

Разработка рациональной силовой конструкции каркаса автобуса

© Р.Б. Гончаров¹, П.С. Рубанов², Г.И. Скотников¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

²ИЦ КАМАЗ, Москва, 121205, Российская Федерация

Глобальная тенденция в развитии автомобильной отрасли — уменьшение массы и улучшение эксплуатационных показателей автобуса. При проектировании его конструкции очень важно проводить рациональный выбор структуры силового каркаса транспортного средства, чтобы соблюдались требования, предъявляемые к его прочности и жесткости. Для проектирования конструкции каркаса автобуса, которая удовлетворяла бы установленным требованиям, необходимо учитывать не только прочность, но и, согласно правилам ООН № 66, эффективность поглощения энергии удара при опрокидывании. Это обеспечивается путем проведения топологической оптимизации с целью получения рационального расположения силовых элементов каркаса автобуса. Для проведения оптимизации с учетом ударного режима нагружения в программном комплексе ANSYS Workbench использовалась программа LS-TaSC с явным решателем LS-DYNA. В результате была получена рациональная структура силового каркаса автобуса.

Ключевые слова: метод конечных элементов, топологическая оптимизация, удар, автобус, силовой каркас, нагрузочные режимы

Введение. Автобусы играют важную роль в системе общественного транспорта, так как обеспечивают комфортный проезд к месту назначения, а также отличаются значительной пассажироместимостью. При проектировании несущей системы автобуса следует учитывать эксплуатационные нагрузки, для того чтобы обеспечивать требуемые жесткостные и прочностные характеристики силового каркаса. Необходимо отметить, что опрокидывание автобуса на бок является хотя и не самым частым, но, безусловно, одним из приводящих к наиболее тяжелым последствиям видом ДТП, к которым зачастую относятся многочисленные травмы и даже гибель людей. Поэтому обязательным условием сертификации автобусов является проведение испытаний на опрокидывание в соответствии с правилами ООН № 66 [1].

Современная тенденция в проектировании несущих систем транспортных средств (ТС) — рациональное распределение материала с целью создания равнопрочной конструкции. Для этого при разработке силовых конструкций транспортных средств применяется метод топологической оптимизации, широко представленный в [2–6].

Цель настоящей работы — получение картины рационального расположения силовых элементов каркаса автобуса путем проведения топологической оптимизации.

Постановка задачи оптимизации, формирование нагрузочных режимов. Основная задача, решаемая посредством автобуса, — безопасная перевозка пассажиров. Для ее выполнения силовая конструкция должна иметь достаточную прочность, чтобы выдерживать нагрузки, создаваемые максимально допустимым количеством пассажиров. Кроме того, следует учитывать, что на каркас автобуса будут оказывать воздействие навесное оборудование, агрегаты, а также внутренняя и внешняя обшивки.

В процессе эксплуатации автобус постоянно испытывает динамические нагрузки при частых остановках, разгонах и поворотах, а также у него происходит вывешивание колес при попадании в ямы на некачественном дорожном полотне, в связи с чем предъявляются повышенные требования не только к прочности, но и к жесткости конструкции.

Для обеспечения безопасности перевозимых пассажиров, силовой каркас автобуса проверяется на ударопрочность в соответствии с правилами ООН № 66. Согласно этим правилам, верхняя часть конструкции транспортного средства должна обладать достаточной прочностью, для того чтобы и во время, и после ее испытания ни один из сместившихся элементов автобуса не выступал в остаточное пространство, и ни одна из частей остаточного пространства не выступала за пределы деформированной конструкции. Под остаточным пространством подразумевают объем пассажирского салона, образуемый путем перемещения по прямой или по прямым линиям поперечной вертикальной плоскости (рис. 1, *a*) таким образом, чтобы точка *R* перемещалась от точки *R* внешнего заднего сиденья через точку *R* каждого внешнего промежуточного сиденья до точки *R* внешнего переднего пассажирского сиденья. Было принято, что точка *R*, указанная на рис. 1, *б*, расположена на расстоянии 500 мм выше уровня пола под ногами пассажиров, на расстоянии 300 мм от внутренней стороны транспортного средства и на расстоянии 100 мм вперед от спинки сиденья на центральной линии внешних сидений.

Схема динамического испытания на опрокидывание в соответствии с правилом ООН № 66 приведена на рис. 2. Исследуемое транспортное средство размещают на жесткой плите, находящейся на высоте 800 мм от бетонного основания, положение центра тяжести автобуса (точка *C*) при этом должно находиться на высоте h_0 от опрокидывающей платформы. Плита наклоняется с угловой скоростью менее 5 град/с до тех пор, пока автобус не окажется в неустойчивом положении и не начнет переворачиваться (точка *C* переходит в положение *C'*). Затем транспортное средство под действием силы тяжести падает с высоты h_1 и ударяется о нижнюю поверхность ямы (точка *C'* переходит в положение *C''*) [7].

