

Методика синтеза геометрии продольного профиля и конструктивных параметров листовой рессоры с применением метода конечных элементов

П.С. Рубанов¹, Р.О. Максимов^{1, 2}, М.В. Четвериков^{1, 2}

¹ Инновационный центр «КАМАЗ», Москва, Российская Федерация;

² Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В большинстве грузовых транспортных средств применяются листовые рессоры в качестве упругого элемента в системе поддрессоривания, поэтому совершенствование подходов к расчёту и синтезу рессорных подвесок автомобиля для снижения вибронагруженности и повышения комфорта движения является актуальным вопросом. Благодаря синтезированию продольного профиля листов рессоры сложной формы можно добиться высоких свойств прочности рессоры при достаточно низкой жёсткости путём применения расчётов и оптимизаций с помощью метода конечных элементов (МКЭ), что позволяет создавать более совершенную форму рессоры с точки зрения плавности хода транспортного средства.

Цель работы — создание новой методики синтеза листовой рессоры переменного профиля её продольного сечения и получение ее характеристик при помощи современных методов проектирования, основанных на применении МКЭ.

Материалы и методы. Решение поставленной задачи проводится в программном комплексе NX в среде для прочностных расчётов Simcenter 3D. Для получения геометрии продольного профиля рессоры применяется топологическая оптимизация, а затем проводится проверочный расчёт на прочность с помощью МКЭ для получения характеристик рессоры.

Результаты. В ходе выполнения работы, проводимой в Инновационном центре «КАМАЗ», разработан способ формирования продольного профиля листовой (независимо от количества листов) рессоры и построены зависимости жёсткости листовой рессоры от её параметров. По полученным зависимостям была синтезирована оптимальная геометрия продольного профиля рессоры, в которой была снижена жёсткость на 33%, по сравнению с прототипом рессоры, при сохранении несущей способности транспортного средства.

Заключение. Данная методика синтеза геометрии продольного профиля и конструктивных параметров рессоры может использоваться в процессах конструкторского проектирования систем поддрессоривания транспортных средств и в дальнейшем применяться при проведении исследовательских работ.

Ключевые слова: листовая рессора; МКЭ; топологическая оптимизация; расчёт на прочность; параметрическая оптимизация.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

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. [x-y](#). DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625745>

The method of synthesis of the geometry of the longitudinal profile and the design parameters of the leaf spring using the finite element method

Pavel S. Rubanov¹, Roman O. Maksimov^{1,2}, Mikhail V. Chetverikov^{1,2}

¹ KAMAZ Innovation Center, Moscow, Russian Federation;

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: In most cargo vehicles, leaf springs are used as an elastic element in the suspension, therefore, improving approaches to the calculation and synthesis of vehicle suspensions with leaf springs to reduce vibration load and to increase ride comfort is a relevant issue. Using the synthesis of the longitudinal profile of the spring leaves of complex shape, it is possible to achieve high strength properties of a leaf spring with a sufficiently low stiffness by applying calculations and optimizations using the finite element method (FEM), which helps to create a more perfect spring shape in terms of ride smoothness of the vehicle.

AIM: Development of a new method for the synthesis of a leaf spring with a variable profile of its longitudinal section and obtaining its characteristics using modern engineering methods based on the use of the FEM.

METHODS: The solution of the task is carried out in the NX software package including the Simcenter 3D CAE software. Topological optimization is applied to obtain the geometry of the longitudinal profile of the leaf spring, and then a strength test calculation is performed using the FEM to obtain the characteristics of the leaf spring.

RESULTS: During the work carried out at the KAMAZ Innovation Center, a method for forming the longitudinal profile of a leaf spring (regardless of the number of leaves) was developed and the dependences of the stiffness of the leaf spring on its parameters were constructed. According to the obtained dependencies, the optimal geometry of the longitudinal profile of the spring was synthesized, in which the stiffness was reduced by 33% compared to the prototype of the spring, while maintaining the bearing capacity of the vehicle.

CONCLUSIONS: This method of synthesis of the geometry of the longitudinal profile and the design parameters of the leaf spring can be used in the design processes of vehicle suspensions and to be further applied during research work.

Keywords: leaf spring; FEM; topological optimization; strength calculation; parametric optimization.

TO CITE THIS ARTICLE:

Rubanov PS, Maksimov RO, Chetverikov MV. The method of synthesis of the geometry of the longitudinal profile and the design parameters of the leaf spring using the finite element method. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(3):x-y. DOI:

<https://doi.org/10.17816/0321-4443-625745>

ВВЕДЕНИЕ

В современных методах проектирования широко распространяется использование метода конечных элементов [1–5]. Наибольшее применение этот метод находит в проведении прочностных расчётов, с помощью которых проводится проверка работоспособности и безопасности конструктивных решений, применяемых в транспортных средствах [6–10]. Также МКЭ применяется для уточнения динамических моделей транспортных средств путём внедрения в систему динамики твёрдых тел податливых элементов [11–15] и проведения оптимизации конструкции для повышения прочностных характеристик [16–17].

Листовые рессоры являются важнейшей частью систем поддрессоривания транспортных средств (ТС), которые эксплуатируются в любых климатических условиях [18]. Для исследования влияния свойств рессорных подвесок на показатели вибронагруженности и комфорта применяется динамические модели, в которых важно точное описание модели рессоры для получения достоверных результатов [19]. Известно много работ, в которых МКЭ применяется для расчёта листовых рессор на прочность. С помощью проводимых расчётов появляется возможность точно определить максимальные прогибы, возникающие в листах рессоры, распределение напряжений и спрогнозировать срок службы (ресурс) рессоры [20–21].

Целью работы является создание инновационной методики синтеза геометрии продольного профиля рессоры при помощи методов топологической оптимизации и дальнейшего получения ее напряженно-деформируемого состояния для определения зависимости характеристик рессоры от ее геометрических параметров.

МЕТОДЫ

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ РЕССОРЫ

Использование топологической оптимизации в данной работе позволяет получить наиболее оптимальное распределение материала в направлении листа рессоры при условии обеспечения равной прочности по всей длине рессоры.

При синтезе геометрии продольного профиля рессоры выдвигаются следующие требования:

- достижение наибольшей мягкости рессоры для улучшения показателей вибронагруженности и комфорта водителя;
- способность рессоры выдерживать динамическую нагрузку (силу, действующую на рессору во время движения);
- сила необходимая для удара в отбойник должна быть меньше статической нагрузки на рессору;
- места крепления рессоры соответствуют реальным расположениям креплений в конструкции автомобиля;
- при воздействии динамических нагрузок не превышает предел текучести материала рессоры;
- напряжения возникающие в листе рессоры распределены равномерно по всей длине листа.

