

УДК 621.826

**З.А. Годжаев, профессор, д-р техн. наук,****А.А. Поповский, инженер,****С.В. Гончаренко, инженер***ОАО «Федеральный исследовательский испытательный центр машиностроения»**ул. НАТИ13, Новый Быт, Чеховский р-н, Московская область, Россия, 142322**E-mail: ficm@mail.ru***ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧЕСКОГО УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА РУКАВНОГО ТИПА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА, ХОДА И ФОРМЫ ПОРШНЯ**

*Проведены исследования пневматического элемента рукавного типа Taurus BL121 370-230. Дана оценка эффективности использования пневмоэлементов рукавного типа в автобусах и грузовых автомобилях.*

**Ключевые слова:** *подвеска пневматическая, пневмоэлемент рукавного типа, нагрузочная характеристика, петля гистерезиса, коэффициент демпфирования, жесткость пневмоэлемента.*

Пассажирский автобус является одним из самых массовых видов транспортных средств и, очевидно, таким останется в обозримом будущем. Поэтому развитие пассажирских автобусов идет по многим направлениям. Совершенствуются конструкции с целью улучшения их эксплуатационных показателей и потребительских качеств, в том числе вместимости, комфорта и т.д.

На всех моделях автобусов «Икарус», автобусах «Укравтобуспром», ТОО «Альтерна», «ЛиАЗ» новых моделях автобусов производства ОАО «ТМЗ» «Московит» устанавливаются пневматические подвески. Пневматические подвески получили распространение благодаря своей характеристике, которая обеспечивает, по сравнению с рессорной, практически постоянную частоту колебаний, то есть плавность хода независимо от нагрузки. Это защищает пассажиров и перевозимый груз от толчков и вибраций, сохраняется постоянный контакт колеса с дорогой, имеющий большое значение для эффективной работы тормозов и точности рулевого управления.

Пневматические подвески устанавливаются на грузовых автомобилях полной массой свыше 10 т. Все большую популярность пневмоподвеска приобретает и на современных легковых автомобилях.

В современных условиях создания и доводки моделей машин расчетные методы оценки напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности, надежности и сопротивления усталости элементов конструкции выходят на первый план и доминируют. Для проведения расчетных оценок исследователям в качестве исходных данных необходимо знать инерционные, упругие, демпфирующие свойства элементов конструкции. Наши исследования, обзор и анализ литературных источников показывают, что очень мало экспериментальных данных по оценке, особенно демпфирующих и упругих свойств элементов несущей системы мобильных машин, таких как пассажирский автобус, грузовые автомобили, внедорожники, легковые автомобили и т.д. В связи с этим возникла необходимость для дальнейшей оценки НДС, прочности, сопротивления усталости пассажирского автобуса «Московит» производства Тушинского машиностроительного завода провести экспериментальные исследования демпфирующих и упругих характеристик пневматического упругого рукавного элемента Taurus 370-230, которые являются основным элементом подвески несущей системы этих машин. Актуальность данных экспериментальных исследований заключается в том чтобы оценить эффективность гашения возникающих динамических колебаний в системе машины в целом.

С целью определения эксплуатационных характеристик пневматического рукавного элемента щелкающего типа размерности 370-230 и оценки эффективности использования пневмоэлементов рукавного типа в автобусах и грузовых автомобилях были проведены стендовые испытания.

Пневматический упругий элемент (рисунок 1) состоит из: верхней крышки корпуса, в которую вварен ниппель; резинокордного рукавного элемента с габаритными размерами по высоте 370 мм и наружным диаметром 230 мм; поршня (нижней крышки корпуса) с закрепленным на нем резиновым амортизатором.

Наружный и внутренний слои изготавливаются из высококачественного эластомера. Материал устойчив к любым атмосферным воздействиям и является маслостойким. Внутренний слой воздухонепроницаемый.

Каркас воспринимает усилия, возникающие благодаря внутреннему давлению в пневмобаллоне.