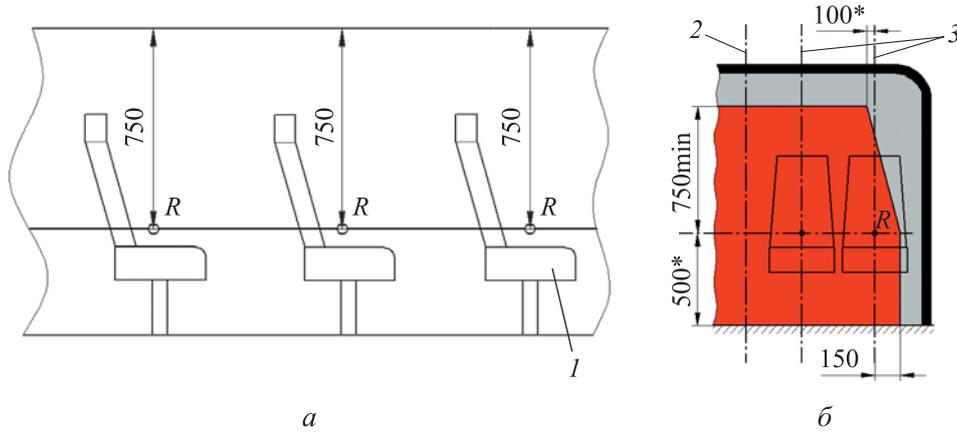


Рис. 1. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы остаточного пространства в соответствии с правилами ООН № 66:

1 — переднее пассажирское сиденье автобуса; 2 — ось симметрии ТС; 3 — ось симметрии сидений

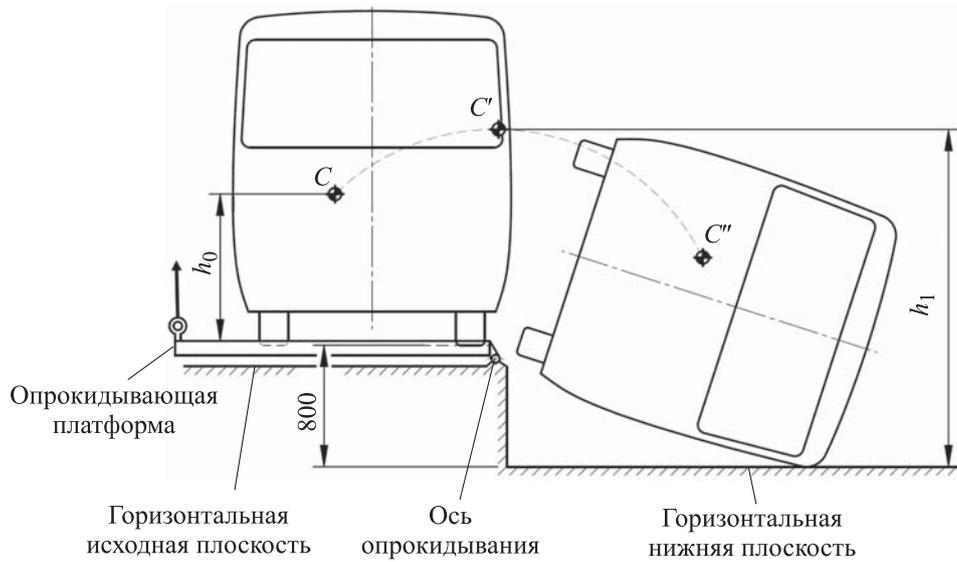


Рис. 2. Схема динамического испытания на опрокидывание

В результате анализа условий эксплуатации автобуса и требований, предъявляемых к силовым конструкциям, сформированы нагрузочные режимы [8–13], представленные в таблице.

Перечень нагрузочных режимов

Нагрузочный режим	Пояснение
<i>Дорожный режим нагружения (расчет в ANSYS Topology optimization)</i>	
Статическая нагрузка	Автобус стоит на ровной горизонтальной поверхности, на конструкцию действует статическая нагрузка от пассажиров и навесного оборудования
Разгон	Движение передним ходом с максимальной продольной силой, обеспечиваемой предельными возможностями двигателя
Торможение с замедлением a	Движение с максимальным замедлением (экстренное торможение) $a = 7,845 \text{ м/с}^2$
Поворот с минимальным радиусом R , скоростью v , ускорением a	$R = 25 \text{ м}$, $v = 40 \text{ км/ч}$, $a = 4,94 \text{ м/с}^2$
Вывешивание переднего левого колеса	Кручение каркаса
Вывешивание заднего левого колеса	
Ударный режим нагружения (расчет в LS-TaSC)	

Описание расчетной модели. Статический расчет каркаса автобуса методом конечных элементов позволяет определить распределение напряжений и деформаций от постоянных нагрузок: собственного веса конструкции, массы пассажиров и установленных агрегатов [14]. Граничные условия модели задаются в точках контакта колес с опорной поверхностью. Компоновка агрегатов и приложенные к несущей системе нагрузки показана на рис. 3. Передняя система поддрессоривания автобуса — независимая, двухрычажная; задняя — зависимая с пневматическими упругими элементами. Направляющие и упругодемпфирующие элементы системы поддрессоривания моделировались упрощенно, с помощью балочных элементов с большой жесткостью. Перераспределение усилий при работе системы поддрессоривания не учитывалось.

