



ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 004.942

В.И. ИВЧЕНКО

заместитель начальника Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля¹

E-mail: oimoa@tut.by

А.В. ШМЕЛЁВ, канд. техн. наук

заместитель генерального директора по научной работе¹

E-mail: shmeliov.alexei@gmail.com

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25.02.2019.

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРУШАЮЩИХ НАГРУЗОК УШКОВ ЛИСТОВЫХ РЕССОР ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ С ПРОТИВОТАРАННЫМ УСТРОЙСТВОМ

Разработаны рекомендации по определению показателей прочности наиболее нагруженных элементов коренных листов рессор передних подвесок грузовых автомобилей на основе компьютерного моделирования процессов разрушения и исследования механических свойств материала. Методика апробирована на примере типовой конструкции рессоры с двумя витыми ушками на передних концах. Предложенные методические рекомендации по определению показателей прочности ушков рессор могут использоваться при проектировании дорожных блокираторов для расчетной оценки действующих нагрузок.

Ключевые слова: грузовой автомобиль, компьютерное моделирование, противотаранное устройство, прочность, рессора, стендовые испытания, ударное взаимодействие

Введение. В последнее время в мире значительно выросло количество террористических актов с использованием грузовых транспортных средств. Самые резонансные террористические акты конца 2016—начала 2017 года в Берлине (Германия), Ницце (Франция), Лондоне (Великобритания), Иерусалиме (Израиль) и Стокгольме (Швеция) в общей сложности привели к гибели почти ста человек и еще большему количеству пострадавших. Грузовые автомобили представляют большую опасность при использовании в террористических целях из-за своей доступности, высокой проникающей и повреждающей способности [1–2]. Наибольшему риску террористической угрозы подвержены военные базы, пограничные переходы, атомные электростанции, нефтеперерабатывающие и химические предприятия, а также объекты, характеризующиеся большим скоплением людей: вокзалы, аэропорты, рынки, крупные административные комплексы и т. д.

С учетом этого стала актуальной задача создания высокоэффективных средств, предотвращающих несанкционированный въезд автотранспорта на охраняемые объекты. В настоящее время широкое распространение в качестве технических средств, используемых в противотаранных целях, получили автоматические ворота, шлагбаумы, болларды, дорожные блокираторы с подъемной платформой [3].

В процессе разработки дорожных блокираторов стоит задача поиска наиболее эффективных технических решений, обеспечивающих достижение высоких показателей удерживающей способности при минимальных затратах на производство, монтаж и обслуживание устройства. Для ее решения необходимо знать величину нагрузок, действующих на конструкцию при столкновении с автомобилем. Указанные нагрузки, в свою очередь, должны обеспечивать (гарантировать) разрушение конструктивных элементов автомобиля

и сохранение работоспособности противотаранного устройства после ударного взаимодействия. Величина таких нагрузок определяется различными факторами, среди которых наиболее важную роль играют конструкция автомобиля и дорожного блокиратора и, конечно же, механические свойства материалов, из которых они изготовлены. Наиболее достоверную информацию об указанных нагрузках можно получить по результатам экспериментальных исследований, которые максимально учитывают все особенности (конструктивные, технологические и др.) испытываемых объектов. Однако в нашем случае имеется и ряд недостатков, таких как затратность эксперимента, длительность его организации, высокая зависимость его результатов от состояния выбранного для испытаний транспортного средства, а также многообразие самих транспортных средств для испытаний, существенно отличающихся конструктивно при схожих массогабаритных параметрах и т. п., из-за чего могут возникать затруднения с сопоставлением результатов испытаний. Поэтому необходимо иметь достоверный и относительно легко применимый на практике расчетный подход, заменяющий экспериментальное исследование.

Методика определения разрушающих нагрузок конструктивных элементов листовых рессор. Анализ проведенных исследований [4–6] выявил отсутствие конкретных методических рекомендаций по определению показателей прочности наиболее нагруженных элементов автомобилей в процессе ударного взаимодействия с противотаранными устройствами и иными повреждающими конструкциями. В результате были проведены собственные исследования [7] по расчетному и экспериментальному определению разрушающих нагрузок конструктивных элементов грузовых автомобилей при взаимодействии с противотаранными устройствами. Указанные исследования выявили, что ключевым фактором потери управляемости грузовых автомобилей категории N_2 и N_3 [8] является

разрушение его передних рессор, а также подтвердили высокую достоверность результатов компьютерного моделирования разрушения рессоры относительно результатов стендовых испытаний и на порядок более высокую точность в сравнении с результатами, полученными методами аналитических расчетных исследований. Отклонения величин продольных сил, разрушающих переднюю рессору автомобиля, полученных компьютерным моделированием, в сравнении с результатами натурных испытаний не превысили 3,6 %. Тогда как указанные показатели, полученные классическим расчетом, отличались на 35,1...45,9 % в зависимости от закладываемых в расчет данных по прочностным характеристикам материала.

