

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-632953>

Оригинальное исследование



Компьютерное моделирование испытаний кабины грузового автомобиля для поиска путей выполнения требований правил ООН 29

С.А. Сергиевский¹, Ю.П. Трусова¹, А.А. Морозова¹, В.С. Макаров¹,
А.А. Шмелев², Т.Н. Мансуров²

¹ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация;

² "КАМАЗ", Набережные Челны, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Обеспечение требуемого уровня пассивной безопасности грузовых автомобилей является актуальной задачей. Для решения этой задачи необходимо применение методов компьютерного моделирования.

Цель работы — поиск путей обеспечения пассивной безопасности грузовых автомобилей за счёт выбора соответствующей конструкции кабины.

Методы. При проведении исследования применялся метод виртуального моделирования испытаний кабины грузового автомобиля в соответствии с требованиями Правил ООН 29.

Результаты. Разработана расчётная модель кабины грузового автомобиля, позволяющая выполнять компьютерное моделирование испытаний по Правилам ООН 29. Основным требованием Правил ООН 29 является сохранение после проведения испытаний пространства в кабине, достаточного для размещения в нём манекена водителя. В рамках исследования проведено определение свойств материала (стали), используемого для изготовления кабин-прототипов разрабатываемого автомобиля, причём испытанные образцы были получены путём препарирования изделия-прототипа, то есть полученные результаты учитывают технологическую историю материала. Полученные данные о свойствах материалов использовались при разработке расчётной модели кабины. В разработанной и используемой расчётной модели учтены все особенности конструкции исследуемой кабины, в том числе расположение и характеристики сварочных точек. Исследованы различные варианты изменений конструкции кабины и их влияние на возможность выполнения требований Правил ООН 29. Установлено, что только увеличением (в разумных пределах) толщины отдельных элементов каркаса кабины и/или применения для их изготовления высокопрочной стали обеспечить выполнение требований Правил ООН № 29 в полном объёме не удаётся. На основе анализа деформации каркаса кабины-прототипа при приложении к ней нагрузки, соответствующей Испытанию С по Правилам ООН № 29 Пересмотр 2, сформулированы предложения по изменениям конструкции кабины, позволяющие выполнить требование Правил ООН № 29.

Заключение. Результаты исследования указывают на перспективность предлагаемых изменений конструкции кабины.

Ключевые слова: пассивная безопасность; кабина грузового автомобиля; расчётная модель; пути передачи нагрузки.

Как цитировать:

Сергиевский С.А., Трусова Ю.П., Морозова А.А., Макаров В.С., Шмелев А.А., Мансуров Т.Н. Компьютерное моделирование испытаний кабины грузового автомобиля для поиска путей выполнения требований правил ООН 29 // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 4. С. 450–465.
DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-632953>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-632953>

Original Study Article

Computer simulation of the truck cabin tests to find ways to meet the requirements of the UNECE Regulation 29

Sergey A. Sergievsky¹, Yulia P. Trusova¹, Anastasia A. Morozova¹, Vladimir S. Makarov¹, Alexander A. Shmelev², Timur N. Mansurov²

¹ Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation;

² KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Ensuring the required level of passive safety of trucks is a relevant task. To solve this problem, it is necessary to use computer simulation methods.

AIM: Search for the ways to ensure the passive safety of trucks by choosing the appropriate cabin design.

MATERIALS AND METHODS: During the study, the method of virtual simulation of the truck cabin tests was used in accordance with the requirements of the UNECE Regulation 29.

RESULTS: A simulation model of a truck cabin has been developed, which makes it possible to conduct the computer simulation of the tests according to the UNECE Regulation 29. The main requirement of the UNECE Regulation 29 is retaining sufficient space in the cabin to accommodate the driver's dummy inside it after its testing. As a part of the study, the properties of the material (steel) used for manufacturing of prototype cabins of the truck under development were determined, and the tested specimens were obtained by dissecting the prototype of the cabin, so the obtained results take into account the technological history of the material. The obtained data on the properties of the materials were used in the development of the simulation model of the cabin. The developed and used simulation model takes into account all the design features of the cabin under study, including the location and properties of welding points. Various options of cabin design changes and their impact on the ability to meet the requirements of the UNECE Regulations 29 are investigated. It has been found that it is not possible to fully comply with the requirements of the UNECE Regulation 29 only by increasing (within reasonable limits) the thickness of individual elements of the cabin frame and/or using high-strength steel for their manufacturing. Based on the analysis of the deformation of the prototype cabin frame during the Test C according to the UNECE Regulation 29 Revision 2, proposals for changes to the cabin design to meet the requirement of the UNECE Regulation 29 are formulated.

CONCLUSION: The results of the study indicate the prospects of the proposed changes to the cabin design.

Keywords: passive safety; truck cabin; simulation model; load transfer paths.

To cite this article:

Sergievsky SA, Trusova YuP, Morozova AA, Makarov VS, Shmelev AA, Mansurov TN. Computer simulation of the truck cabin tests to find ways to meet the requirements of the UNECE Regulation 29. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(4):450–465. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-632953>

Received: 05.08.2024

Accepted: 20.08.2024

Published online: 28.09.2024

ОБОСНОВАНИЕ

В настоящее время (2024 г.) на территории Российской Федерации действует ГОСТ Р 41.29-99 “Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты лиц, находящихся в кабине грузового транспортного средства” [1]. Требования указанного ГОСТа соответствуют требованиям Правил ООН № 29 Пересмотр 1 от 12.10.1993 [2]. В тоже время, с точки зрения возможного изменения законодательства и перспектив экспорта продукции отечественного автомобилестроения в страны, интерес представляет также следующая редакция Правил 29 (Пересмотр 2).

Обе редакции Правил предусматривают проведение трёх испытаний (Испытания А, В и С).

Основные требования Правил ООН № 29 одинаковы для всех испытаний:

- после проведения каждого из испытаний в кабине транспортного средства должно оставаться достаточное пространство, в котором может поместиться на сиденье, установленном в среднем положении, и не приходя в соприкосновение с жёстко закреплёнными частями кабины, манекен, описание которого приводится в Приложении к Правилам;
- в ходе испытаний в деталях крепления кабины к раме могут наблюдаться деформации или изломы, однако кабина должна оставаться прикреплённой к раме.

Условия проведения Испытания А (“Удар спереди”) одинаковы для Правил 29 Пересмотр 1 (в дальнейшем — Правила 29.02) и Правил 29 Пересмотр 2 (в дальнейшем — Правила 29.03). При Испытании А удар наносится плоским маятником (рис. 1). Энергия маятника в момент удара различна: при испытании транспортного средства (ТС) категории N3 кинетическая энергия маятника должна быть 45 кДж согласно Правилам 29.02 и 55 кДж согласно Правилам 29.03.

Условия проведения Испытания В Согласно Правилам 29.02 и Правилам 29.03 отличаются.

Согласно Правилам 29.02 Испытание В заключается в приложении вертикальной статической нагрузки к крыше кабины (рис. 2). Нагрузка прилагается посредством недеформируемой плиты, перекрывающей всё пространство крыши, причём её величина зависит от веса ТС, приходящегося на переднюю ось.

Согласно Правилам 29.03 Испытание В заключается в нанесении удара маятником с цилиндрическим ударником по передним стойкам крыши кабины (рис. 3).

Условия проведения Испытания С согласно Правилам 29.02 и Правилам 29.03 отличаются. Согласно Правилам 29.02 Испытание С заключается в приложении горизонтальной продольной статической нагрузки к задней стенке кабины (рис. 4). Нагрузка прилагается посредством недеформируемой плиты, перекрывающей всё пространство задней стенки кабины. Величина прилагаемой нагрузки зависит от разрешённой полезной нагрузки ТС.

