

УДК 629.11.012.8

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОЭЛЕМЕНТА С РЕЗИНО-КОРДНОЙ ОБОЛОЧКОЙ ТОРОИДНОГО ТИПА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ВТОРИЧНОГО ПОДРЕССОРИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

¹Черненко А.Б., ²Нефёдов В.В., ²Скринников Е.В., ²Сиротин П.В.

¹Адыгейский филиал ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова», Майкоп, e-mail: k197vs@yandex.ru;

²ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова», Новочеркасск, e-mail: nvvnp@gmail.com

В процессе эксплуатации поддресоренная кабина многоосного шасси совершает сложные пространственные движения. Пневматические упругие элементы с РКО тороидного типа в системе подвешивания кабины испытывают осевые, также продольные и поперечные внешние воздействия. В статье изучается влияние геометрических параметров пневматического упругого элемента с резино-кордной оболочкой тороидного типа на характеристики систем вторичного поддресоривания автомобилей. Авторами разработана математическая модель, позволяющая исследовать влияние геометрических параметров пневматического упругого элемента с резино-кордной оболочкой тороидного типа на его нагрузочные характеристики. Исследование влияния геометрических параметров пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа на его нагрузочные характеристики на основе разработанной модели подтверждает предположение о возможности создания пневмовиброизолятора для систем вторичного поддресоривания автомобилей с наперёд заданными желаемыми нелинейными характеристиками.

Ключевые слова: резино-кордная оболочка, тороид, поддресоривание, нагрузочные характеристики, упругий элемент, математическая модель

INFLUENCE OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF PNEUMOELEMENTS WITH RUBBER-SHELL TOROIDAL TYPE ON THE CHARACTERISTICS OF SYSTEMS SECONDARY SUSPENSION CARS

¹Chernenko A.B., ²Nefedov V.V., ²Skrinnikov E.V., ²Sirotnin P.V.

¹Adygeya branch South-Russian State Technical University (NPI) to them. M.I. Platov, Maikop, e-mail: k197vs@yandex.ru;

²Platov' South-Russian State Technical University (NPI), Novocherkassk, e-mail: nvvnp@gmail.com

During operation, multi-axis sprung cab chassis performs complex spatial movement. Air spring elements with RCS toroidal type in the hanging cabin experience both axial and longitudinal and transverse external influences. We study the influence of geometric parameters of the air spring with the rubber-cord shell toroidal type on the characteristics of the secondary suspension systems of automobiles. The authors have developed mathematical model allowing to investigate the influence of geometrical parameters of a pneumatic-elasticity with Gogo element rubber-cord shell toroidal type on its load characteristics. Investigation of the influence of geometric parameters of the air spring with RCS toroidal type on its load characteristics on the basis of the developed model confirms the assumption about the possibility of creating pneumatic-vibroisolator secondary suspension systems for vehicles in advance to select a desired non-linear characteristics.

Keywords: rubber-cord shell, toroidal, cushioning, load characteristics, the elastic element, a mathematical model

Основные принципы расчёта характеристик пневматических упругих элементов с резино-кордными оболочками (РКО) при различных формах нагружения были изложены в работах В.Л. Бидермана и Б.Л. Бухина [1], которые можно считать основополагающими работами в этом направлении. Наиболее полное обобщение этих работ и дальнейшая разработка методов синтеза пневматических упругих элементов на базе существующих резино-кордных оболочек выполнены в работе [3]. Разработанный метод расчёта геометрии направляющих поверхностей металлоарматуры упругих элементов с РКО и был положен в основу при

разработке конструкции пневматического виброизолятора с РКО тороидного типа для систем вторичного поддресоривания.

В процессе эксплуатации поддресоренная кабина многоосного шасси совершает сложные пространственные движения. Пневматические упругие элементы с РКО тороидного типа в системе подвешивания кабины испытывают осевые, также продольные и поперечные внешние воздействия. На рис. 1 представлены схемы деформаций с РКО и перекачки её гофров, когда опорный элемент виброизолятора находится в крайних положениях, при нагружении его осевой и поперечной нагрузкой.