По результатам проведенного исследования разработана методика определения разрушающих нагрузок конструктивных элементов листовых рессор в целях их дальнейшего использования при анализе процессов ударного взаимодействия грузовых автомобилей с противотаранными устройствами. Принимая во внимание многообразие конструкций транспортных средств, указанные разрушающие нагрузки могут существенно варьироваться для разных типов и моделей грузовых автомобилей. В этой связи оперирование достоверными данными по прочностным характеристикам рессор автомобилей повышает достоверность оценки удерживающей способности противотаранных устройств и позволяет заложить их высокие потребительские свойства еще на стадии проектирования.

Как показали расчетные и экспериментальные исследования, величина продольных осевых сил, приводящих к разрушению (развивке) ушков одиночных коренных листов передних рессор автомобилей МАЗ, может достигать 168 и 224 кН в зависимости от толщины сечения листа [7]. Однако следует отметить, что передняя рессора грузового автомобиля повышенной грузоподъемности наиболее часто имеет конструкцию с несколькими

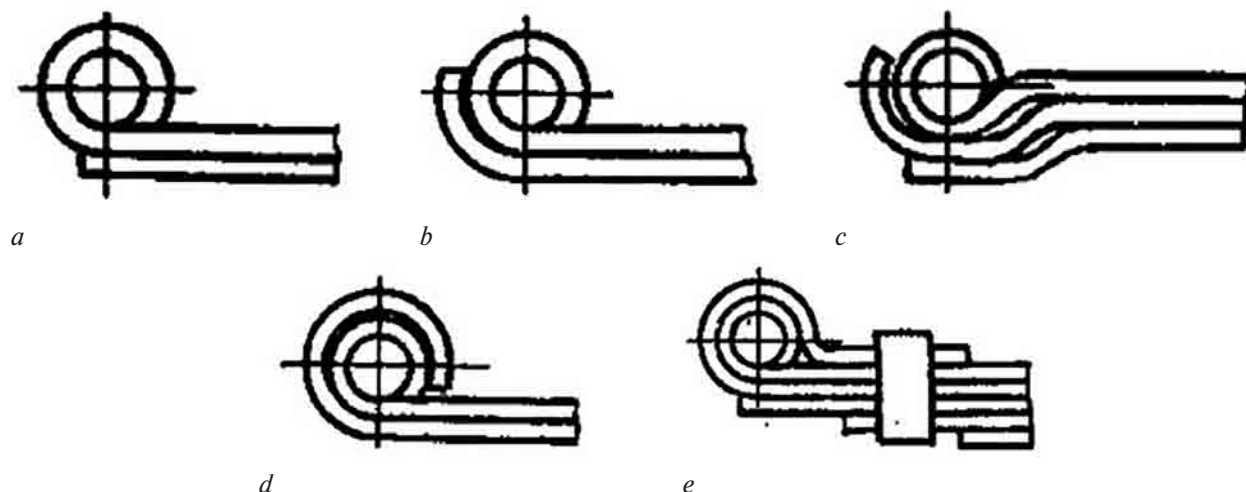


Рисунок 1 — Варианты исполнения переднего конца рессоры с витым ушком [9]
Figure 1 — Variants of front end of spring with upturned eye [9]

витыми ушками на фиксированных концах. Второй лист рессоры может частично или полностью охватывать ушко коренного листа для повышения его надежности. Наиболее распространенные варианты конструкций фиксированного конца коренной рессоры представлены на рисунке 1.

Очевидно, что при прочих равных условиях конструкции рессор с двумя витыми ушками способны обеспечивать передачу более высоких величин продольной осевой нагрузки в сравнении с рессорами с одним витым ушком.