Для получения геометрии продольного профиля рессоры необходимо провести ряд топологических оптимизаций упрощённой модели-заготовки для дальнейшего синтеза приблизительной формы листовой рессоры. В качестве исходной модели принят прямоугольник с точками крепления, расположенными в местах, аналогичных местам крепления рессоры в конструкции системы поддрессоривания натурального грузового транспортного средства. Ширина прямоугольника выбрана аналогично ширине рессор, устанавливаемых на грузовые транспортные средства с нагрузкой на ось 9 – 10 тонн, а высота прямоугольника задавалась произвольно. Исходная модель для оптимизации формы рессоры представлена на Рис. 1.

Топологическая оптимизация данной модели проведена в программном комплексе NX в приложении для конечно-элементных расчётов Simcenter 3D. В первой итерации топологической оптимизации (см. Рис. 2 а) видны места, где необходимо оставлять материал в модели для обеспечения меньшей массы и сохранения жёсткости. Большая часть материала, которую рекомендуется оставить, находится в нижней части модели. Материал, который находится сверху, возникает вследствие того, что происходит изгиб и возникают напряжения при растяжении в верхней части исходной модели. Следовательно, положение верхней части модели можно изменить и сместить вниз. В нижней части следует убрать материал по краям и уменьшить расстояние до нижней грани от точек закрепления, чтобы напряжения распределялись более равномерно по нижней области. Далее итерационно изменялась геометрия исходной модели в соответствии с получаемыми результатами, как показано на Рис. 2.

Закрепление рессоры в проушинах

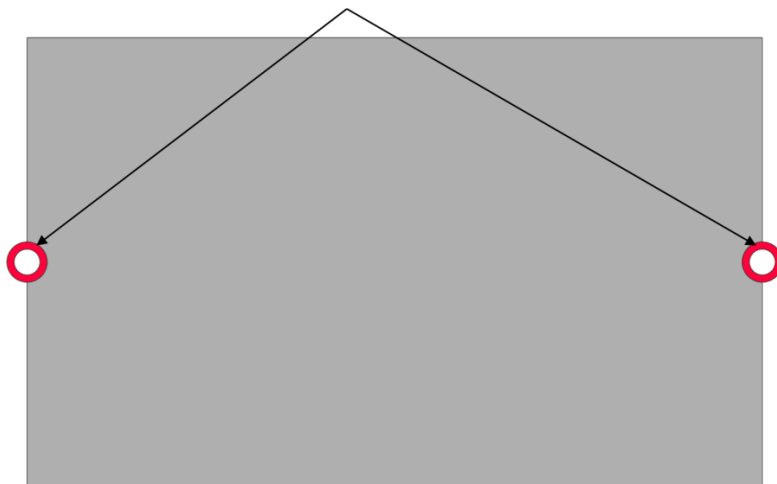


Рис. 1. Исходная модель листовых рессор для оптимизации.

Fig. 1. The initial model of leaf springs for optimization.

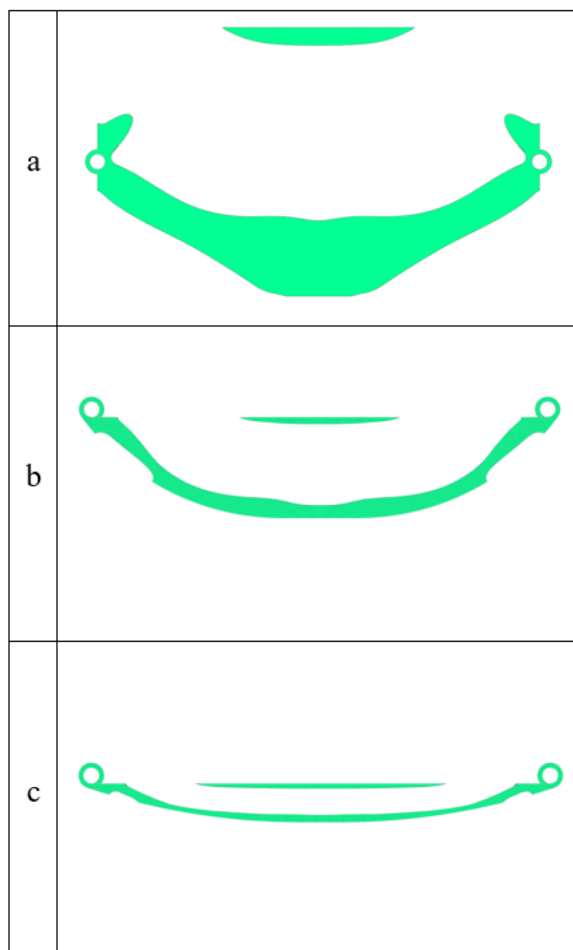


Рис. 2. Итерации топологической оптимизации: а) первая итерация топологической оптимизации; б) вторая итерация топологической оптимизации; в) третья итерация топологической оптимизации.

Fig. 2. Iterations of topological optimization: a) the first iteration of topological optimization; b) the second iteration of topological optimization; c) the third iteration of topological optimization.

Чтобы определить влияние количества листов рессоры на рассчитываемые параметры её жёсткости и прочности, на основе полученной топологической оптимизацией формы продольного профиля

рессоры были построены упрощённые модели двухлистовой и трехлистовой рессор. На Рис. 3 показаны полученные формы профилей однолистовой рессоры и упрощённые 3D-модели двухлистовой и трехлистовой рессор.



Рис. 3. Построенные с учетом топологической оптимизации 3D-модели рессор.

Fig. 3. The 3D models of leaf springs built after the topological optimization.

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК РЕССОР

Конечно-элементные модели рессор, показанные на Рис. 4, сформированы из конечных элементов типа HEXA(8). В местах крепления рессор созданы точки, которые соединены с опорной площадкой рессоры RBE2 элементами (показаны синим цветом).