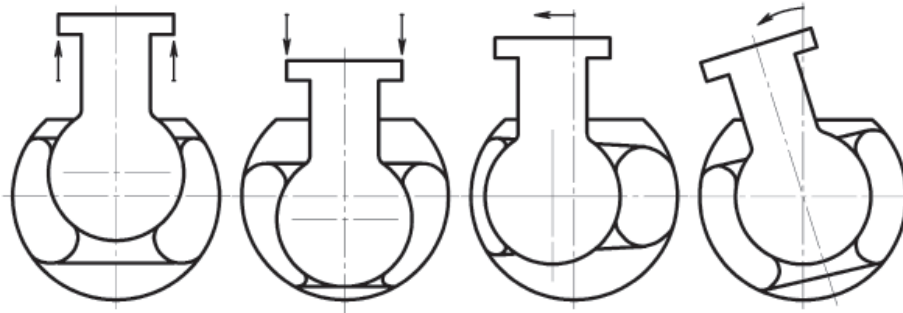


Рис. 1. Схемы деформации РКО при нагружении упругого элемента осевой, поперечной или угловой нагрузкой

Проведенные исследования по выбору типа упругого элемента для систем вторичного поддрессоривания многоосных автомобилей позволили сформулировать основные технические требования, предъявляемые к пневматическому виброизолятору с РКО. Для пневматических систем вторичного поддрессоривания многоосных автомобилей наиболее целесообразно применение РКО тороидного типа [5].

Пневматические упругие элементы с РКО тороидного типа хорошо компонуются в системах вторичного поддрессоривания, осуществляют виброизоляцию как в осевом, так и в продольном и поперечном направлениях, обладают способностью воспринимать угловые и сложные нагрузки при полном отсутствии металлического контакта (жесткой связи). Наряду с этим пневмоэлементы с РКО тороидного типа позволяют совмещать в себе упругие и демпфирующие свойства. При этом регулирование взаимовлияния этих свойств за счёт варьирования конфигурацией поверхностей металлоарматуры, с которой оболочка находится в контакте, позволяет во многих случаях получить близкую к оптимальной, упруго-диссипативную характеристику подвески [6].

На рис. 2 представлен пневматический упругий элемент с РКО тороидного типа для систем вторичного поддрессоривания автомобилей. Важной конструктивной особенностью этого упругого элемента является то, что нелинейный профиль направляющей арматуры позволяет получать требуемые характеристики жесткостей виброизолятора.

При линейной арматуре (конус, цилиндр и пр.) получить требуемые изменения жесткостей значительно сложнее по технологическим причинам и из-за несовместимости требований, предъявляемых к горизонтальным и осевым нагрузочным характеристикам.

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 – корпус виброопоры, 2 – опорный элемент (поршень), 3 – РКО тороидного

типа. При осевых перемещениях опорный элемент перемещается относительно корпуса, при этом деформируются и перекатываются по поверхностям металлоарматуры (корпус и опорный элемент) гофры эластичной оболочки. Изменение силы при изменении величины деформации упругого элемента обеспечивается в основном за счёт изменения эффективной площади, равной разности площадей S_{31} и S_{32} , характеризуемых эффективными диаметрами D_{31} и D_{32} пневмоэлемента, при деформации гофров оболочки между поверхностями металлоарматуры, а также за счёт сжатия воздуха в РКО.

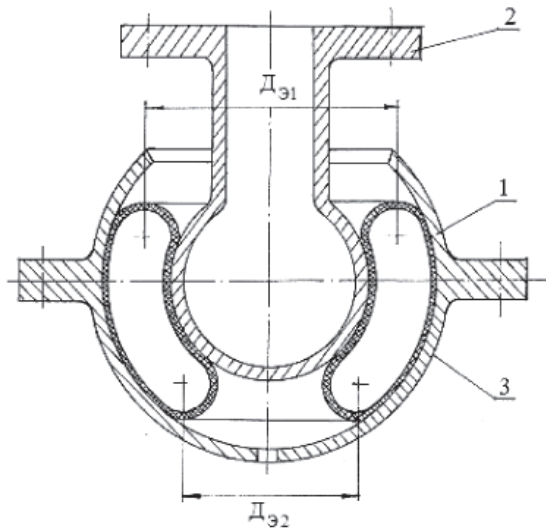


Рис. 2. Схема пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа

При колебаниях с допустимыми амплитудами происходит деформация тороидной оболочки, сопровождаемая перекатыванием гофров, а также изменение воздушного объёма РКО. Такое конструктивное исполнение пневматического упругого элемента позволит обеспечить хорошие виброизолирующие свойства по всем направлениям колебаний.