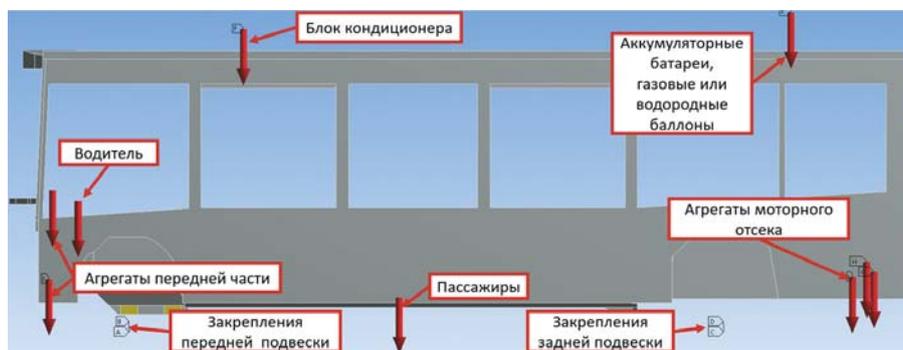


Рис. 3. Расчетная модель автобуса

Движение с максимальным продольным ускорением возникает при трогании автобуса с места, когда педаль акселератора полностью нажата. При этом все агрегаты, передающие нагрузку на каркас, создают значительную инерционную составляющую (силу Даламбера), направленную противоположно ускорению. Аналогичная ситуация с максимальным замедлением возникает при экстренном торможении, когда инерционные силы изменяют свое направление.

При оценке прочности конструкции современного городского автобуса необходимо учитывать экстремальные режимы эксплуатации, в частности, движение с минимальным радиусом поворота [15]. В этом режиме конструкция испытывает максимальные нагрузки, вызванные резким изменением направления движения. Значительные нагрузки на каркас автобуса связаны с его компоновочной схемой, предусматривающей размещение массивного навесного оборудования, такого как аккумуляторные батареи, газовые или водородные баллоны, а также блок системы кондиционирования. Большая масса и крупные габариты этих компонентов повышают риск возникновения опасных деформаций несущей конструкции при резких маневрах, к которым относятся прохождение крутых поворотов, экстренное торможение и интенсивное ускорение.

Пространство проектирования — область, заполненная конечными элементами, необходимая для топологической оптимизации. Для выбранного объекта исследования пространство проектирования показано на рис. 4. Данная модель выполнена с помощью тетра-элементов, материал — конструкционная сталь.

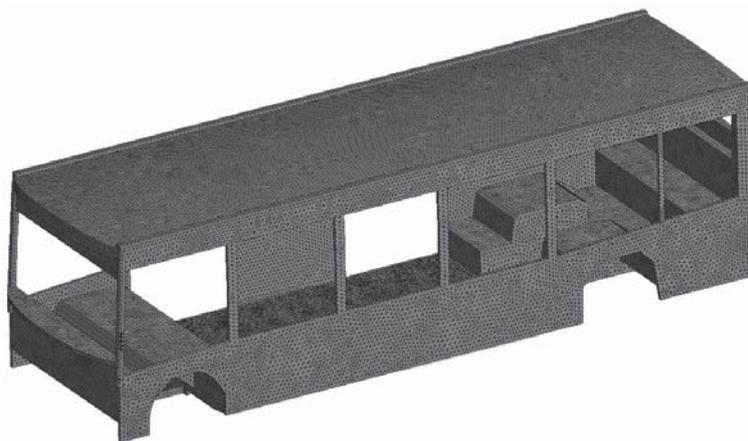


Рис. 4. Конечно-элементная модель пространства проектирования

Оптимизационная задача данной работы заключается в достижении максимальной жесткости конструкции путем изъятия заданного объема материала.

Интерпретация результатов топологической оптимизации.

Результаты топологической оптимизации продемонстрированы на рис. 5. Их анализ показал, что задняя часть каркаса автобуса не влияет на общую жесткость конструкции, она должна быть разработана с учетом расположения и мест крепления агрегатов моторного отсека.