В теории проектирования рессор расчет ушков коренных листов на развивку относится к особым случаям расчета и носит проверочный характер [10]. Кроме того, как показали исследования [7], результаты данного расчета имеют большое расхождение с результатами натурных экспериментов. Проведение же натурных экспериментальных исследований таких конструкций является сложной задачей с точки зрения организации эксперимента, достижения его достоверности и сопоставимости результатов. На результат эксперимента оказывают влияние множество факторов, среди которых точность контроля условий тестирования и варьированность параметров испытываемых объектов (отклонения геометрии, разброс показателей прочности и т. п.). Таким образом, организация таких исследований при проектировании конструкций противотаранных устройств также представляется нецелесообразной.

В связи с этим в целях выявления конструкции рессоры, обеспечивающей максимальное силовое воздействие на противотаранное устройство, наиболее рационально руководствоваться методикой компьютерного моделирования испытаний по оценке разрушающей нагрузки для листов рессор с витым ушком, включающей в себя следующие этапы:

1. Разработка схемы нагружения.
2. Разработка конечно-элементной модели исследуемого варианта элемента рессоры и сопряженных с ней деталей, обеспечивающих реализацию составленной схемы нагружения.
3. Задание начальных и граничных условий, соответствующих условиям проведения испытаний; определение и задание свойств материалов.
4. Компьютерное моделирование испытаний.
5. Анализ результатов расчета (определение наиболее нагруженных зон, характера разрушения, величин продольных осевых нагрузок, воспринимаемых рессорой).

Компьютерное моделирование прочностных испытаний рессор с витым ушком по разработанной методике представляет собой комплекс многовариантных исследований, позволяющих провести как качественный, так и количественный анализ параметров и результатов моделирования процесса нагружения рессоры продольными осевыми нагрузками.

Апробация методики компьютерного моделирования испытаний листов рессор. Приведенная методика была апробирована на примере существующей конструкции рессоры МАЗ с витыми ушками первых двух листов толщиной 14 мм.

При компьютерном моделировании разрушения рессоры к ее витому ушку через втулку и палец прикладывалось продольное перемещение по схеме, представленной на рисунке 2. Величина продольной силы F_x , прикладываемой таким образом к листу рессоры, определялась путем расчета реакции в заделке.

Для моделирования испытаний были разработаны конечно-элементные модели листов рессор, пальца и втулки ушка передней рессоры, представленные на рисунке 3, заданы начальные и граничные условия, соответствующие условиям проведения испытаний.

Как видно из рисунка 3, исследуемая конструкция включает четыре детали: два фрагмента листов рессоры, втулку и палец. Все детали представлены объемными геометрическими компьютерными моделями. Поэтому конечно-элементные модели деталей создавались с преобладающим применением элементов гексагональной, а также призматической формы первого порядка с полным описанием функции формоизменения элемента (ELFORM=2). Описание контактного

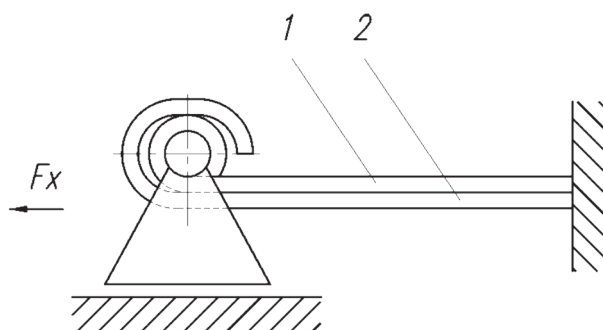


Рисунок 2 — Схема нагружения рессоры с двумя витыми ушками продольной силой: 1 — коренной лист рессоры; 2 — второй лист рессоры

Figure 2 — Scheme of loading spring with two upturned eyes with longitudinal force: 1 — top spring leaf; 2 — second spring leaf

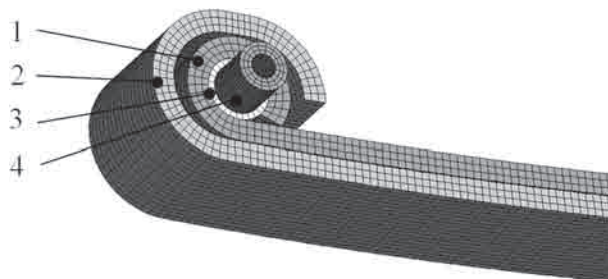


Рисунок 3 — Конечно-элементная модель для моделирования испытаний рессоры с двумя витыми ушками:

1 — фрагмент коренного листа рессоры; 2 — фрагмент второго листа рессоры; 3 — втулка; 4 — палец

Figure 3 — Finite element model for testing simulation of spring with two upturned eyes: 1 — fragment of top spring leaf; 2 — fragment of second spring leaf; 3 — bearing; 4 — pin

взаимодействия исследуемых объектов в процессе моделирования выполнялось с использованием опции *CONTACT_AUTOMATIC_GENERAL. Трение между деталями конструкции не учитывалось.