Текущее значение усилия $Q(x)$ на пневматический упругий элемент с РКО тороидного типа определяется по уравнениям

$$Q(x) = p_u(x) [S_{\Sigma 1}(x) - S_{\Sigma 2}(x)]; \quad (1)$$

$$p_u(x) = (p_0 - p_a) \left[\frac{V_0}{V(x)} \right]^n + p_a, \quad (2)$$

где $p_u(x)$ – текущее значение давления в РКО; $S_{\Sigma 1}(x)$, $S_{\Sigma 2}(x)$ – текущее значение эффективных площадей верхнего и нижнего гофров РКО тороидного типа; p_0 – начальное (статическое) значение давления в РКО; p_a – атмосферное давление; V_0 – начальный объём внутренней полости РКО; $V(x)$ – текущее значение объёма внутренней полости РКО; n – показатель политропы, зависящий от условий теплообмена между рабочим газом и окружающей средой.

Значение текущего объёма определяется после разбиения суммарного объёма на элементарные составляющие, объём которых вычисляется по теореме Гюльдена:

$$V(x) = 2\pi S_{\text{п.п}}(x) r_{\text{ц.т}}(x), \quad (3)$$

где $S_{\text{п.п}}(x)$ – площадь поперечного сечения фигуры вращения; $r_{\text{ц.т}}(x)$ – координаты центра тяжести фигуры вращения.

Дифференцируя по x уравнение (1), получим формулу для определения осевой жёсткости C_x пневмоамортизатора:

$$C(x) = \frac{dQ(x)}{dx} = \frac{n(p_u(x) + p_a)(S_{\Sigma 1}(x) - S_{\Sigma 2}(x))^2}{V(x)} + p_u(x) \frac{d(S_{\Sigma 1}(x) - S_{\Sigma 2}(x))}{dx}. \quad (4)$$

Эта формула показывает, что осевая жёсткость пневмоамортизатора определяется суммой двух слагаемых, из которых первое зависит от размеров пневматического упругого элемента (т.е. от величин $S_{\Sigma 1}$ и $S_{\Sigma 2}$) и от показателя политропы воздуха, а второе зависит ещё и от скорости изменения эффективного радиуса, то есть от формы направляющих поверхностей металлоарматуры. Геометрические параметры пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа, влияющие на его характеристики, полностью определяются эффективными площадями $S_{\Sigma 1}$ и $S_{\Sigma 2}$ и V – внутренним объёмом РКО.

Эффективные площади для верхнего и нижнего гофров пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа определяются из соотношений

$$S_{\Sigma 1}(x) = \pi r_{\Sigma 1}^2(x); \quad S_{\Sigma 2}(x) = \pi r_{\Sigma 2}^2(x), \quad (5)$$

откуда

$$\frac{dS_{\Sigma 1}(x)}{dx} = 2\pi r_{\Sigma 1,2}(x) \frac{dr_{\Sigma 1,2}(x)}{dx}, \quad (6)$$

где $r_{\Sigma 1,2}$ – эффективные радиусы верхнего и нижнего гофров пневмоэлемента с РКО тороидного типа.

Уравнения (1)–(6) позволяют выполнить расчёт осевых нагрузочных характеристик пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа для различных начальных значений избыточного давления и объёма полости рабочего газа в РКО, если известны функции $r_{\Sigma 1}(x)$ и $r_{\Sigma 2}(x)$.

Расчётная схема для определения нагрузочной характеристики пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа, у которого направляющая арматура (поршень и корпус) выполнены в виде сферических поверхностей, представлена на рис. 2.

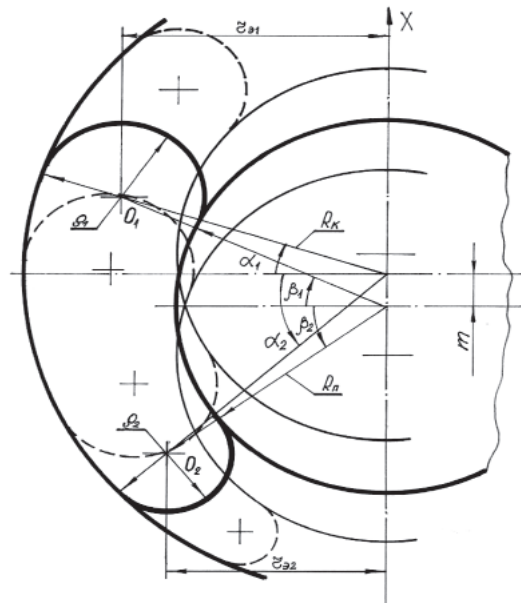


Рис. 3. Расчётная схема осевой нагрузочной характеристики пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа

Система геометрических соотношений, характеризующих произвольное положение РКО упругого элемента при его осевой деформации, определится из решения треугольников $O_1 O_2 K$, $O_1 O_2 M$, $O_1 K M$, $O_2 K M$ и уравнения постоянства длины профиля оболочки:

$$\begin{aligned} (R_k - \rho_1)^2 + (R_k - \rho_2)^2 - 2(R_k - \rho_1)(R_k - \rho_2)\cos(\alpha_1 + \alpha_2) = \\ = (R_n + \rho_1)^2 + (R_n + \rho_2)^2 - 2(R_n + \rho_1)(R_n + \rho_2)\cos(\beta_1 + \beta_2); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{R_k - \rho_{1,2}}{\cos \beta_{1,2}} = \frac{m \pm x}{\sin(\beta_{1,2} - \alpha_{1,2})}; \quad \frac{R_n + \rho_{1,2}}{\cos \alpha_{1,2}} = \frac{m \pm x}{\sin(\beta_{1,2} - \alpha_{1,2})};$$

$$\rho_1 (\pi + (\beta_1 - \alpha_1)) + R_n (\beta_1 + \beta_2) + \rho_2 (\pi + (\beta_2 - \alpha_2)) +$$

$$+ R_k (\alpha_1 + \alpha_2) = l_0,$$

где l_0 – длина профиля резино-кордной оболочки; ρ_1 и ρ_2 – радиусы гофров РКО; $\alpha_{1,2}$ – и $\beta_{1,2}$ – углы наклона нормалей, проведённых в точках сопряжения гофра оболочки с направляющими поверхностями ограничивающей арматуры (корпуса и поршня) [7, 8].

После решения приближёнными методами системы из шести нелинейных трансцендентных уравнений (7) можно получить текущие значения переменных $\beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2, \rho_1, \rho_2$. В зависимости от величины хода x упругого элемента. Эффективные радиусы пневматического упругого элемента $r_{31}(x)$ и $r_{32}(x)$ определяются из соотношений

$$r_{31} = (R_k - \rho_1) \cos \alpha_1 = (R_n + \rho_1) \cos \beta_1; \quad (8)$$

$$r_{32} = (R_k - \rho_2) \cos \alpha_2 = (R_n + \rho_2) \cos \beta_2. \quad (9)$$

Значения текущего объёма с учётом (3) определяются из соотношений

$$V_1 = \left[\frac{R^2}{3} \sqrt{2(1 - \cos(\alpha_1 + \alpha_2))} \cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{3} (R - \rho_1)^2 (R - \rho_2) \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(\pi - \gamma_1 - \alpha_1) \sin \gamma_1 \right] 2\pi; \quad (10)$$

$$\sin \gamma_1 = \frac{(R - \rho_2) \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sqrt{(R - \rho_1)^2 + (R - \rho_2)^2 - 2(R - \rho_1)(R - \rho_2) \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}}; \quad (11)$$

$$V_2 = \left[\frac{1}{3} (r_n + \rho_2)^2 (r_n + \rho_1) \sin(\beta_1 + \beta_2) \cos(\pi - \gamma_2 - \beta_1) \sin \gamma_2 - \right. \\ \left. - \frac{r_n^3}{3} \cos\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right) \sqrt{2(1 - \cos(\beta_1 + \beta_2))} \right] 2\pi; \quad (12)$$

$$\sin \gamma_2 = \frac{(r_n + \rho_2) \sin(\beta_1 + \beta_2)}{\sqrt{(R - \rho_1)^2 + (R - \rho_2)^2 - 2(R - \rho_1)(R - \rho_2) \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}}; \quad (13)$$

$$V_3 = \left[\frac{1}{2} \rho_1 l_1 (R - \rho_2) \cos \beta_1 - \frac{2}{3} \frac{\rho_1^2}{l_1} \sqrt{2 \left(1 - \cos\left(\frac{\pi - \beta_1 - \alpha_1}{2}\right) \right)} \right] 2\pi; \quad (14)$$