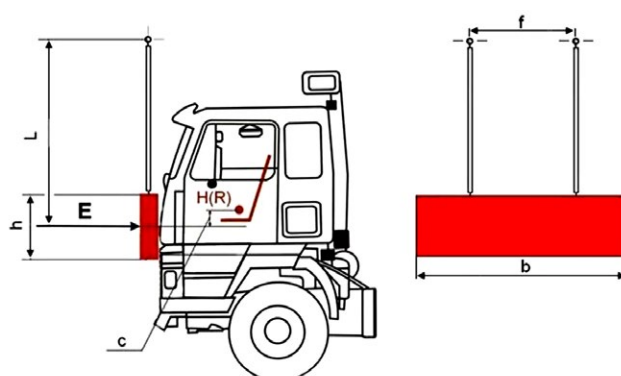


Рис. 1. Схема проведения Испытания А.
Fig. 1. Diagram of the Test A conducting.



Рис. 2. Схема проведения Испытания В согласно Правилам 29.02.
Fig. 2. Diagram of the Test B conducting according to the UNECE Regulation 29.02.

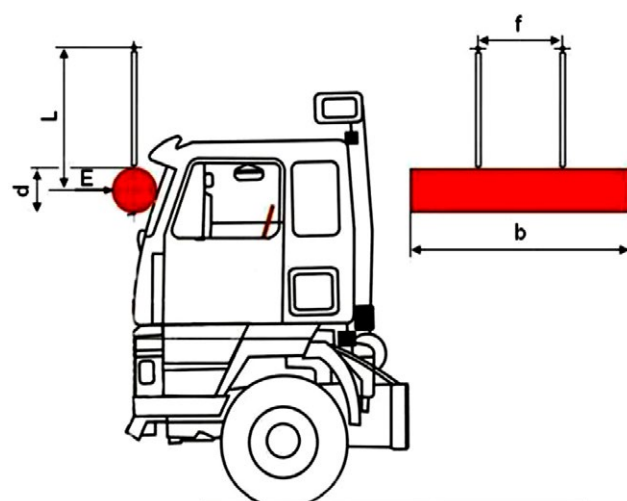


Рис. 3. Схема проведения Испытания В согласно Правилам 29.03.
Fig. 3. Diagram of the Test B conducting according to the UNECE Regulation 29.03.

Испытание С кабины автомобиля с полной массой более 7500 кг, проводимое Согласно Правилам 29.03, включает два этапа (рис. 5):

- первый этап — удар сбоку под углом 20° к горизонту;
- второй этап — приложение статической нагрузки к крыше кабины.

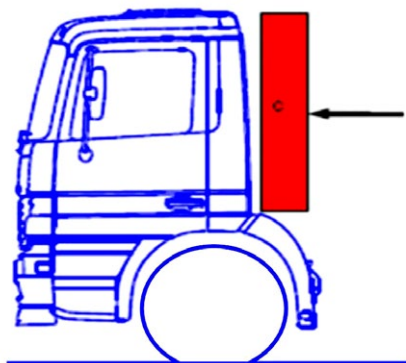


Рис. 4. Схема проведения Испытания С согласно Правилам 29.02.

Fig. 4. Diagram of the Test C conducting according to the UNECE Regulation 29.02.

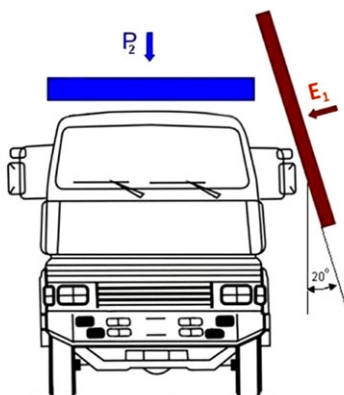


Рис. 5. Схема проведения Испытания С согласно Правилам 29.03.

Fig. 5. Diagram of the Test C conducting according to the UNECE Regulation 29.03.



Рис. 6. Зависимости “растяжение — нагрузка” для образцов с базой 50 мм.

Fig. 6. “Tension — load” dependencies for specimens with a base of 50 mm.

Кинетическая энергия ударного элемента и статическая нагрузка, прилагаемая к крыше на втором этапе испытания, зависят от параметров ТС. Необходимо отметить, что этапы испытания должны выполняться последовательно и с использованием одной и той же кабины.

Автомобили, имеющие полную массу, не превышающую 7500 кг, подвергаются только второму этапу испытания С, то есть для этих автомобилей условия проведения Испытания С по Правилам 29.03 аналогичны условиям проведения Испытания В по Правилам 29.02.

В процессе ударного нагружения конструктивные элементы кабины теряют устойчивость и испытывают значительные деформации смятия и изгиба, многие из них вступают в контактные взаимодействия друг с другом. Быстротечность развития деформаций существенно затрудняет понимание процесса нагружения кабины, необходимого для выбора её рациональной конструкции, обеспечивающей выполнение предъявляемых требований. Получение необходимой информации о процессе и результатах деформирования кабины при приложении ударных испытательных нагрузок, а также сравнение различных вариантов конструкции без изготовления и проведения испытаний физических образцов кабины (что влечёт большие затраты времени и средств) обеспечивается при применении компьютерного моделирования с использованием расчётных моделей, построенных на методе конечных элементов (МКЭ). Поиск путей совершенствования конструкции кабины для выполнения требований Правил ООН № 29 является актуальной задачей.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью проведённых исследований была проверка соответствия конструкции исследуемой кабины грузового автомобиля требованиям Правил 29.02 и поиск путей изменения конструкции кабины для выполнения требований Правил 29.03.

МЕТОДЫ

Определение характеристик материалов

Высокий уровень деформаций конструктивных элементов кабины при испытаниях по Правилу ООН № 29 обуславливает необходимость применения при разработке расчётной модели характеристик материалов, заданных в широком диапазоне деформаций — вплоть до деформаций, соответствующих напряжению предела прочности.

В практике распространён подход, согласно которому определение характеристик сталей производится путём растяжения образцов на испытательной машине.

Образцы для определения характеристик материалов получены путём препарирования различных частей прототипа исследуемой кабины. В результате испытаний получены зависимости “растяжение–нагрузка”, пример которых приведён на рис. 6.

Зависимости “растяжение–нагрузка” были преобразованы к зависимостям напряжений от деформации. Учитывая, что на механические характеристики материала деталей существенно влияет технологическая история их изготовления (вытяжка в процессе их изготовления с применением штамповки) и отсутствие возможности получения представительного количества образцов из изготовленной кабины. Для виртуального моделирования была принята механическая характеристика материала образца, полученного из центральной части наружной панели двери, которая, предположительно, в процессе изготовления не получила значительной вытяжки (рис. 7, зависимость “Дверь_00”).

Для поисковых исследований влияния изменения конструкции компонентов кабины на возможность обеспечения выполнения требований Правил 29.03 в части Испытания В была принята характеристика стали повышенной прочности (см. рис. 7) (зависимость “s500mc”). Выбор данного материала обусловлен рекомендациями, вытекающими из перечня материалов, применяемых в предприятии-разработчике. Данные для построения этой характеристики взяты из сети Интернет (см. например, [3]).

Во всех расчётах принимались следующие основные характеристики материала (стали) конструктивных силовых элементов кабины:

- плотность $\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ($7,85 \cdot 10^{-9} \text{ т/мм}^3$);
- модуль упругости 1-го рода $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ($2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$);
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Также во всех случаях принималось, что разрушение материала происходило при величине относительной деформации равной 0,5.

Расчётная модель кабины

Компьютерное моделирование испытаний кабины производилось с использованием расчётных моделей кабин грузовых автомобилей с полной массой 15 тонн и полной массой 6 тонн. Расчётные модели построены на базе геометрических моделей в формате step.

Модели для оценки конструкции каркаса кабины построены в расчёте на применение для вычислений конечно-элементного решателя LS-Dyna.

Расчётные модели включают следующие компоненты:

- модель кабины;
- модель участка рамы.