Создание конечно-элементных моделей деталей выполнялось в программе ANSYS Workbench, в которой с помощью системной компоненты Explicit Dynamics (LS-DYNA export) генерировался *k*-файл конечно-элементной модели, соответствующий формату компьютерной программы LS-DYNA. Настройка конечно-элементной модели, включающая приложение нагрузки, закрепление модели, задание свойств материалов, контактного взаимодействия и т. п., выполнялась в пре- и постпроцессоре LS-PrePost.

Идентификация параметров модели материала рессоры проведена с использованием результатов экспериментального определения механических свойств стали 60C2 [7]. С этой целью в виртуальной среде воспроизводился натурный эксперимент по определению механических свойств материала. В качестве целевой характеристики использовались параметры наиболее прочного образца. Данное допущение сделано исходя из задачи исследования, заключающейся в определении наибольшего значения силы разрушения элемента подвески.

Учитывая, что моделировалось нагружение объекта исследования, включающее процесс пластического деформирования с разрушением, для описания свойств материала листа рессоры использовалась билинейная модель материала с кинематическим упрочнением (003 Plastic kinematic), предусматривающая задание величины предельной пластической деформации, соответствующей разрушению. Данная модель материала, помимо параметров, описывающих зависимость упругого и пластического деформирования материала, также позволяет задавать величину локальной пластической деформации (FS), соответствующей разрушению материала, что является необходимым для полного воспроизведения процесса разрушения листа рессоры при нагружении. Для описания свойств материала других деталей использовалась линейная модель материала.

Полученное по результатам компьютерного моделирования испытаний распределение пластических деформаций рессоры на разных этапах нагружения и график нагружения представлены на рисунках 4 и 5.

Для сравнения на рисунке 6 приведены результаты компьютерного моделирования нагружения одиночного коренного листа передней рессоры толщиной 14 мм.

Анализ результатов виртуальных испытаний рессоры с двумя витыми ушками толщиной 14 мм показывает, что максимальное продольное усилие, приводящее к разрушению рессоры, состав-

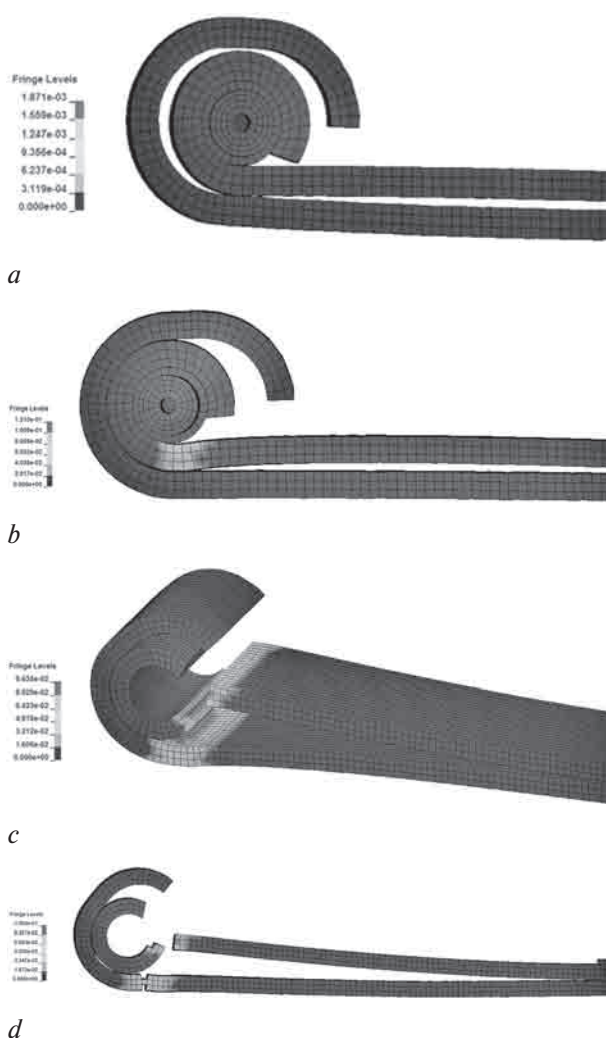


Рисунок 4 — Распределение пластических деформаций рессоры с двумя витыми ушками
Figure 4 — Distribution of plastic deformation of spring with two upturned eyes