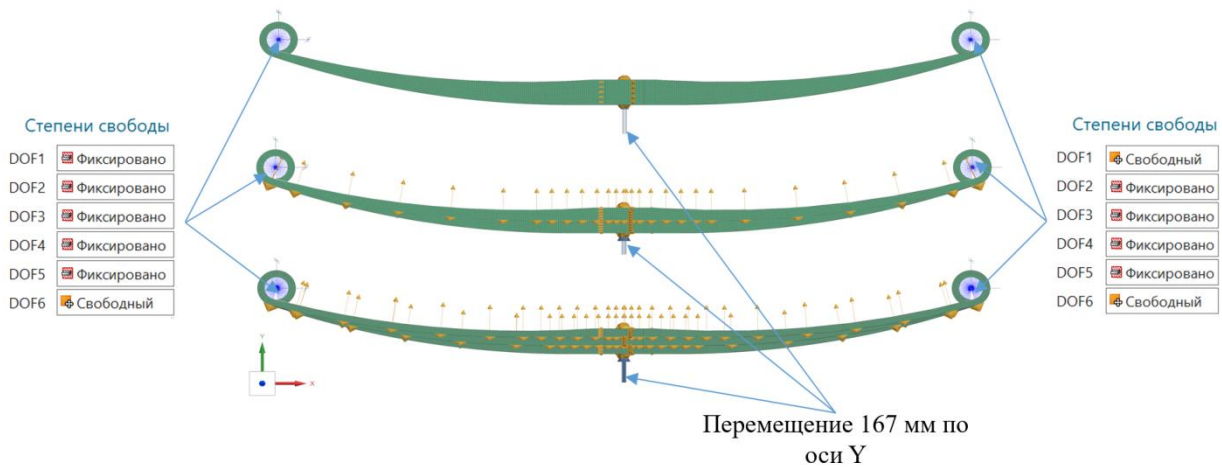


Рис. 4. КЭ модели листовых рессор.

Fig. 4. The FE models of leaf springs.

В проушинах рессор заданы ограничения, приложенные к узлам в середине отверстий. Левое ограничение допускает только вращение вокруг оси Z, а правое ограничение — перемещение вдоль оси X и вращение вокруг оси Z. Между листами двухлистовой и трехлистовой рессоры задано контактное взаимодействие. Трение пренебрежимо мало, так как расчёт проводится на упрощённой модели, используемой только для получения зависимостей жёсткости и прочности от геометрических параметров рессоры. В современных конструкциях применяется ряд конструктивных решений, приводящих к снижению межлистового трения. В расчётах в качестве нагружения задаётся прогиб рессоры, для всех случаев одинаковый и соответствующий максимальному ходу (до полного сжатия отбойника) в составе передней подвески автомобиля.

Для представленных моделей проведены расчёты МКЭ для определения влияния геометрических параметров рессор на их характеристики жёсткости и прочности. Для построения зависимостей в моделях

варьировались и задавались значения высоты и ширины поперечного сечения в центральной части рессоры (пакета рессор). Результаты расчётов представлены на Рис. 5.

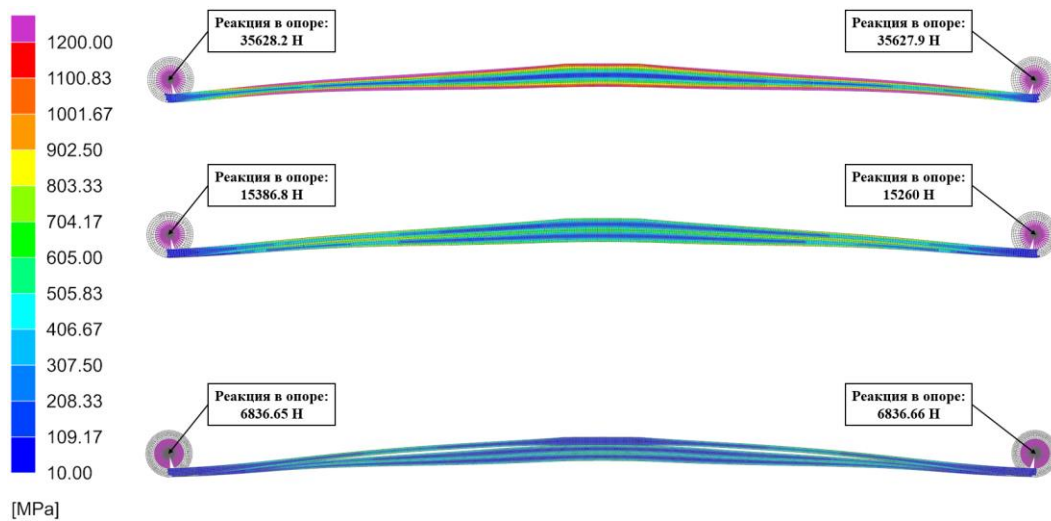


Рис. 5. Результаты расчётов рессор с помощью МКЭ.

Fig. 5. Results of leaf spring calculations using the FEM.

Для рассчитанных типов рессор построена зависимость жёсткости от количества листов рессоры, показанная на Рис. 6.

Для определения зависимостей характеристик рессор от их геометрических параметров проведены аналогичные расчёты, в которых варьировались значения высоты H и ширины B рессор.

В результате расчётов определялись: необходимая сила F для создания прогиба X , соответствующего полному ходу рессоры подвески, жёсткость рессоры и напряжения, возникающие в рессоре. Полученные зависимости показаны на Рис. 7–10.

Зависимости напряжений, возникающих в рессоре, от ширины рессоры в поперечном сечении ее центральной части не строилась, так как влияние ширины на напряжения достаточно мало.

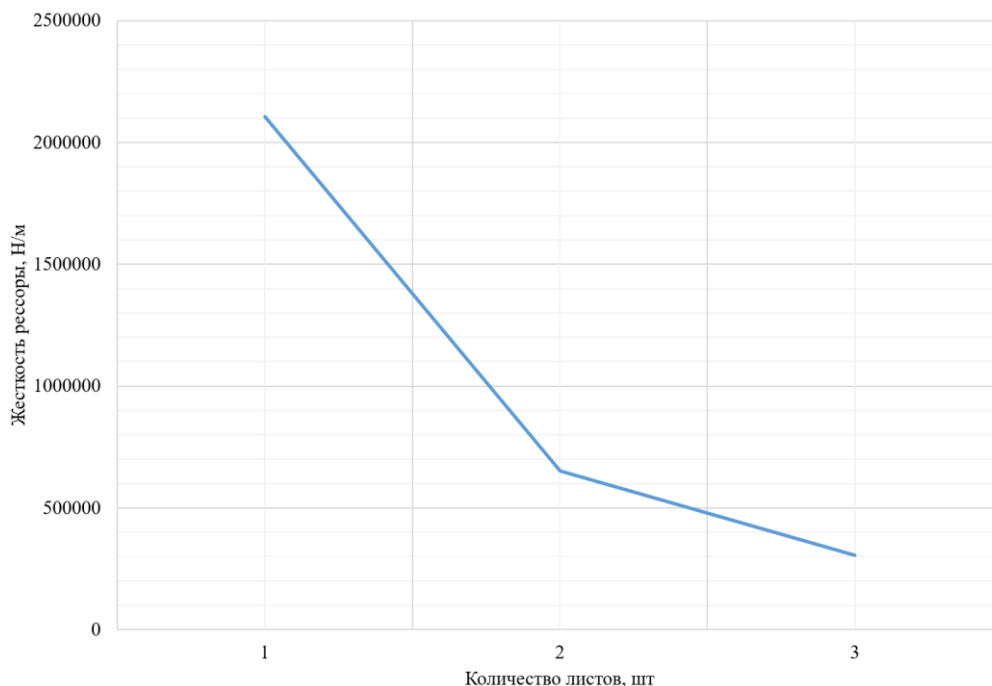


Рис. 6. Зависимость жёсткости рессоры от количества листов.