В модель кабины включён каркас кабины, рулевое управление (рулевое колесо и конструктивные элементы, через которые оно сопрягается с каркасом кабины), двери, сиденье водителя, лобовое стекло, боковые стёкла в дверях, стекло в задней стенке кабины.

В модель участка рамы, применявшейся при расчёте процессов нагружения автомобиля согласно Правилам ООН № 29, включена её часть, располагающаяся впереди опоры, положение которой задано в Правилах ООН № 29 (рис. 8). Согласно Правилам ООН № 29 опора рамы должна находиться сзади задних опор кабины и впереди середины колёсной базы.

При выборе размера элементов конечно-элементной сетки расчётной модели приходится искать компромисс между точностью получаемых результатов и затратами времени на выполнение расчётов. Основываясь на результатах исследования влияния размеров элементов на получаемые результаты, приведённые в [4], при построении конечно-элементной сетки использовался следующий подход: минимальный размер элементов 4 мм,

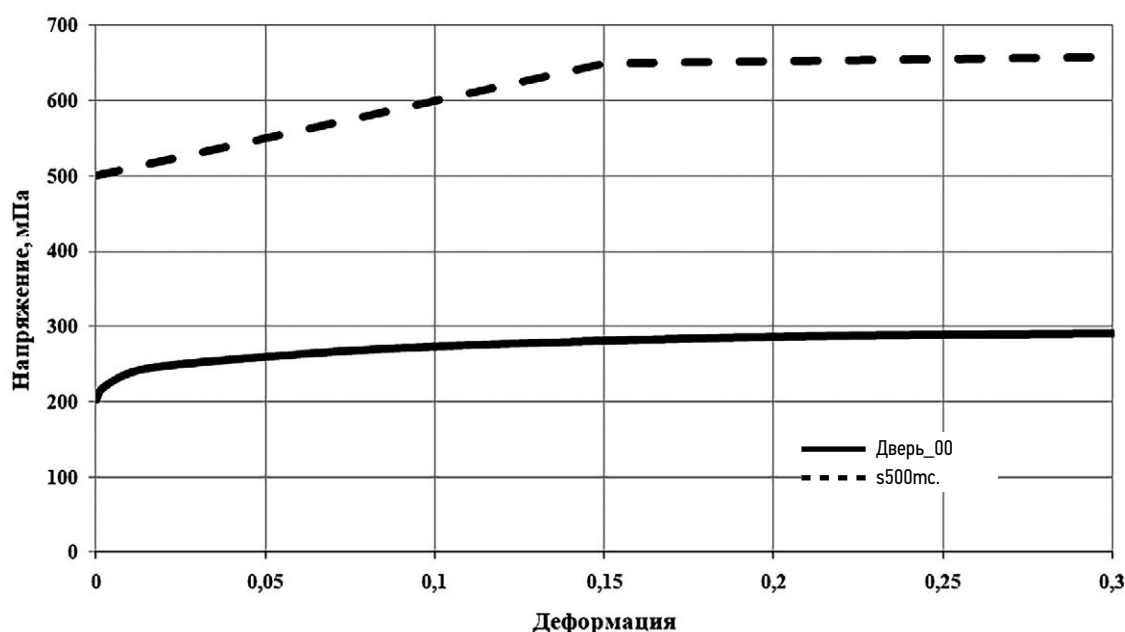


Рис. 7. Зависимости напряжений и деформаций, принятая для виртуального моделирования.

Fig. 7. Stress and strain dependences adopted for virtual simulation.

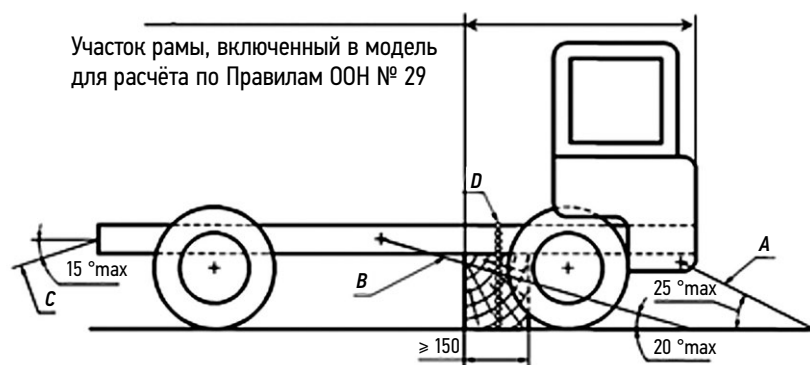


Рис. 8. Участок рамы, включаемый в расчётную модель.

Fig. 8. The part of the frame included in the simulation model.



Рис. 9. Расчётная конечно-элементная модель кабины автомобиля с полной массой 15 тонн.

Fig. 9. The simulation finite element model of the truck cabin with a gross weight of 15 tons.

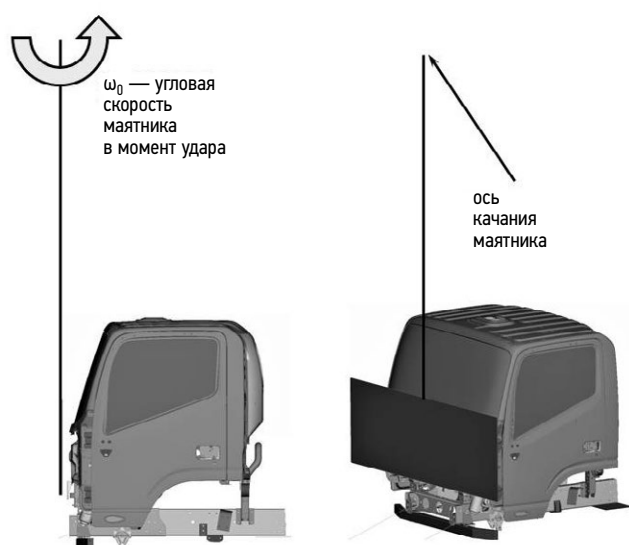


Рис. 10. Расчётная модель нагрузки для Испытания А (Правила 29.02 и Правила 29.03).

Fig. 10. The simulation model of load for the Test A (the UNECE Regulation 29.02 and the UNECE Regulations 29.03).

преимущественный характерный размер элементов 8 мм, максимальный размер 12 мм. Большинство элементов в моделях деталей из тонколистового металла — четырёхузловые, трёхузловые элементы применены только в областях, где это неизбежно в силу заданной геометрии. При построении расчётной сетки ставилась цель обеспечить выполнение требований, предъявляемых к форме конечных элементов. Построенная конечно-элементная сетка удовлетворяет заявленным требованиям.

Конструкции кабины автомобилей с вышеуказанными величинами полной массы существенно унифицированы и отличаются, по большей части, только размерами. На рис. 9 показана расчётная модель кабины автомобиля с полной массой 15 тонн (сетка конечных элементов не отображается в силу её большой густоты).

Для моделирования испытаний по Правилам ООН № 29 разработаны расчётные модели нагрузок.

На рис. 10 представлена расчётная модель нагрузки при Испытании А по Правилам 29.02 и Правилам 29.03.

Согласно требованиям Правил 29.02 кинетическая энергия маятника в момент удара должна быть 45 кДж, а согласно требованиям Правил 29.03 — 55 кДж. В соответствии с этим при моделировании Испытания А по Правилам 29.02 угловая скорость маятника задаётся 1,916 рад/с, а при моделировании Испытания А по Правилам 29.03 — 2,380 рад/с.

Расчётная модель нагрузки для Испытания В по Правилам 29.02 и расчётная модель нагрузки для второго этапа Испытания С по Правилам 29.03 идентичны (рис. 11).

На рис. 12 показана расчётная модель нагрузки для Испытания С по Правилам 29.02 (статическое нагружение задней стенки кабины).

Расчётная модель нагрузки для Испытания В по Правилам 29.03 (испытание передних стоек крыши кабины на удар) показана на рис. 13.