В соответствии с таблицей 1 нагрузочного ряда проводилась обжимка пневморессоры на полном ходе от  $H_{\max} = 440$  мм до  $H_{\min} = 200$  мм на давлениях воздуха 1;2;3;4; и 5 bar, устанавливаемом при  $H_{\text{раб}} = 385$  мм. По зависимостям «нагрузка-разгрузка» от деформации  $h_z$  строились петли гистерезиса (рисунок 2). По графикам петель гистерезиса оценивалось отношение потерянной работы, равное

площади петли  $\Delta S_{II}$ , к проделанной работе, равной площади под петлей гистерезиса  $S_{II}$ . Отношение потерянной работы к проделанной работе при обжимке названо коэффициентом рассеяния энергии  $\Psi$ :

$$\Psi = \frac{\Delta S_{II}}{S_{II}};$$

где  $\Delta S_{II}$  – площадь петли гистерезиса;  $S_{II}$  – площадь криволинейного треугольника в координатах  $P = f(hz)$  под петлей.

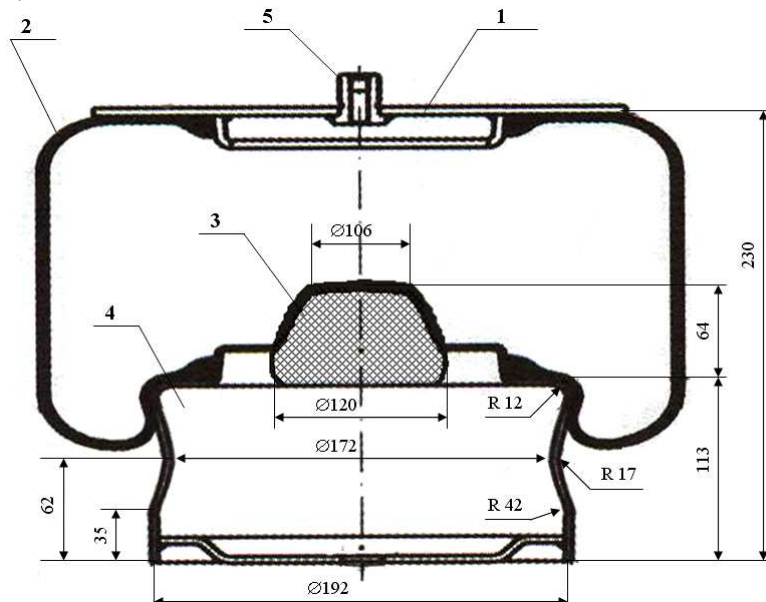


Рисунок 1 – Вид рукавного пневматического элемента Taurus 370-230 в разрезе.

1 – крышка верхняя; 2 – резинокордный рукавный пневматический элемент диафрагменного типа; 3 – резиновый амортизатор (отбойник); 4 – поршень (стакан) сложной вогнутой формы; 5 – нипель для воздуха

Таблица 1 – Режимы испытаний пневморессоры

| Высота сжатия пневморессоры, мм | Прогиб пневморессоры, мм | Давления воздуха в пневморессоре, bar |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                 |                          | $P_{w\text{нач}}$                     | $P_{w\text{раб}}$ | $P_{w\text{кон}}$ | $P_{w\text{нач}}$ | $P_{w\text{раб}}$ | $P_{w\text{кон}}$ | $P_{w\text{нач}}$ | $P_{w\text{раб}}$ | $P_{w\text{кон}}$ | $P_{w\text{нач}}$ | $P_{w\text{раб}}$ | $P_{w\text{кон}}$ | $P_{w\text{нач}}$ | $P_{w\text{раб}}$ | $P_{w\text{кон}}$ |
| $H_{\text{нач}}=440$            | $f_{\text{нач}}=0$       | 0,85                                  |                   |                   | 1,7               |                   |                   | 2,7               |                   |                   | 3,7               |                   |                   | 4,5               |                   |                   |
| $H_{\text{раб}}=375$            | $f_{\text{раб}}=55$      |                                       | 1,0               |                   |                   | 2,0               |                   |                   | 3,0               |                   |                   | 4,0               |                   |                   | 5,0               |                   |
| $H_{\text{кон}}=200$            | $f_{\text{кон}}=240$     |                                       |                   | 2,4               |                   |                   | 4,1               |                   |                   | 5,8               |                   |                   | 7,4               |                   |                   | 8,6               |

Здесь: *нач* – начальное устойчивое положение пневмоэлемента;

*раб* – рабочее статическое положение пневмоэлемента при котором устанавливалось давление воздуха.

*кон* – конечное положение, при котором происходил удар верхней крышки в отбойник (амортизатор).