$$l_1 = \frac{\rho_1 \pi (\pi + \beta_1 - \alpha_1)}{\pi}; \quad (15)$$

$$V_3 = \frac{1}{2} \rho_2 l_2 \left[(R - \rho_2) \cos \beta_2 - \frac{2}{3} \frac{\rho_2^2}{l_2} \sqrt{2 \left(1 - \cos(\pi + \beta_2 - \alpha_2) \cos\left(\frac{\pi - \beta_2 - \alpha_2}{2}\right) \right)} \right] 2\pi; \quad (16)$$

$$l_2 = \frac{\rho_2 \pi (\pi + \beta_2 + \alpha_2)}{\pi}. \quad (17)$$

На рис. 4 представлена расчётная схема поперечного нагружения силой Q_x пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа. На схеме ось Y направлена вдоль линии действия силы Q_x . При перемещении поршня характер деформирования стенки РКО меняется по мере её удаления от оси Y . Если провести радиальное сечение РКО под углом через ось симметрии поршня (рис. 4), то в левой фронтальной зоне поверхности РКО при $\varphi = 0$, радиальный профиль РКО испытывает максимальное сжатие, а в правой при $\varphi = \pi$ – максимальное растяжение. При этом центры гофров O_1 и O_2 левого профиля РКО расходятся в стороны, а центры гофров P_1 и P_2 сближаются.

В боковых зонах упругого элемента, при $\varphi = \pm\pi/2$, поверхность РКО испытывает максимальные сдвиговые деформации, при этом размеры радиальных профилей в этих зонах практически не меняются [3].

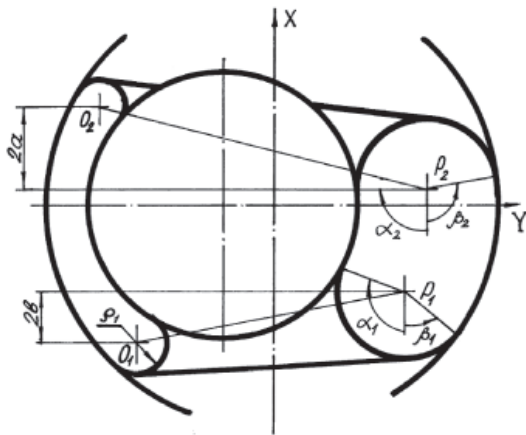


Рис. 4. Расчётная схема поперечной нагрузочной характеристики пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа

Поэтому при поперечном ходе поршня упругого элемента Y происходит наклон эффективных площадей верхнего и нижнего гофров пневмоамортизатора на величину $2a$ и $2b$ соответственно. Сумма проекций эффективных площадей верхнего и нижнего гофров на плоскость, перпендикулярную линии действия поперечной силы, представляет собой поперечную эффективную площадь пнев-

матического упругого элемента с РКО тороидного типа.

При расчёте поперечной нагрузочной характеристики ПУЭ с РКО тороидного типа принимаем, что поперечная эффективная площадь равняется сумме поперечных эффективных площадей верхнего и нижнего гофров, которые являются эллипсами с полуосями равными соответственно a и r_3 , b и r_5 или $(a + b)$ и r_5 :

$$Q_y = \pi(a + b)r_5 p_u + Q_{yk}, \quad (18)$$

где Q_{yk} – составляющая поперечная сила, обусловленная упругими свойствами стенки РКО. Величины r_3 и p_u в этой формуле определяются по осевому положению пневматического упругого элемента. Поперечная жесткость C_y пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа равна

$$C_y = \pi r_5 p_u \frac{d(a + b)}{dx} + C_{yk}, \quad (19)$$

где

$$C_{yk} = \frac{dQ_{yk}}{d(x)}. \quad (20)$$

Аналитическое исследование поперечной жесткости требует весьма сложного математического аппарата для определения равновесного положения резино-кордной оболочки при поперечной деформации. При этом возникают задачи, связанные с необходимостью определения фактической геометрии кордного каркаса несимметрично деформированной оболочки и учета упругих свойств резины и корда. Решение этих задач приводит к громоздким трансцендентным выражениям с использованием интегралов, не берущихся в конечном виде.