Энергия удара — 29,4 кДж.

Испытание С по Правилам 29.03 включает два этапа, выполняемые на одном и том же физическом образце кабины.

На рис. 14 показана расчётная схема нагружения кабины на первом этапе Испытания С по Правилам 29.03.



Рис. 11. Расчётная модель нагрузки для Испытания В по Правилам 29.02 и второго этапа Испытания С по Правилам 29.03.

Fig. 11. The simulation model of load for the Test B according to the UNECE Regulations 29.02 and for the second stage of the Test C according to the UNECE Regulations 29.03.



Рис. 12. Расчётная модель нагрузки для Испытания С по Правилам 29.02.

Fig. 12. The simulation model of load for the Test C according to the UNECE Regulations 29.02.

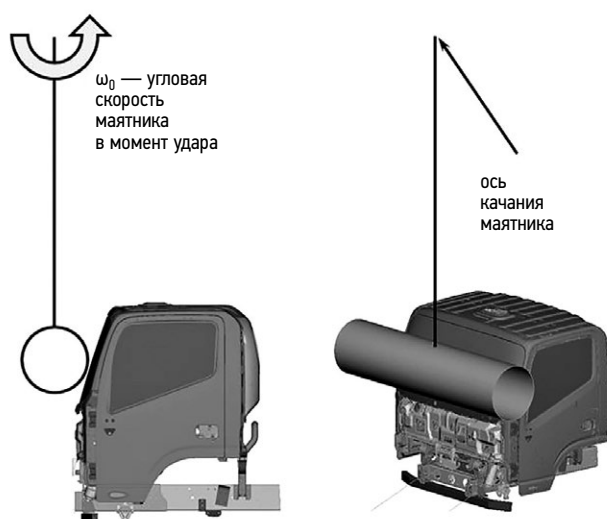


Рис. 13. Расчётная модель нагрузки для Испытания В по Правилам 29.03.

Fig. 13. The simulation model of load for the Test B according to the UNECE Regulations 29.03.

Согласно требованиям Правил 29.03 для проведения первого этапа Испытания С регламентируется кинетическая энергия ударного элемента. Расчётную модель нагружения кабины на втором этапе Испытания С по Правилам 29.03 см. на рис. 11.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследования прототипа кабины

Компьютерное моделирование испытаний кабины предусматривает расчёт процесса нагружения и деформирования кабины в течение 0,5 с после начала соприкосновения ударника с элементами кабины. За это время скорость ударного элемента снижается до нуля и начинается процесс его “отскока” от кабины. К моменту $t = 0,5$ с процессы обратного движения деформированных элементов кабины (“springback” за счёт упругой составляющей деформации кабины) также успевают завершиться.

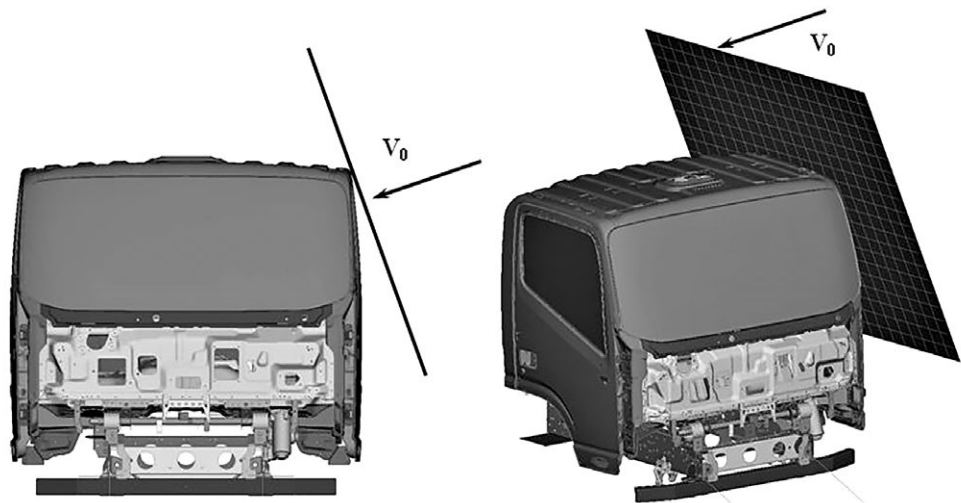


Рис. 14. Расчётная модель нагрузки для первого этапа Испытания С по Правилам 29.03.
Fig. 14. The simulation model of load for the first stage of the Test C according to the UNECE Regulations 29.03.

Из результатов расчётов следует, что конструкция прототипа кабины удовлетворяет требованиям Правил 29.02 в отношении Испытаний А, В и С, а также требованиям Правил 29.03 в отношении Испытаний А и С (табл. 1).

В качестве примера, на рис. 15 показано размещение манекена в кабине после удара плоским маятником с энергией 55 кДж (Испытание А по Правилам 29.03).

Из табл. 1 следует, что кабина не удовлетворяет требованиям в отношении результатов Испытания В по Правилам 29.03. Рис. 16 позволяет заключить, что перемещение рулевого колеса таково, что пространства между ним

и поверхностью подушки сиденья водителя недостаточно для размещения манекена.

На рис. 17 приведена зависимость от времени расстояния по вертикали между рулевым колесом и подушкой сиденья водителя в процессе удара цилиндрическим маятником.

Из рис. 17 видно, что расстояние между нижней точкой рулевого колеса и поверхностью сиденья водителя в процессе Испытания В по Правилам 29.03 сокращается до величины в несколько миллиметров. В то же время, “толщина” “бёдер” манекена в области, где рулевое колесо сближается с поверхностью сиденья, составляет около

Таблица 1. Результаты виртуального моделирования испытаний кабин по Правилам ООН 29

Table 1. Results of the virtual simulation of the cabin tests according to the UNECE Regulations 29

Тип испытания	Требование Правил	Выполнение требований Правил ООН № 29	
		Автомобиль с полной массой 15 тонн	Автомобиль с полной массой 6 тонн
Правила 29.02			
Испытание А	Сохранение остаточного пространства	Выполняется	Выполняется
	Неразрушение опор кабины	Выполняется	Выполняется
Испытание В	Сохранение остаточного пространства	Выполняется	Выполняется
	Неразрушение опор кабины	Выполняется	Выполняется
Испытание С	Сохранение остаточного пространства	Выполняется	Выполняется
	Неразрушение опор кабины	Выполняется	Выполняется
Правила 29.03			
Испытание А	Сохранение остаточного пространства	Выполняется	Выполняется
	Неразрушение опор кабины	Выполняется	Выполняется
Испытание В	Сохранение остаточного пространства	Не выполняется	Не выполняется
	Неразрушение опор кабины	Выполняется	Выполняется
Испытание С	Сохранение остаточного пространства	Выполняется	Выполняется
	Неразрушение опор кабины	Выполняется	Выполняется



Рис. 15. Размещение манекена в кабине с низкой крышей. Испытание А, энергия удара 55 кДж.
Fig. 15. Placing the dummy in a low-roofed cabin. The test A, the impact energy is 55 kJ.

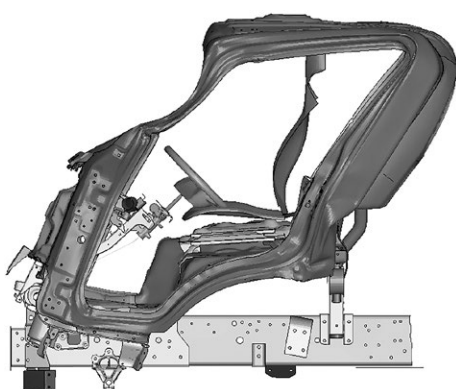


Рис. 16. Деформация каркаса кабины после удара цилиндрическим маятником (Испытание В по Правилам 29.03).
Fig. 16. Deformation of the cabin frame after impact with a cylindrical pendulum (The test B according to the UNECE Regulations 29.03).