Зависимость коэффициента рассеяния энергии  $\Psi$  от давления воздуха представлялась в виде полуэмпирической зависимости

$$\Psi = \Psi_0 + A \cdot P_w^B,$$

где  $\Psi_0$  – постоянный для данного рукавного пневмоэлемента безразмерный коэффициент, к которому стремится парабола при давлении воздуха стремящемся к нулю;  $A$  – постоянный для данного рукавного пневмоэлемента коэффициент, имеющий размерность  $[bar]^{-B}$ ;  $B$  – показатель степени давления воздуха, постоянная величина для данного типа рукавного пневмоэлемента.

Зависимость относительного коэффициента рассеяния энергии в пневморессоре после обработки экспериментальных данных получена в виде:

$$\Psi = 0,082 + 0,005 \cdot P_w^{1,9},$$

где 0,082; 0,005  $[bar]^{-1,9}$ ; 1,9 – постоянные для пневмоэлемента 370-230 коэффициенты;  $P_w [bar]$  – рабочее давление воздуха в пневмоэлементе.

Зависимость относительного коэффициента рассеяния энергии от давления воздуха приведена на рисунке 3.

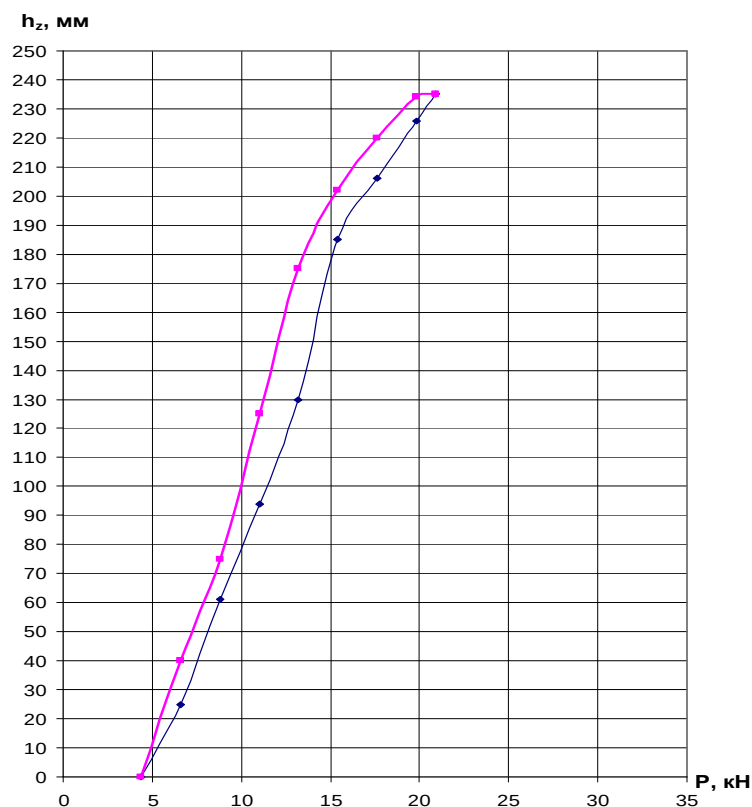


Рисунок 2 – Петля гистерезиса рукавного пневмоэлемента щелкающего типа модели Taurus 370-230 при рабочем давлении воздуха  $P_w = 3,0$  bar

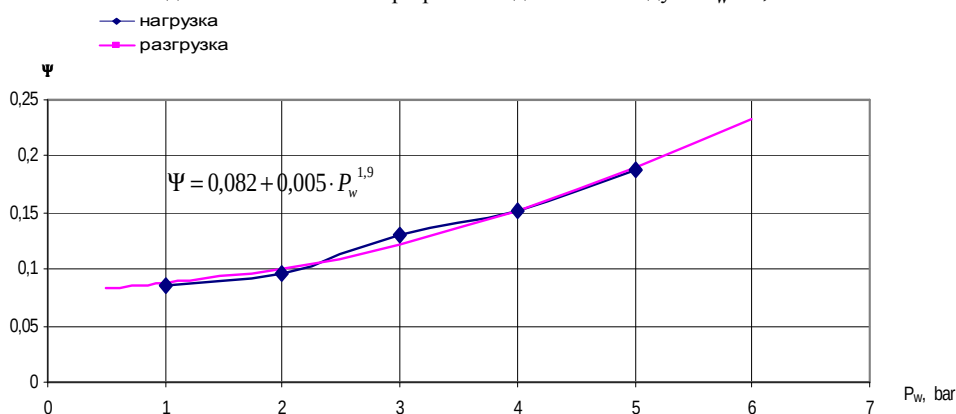


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента демпфирования рукавного пневматического элемента Taurus 370-230 от давления воздуха