ляет 265,4 кН, что более чем в 1,2 раза выше величины усилия разрушения одиночного коренного листа рессоры толщиной 14 мм. Более высокая величина воспринимаемого рессорой усилия достигается за счет одновременной совместной работы обоих ушков рессоры, обеспечиваемой благодаря пластической деформации коренного листа. При этом на графике нагружения рессоры можно отметить наличие специфического участка, соответствующего нарастанию сопротивления рессоры

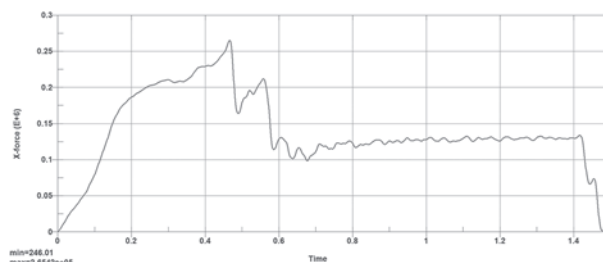


Рисунок 5 — График нагружения рессоры с двумя витыми ушками
Figure 5 — Diagram of loading of spring with two upturned eyes

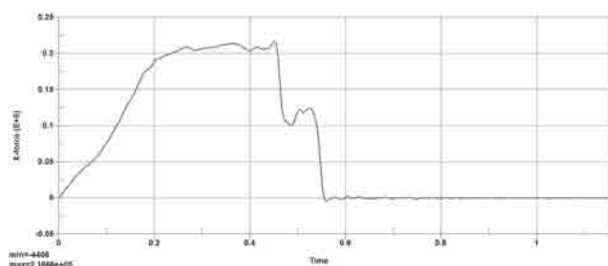


Рисунок 6 — График нагружения одиночного коренного листа передней рессоры толщиной 14 мм [7]

Figure 6 — Diagram of loading of single top leaf of front spring with thickness of 14 mm [7]

из-за замыкания профилей ушков при частичном раскрытии ушка первого коренного листа; а также участка скачкообразного снижения нагрузки в момент разрушения первого и второго ушков.

Выявленная картина нагружения рессоры с двумя витыми ушками свидетельствует о том, что взаимодействие листов рессоры при приложении продольной нагрузки может носить сложный характер, который затруднительно просчитать аналитическими расчетными методами и довольно трудоемко выявить натурными испытаниями. Это наряду с высокой достоверностью получаемых результатов является одним из основных преимуществ методики виртуального моделирования испытаний. Еще одним преимуществом применения данной методики является экономия времени на организацию и проведение эксперимента, которая может оцениваться до 5 раз в сравнении с затратами времени на подготовку и проведение натурных испытаний.

Полученные в ходе проведенных исследований значения нагрузок, разрушающих рессору, были использованы специалистами Объединенного института машиностроения НАН Беларуси при проектировании дорожного блокиратора, рассчитанного на остановку грузового автомобиля полной массой 20 т, движущегося со скоростью 60 км/ч [11]. На автополигоне НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» (г. Дмитров, Россия) был проведен натурный краш-тест груженого автомобиля-самосвала КАМАЗ-5410 с разработанным и изготовленным для эксперимента дорожным блокиратором. Характер повреждения автомобиля и элементов его передней подвески представлен на рисунках 7 и 8.

Заключение. Исследования по формированию и обоснованию расчетных методов определения разрушающих нагрузок конструктивных элементов листовых рессор в целях их дальнейшего использования при анализе процессов ударного взаимодействия грузовых автомобилей с противотаранными устройствами показывают высокую достоверность результатов компьютерного моделирования разрушения рессоры в сравнении с результатами стендовых испытаний, а также более высокую точность в сравнении с аналитическими



Рисунок 7 — Результаты натурных испытаний устройства остановки колесного транспорта на полигоне НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ»

Figure 7 — Results of field tests of stopping device of wheel transport on FSUE “NAMI” proving ground



a



b

Рисунок 8 — Повреждения передних рессор автомобиля-самосвала КАМАЗ-5410 после столкновения с устройством остановки колесного транспорта
Figure 8 — Damage to front springs of truck KAMAZ-5410 after collision with stopping device of wheel transport