125 мм. Это означает, что разместить манекен на сиденье водителя при “исходной” конструкции кабины после Испытания В по Правилам 29.03 невозможно.

Сопоставление результатов компьютерного моделирования Испытания В по Правилам 29.03 и имеющейся информации о результатах испытаний физического образца прототипа кабины показывают, что в целом характер и величина деформаций каркаса кабины, полученные расчётным путём, близки к характеру и величине деформаций физического образца прототипа. Построение разработанной расчётной модели с использованием принятых в отрасли подходов к разработке подобных моделей [5],

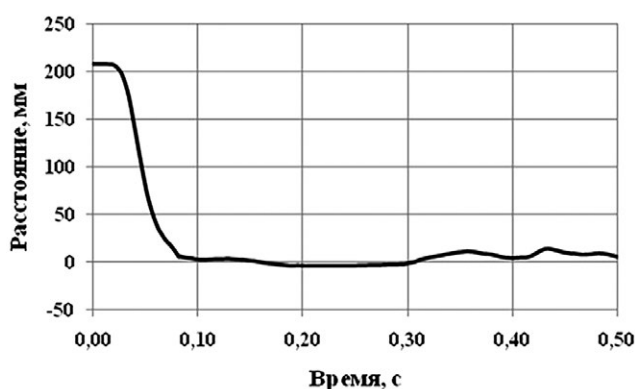


Рис. 17. Расстояние между нижней точкой рулевого колеса и поверхностью сиденья водителя в процессе Испытания В по Правилам 29.03.

Fig. 17. The distance between the lower point of the steering wheel and the surface of the driver's seat during the Test B according to the UNECE Regulation 29.03.

в том числе, с применением приёмов построения расчётных сеток, проверенных путём проведения специальных испытаний [6], указывает на пригодность разработанной расчётной модели для проведения исследований по поиску путей улучшения рассматриваемой конструкции.

Анализ результатов компьютерного моделирования Испытания В по Правилам 29.03 показывает, что в основном расстояние между рулевым колесом и подушкой сиденья уменьшается из-за “поворота” стойки петель дверей и связанных с ней элементов рулевого управления, в том числе, рулевого колеса, вокруг характерной точки в передней части порога двери (рис. 18).

Для того, чтобы обеспечить достаточную величину расстояния от поверхности сиденья водителя до рулевого колеса после удара цилиндром по передним стойкам крыши кабины, необходимо внести в конструкцию кабины изменения, направленные на уменьшение “поворота” стойки петель. В принципе, это может быть достигнуто увеличением несущей способности компонентов каркаса кабины, находящихся в нижней части каркаса кабины — лонжеронов пола кабины и деталей, образующих порог дверного проёма, особенно в зоне “примыкания” порога к стойке дверных петель.

В качестве возможных путей повышения несущей способности элементов каркаса кабины в указанной области рассматривались увеличение толщины конструктивных элементов в этой зоне, применение для изготовления некоторых из них высокопрочной стали, а также добавление в конструкцию некоторых новых деталей-усилителей. Исследовалась возможность уменьшения “поворота” петельной стойки за счёт введения в конструкцию каркаса кабины дополнительных усилителей порога, лонжерона пола кабины, петельной стойки, а также замена материала отдельных деталей на высокопрочную сталь (см. рис. 7, сталь S500MC). Необходимо отметить, что ввиду необходимости учёта компоновочных ограничений рассмотренные варианты изменения конструкции носили “локальный” характер. Как показали расчёты, рассматриваемые изменения конструкции каркаса кабины способствуют увеличению “остаточного” пространства (расстояния от поверхности сиденья до нижней точки на рулевом колесе) до величины 64 мм. Однако требуемое расстояние (125–130 мм) от сиденья до рулевого колеса не достигается.

При вышеуказанных исследованиях рассматривалось увеличение толщины отдельных конструктивных элементов до величины 2–3 мм, что можно считать предельным для деталей каркаса кабины. Очевидно, что, в принципе, при ещё большем увеличении толщины деталей каркаса кабины необходимая величина “остаточного” пространства может быть достигнута, однако, это представляется

неприемлемым по технологическим, экономическим и другим соображениям.

Альтернативным способом повышения прочности и жёсткости кузовной конструкции представляется применение материалов типа пеноалюминия, вводимого в полость лонжеронов пола кабины и полностью её заполняющего [7]. В то же время, применение новых технологий (типа введения пеноалюминия во внутренние полости каркаса) вызывает определённые производственные трудности, оказывает негативное влияние на стоимость продукции и проводится только при соответствующем экономическом обосновании. Поэтому исследованы пути повышения стойкости каркаса кабины к удару цилиндрическим маятником по передним стойкам крыши (Испытание В по Правилам 29.03), за счёт применения “традиционных” материалов и конструктивных решений.

Оптимизация путей передачи нагрузок

Результатов компьютерного моделирования позволяют сделать вывод, что введение в конструкцию кабины локальных изменений, включая применение высокопрочной стали, в отношении увеличения остаточного пространства после ударного воздействия на кабину характеризуется ограниченной эффективностью. Из рис. 16 видно, что в основном деформация конструктивных элементов кабины сосредоточена в ограниченных по размеру областях, в которых возникают пластические шарниры. Противодействовать возникновению пластических шарниров в каркасе кабины можно путём увеличения толщины деталей и введения дополнительных усилителей в “углах” нижнего и верхнего силовых поясов каркаса кабины. Однако, это представляется затруднительным и/или неприемлемым по компоновочным соображениям. Поэтому рассмотрено изменение конструкции каркаса кабины, при котором оптимизируются пути передачи нагрузок, возникающих при ударе цилиндрическим маятником, к элементам каркаса с большей несущей способностью. Перераспределение нагрузок от элементов с малой несущей способностью к элементам с большей несущей способностью может способствовать уменьшению деформаций кабины.

С точки зрения характера деформации, возникающей в каркасе кабины при ударе по передним стойкам крыши, каркас кабины напоминает параллелограмм, стороны которого поворачиваются относительно его стороны-основания (рис. 19).

Расчётные исследования, проведённые в рамках данной работы, показывают, что дверь, находясь в боковом проёме кабины, оказывает сопротивление деформации с характером (см. рис. 19). Данное обстоятельство отмечается также в [7]. Однако, влияния двери, детали которой изготавливаются из обычной “кузовной” стали с пределом текучести около 200 МПа и толщиной листа 0,8 мм, недостаточно для противодействия удару цилиндрическим маятником с энергией 29,4 кДж.

Из анализа характера деформации кабины при ударе по передним стойкам крыши (см. рис. 19) можно

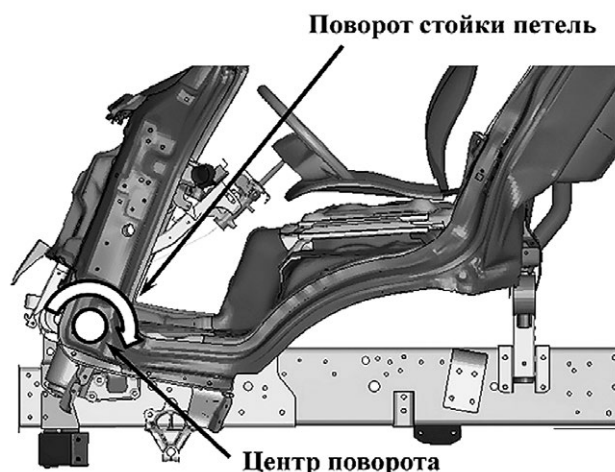


Рис. 18. “Поворот” стойки петель дверей.

Fig. 18. “Rotation” of the door hinge rack.