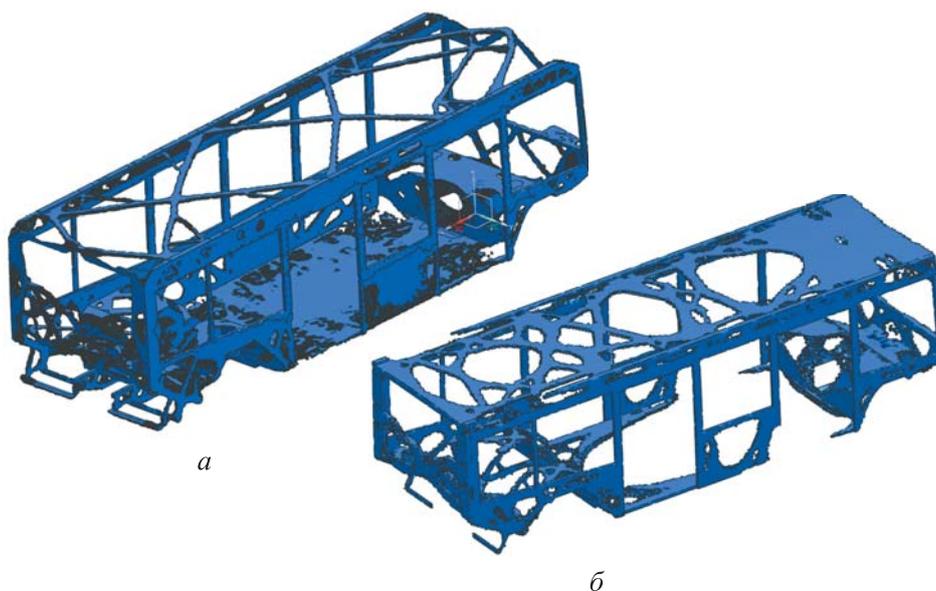


Рис. 5. Результаты топологической оптимизации для дорожных режимов (а) и ударного режима (б)

Сравнение результатов оптимизации для дорожных и ударного режимов нагружения приведено на рис. 6–10. Желтым цветом обозначены места расположения силовых элементов конструкции, определенных по результатам топологической оптимизации, зеленым — обведены места совпадения креплений поперечин для двух режимов.