Fig. 6. Dependence of spring stiffness on the number of leaves.

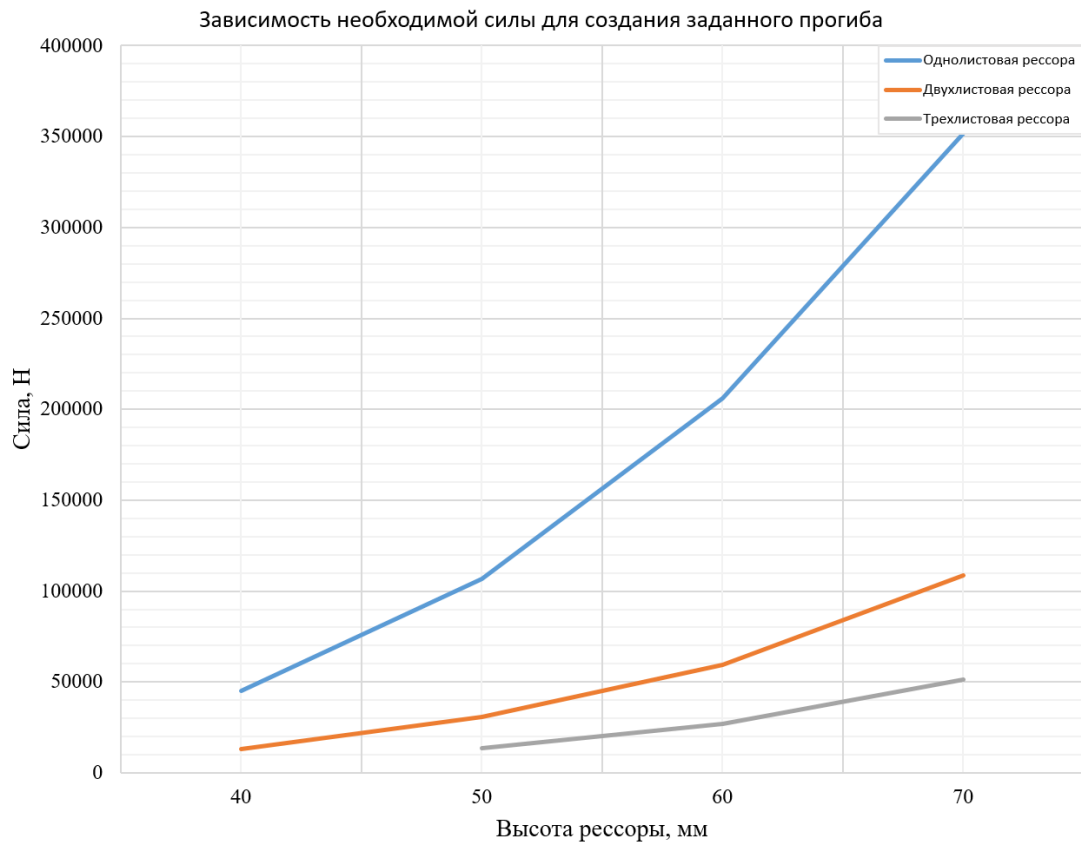


Рис. 7. Зависимости необходимой силы для обеспечения полного хода рессоры от высоты рессоры в поперечном сечении её центральной части.

Fig. 7. The dependence of the required force to ensure the full stroke of the leaf spring on the leaf spring height in the cross section of its central part.

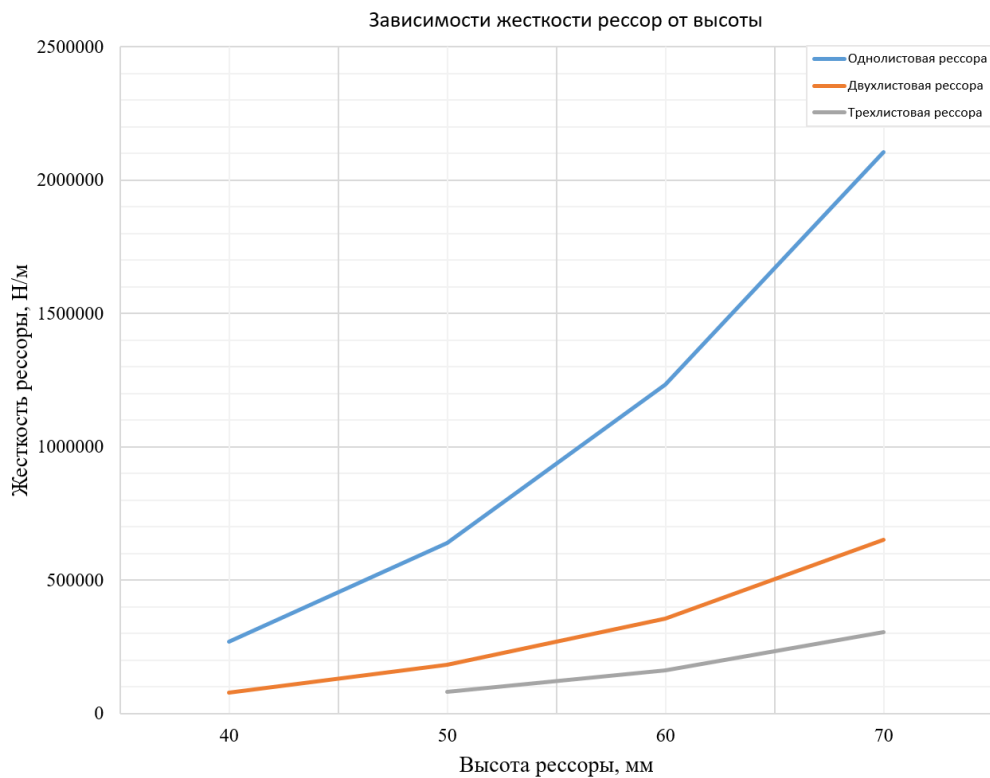


Рис. 8. Зависимости жёсткости рессоры от высоты рессоры в поперечном сечении её центральной части.