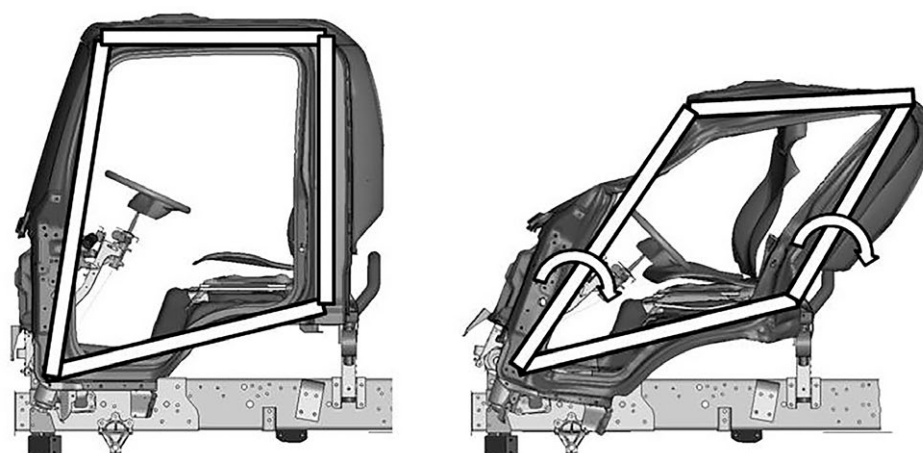


Рис. 19. “Параллелограммная” деформация кабины.
Fig. 19. The “parallelogram” deformation of the cabin.

предположить, что эффективным способом препятствовать “повороту” петельных стоек будет введение в конструкцию кабины специального конструктивного элемента, соединяющего характерные точки А и Б каркаса кабины, и “работающего” по правилу “жёсткого треугольника” (рис. 20). Предполагается, что, если ввести в конструкцию каркаса кабины конструктивный элемент, препятствующий сближению характерных точек А и Б, поворот петельных стоек будет меньшим, что будет способствовать сохранению расстояния между рулевым колесом и поверхностью подушки сиденья водителя.

Очевидные компоновочные требования к устройству кабины (недопустимость каких-либо конструктивных элементов, препятствующих перемещению водителя или пассажира между сиденьями) приводят к возможности расположения упомянутого специального конструктивного элемента, соединяющего характерные точки А и Б каркаса кабины только во внутренней полости двери.

Для исследования эффективности применения конструктивного элемента-усилителя, препятствующего повороту петельных стоек кабины, в расчётную модель введена соответствующая модель усилителя (рис. 21). Расчёты, проведённые с применением модели, включающей элемент-усилитель, показали, что для обеспечения требуемой эффективности усилитель должен иметь значительные прочностные характеристики.

В рассматриваемой расчётной модели элемент-усилитель имеет следующие характеристики:

- площадь поперечного сечения $S = 550 \text{ мм}^2$;
- моменты инерции сечения $I_x = I_y = 46319 \text{ мм}^4$,
 $I_p = 92638 \text{ мм}^4$;
- материал – сталь с пределом текучести около 200 МПа.

Физическим аналогом такого элемента-усилителя является труба 25×7.

Проведённые расчёты показали, что использование усилителя оказывает значительное влияние на величину “остаточного пространства” между рулевым колесом и поверхностью сиденья. Однако, для обеспечения необходимой

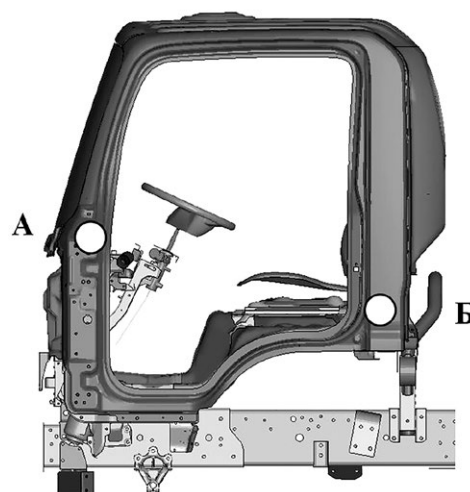


Рис. 20. Характерные точки каркаса кабины.
Fig. 20. Key points of the cabin frame.

величины “остаточного пространства” включение одной только трубы-усилителя в конструкцию двери недостаточно. Если ограничиться добавлением в конструкцию только трубы-усилителя, то это приводит к значительным деформациям (или даже разрушению) имеющихся конструктивных элементов каркаса кабины, через которые передаются нагрузки от трубы-усилителя, возникающие при ударе цилиндрическим ударником. Эти значительные деформации имеющихся элементов каркаса кабины “нивелируют” положительное влияние трубы-усилителя, что не позволяет решить задачу сохранения необходимой величины пространства между рулевым колесом и подушкой сиденья водителя. Иными словами, для того, чтобы труба-усилитель эффективно препятствовала повороту петельных стоек, необходимо, чтобы в конструкции каркаса кабины присутствовали конструктивные элементы с достаточной жёсткостью и прочностью, через которые нагрузки от трубы-усилителя могли бы “распределяться” по возможно большему

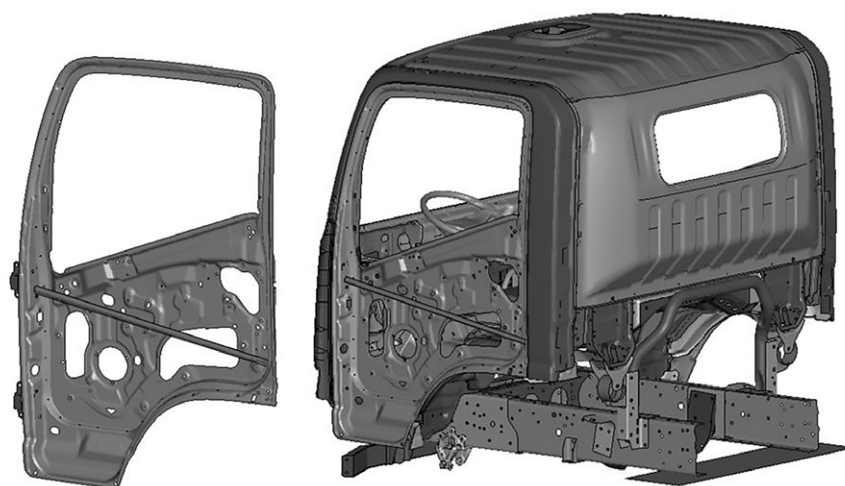


Рис. 21. Конструктивный элемент — силовая связь в полости двери.

Fig. 21. A structural element — the force connection in the door cavity.

количеству существующих конструктивных элементов каркаса кабины. В результате расчётов установлено, что значительную роль в передаче и распределении нагрузок играют конструктивные элементы, находящиеся в нижней задней части каркаса кабины.

Поиск вариантов конфигурации каркаса кабины производился путём *многократных* расчётов с использованием расчётных моделей, характеризующихся *различными комбинациями* толщины компонентов каркаса, различными характеристиками материалов (стали с пределом текучести около 200 МПа и около 500 МПа), а также различными дополнительными конструктивными элементами. Произведена, своего рода, “селекция” различных изменений конструкции каркаса кабины, направленная на выявление комбинации изменений, позволяющих “приблизиться” к выполнению требований, предъявляемых к результатам Испытания В по Правилам 29.03. В то же время, второй, но достаточно

приоритетной задачей при выполнении указанной “селекции” была задача выбора конструкции, которая отличалась бы, возможно, меньшим количеством изменений по отношению к исходной конструкции каркаса кабины.

Результатом проведённой “селекции” являются два варианта конфигурации каркаса кабины причём оба варианта включают трубу-усилитель:

- модель 1 отличается изменением толщины отдельных компонентов каркаса и использованием (наряду с обычной “кузовной” сталью с пределом текучести около 200 МПа) высокопрочной стали типа s500mc с пределом текучести около 500 МПа;
- модель 2 отличается только изменением толщин отдельных компонентов без использования высокопрочной стали.