Поэтому в инженерной практике используют приближенные формулы для расчёта поперечной жесткости. Для нашей расчётной схемы (рис. 4) будем рассчитывать поперечную жесткость для верхнего и нижнего гофров эластичной оболочки отдельно. Общая поперечная жесткость ПУЭ с РКО тороидного типа равна сумме $C_n = C_n^b + C_n^h$. Ниже величина $C_n^{bh}(x)$ определяется по известной полуэмпирической формуле, учитывающей влияние как ограничивающей арматуры, так и геометрии каркаса РКО [2,4]:

$$C_n^{bh}(x) = \pi r_{3,5}(x) k_{1,2} [\alpha_{1,2}(x), \beta_{1,2}(x)] p_u(x) + 60 \sqrt{p_u(x) + 0,16 p_u} \left\{ 1 + \frac{3,4R}{\lambda^2} \sqrt{\lambda^2 - R^2} \right\}; \quad (21)$$

$$k_{1,2} [\alpha_{1,2}(x), \beta_{1,2}(x)] = \frac{[2\pi - \alpha_{1,2}(x) - \beta_{1,2}(x)] \sin \alpha_{1,2}(x) \sin \beta_{1,2}(x) - \sin [\alpha_{1,2}(x) + \beta_{1,2}(x)]}{2 - 2 \cos [\alpha_{1,2}(x) + \beta_{1,2}(x)] + [2\pi - \alpha_{1,2}(x) \beta_{1,2}(x)] \sin [\alpha_{1,2}(x) + \beta_{1,2}(x)]}; \quad (22)$$

$$\lambda = \frac{r_b(1+\delta)}{\sin \theta_b} = \frac{\sin \theta_x(x)}{R}, \quad (23)$$

где $p_u(x)$ – текущее избыточное давление рабочего газа; $\theta_k(x)$ – угол, составленный направлением нити корда и меридианом РКО; r_b – радиус сборочного барабана; θ_b – угол закроя корда; δ – коэффициент условной вытяжки корда.

В работе [4] построена номограмма, позволяющая определять параметры перекачивания гофрированных РКО при поперечных деформациях, из которой видно, что при нелинейном профиле направляющей арматуры, обеспечивающей нелинейное изменение углов $\alpha(x)$ и $\beta(x)$, можно получить любую характеристику жесткости виброопоры в поперечном направлении, варьируя параметры m , R_k , R_n .

Исследование влияния геометрических параметров пневматического упругого элемента с РКО тороидного типа на его нагрузочные характеристики подтверждает предположение о возможности создания пневмовиброизолятора для систем вторичного поддрессоривания автомобилей с наперед заданными желаемыми нелинейными характеристиками.

Список литературы

1. Бидерман В.Л., Бухин Б.Л. Расчёт резино-кордных пневматических амортизаторов // Расчёты на прочность. – М., 1960. – Вып. 5.
2. Кузнецов А.В., Якимец Ю.А. Исследование конструктивной составляющей поперечной жесткости пневморессор // Тр. ВНИИ Вагоностроения. – 1974. – Вып. 25. – С. 53–59.
3. Кузнецов Ю.И. Синтез резино-кордных упругих элементов пневматических подвесок колёсных машин: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1976.
4. Кузнецов Ю.И., Савушкин С.О. Синтез пневматических упругих элементов диафрагменного типа с заданной поперечной жёсткостью // Пневматические упругие элементы с резино-кордными оболочками. Расчёт, проектирование, изготовление и эксплуатация: Тр. НИКТИ шинной пром. – М.: ЦНИИТЭИнефтехим, 1977. – С. 91–97.
5. Черненко А.Б. Экспериментальные амплитудно-частотные характеристики систем поддрессоривания кабин многоосных автомобилей // Известия Вузов. Машиностроение. – 1990. – № 8.
6. Черненко А.Б. и др. Пневматическая виброизолирующая опора / Авторское свидетельство № 1677405, 05.12.1988. № 4615930, кл. F 16 F 9/04.
7. Черненко А.Б. Создание и исследование пневматической системы поддрессоривания кабины многоосных автомобилей: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. – 265 с.
8. Черненко А.Б., Гасанов Б.Г. Пневматические системы вторичного поддрессоривания кабин многоосных автомобилей / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2012. – 156 с.