Fig. 8. Dependences of the leaf spring stiffness on the leaf spring height in the cross section of its central part.

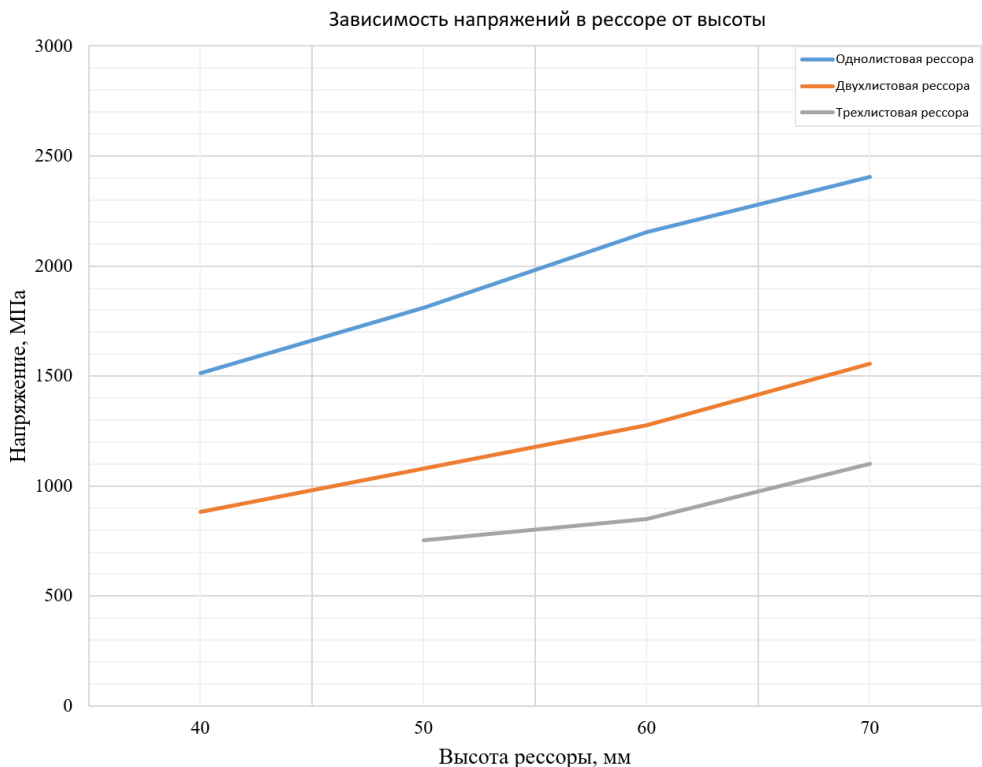


Рис. 9. Зависимости возникающих в рессоре максимальных напряжений от высоты рессоры в поперечном сечении её центральной части.

Fig. 9. The dependence of the maximal stresses arising in the leaf spring on the leaf spring height in the cross section of its central part.

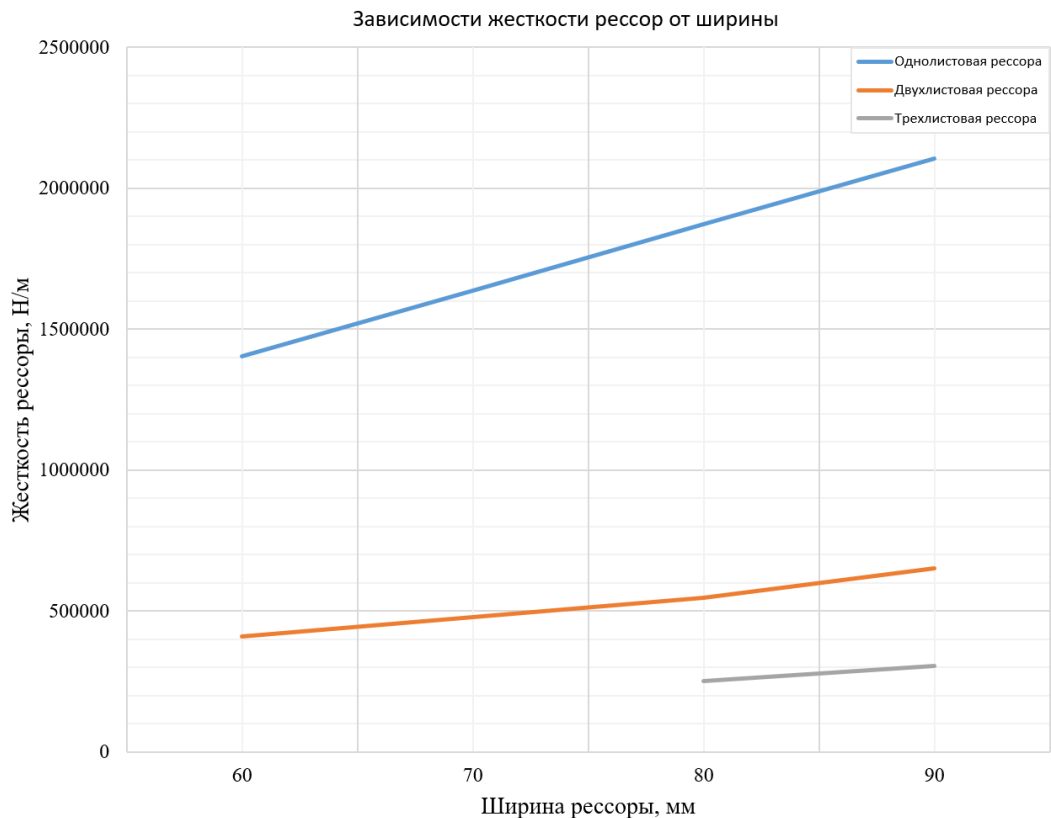


Рис. 10. Зависимости жёсткости рессоры от ширины рессоры в поперечном сечении её центральной части.

Fig. 10. Dependences of the leaf spring stiffness on the leaf spring width in the cross section of its central part.

На Рис. 11 представлена методика синтеза геометрии продольного профиля рессоры в виде блок-схемы. Благодаря полученным зависимостям, пользуясь составленным алгоритмом синтеза формы рессоры, мы можем выбрать наиболее подходящую для транспортного средства конфигурацию, исходя из предъявляемых требований: по массе транспортного средства, на котором будет использоваться рессора; по требуемому сроку службы; по предъявляемому коэффициенту динамичности в зависимости от условий эксплуатации.