Изменённые и добавленные элементы каркаса кабины показаны на рис. 22 и 23.



Рис. 22. Элементы каркаса кабины, изменённые и добавленные в Модель 1.

Fig. 22. Cabin frame elements modified and added to the Model 1.



Рис. 23. Элементы каркаса кабины, изменённые и добавленные в Модель 2.

Fig. 23. Cabin frame elements modified and added to the Model 2.

Проведёнными расчётами установлено, что кабина с предлагаемыми изменениями конструкции будет обеспечивать выполнение всех требований, предъявляемых как Правилами 29.02, так и Правилами 29.03.

Результаты компьютерного моделирования Испытания В по Правилам 29.03, представлены на рис. 24 и рис. 25.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

Исследованная конструкция каркаса кабины обеспечивает выполнение требований Правил ООН 29 Пересмотр 1,

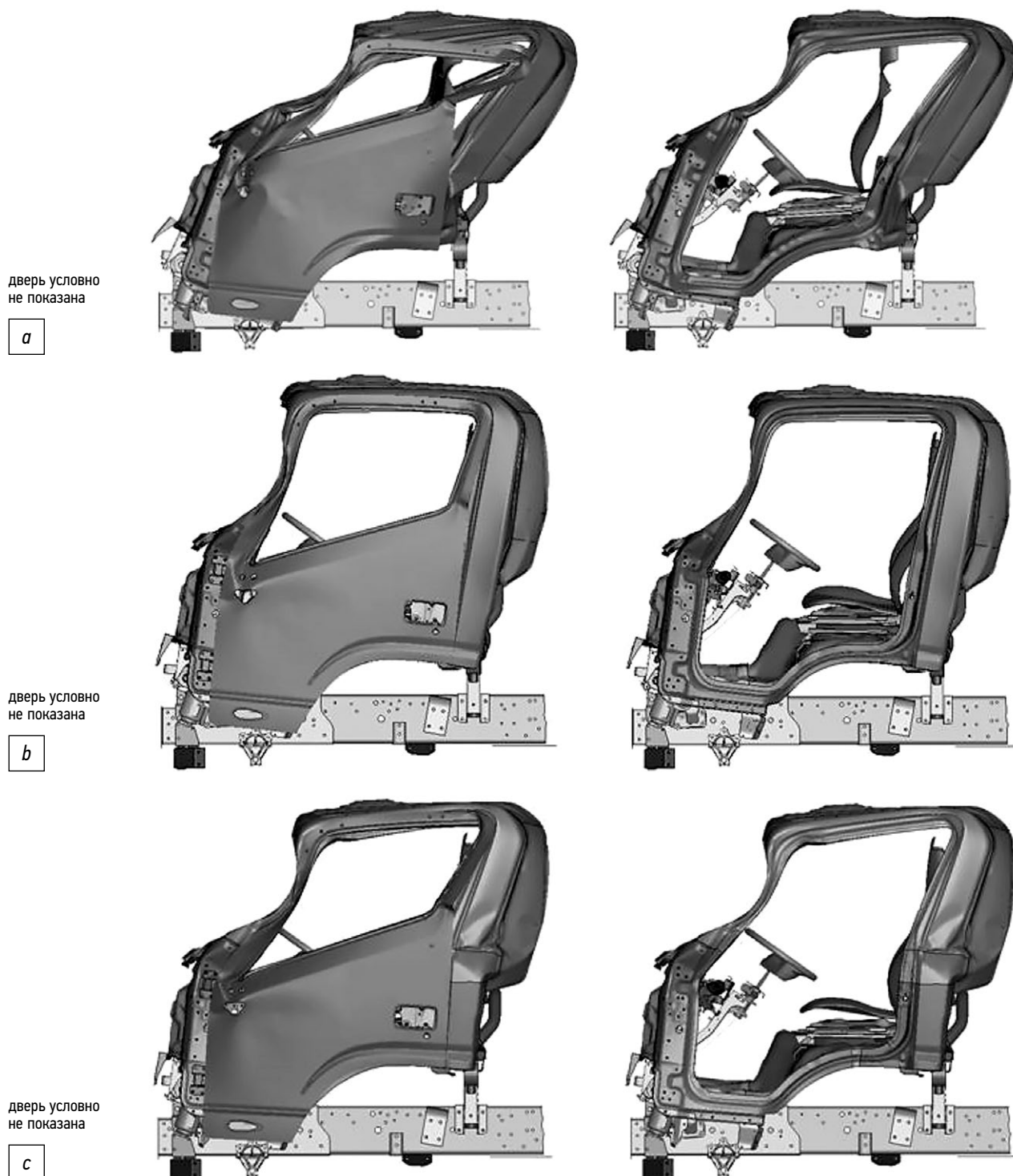


Рис. 24. Деформация кабины после удара цилиндрическим маятником (Испытание В по Правилам 29.03): *a* — исходная модель; *b* — модель 1; *c* — модель 2.

Fig. 24. Deformation of the cabin after impact with a cylindrical pendulum (the test B according to the UNECE Regulations 29.03): *a* — the original model; *b* — the model 1; *c* — the model 2.

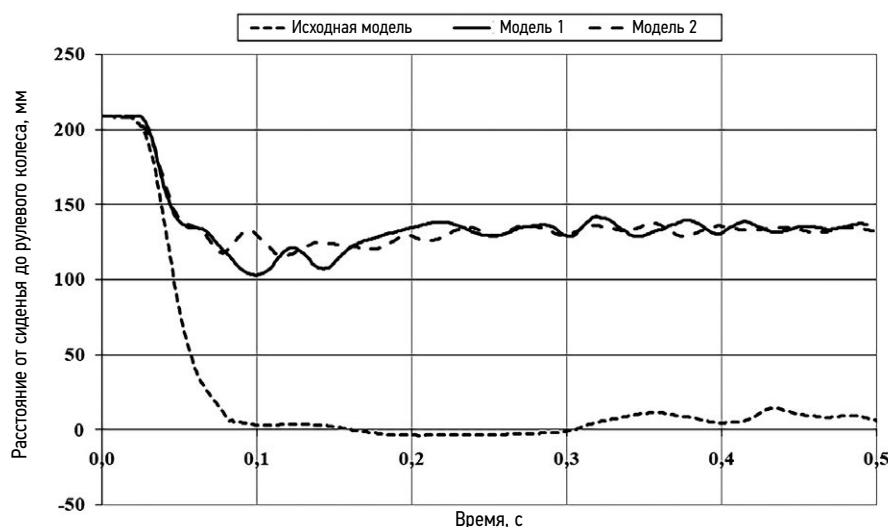


Рис. 25. Расстояние от поверхности подушки сиденья водителя до рулевого колеса.

Fig. 25. Distance from the surface of the driver's seat to the steering wheel.

а также выполнение требований Правил ООН 29 Пересмотр 2 в части требований к результатам Испытания А и испытания С. Требования Правил ООН 29 Пересмотр 2 в части требований к результатам Испытания В не выполняются.