Коэффициент поглощения энергии  $\Psi_L$ , логарифмический декремент затухания  $\delta$  и относительный коэффициент рассеяния энергии  $\Psi$  связаны между собой зависимостью в соответствии с работой [1].

$$\Psi = \Psi_L / 4 = \delta / 2.$$

По зависимостям нагрузки  $G_z$  от хода сжатия  $H$  и деформации пневмоэлемента  $f$  строились нагрузочные характеристики  $G_z = \beta(H)$  и  $G_z = \beta(f)$ , рисунки 4 и 5.

Жесткость  $C$  пневмоэлемента определяется по формуле, справедливой для всех упругих элементов:

$$C = \frac{\Delta G_z}{\Delta H_z} = \frac{\Delta G_z}{\Delta f}, \quad \left[ \frac{\kappa H}{м} \right]$$

где  $\Delta G_z$  – приращение нормальной нагрузки на пневмоэлемент, [кН];  $\Delta H_z$  – приращение хода сжатия, [м];  $\Delta f$  – приращение осевой деформации пневмоэлемента, [м].

Зависимости осевой жесткости  $C$  пневмоэлемента рукавного типа при переменных рабочих давлениях воздуха от деформации  $f$  приведены на рисунке 6.

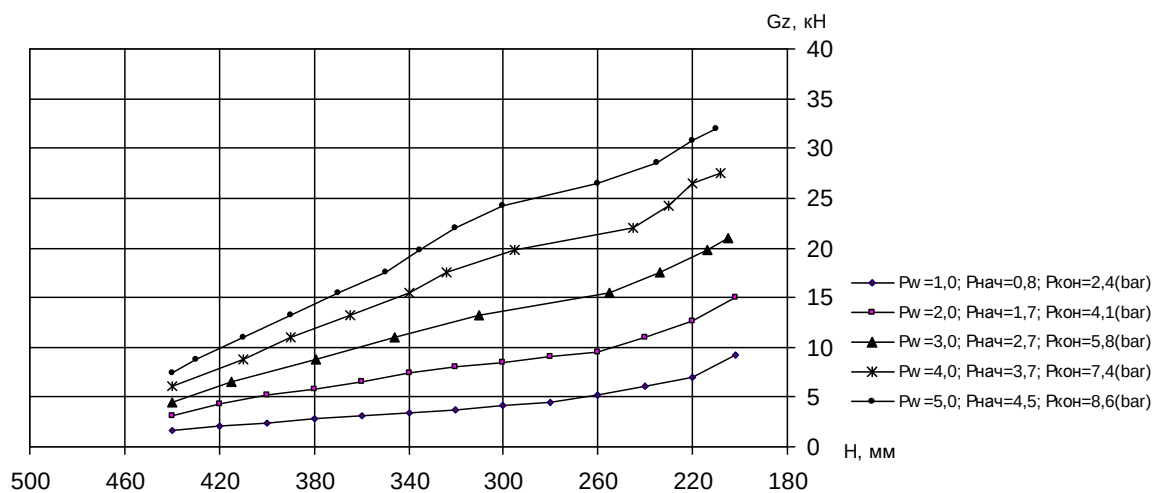


Рисунок 4 – Нагрузочная характеристика рукавного пневмоэлемента щелкающего типа модели Taigus размера 370-230