По проведённым расчётам можно выделить 3 конфигурации рессоры, которые обладают наиболее выгодными характеристиками для применения на грузовых транспортных средствах с нагрузкой на ось 9 – 10 тонн:

- однолистовая рессора высотой 43 мм, шириной 90 мм;
- двухлистовая рессора высотой 60 мм, шириной 90 мм;
- трехлистовая рессора высотой 70 мм, шириной 90 мм.

При использовании однолистовой рессоры удаётся избежать возникновения межлистового трения, однако уменьшается коэффициент динамичности и возрастают напряжения по Мизесу. Для однолистовой рессоры достигнуто снижение жёсткости на 33% по сравнению с прототипом. При применении двухлистовой и трехлистовой рессор присутствует межлистовое трение в листах рессоры, но за счет описанных геометрических параметров рессоры удаётся уменьшить жёсткость рессоры.

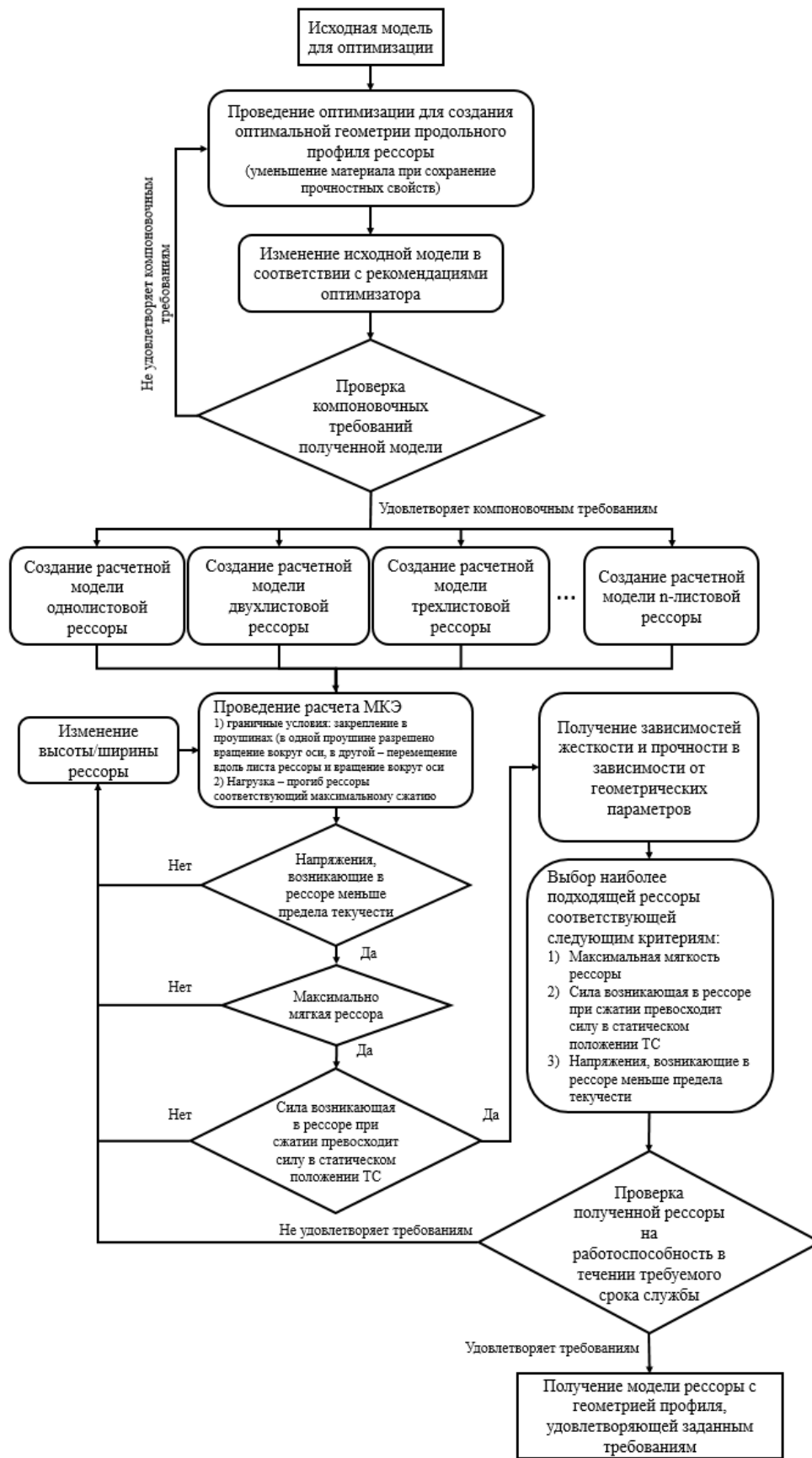


Рис. 11. Методика синтеза геометрии продольного профиля рессоры.

Fig. 11. The method of synthesis of the geometry of the longitudinal profile of a leaf spring.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведённых расчётов получены следующие результаты:

1. Зависимости сил полного сжатия, жёсткостей и напряжений рессоры от ее геометрических параметров.
2. Характеристики жёсткости рессоры в зависимости от количества листов.
3. Предложен новый метод синтеза геометрии продольного профиля и подбора требуемых характеристик рессор подвесок, применяемых на транспортных средствах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением требований, выдвигаемых к системам подрессоривания транспортных средств необходимо внедрение новых методов проектирования. В работе представлен новый подход к синтезу рессор, которые являются важнейшей частью системы подрессоривания. Разработанный подход к проектированию позволяет подобрать оптимальную геометрию продольного профиля рессоры и рассчитать характеристики рессоры, а также использовать их для создания динамических моделей систем подрессоривания, применяемых в транспортных средствах для дальнейших расчётов динамики транспортных средств.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов: П.С. Рубанов — проведение прочностных расчетов и оптимизации, написание текста и редактирование статьи; Р.О. Максимов — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, редактирование статьи; М.В. Четвериков — редактирование текста рукописи, экспертная оценка. 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 проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution: P.S. Rubanov — carrying out strength calculations and optimization, writing and editing the text of the manuscript; R.O. Maksimov — literature review, collection and analysis of literary sources, editing the text of the manuscript; M.V. Chetverikov — editing the text of the manuscript, expert opinion. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлепитько А.С., Мавлеев И.Р. Особенности использования рациональных методов проектирования несущей системы грузового автомобиля. В кн.: XII Камские чтения : сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Набережные Челны, 20 ноября 2020 года / Казанский федеральный университет, Набережно-челнинский институт. Набережные Челны, 2020. С. 361–367. EDN EAAWRV
2. Таупек И.М., Положенцев К.А. Анализ конечно-элементного моделирования процессаковки на РКМ. В кн.: Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство : Материалы девятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Старый Оскол, 07 декабря 2022 года. Старый Оскол: НИТУ "МИСиС", 2023. С. 309–314. EDN DUJGZJ
3. Фищев А.В. Исследование концентраций напряжений в узлах металлических конструкций // Фундаментальные основы механики. 2023. № 11. С. 64–67. doi: 10.26160/2542-0127-2023-11-64-67 EDN OCNHND