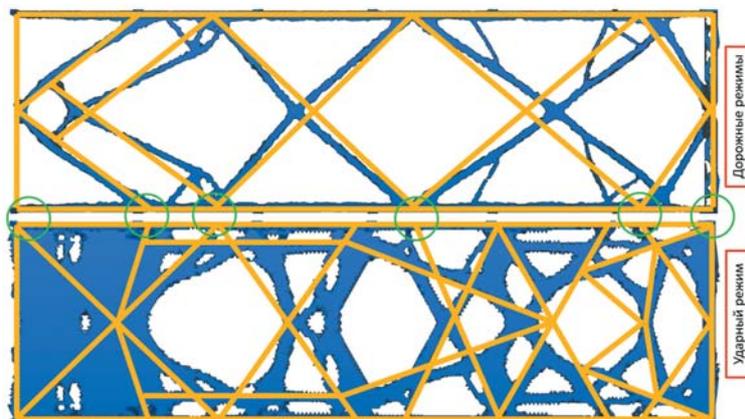


Рис. 6. Интерпретация результатов оптимизации для каркаса крыши

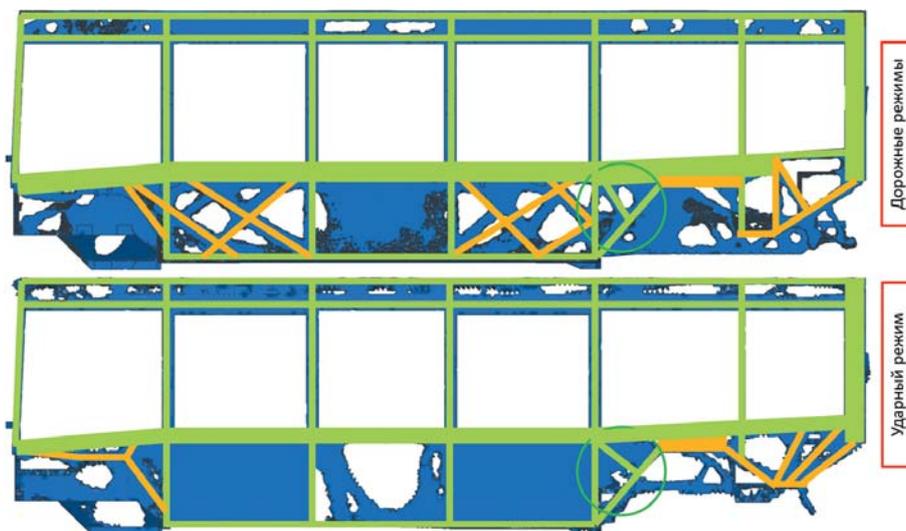


Рис. 7. Интерпретация результатов оптимизации для левой боковины

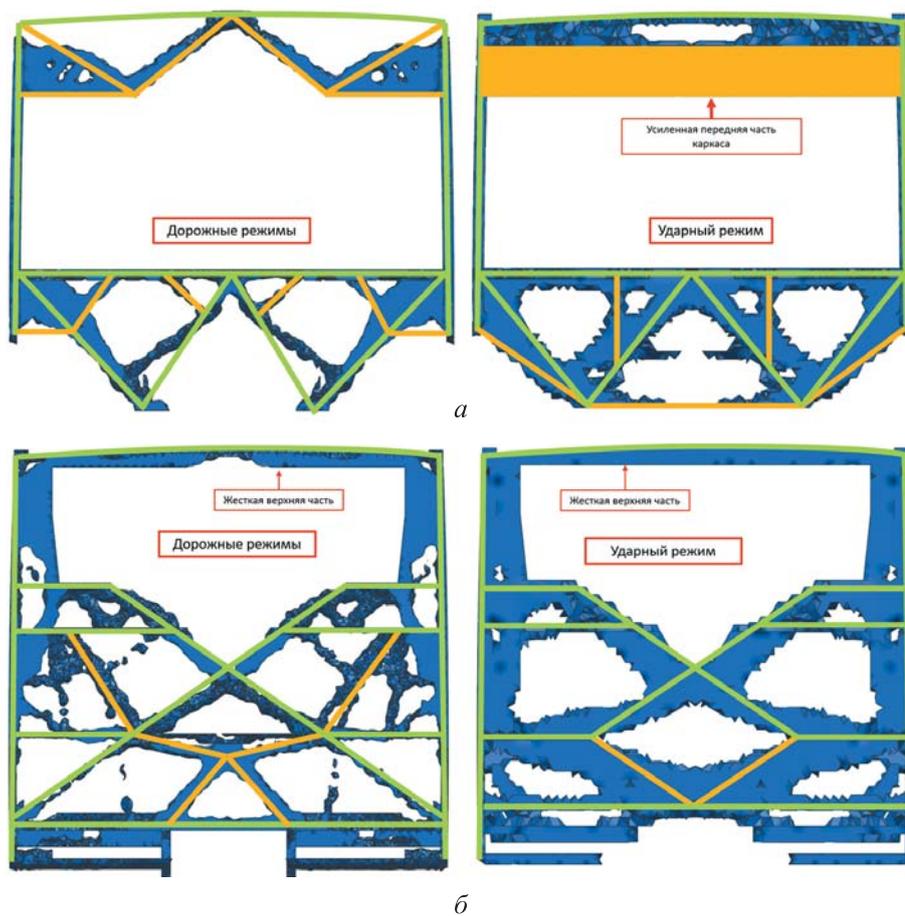


Рис. 8. Интерпретация результатов оптимизации для передней (а) и задней (б) части каркаса

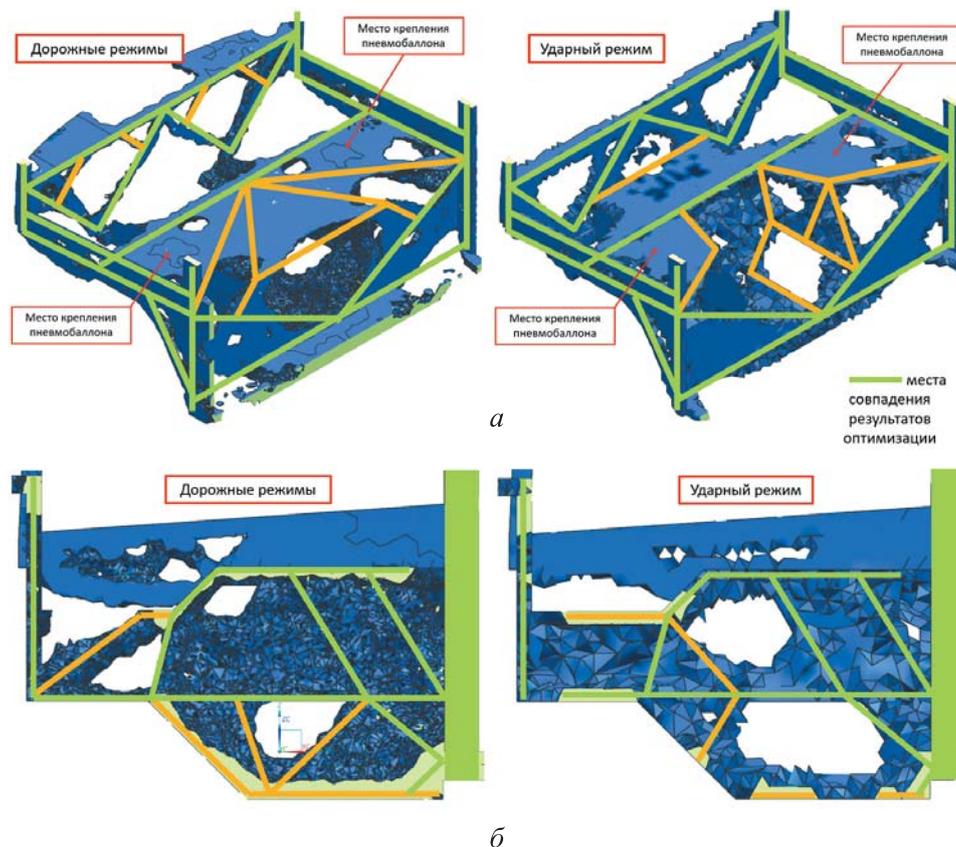


Рис. 9. Интерпретация результатов оптимизации для переднего модуля:
a — вид в изометрии; *б* — продольный разрез

Оптимальное распределение материала в конструкции крыши автобуса достигается за счет X-образной схемы расположения продольных и поперечных балок. Такая конструкция обладает повышенной устойчивостью к кручению, что особенно важно при диагональном вывешивании кузова автобуса. Для повышения общей жесткости необходимо обеспечить силовую связь между боковинами каркаса в передней и в задней части. Однако наличие большого лобового стекла снижает жесткость передней части по сравнению с задней. Поэтому, согласно результатам оптимизации для режима нагружения «прокидывание на борт», требуется дополнительно усилить конструкцию передней части крыши.