расчетами. Отклонение величин разрушающих переднюю рессору автомобиля продольных сил, полученных компьютерным моделированием, в сравнении с результатами натурных испытаний составляет от 1,7 % до 3,6 % для разных толщин листов рессор. В то же время указанные показатели, полученные классическим расчетом, отличаются уже на 35,1...45,9 % в зависимости от закладываемых в расчет данных по прочности ма-

териала. Полученные результаты по характеру повреждений соответствуют результатам натурных испытаний столкновений грузовых автомобилей с противотаранными устройствами, при которых ключевым фактором потери управляемости автомобиля является разрушение его передних рессор. Предложенная методика апробирована на примере типовой конструкции рессоры с двумя витыми ушками на передних концах.

Возможность получить наиболее достоверные данные по прочности рессор на стадии проектирования противотаранных устройств позволяет повысить достоверность моделирования динамических процессов ударного взаимодействия исследуемых объектов, сократить затраты времени на совершенствование конструкции с обеспечением выхода на запланированные показатели удерживающей способности противотаранного устройства при его минимальной материалоемкости.

Предложенные методические рекомендации позволяют определять разрушающие нагрузки для любых других фрагментов и деталей рессор (подвесок), отличающихся как по конструкции, так и применяемыми материалами, и могут быть использованы при проектировании рессорных подвесок.

Список литературы

1. Субботин, И. Грузовик хуже взрывов: что означает сценарий теракта в Ницце. [Электронный ресурс] / И. Субботин // Московский Комсомолец. Электронное периодическое издание «МК.ru». — Режим доступа: <http://www.mk.ru/incident/2016/07/15/gruzovik-khuzhe-vzryvov-chto-oznachaet-scenariy-terakta-v-nice.html>. — Дата доступа: 23.06.2017.
2. Врезаться в людей на автомобиле — новая тактика террористов? [Электронный ресурс] // Советская Белоруссия. — Режим доступа: <https://www.sb.by/articles/vrezatsya-v-lyudey-na-avtomobile-novaya-taktika-terroristov.html>. — Дата доступа: 23.06.2017.
3. Обзор российского рынка противотаранных устройств. [Электронный ресурс] // ООО «Протек». — Режим доступа: http://www.secuteck.ru/articles2/sys_ogr_dost/obzor-rossiyskogo-rynka-protivotarannyh-ustroystv. — Дата доступа: 23.06.2017.
4. Shih Kwang Tay. Crash Impact Modelling Of Security Bollard. [Electronic resource] // International LS-DYNA. Users Conference. — Mode of access: <https://automotive22-b.pdf>. — Date of access: 23.06.2017.
5. Ramon-Villalonga, L. Advanced Simulation Techniques for Low Speed Vehicle Impacts. [Electronic resource] / L. Ramon-Villalonga // LS-DYNA Anwenderforum. — Frankenthal 2007. — Mode of access: <https://B-I-03.pdf>. — Date of access: 23.06.2017.
6. Sarmah, Ratul D. Three-Dimensional Security Barrier Impact Response Modeling / Ratul D. Sarmah, Christopher Y. Tuan // International Journal of Nonlinear Science. — 2011. — Vol. 11, No. 2. — Pp. 236–245.
7. Ивченко, В.И. Определение разрушающих нагрузок конструктивных элементов подвесок грузовых автомобилей при взаимодействии с противотаранными устройствами / В.И. Ивченко, А.В. Шмелев, А.В. Рубцов // Механика машин, механизмов и материалов. — 2018. — № 3(44). — С. 26–35.
8. О безопасности колесных транспортных средств: ТР ТС 018/2011. — Введ. 01.01.2015. — Минск: БелГИСС, 2018. — 248 с.
9. Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть: учеб. пособие для вузов / А.И. Гришкевич [и др.]; под ред. А.И. Гришкевича. — Минск: Выш. шк., 1987. — 200 с.
10. Пархиловский, И.Г. Автомобильные листовые рессоры / И.Г. Пархиловский. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1978. — 232 с.
11. Заградительное устройство: пат. ЕА 023489 / Е.Л. Алешкевич, А.А. Дюжев, В.И. Ивченко, М.А. Крицкий, В.А. Левицкий, В.И. Петько, А.Н. Скок, С.В. Харитончик, А.В. Шмелев. — Оpubл. 30.06.2016.