4. Дергачев Д.А. Повышение качества продукции путем автоматизации проектирования. В кн.: СНК-2022 : Материалы LXXII открытой международной студенческой научной конференции Московского Политеха, Москва, 04–22 апреля 2022 года. Москва: Мосполитех, 2022. С. 90–94. EDN PUFVD
5. Сутягин А.Н., Колесова В.И. К вопросу о специализированном программном обеспечении, осуществляющем расчеты на основе метода конечных элементов // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2022. № 4(63). С. 107–112. EDN XKGSLE
6. Гонсалес А.А., Гончаров Р.Б., Петюков А.В. Физико-математическое моделирование процесса взаимодействия подушки безопасности легкового автомобиля с антропоморфным манекеном // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2022. № 4(103). С. 4–21. doi: 10.18698/1812-3368-2022-4-4-21 EDN NJQZLI
7. Четвериков М.В., Гончаров Р.Б., Бутарович Д.О. Исследование остаточного напряжённо-деформированного состояния несущей системы минипогрузчика при многократном нагружении по требованиям стандарта безопасности ROPS // Труды НАМИ. 2023. № 1(292). С. 46–55. doi: 10.51187/0135-3152-2023-1-46-55 EDN DETBGE
8. Гончаров Р.Б. Совершенствование конструкций кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования для обеспечения требований пассивной безопасности при ударе и минимизации массы // Труды НАМИ. 2019. № 4(279). С. 28–37. EDN XXVGQA
9. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Особенности поиска оптимальных параметров усилителей задней части кабины грузового автомобиля на базе параметрической и топологической оптимизации с целью обеспечения требований по пассивной безопасности по международным правилам и получения её минимальной массы // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 2(125). С. 163–170. doi: 10.46960/1816-210X_2019_2_163 EDN ZTJSJEL
10. Левенков Я.Ю., Вдовин Д.С., Александров Д.А. Разработка ROPS из алюминиевых сплавов для фронтальных погрузчиков // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 3. С. 1–15. EDN ALZYPP
11. Вдовин Д.С., Чичекин И.В., Левенков Я.Ю. Прогнозирование усталостной долговечности элементов подвески полуприцепа на ранних стадиях проектирования // Труды НАМИ. 2019. № 2(277). С. 14–23. EDN QTMBXK
12. Горелов В.А., Комиссаров А.И., Вдовин Д.С., Чудаков О.И. Анализ нагрузок рамы грузового автомобиля методом динамики систем тел с использованием конечно-элементной модели // Транспортные системы. 2020. № 4(18). С. 4–14. doi: 10.46960/62045_2020_4_4 EDN GLXUZD
13. Zhu SH, Xiao ZJ, Li XY. Vehicle frame fatigue life prediction based on finite element and multi-body dynamic // Applied Mechanics and Materials. 2012. Vol. 141. P. 578–585.
14. Юдаков А.А. Принципы построения общих уравнений динамики упругих тел на основе модели Крейга–Бэмптона и их практически значимых приближений // Вестн. Удмуртск. ун-та. Матем. Мех. Компьют. науки. 2012. № 3. С. 126–140.
15. Гончаров Р.Б., Рябов Д.М. Методика расчёта нагрузок, действующих в направляющих элементах подвески автомобиля при преодолении препятствий // Известия МГТУ “МАМИ”. 2015. Т. 1, № 3(25). С. 129–135. EDN UXKHEZ
16. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Топологическая оптимизация конструкции бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности // Известия МГТУ “МАМИ”. 2018. № 2(36). С. 2–9. EDN XUWXVB
17. Шаболин М.Л., Вдовин Д.С. Снижение требований к прочности материала подрамника грузового автомобиля с независимой подвеской путём топологической оптимизации конструктивно-силовой схемы // Известия МГТУ “МАМИ”. 2016. № 4(30). С. 90–96. EDN XDEHED
18. Яковлева С.П., Буслаева И.И., Махарова С.Н., Левин А.И. Влияние структурных изменений на сопротивление хрупкому разрушению металла рессоры автомобиля КАМАЗ при эксплуатации в условиях Севера // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2019. № 3. С. 65–73. doi: 10.1134/S0235711919030155 EDN WBWKBG
19. Рыкова О.А. Вопросы моделирования трения в листовых рессорах // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2022. Т. 1. С. 207–213. EDN UIEXYO
20. Артемов И.И., Келасьев В.В., Генералова А.А. Экспериментальные исследования разрушения

листовой рессоры транспортных средств // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2009. № 2(10). С. 145–155. EDN KWKSHH

21. Чекурда В.В., Ноздрин М.А. Долговечность многолистовой рессоры автомобиля. В кн.: Надёжность и долговечность машин и механизмов: Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 14 апреля 2022 года. Иваново: ИПСА ГПС МЧС России, 2022. С. 426–431. EDN COUUUW