Увеличение толщины отдельных деталей, включение в конструкцию кабины дополнительных конструктивных элементов-усилителей “локального” характера и применение для изготовления отдельных деталей высокопрочной стали повышает пассивную безопасность существующей кабины (увеличивает “остаточное” пространство в кабине). Однако, применение только этого метода недостаточно для выполнения требований Правил ООН 29 Пересмотр 2 в полном объеме. Введение в конструкцию кабины дополнительных конструктивных элементов, в первую очередь, трубы-усилителя в полости двери, препятствующих возникновению пластических шарниров в каркасе кабины, позволяет существенно перераспределить нагрузки между компонентами силового каркаса и вследствие этого уменьшить деформацию кабины и обеспечить требуемые размеры “остаточного” пространства внутри кабины. При применении предлагаемых изменений конструкция кабины будет удовлетворять требованиям Правил ООН № 29 (включая Правила 29.03) в полном объеме.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.А. Сергиевский — постановка задачи, руководство проведением исследования, анализ полученных результатов, написание статьи; Ю.П. Трусова — разработка расчётной модели, проведение расчётов; А.А. Морозова — разработка расчётной модели, участие в расчётах; В.С. Макаров — участие в постановке задачи и анализе полученных результатов; А.А. Шмелев — подготовка исходных данных для разработки расчётной модели, участие в анализе полученных результатов; Т.Н. Мансуров — участие в анализе полученных результатов. Авторы

подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследования выполнены ФГБОУ ВО “НГТУ им. Р.Е. Алексеева” по договору № 01-17560/2021 от 8 апреля 2022 г. при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по теме “Создание высокотехнологичного производства городских электрических грузовых автомобилей с отечественной компонентной базой основных узлов и интеллектуальной системой помощи водителю”. Соглашение №075-11-2022-017 от 07.04.2022 г. (ИГК № 000000S407522Q050002).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. S.A. Sergievsky — setting of the problem, management of the study, analysis of the obtained results, writing the article; Yu.P. Trusova — development of the simulation model, conducting the calculations; A.A. Morozova — development of the simulation model, participation in calculations; V.S. Makarov — participation in the setting of the problem and analysis of the results; A.A. Shmelev — collecting of initial data for the development of a simulation model, participation in the analysis of the obtained results; T.N. Mansurov — participation in the analysis of the obtained results. All authors confirm their authorship compliance with the *ICMJE* international criteria (all authors made a significant contribution to the conceptualization, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the conducted research and the publication of this article.

Funding source. The study was carried out by the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev according to the agreement No. 01-17560/2021 dated April 8, 2022 with the financial support of the Ministry of Education and

Science of the Russian Federation as part of the implementation of a comprehensive project on the topic "Creation of a high-tech production of urban electric trucks with a domestic component base of the main components and an intelligent driver assistant system". Agreement No 075-11-2022-017 dated April 07, 2022 (the identifier of the government contract № 000000S407522Q050002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 41.29-99. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты лиц, находящихся в кабине грузового транспортного средства. Дата обращения 05.04.2024. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200027818>
2. UN Regulations (Addenda to the 1958 Agreement). Дата обращения 09.04.2024. Режим доступа: <https://unece.org/un-regulations-addenda-1958-agreement>.
3. ООО "Европейская металлургическая компания" [internet]. Дата обращения 22.03.2024. Режим доступа: https://emk24.ru/wiki/en_steels/s500mc_1_0984_2186665.
4. Ratzel M., Bois P.D., Fredriksson L.A., Schneider D. A study of mesh sensitivity for crash simulations: comparison of manually and batch meshed models. In: LS-DYNA Anwenderforum. Bamberg, 2005. Дата обращения: 05.04.2024. Режим доступа: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4fe74feb189b614c2aa495d4cdaadda2217beb60>

5. Шмелев А.В., Лисовский Э.В., Короткий В.С. Основы методики виртуального моделирования испытаний кабин грузовых автомобилей по требованиям пассивной безопасности // Механика машин, механизмов и материалов. 2015. Т. 33, № 32. Дата обращения 01.09.2024. Режим доступа: <https://mmmm.by/pdf/ru/2015/03/9.pdf>
6. Орлов Л.Н., Рогов П.С., Тумасов А.В., Вашурин А.С. Повышение пассивной безопасности кузовов автобусов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. Дата обращения 22.03.2024. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13019>
7. Зузов В.Н., Шабан Б. Совершенствование кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования для удовлетворения требованиям пассивной безопасности // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 12. Дата обращения 22.03.2024. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1130.html>.

REFERENCES

1. GOST R 41.29-99. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle. (In Russ.) Accessed: 05.04.2024. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200027818>
2. UN Regulations (Addenda to the 1958 Agreement). Accessed: 09.04.2024. Available from: <https://unece.org/un-regulations-addenda-1958-agreement>
3. LLC "European Metallurgical Company": [internet]. Accessed: 22.03.2024. Available from: https://emk24.ru/wiki/en_steels/s500mc_1_0984_2186665
4. Ratzel M, Bois PD, Fredriksson LA, Schneider D. A study of mesh sensitivity for crash simulations: comparison of manually and batch meshed models. In: *LS-DYNA Anwenderforum*. Bamberg; 2005. Accessed: 05.04.2024. Available from: <https://citeseerx.ist.psu.edu/>

- document?repid=rep1&type=pdf&doi=4fe74feb189b614c2aa495d4cdaadda2217beb60
5. Zuzov VN, Shaban B. Improving truck cabins at the design stage to meet passive safety requirements. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013;12. (In Russ.) Accessed: 22.03.2024. Available from: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1130.html>
6. Orlov LN, Rogov PS, Tumasov AV, Vashurin AS. Improving the passive safety of bus bodies. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014;3. Accessed: 22.03.2024. Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13019>
7. Zuzov VN, Shaban B. Improvement of truck cabins at the design stage to meet passive safety requirements. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013;12. Accessed: 22.03.2024. Available from: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1130.html>

ОБ АВТОРАХ

* Макаров Владимир Сергеевич,

д-р техн. наук;
профессор кафедры «Строительные и дорожные машины»;
адрес: Российская Федерация, 603155, Нижний Новгород,
ул. Минина, д. 24;
ORCID: 0000-0002-4423-5042;
eLibrary SPIN: 9834-6239;
e-mail: makvl2010@gmail.com

AUTHORS' INFO

* Vladimir S. Makarov,

Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the Building and Road Machines Department;
address: 24 Minina street, 603155 Nizhny Novgorod,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-4423-5042;
eLibrary SPIN: 9834-6239;
e-mail: makvl2010@gmail.com

Сергиевский Сергей Андреевич,

канд. техн. наук,
доцент кафедры «Автомобили и тракторы»;
ORCID: 0000-0003-4944-4254;
eLibrary SPIN: 8555-4440;
e-mail: s.sergievskiy@nntu.ru

Трусова Юлия Павловна,

ведущий инженер Центра технических средств и технологий
мониторинга окружающей среды;
ORCID: 0000-0001-6715-3739;
e-mail: trusovayp@nntu.ru

Морозова Анастасия Александровна,

ведущий инженер Центра технических средств и технологий
мониторинга окружающей среды;
ORCID: 0000-0001-8787-2861;
e-mail: anastasia.smirnova96@mail.ru

Шмелев Александр Александрович,

инженер-конструктор НТЦ;
ORCID: 0009-0004-2809-6945;
eLibrary SPIN: 6112-6322;
e-mail: ShmelevAA@kamaz.ru

Мансуров Тимур Наилович,

инженер-конструктор НТЦ;
ORCID: 0009-0000-7468-2073;
eLibrary SPIN: 3133-6306;
e-mail: MansurovTN@kamaz.ru

Sergey A. Sergievsky,

Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor of the Automobiles and Tractors Department;
ORCID: 0000-0003-4944-4254;
eLibrary SPIN: 8555-4440;
e-mail: s.sergievskiy@nntu.ru

Yulia P. Trusova,

Leading Engineer of the Center for Technical Means
and Technologies for Environmental Monitoring;
ORCID: 0000-0001-6715-3739;
e-mail: trusovayp@nntu.ru

Anastasiia A. Morozova,

Leading Engineer of the Center for Technical Means
and Technologies for Environmental Monitoring;
ORCID: 0000-0001-8787-2861;
e-mail: anastasia.smirnova96@mail.ru

Alexander A. Shmelev,

Design Engineer of the Scientific and Technical Center;
ORCID: 0009-0004-2809-6945;
eLibrary SPIN: 6112-6322;
e-mail: ShmelevAA@kamaz.ru

Timur N. Mansurov,

Design Engineer of the Scientific and Technical Center;
ORCID: 0009-0000-7468-2073;
eLibrary SPIN: 3133-6306;
e-mail: MansurovTN@kamaz.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author