IVCHENKO Vadim I.

Deputy Head of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering¹

E-mail: oimoa@tut.by

SHMIALIOU Aliaksei V., Ph. D. in Eng.

Deputy Director General for Research¹

E-mail: shmeliou.alexsei@gmail.com

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 25 February 2019.

CALCULATED DETERMINATION OF FAILURE LOADS OF LEAF SPRINGS EYES AT COLLISION OF TRUCK WITH ANTI-RAM DEVICE

Recommendations were developed for determining the strength indicators of the most loaded elements of the top spring leaves of the front suspensions of trucks based on computer simulation of the processes of destruction and the study of the mechanical properties of the material. The method was tested on the example of a standard spring design with two upturned eyes at the front ends. The proposed guidelines for determining the indicators of the strength of the springs eyes can be used in the design of road blockers for the calculation of the existing loads.

Keywords: truck, computer simulation, anti-ram device, strength, spring, bench tests, impact interaction

References

1. Subbotin I. Gruzovik khuzhe vzryvov: chto oznachaet stsenariy terakta v Nitstse [The truck is worse than explosions: what does the scenario of the terrorist attack in Nice mean]. *Moskovskiy komsomolets. Elektronnoe periodicheskoe izdanie "MK.ru"* [Moscow Komsomol. Electronic periodical "MK.ru"]. Available at: <http://www.mk.ru/incident/2016/07/15/gruzovik-khuzhe-vzryvov-chto-oznachaet-scenariy-terakta-v-nice.html> (accessed 23 June 2017).
2. Vrezatsya v lyudey na avtomobile — novaya taktika terroristov? [Is crashing people by a car a new terrorist tactic?]. *Sovetskaya Belorussiya* [Soviet Belarussia]. Available at: <https://www.sb.by/articles/vrezatsya-v-lyudey-na-avtomobile-novaya-taktika-terroristov.html> (accessed 23 June 2017).
3. Kraynov G. *Obzor rossiyskogo rynka protivotarannykh ustroystv* [Overview of the Russian market of anti-RAM devices]. Available at: http://www.secuteck.ru/articles2/sys_ogr_dost/obzor-rossiyskogo-rynka-protivotarannyh-ustroystv (accessed 23 June 2017).
4. Shih Kwang Tay, Bryan Lim, Shu Herng Ng. Crash Impact Modelling of Security Bollard. *12th International LS-DYNA Users Conference*. Detroit, 2012. Available at: <https://automotive22-b.pdf> (accessed 23 June 2017).
5. Ramon-Villalonga L., Enderich Th. Advanced Simulation Techniques for Low Speed Vehicle Impacts. *6. LS-DYNA Anwenderforum*. Frankenthal, 2007. Available at: <https://B-I-03.pdf> (accessed 23 June 2017).
6. Sarmah R.D., Tuan Ch.Y. Three-Dimensional Security Barrier Impact Response Modeling. *International Journal of Nonlinear Science*, 2011, vol. 11, no. 2, pp. 236–245.
7. Ivchenko V.I., Shmaliou A.V., Rubtsov A.V. Opredelenie razrushayushchikh nagruzok konstruktivnykh elementov podvesok gruzovykh avtomobiley pri vzaimodeystvii s protivotarannymi ustroystvami [Fracture load determination for the structural elements of trucks suspensions when interacting with antiram devices]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2018, no. 3(44), pp. 26–35.
8. Technical regulations of the Customs Union TR TS 018/2011. *O bezopasnosti kolesnykh transportnykh sredstv* [On the safety of wheeled vehicles]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2018. 248 p.
9. Grishkevich A.I. *Avtomobili: Konstruktsiya, konstruirovaniye i raschet. Sistemy upravleniya i khodovaya chast* [Cars: Design, construction and calculation. Control systems and chassis]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1987. 200 p.
10. Parkhilovskiy I.G. *Avtomobilnye listovye resory* [Car leaf springs]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 232 p.
11. Aleshkevich E.L., Dyuzhev A.A., Ivchenko V.I., Kritskiy M.A., Levitskiy V.A., Petko V.I., Skok A.N., Kharitonchik S.V., Shmaliou A.V. *Zagraditelnoe ustroystvo* [The barrier device]. Patent EA, no. 023489, 2016.