Для того чтобы создать равнопрочную конструкцию боковины автобуса, необходимо увеличить жесткость подоконного профиля. Каркас боковины должен быть X-образным (сетчатая структура). Расположение балок в задней части каркаса (моторный отсек) зависит от расположения агрегатов и не влияет на силовую конструкцию каркаса в целом.

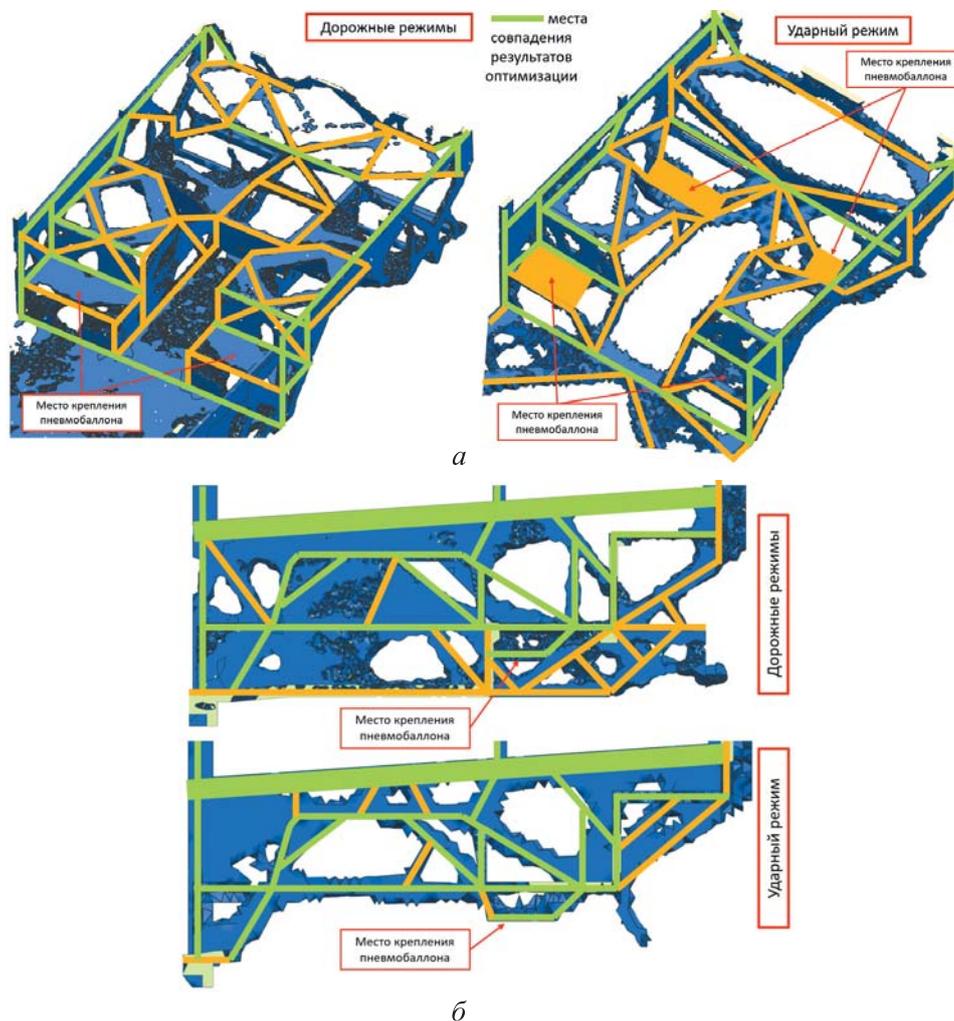


Рис. 10. Интерпретация результатов оптимизации для заднего модуля:
 а — вид в изометрии; б — продольный разрез

Проектирование передней части каркаса должно в первую очередь основываться на результатах оптимизации для ударного режима нагружения (опрокидывание), который является наиболее критичным для несущей системы. Для обеспечения требуемой жесткости каркаса в этом режиме необходимо усилить конструкцию крыши.

При проектировании передней и задней частей силового каркаса автобуса в зоне колесных арок приоритет следует отдавать результатам оптимизации для режима опрокидывания, так как это нагружение является наиболее критичным.

Заключение. В результате проведенных исследований был предложен набор режимов нагружения, позволяющий получить рациональную картину расположения силовых элементов каркаса автобуса;

выполнена топологическая оптимизация силового каркаса автобуса, учитывающая эксплуатационные нагрузочные режимы и требования к пассивной безопасности пассажиров автобуса в соответствии с правилами ООН № 66.

