2). Именно эта часть лонжерона, практически не испытывала деформации, передала основную энергию ударного воздействия на салон, посредством прикрепленных к ней (прямо, либо опосредованно) элементов конструкции автомобиля. К ним, в частности, относится и левое переднее колесо, которое также практически не деформировалось.

С целью организации проектных работ по модификации конструкции лонжерона и минимизации затрат на натурные испытания было решено создать цифровую расчетную модель, чтобы результаты численного прочностного анализа в отношении ее согласовались с результатами натурных испытаний. Впоследствии планировалось, что при удовлетворительной корреляции полученных визуальных данных натурного эксперимента и численного исследования, провести серию компьютерных экспериментов с модифицированными конструкцией лонжерона и навесных элементов.

Результаты проведенного численного прочностного анализа в виде визуальной картины финальной стадии деформации представлены на рис. 4.

В ходе проведения эксперимента правая часть электронной модели (имитирующая препятствие) постепенно линейно смещалась по направлению к салонной области. При этом величина смещения соответствовала смещению торца лонжерона в натурном эксперименте – 617 мм (табл. 1).

Рассмотрим лонжерон поскольку он является основным элементом, определяющим прочностные свойства левой передней части кузова вдоль вектора ударного воздействия (рис. 4). Можно отметить значительные деформационные изменения в двух областях: с левой и правой стороны от центральной части, где располагаются вертикальные и наклонные подштамповки, провоцирующие активные деформационные процессы при продольных нагрузках. Центральная часть лонжерона таких элементов не имеет. В дополнении к этому, детали усиления, которые



в расчетной схеме моделировались увеличением толщины листового материала в монтажной зоне подрамника, превращают центральную часть лонжерона в условно недеформируемый объект, который не поглощает энергию ударного воздействия. Как следствие, левое переднее колесо, соединенного с подрамником, должно непременно оказаться в салоне, что согласуется с визуальными результатами проведенного ранее натурального стендового испытания.

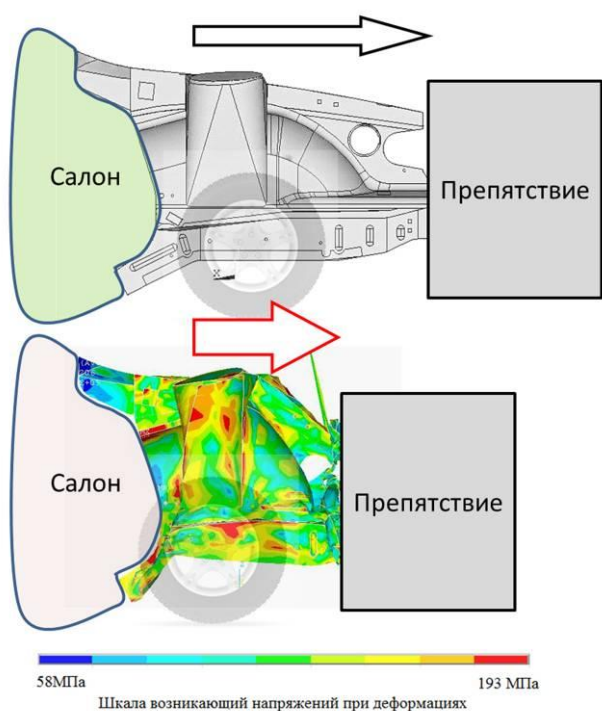


Рис. 4. Результаты численного эксперимента

### Список литературы

1. Filkin N.M., Zikov S.N., Shaikhov R.F. A Practice of Applied Numerical Analysis During Design of a Unified Utility Electric-Transport Vehicle // Proceedings – International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE. October 2019, 9073206, pp. 769-772.

2. Коршунов А.И., Музафаров Р.С., Плетнев М.А., Скуба Д.В., Филькин Н.М. Системные подходы в конструировании и

### Заключение

В качестве итога проведенных исследований можно заключить, что заявленные цели были достигнуты. Разработанная цифровая модель в целом визуально повторила деформационные процессы, происходящие при натурных стендовых испытаниях при условии одинакового диапазона внедрения препятствия в конструкцию автомобильного кузова (617 мм).