REFERENCES

1. Khlepitko AS, Mavleev IR. Features of the use of rational methods of designing the load-bearing system of a truck. In: *XII Kama readings : collection of reports of the All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists, Naberezhnye Chelny, November 20, 2020 / Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny*. Naberezhnye Chelny; 2020:361–367. (In Russ). EDN EAAWRV
2. Таупек ИМ, Полозхентсев КА. Analysis of finite element modeling of the forging process at the RKM. In: *Modern problems of the mining and metallurgical complex. Science and Production : Proceedings of the Nineteenth All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Stary Oskol, December 07, 2022*. Stary Oskol: NITU "MISIS"; 2023:309–314. (In Russ). EDN DUJGZJ
3. Fischev AV. Investigation of stress concentrations in nodes of metal structures. *Fundamental principles of mechanics*. 2023;11:64–67. (In Russ). doi: 10.26160/2542-0127-2023-11-64-67 EDN OCNHND
4. Dergachev DA. Improving product quality through design automation. In: *SNK-2022 : Proceedings of the LXXII open International Student Scientific Conference of the Moscow Polytechnic University, Moscow, April 04-22, 2022*. Moscow: MosPolytech; 2022:90–94. (In Russ). EDN PUFAYD
5. Sutyagin AN, Kolesova VI. On the issue of specialized software performing calculations based on the finite element method. *Bulletin of the Russian State University named after P. A. Solov'yov*. 2022;4(63):107–112. (In Russ). EDN XKGSLE
6. Gonzalez AA, Goncharov RB, Petyukov AV. Physico-mathematical modeling of the process of interaction of a passenger car airbag with an anthropomorphic mannequin. *Bulletin Bauman MSTU. The Natural Sciences series*. 2022;4(103):4–21. (In Russ). doi: 10.18698/1812-3368-2022-4-4-21 EDN NJQZLI
7. Chetverikov MV, Goncharov RB, Butarovich DO. Investigation of the residual stress-strain state of the mini-loader load-bearing system under repeated loading according to the requirements of the ROPS safety standard. *Proceedings of NAMI*. 2023;1(292):46–55. (In Russ). doi: 10.51187/0135-3152-2023-1-46-55 EDN DETBGE
8. Goncharov RB, Zuzov VN. Improving the structures of truck cabins at the design stage to ensure the requirements of passive safety in case of impact and minimizing mass. *Proceedings of NAMI*. 2019;4(279):28–37. (In Russ). EDN XXVGQA
9. Goncharov RB, Zuzov VN. Features of the search for optimal parameters of amplifiers of the rear part of the cabin of a truck based on parametric and topological optimization in order to ensure the requirements for passive safety according to international rules and obtain its minimum mass. *Proceedings of the NSTU named after R.E. Alekseev*. 2019;2(125):163–170. (In Russ). doi: 10.46960/1816-210X_2019_2_163 EDN ZTSJEL
10. Levenkov YaYu, Vdovin DS, Alexandrov DA. Development of ROPS from aluminum alloys for front loaders. *Machines and installations: design, development and operation*. 2023;3:1–15. (In Russ). EDN ALZYPP
11. Vdovin DS, Chichekin IV, Levenkov YaYu. Forecasting the fatigue life of semi-trailer suspension elements at the early stages of design. *Proceedings of NAMI*. 2019;2(277):14–23. EDN QTMBXK
12. Gorelov VA, Komissarov AI, Vdovin DS, Chudakov OI. Analysis of the loads of a truck frame by the method of dynamics of body systems using a finite element model. *Transport systems*. 2020;4(18):4–14. (In Russ). doi: 10.46960/62045_2020_4_4 EDN GLXUZD
13. Zhu SH, Xiao ZJ, Li XY. Vehicle frame fatigue life prediction based on finite element and multi-body dynamic. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;141:578–585.
14. Yudakov AA. Principles of constructing general equations of dynamics of elastic bodies based on the Craig–Bampton model and their practically significant approximations. *Vestn. Udmurtsk. un-ta. Matem. Fur. Computer science*. 2012;3:126–140. (In Russ).
15. Goncharov RB, Ryabov DM. Methodology for calculating the loads acting in the guiding elements of the car suspension when overcoming obstacles. *Izvestiya MSTU MAMI*. 2015;1(3(25)):129–135. (In Russ). EDN UXKHEZ
16. Goncharov RB, Zuzov VN. Topological optimization of the car bumper design under impact from the standpoint of passive safety. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2018;2(36):2–9. (In Russ). EDN XUWXVB

17. Shabolin ML, Vdovin DS. Reducing the requirements for the strength of the material of the truck subframe with independent suspension by topological optimization of the structural and power circuit. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2016;4(30):90–96. (In Russ). EDN XDEHED
18. Yakovleva SP, Buslaeva II, Makharova SN, Levin AI. The influence of structural changes on the resistance to brittle fracture of the metal of the KAMAZ car springs during operation in the conditions of the North. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2019;3:65–73. (In Russ). doi: 10.1134/S0235711919030155 EDN WBWKBG
19. Rykova OA. Issues of friction modeling in leaf springs. *Proceedings of the Fraternal State University. Series: Natural and Engineering Sciences*. 2022;1:207–213. (In Russ). EDN UIEXYO
20. Artyomov II, Kelasyev VV, Generalova AA. Experimental studies of destruction of leaf springs of vehicles. *News of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences*. 2009;2(10):145–155. (In Russ). EDN KWKSHH
21. Chekurda VV, Nozdrin MA. Durability of a multi-leaf car spring. In: *Reliability and durability of machines and mechanisms : Collection of materials of the XIII All-Russian scientific and practical conference, Ivanovo, April 14, 2022*. Ivanovo: IPISA GPS MChS Rossii; 2022;426–431. (In Russ). EDN COUUUW

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

* Рубанов Павел Сергеевич,

инженер-конструктор службы инженерных расчётов и моделирования;

адрес: Российская Федерация, 121205, Москва, Инновационный центр Сколково, ул. Большой бул., д. 62;

ORCID: 0009-0000-2055-2046;

eLibrary SPIN: 6955-1901;

e-mail: rubanov_ps@bk.ru

Соавторы:

Максимов Роман Олегович,

аспирант кафедры «Наземные транспортные средства»; инженер-конструктор службы инженерных расчётов и моделирования;

ORCID: 0009-0003-4947-790X;

eLibrary SPIN: 7384-6758;

e-mail: romychmaximov@gmail.com

Четвериков Михаил Викторович,

аспирант кафедры «Наземные транспортные средства»; инженер-конструктор службы инженерных расчётов и моделирования;

ORCID: 0000-0003-3723-1171;

eLibrary SPIN: 7949-0814;

e-mail: mihchet@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

* Pavel S. Rubanov,

Design Engineer of the Engineering Calculations and Modeling Service;

address: 62 Bolshoy blvd, Skolkovo Innovation Center, 121205 Moscow, Russian Federation;

ORCID: 0009-0000-2055-2046;

eLibrary SPIN: 6955-1901;

e-mail: rubanov_ps@bk.ru

Co-Authors:

Roman O. Maksimov,

Postgraduate of the Ground Vehicles Department; Design Engineer of the Engineering Calculations and Modeling Service;

ORCID: 0009-0003-4947-790X;

eLibrary SPIN: 7384-6758;

e-mail: romychmaximov@gmail.com

Mikhail V. Chetverikov,

Postgraduate of the Ground Vehicles Department; Design Engineer of the Engineering Calculations and Modeling Service;

ORCID: 0000-0003-3723-1171;

eLibrary SPIN: 7949-0814;

e-mail: mihchet@gmail.com