Развитием данной работы должна стать окончательная верификация соответствия конструкции каркаса критериям пассивной безопасности пассажиров, осуществляемая посредством проведения сертификационных испытаний на полноразмерном прототипе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mitic S., Popovic V.M., Blagojevic I., Grbovic A. Verification of the numerical model of optimized bus body structure according to UN Regulation No. 66. *Tehnicki Vjesnik*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 87–92.
- [2] Рубанов П.С., Гончаров Р.Б., Рябов Д.М., Падалкин Б.В. Топологическая оптимизация кабины мини-погрузчика с позиции пассивной безопасности по требованиям FOPS и ROPS. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*, 2024, № 3 (78), с. 48–56.
- [3] Рубанов П.С., Максимов Р.О., Четвериков М.В. Методика синтеза геометрии продольного профиля и конструктивных параметров листовой рессоры с применением метода конечных элементов. *Тракторы и сельхозмашины*, 2024, т. 91, № 3, с. 331–340.
- [4] Жителев Д.А., Поздняков Т.Д., Сулегин Д.А. Топологическая оптимизация силовой конструкции каркаса безопасности. *Известия МГТУ МАМИ*, 2023, т. 17, № 2, с. 179–186.
- [5] Левенков Я.Ю., Лебедев Д.Р. Использование методов топологической оптимизации на ранних стадиях проектирования несущей системы снегохода. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2023, № 4, с. 21–29.
- [6] Душкин М.А., Левенков Я.Ю. Методика автоматизированного выбора нагрузочных режимов для проектирования высоконагруженных деталей транспортных средств с использованием топологической оптимизации. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2025, № 2 (149), с. 85–102.
- [7] Kongwat S., Jongpradist P., Hasegawa H. Lightweight bus body design and optimization for rollover crashworthiness. *Int. J. Automot. Technol.*, 2020, vol. 21, pp. 981–991.
- [8] Чичекин И.В., Левенков Я.Ю., Арутюнян Г.А., Нырков Ф.А., Чудаков О.И. Разработка математической динамической модели карьерного автосамосвала для определения нагрузок, действующих на раму в заданных режимах эксплуатации. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2022, № 2 (137), с. 127–137.
- [9] Kurniadi N., Priyanto K., Gojandra F.P.L. Finite element analysis and optimization of medium bus frame structure. *Jurnal Teknik Mesin*, 2025, vol. 14, no. 2, pp. 157–162.
- [10] Рубанов П.С., Гончаров Р.Б., Скотников Г.И., Горелов В.А., Григорьев В.С. Оценка влияния учета податливости рамы фронтального погрузчика на возникающие нагрузки в системе динамики твердых тел. *Известия МГТУ МАМИ*, 2023, т. 17, № 4, с. 401–409.
- [11] Дианов В.А., Бокарев А.И., Карташев А.Б. Разработка методики моделирования нагруженности карьерного автосамосвала путем каскадирования внешних силовых факторов. *Труды МАМИ*, 2024, № 3 (298), с. 57–70.

- [12] Чичекин И.В., Ныркoв Ф.А., Григорьев В.С. Разработка динамической модели фронтального погрузчика для анализа эксплуатационных свойств и определения нагрузок, действующих на его элементы. *Известия МГТУ МАМИ*, 2022, т. 16, № 1, с. 71–80.
- [13] Razali N.I., Aziz N.A., Tora A. Verification of the computer model of the bus rollover according to Annex 9 UNECE R66. *ASEAN Engineering Journal*, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 143–150.
- [14] Addisu H.S., Koricho E.G. Structural weight and stiffness optimization of a midibus using the reinforcement and Response Surface Optimization (RSO) method in static condition. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2022, paper 6812744.
- [15] Chen J., Hwang H. Steering test of mid-size bus with flexible-body dynamics model. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 169, paper 01038.

Статья поступила в редакцию 27.10.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гончаров Р.Б., Рубанов П.С., Скотников Г.И. Разработка рациональной силовой конструкции каркаса автобуса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 1. EDN DJRXQO

Гончаров Роман Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Колесные машины», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru

Рубанов Павел Сергеевич — инженер-конструктор ИЦ КАМАЗ.
e-mail: rubanov_ps@bk.ru

Глеб Игоревич Скотников — канд. техн. наук, доцент кафедры «Колесные машины», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: skotnikovg@bmstu.ru

Development of a Rational Load-Bearing Frame Structure for a Bus

© R.B. Goncharov¹, P.S. Rubanov², G.I. Skotnikov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

²IC KAMAZ, Moscow, 121205, Russian Federation

A global trend in the automotive industry development involves weight reduction and enhancement of bus operational characteristics. When designing the structure, it is essential to make a rational choice of the load-bearing frame structure of the vehicle in order to meet the requirements for its strength and stiffness. When designing a bus frame structure meeting the established requirements, not only strength must be taken into account, but also, the effectiveness of energy absorption in the event of a rollover impact in accordance with UN Regulation No. 66. This can be achieved through topological optimization aimed at obtaining a rational layout of the bus frame load-bearing elements. Optimization under impact loading conditions was carried out using the LS-TaSC program with the explicit LS-DYNA solver in ANSYS Workbench, resulting in a rational bus frame load-bearing structure.