Разработанная цифровая модель позволила подробно рассмотреть динамику формирования общей картины разрушений. При этом были выявлены недостатки конструкции: лонжерон имеет массивную несминаемую центральную часть, которая передает основную энергию ударного воздействия на салон; непродуманное расположение вертикальных и наклонных подштамповок в передней и предсалонных частях лонжерона, которые не вносят существенный вклад в структуру формирования деформационных процессов.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенные расчетные допущения в отношении структуры и размеров цифровой модели левой передней части автомобильного кузова, а также особенности задания начальных и граничных условий при подготовке вычислений, являются приемлемыми и их можно использовать для проведения серии численных экспериментов при разработке модифицированных вариантов конструкции с улучшенными параметрами деформационного отклика на фронтальную сминающую нагрузку.

### References

1. Filkin N.M., Zikov S.N., Shaikhov R.F. A Practice of Applied Numerical Analysis During Design of a Unified Utility Electric-Transport Vehicle. *Proceedings – International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE*. October 2019, 9073206, pp. 769-772.

2. Korshunov A.I., Muzafarov R.S., Pletnev M.A., Skuba D.V., Filkin N.M. Sistemnye podkhody v konstruirovanii i

дизайн-проектировании унифицированной машины технологического электротранспорта (УМТЭТ) // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 2 (23). С. 40-47.

3. Далида Н.В., Филькин Н.М., Зыков С.Н. Методические аспекты применения численного прочностного анализа силового каркаса квадроцикла // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2023. Т. 23. № 2. pp. 72-82.

4. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Определение критериев выбора параметров материала-наполнителя в несущих тонкостенных конструкциях каркасного типа применительно к задачам пассивной безопасности автомобилей // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 4 (88). С. 2.

5. Ван Ч., Зузов В.Н., Солопов Д.Ю. Обоснование нагрузочных режимов испытаний на пассивную безопасность грузопассажирских автомобилей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 1 (144). С. 70-82.

6. Сулегин Д.А., Зузов В.Н. Исследование влияния усиливающих элементов двери автомобиля на пассивную безопасность при боковом ударе // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 1 (132). С. 86-97.

7. Ван И., Зузов В.Н. Метод многокритериальной параметрической оптимизации на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS применительно к каркасно-оболочечным несущим конструкциям // Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. № 1 (145). С. 1-19. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-1-2329.

8. Зеньков Е.В. Анализ точности и схожимости численного решения в задачах моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций с U-образными концентраторами напряжений // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 19. С. 44-51.

9. Правила ЕЭК ООН № 94 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты водителя и пассажиров в случае лобового столкновения. М.: Издательство стандартов, 1999. 60 с.

dizayn-proektirovaniy unifikirovannoy mashiny tekhnologicheskogo elektrotransporta (UMTET). *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*, 2016, No. 2 (23), pp. 40-47. (In Russian)

3. Dalida N.V., Filkin N.M., Zыkov S.N. Metodicheskie aspekty primeneniya chislennoy prochnostnoy analiza silovogo karkasa kvadrotsikla. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*, 2023, Vol. 23, No. 2, pp. 72-82. (In Russian)

4. Goncharov R.B., Zuzov V.N. Opredelenie kriteriev vybora parametrov materiala-napolnitelya v nesushchikh tonkostennykh konstruktseyakh karkasnogo tipa primenitelno k zadacham passivnoy bezopasnosti avtomobiley. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2019, No. 4 (88), pp. 2. (In Russian)

5. Van CH., Zuzov V.N., Solopov D.Yu. Obosnovanie nagruzochnykh rezhimov ispytaniy na passivnyuyu bezopasnost gruzopassazhirskikh avtomobiley. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2024, No.1 (144), pp. 70-82. (In Russian)

6. Sulegin D.A., Zuzov V.N. Issledovanie vliyaniya usilivayushchikh elementov dveri avtomobilya na passivnyuyu bezopasnost pri bokovom udare. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2021, No.1 (132), pp. 86-97. (In Russian)

7. Van I., Zuzov V.N. Metod mnogokriterialnoy parametricheskoy optimizatsii na osnove usovershenstvovannogo vzveshennogo metoda TOPSIS primenitel'no k karkasno-obolochечnym nesushchim konstruktseyam. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2024, No. 1 (145), pp. 1-19. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-1-2329 (In Russian)

8. Zenkov E.V. Analiz tochnosti i skhodimosti chislennoy resheniya v zadachakh modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktsey s U-obraznyimi kontsentratorami napryazheniy. *Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*, 2023, No. 19, pp. 44-51. (In Russian)

9. *Pravila EEK OON № 94 Edinoobraznye predpisaniya, kasayushchiesya ofitsialnogo utverzhdeniya transportnykh sredstv v*