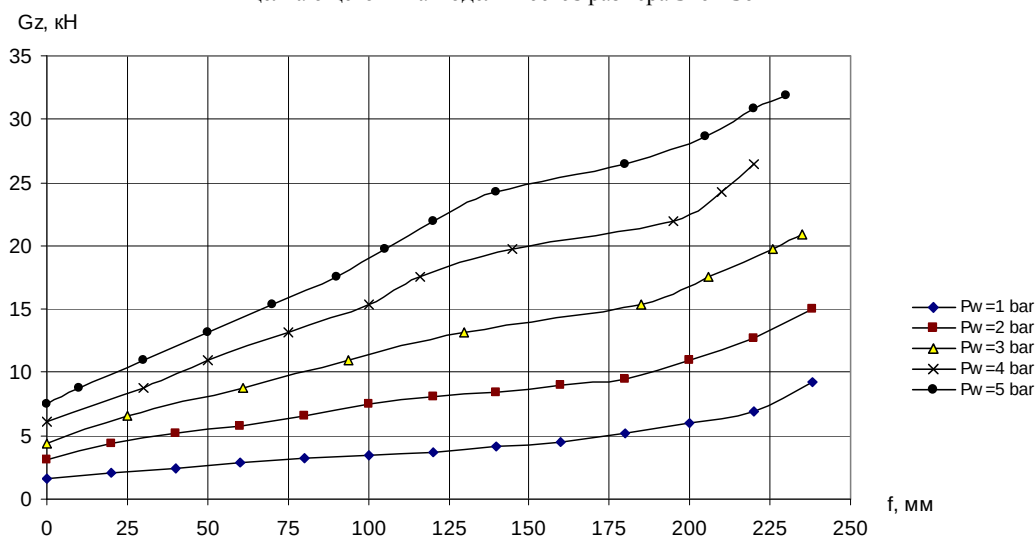


Рисунок 5 – Нагрузочная характеристика рукавного пневмоэлемента щелкающего типа модели Taigus размера 370-230 от прогиба

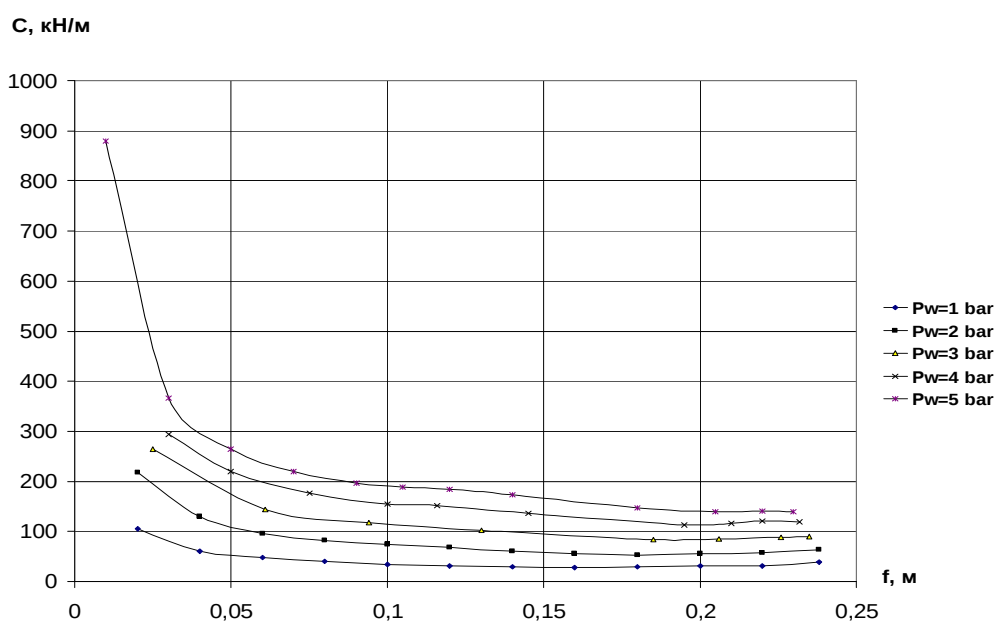


Рисунок 6 – Зависимость радиальной жесткости рукавного пневматического элемента 370-230 от радиальной деформации при переменных давления воздуха

Анализ формы кривой  $C = \beta(f)$  позволяет представить ее в виде эмпирической зависимости  $C = C_0 + \frac{\Delta G_f}{f}$ , кН/м, где  $C_0$  – постоянная для данного рукавного пневмоэлемента жесткость, при которой деформация  $f \rightarrow \infty$ , имеющая размерность [кН/м] при рабочем давлении воздуха  $P_w$ ,  $\Delta G_f$  – постоянная величина для данного рукавного пневмоэлемента, имеющая размерность силы [кН] при фиксированном рабочем давлении  $P_w$ ,  $f$  – осевая деформация пневмоэлемента, [м].