Keywords: finite element method, topological optimization, impact, bus, load-bearing frame, load modes

REFERENCES

- [1] Mitic S., Popovic V.M., Blagojevic I., Grbovic A. Verification of the numerical model of optimized bus body structure according to UN Regulation No. 66. *Tehnicki Vjesnik*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 87–92.
- [2] Rubanov P.S., Goncharov R.B., Ryabov D.M., Padalkin B.V. Topologicheskaya optimizaciya kabiny mini-pogruzchika s pozicii passivnoj bezopasnosti po trebovaniyam FOPS i ROPS [Topological optimization of the mini-loader cabin from the position of passive safety according to the requirements of FOPS and ROPS]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) — Bulletin of the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)*, 2024, no. 3(78), pp. 48–56.
- [3] Rubanov P.S., Maksimov R.O., Chetverikov M.V. Metodika sinteza geometrii prodol'nogo profilya i konstruktivnykh parametrov listovoj resory s primeneniem metoda konechnykh elementov [The method of synthesis of the geometry of the longitudinal profile and the design parameters of the leaf spring using the finite element method]. *Traktory i selkhoz mashiny — Tractors and Agricultural Machinery*, 2024, vol. 91, no. 3, pp. 331–340.
- [4] Zhitelev D.A., Pozdnyakov T.D., Sulegin D.A. Topologicheskaya optimizatsiya silovoy konstrukcii karcasa bezopasnosti [Topological optimization of the load-bearing structure of the safety cage]. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2023, vol. 17, no. 2, pp. 179–186.
- [5] Levenkov Ya.Yu., Lebedev D.R. Ispolzovanie metodov topologicheskoi optimizatsii na rannikh stadiyakh proektirovaniya nesushchei sistemy snieghoda [The use of topological optimization methods in the early stages of snowmobile]. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya*, 2023, no. 4, pp. 21–29.
- [6] Dushkin M.A., Levienkov Ya.Yu. Metodika avtomatizirovannogo vybora nagruzochykh rezhimov dlya proektirovaniya vysokonagruzhenykh detalei

- transportnykh sredstv s ispolzovaniem topologicheskoi optimizatsii [The method of automated load modes selection for designing highly loaded vehicle parts using topology optimization]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva — Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev*, 2025, no. 2 (149), pp. 85–102.
- [7] Kongwat S., Jongpradist P., Hasegawa H. Lightweight bus body design and optimization for rollover crashworthiness. *Int. J. Automot. Technol*, 2020, vol. 21, pp. 981–991.
- [8] Chichekin I.V., Levienkov Ya.Yu., Arutyunyan G.A., Nyrkov F.A., Chudakov O.I. Razrabotka matematicheskoi dinamicheskoi modeli kariernogo avtosamosvala dlya opredeleniya nagruzok, deistvuyushchikh na ramu v zadannykh rezhimakh ekspluatatsii [Development of mathematical dynamic model of an open-pit dump truck for determination of loads acting on frame in specified operating modes]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva — Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev*, 2022, no. 2 (137), pp. 127–137.
- [9] Kurniadi N., Priyanto K., Gojandra F.P.L. Finite element analysis and optimization of medium bus frame structure. *Jurnal Teknik Mesin*, 2025, vol. 14, no. 2, pp. 157–162.
- [10] Rubanov P.S., Goncharov R.B., Skotnikov G.I., Gorelov V.A., Grigoriev V.S. Ocenka vliyaniya ucheta podatlivosti rami frontalnogo pogruchika na vznikayushchie nagruzki v sisteme dinamiki tverdykh tel [Assessment of influence of considering the flexibility of the front loader frame on the emerging loads in the multibody system]. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2023, vol. 17, no. 4, pp. 401–409.
- [11] Dianov V.A., Bokarev A.I., Kartashov A.B. Razrabotka metodiki modelirovaniya nagruzhennosti kariernogo avtosamosvala putyom kaskadirovaniya vneshnikh silovykh faktorov [Developing the procedure of simulation of loading of the open-pit dump truck by means of cascading the external force factors]. *Trudy NAMI — Proceedings of NAMI*, 2024, no. 3(298), pp. 57–70.
- [12] Chichekin I.V., Nyrkov F.A., Grigoriev V.S. Razrabotka dinamicheskoi modeli frontalnogo pogruchika dlya analiza ekspluatatsionnykh svoystv i opredeleniya nagruzok, deystvuyushchikh na ego elementy [Development of a dynamic model of a front loader for the analysis of operational properties and determination of loads acting on its elements]. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 71–80.
- [13] Razali N.I., Aziz N.A., Topa A. Verification of the computer model of the bus rollover according to Annex 9 UNECE R66. *ASEAN Engineering Journal*, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 143–150.
- [14] Addisu H.S., Koricho E.G. Structural weight and stiffness optimization of a midibus using the reinforcement and Response Surface Optimization (RSO) method in static condition. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2022, paper 6812744.
- [15] Chen J., Hwang H. Steering Test of Mid-Size Bus with Flexible-Body Dynamics Model. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 169, paper 01038.

Goncharov R.B., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru

Rubanov P.S., Design Engineer of the IC KAMAZ. e-mail: rubanov_ps@bk.ru

Skotnikov G.I., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: skotnikovg@bmstu.ru