График зависимости  $C = \beta(f)$  в численном виде после математической обработки приведен на рисунке 7.

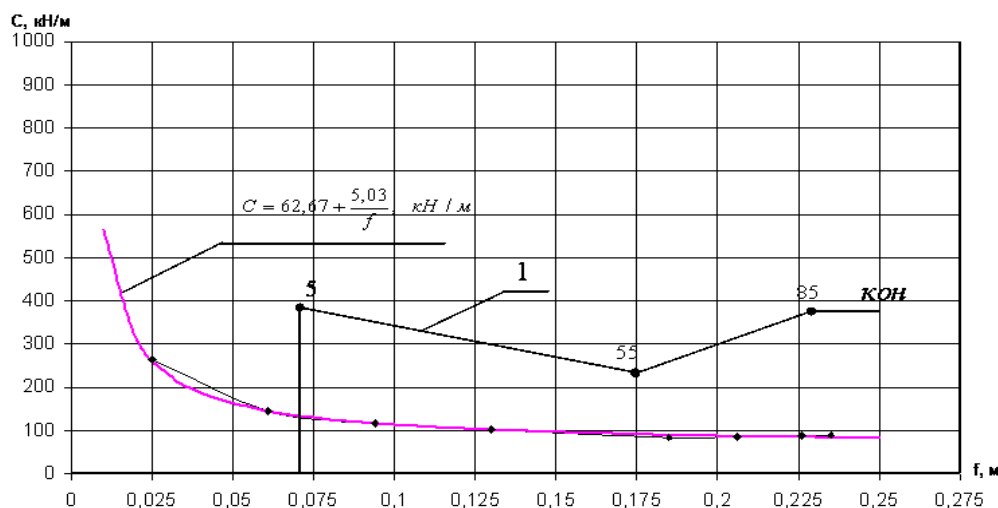


Рисунок 7 – График зависимости жесткости рукавного пневматического элемента щелкающего типа модели Taugus размера 370-230 от прогиба, при  $P_w = 3,0$  bar  
1 – упрощенная форма поршня; 5, 55, 85, кон – координаты характерных точек поршня

Для более глубокого изучения взаимодействия рукавного пневмоэлемента со сложной поверхностью поршня на последний наклеивалась гибкая миллиметровая лента. По гибкой миллиметровой ленте отмечались характерные точки формы профиля поршня: 5, 55, 85 – две конические поверхности и 85 – кон – цилиндрическая поверхность. С наклеенной гибкой миллиметровой лентой проводилась четырехкратная обжимка на трех характерных давлениях воздуха  $P_w = 1$  bar;  $P_w = 3$  bar и  $P_w = 5$  bar. При прохождении характерной точки при внедрении поршня в пневмоэлемент фиксировались величины сжатия  $H$  и рассчитывались величины деформации  $f$  пневмоэлемента.

На основе проведенных экспериментальных исследований проводились численные эксперименты. При моделировании рассматривались различные типы поведения материала пневмобаллона, как линейные, так и нелинейные с учетом контактного взаимодействия упругой части с металлическими основаниями и верхней части крепления. Модель материала упругой части подбиралась посредством сопоставления результатов натурных и виртуальных испытаний, проведенных с применением различных моделей резины, таких как модели Муни-Ривлина, Халпин-Цая, Фрайзера-Нэша, Максвелла, Огдена и др.

При проведении численного эксперимента удалось достаточно корректно подобрать оптимальную модель описания материала, соответствующую экспериментальным данным.

По результатам испытаний были сделаны следующие заключения:

1. В результате испытаний пневморессоры 370-230 BL121 Taugus получены полуэмпирические зависимости жесткости  $C$  пневмоэлемента от деформации  $f$  в виде  $C = C_0 + \frac{\Delta G_f}{f}$ , и относительного коэффициента рассеяния энергии  $\Psi$  в зависимости от давления воздуха  $P_w$  в виде  $\Psi = 0,082 + 0,005 P_w^{1,9}$ .

2. Наибольшая жесткость пневморессоры выявлена при деформации  $f = 75$  мм в момент огибания, или перегиба, резинокордной оболочкой угла верхней горизонтальной плоскости и верхней конической поверхности на радиусе 12 мм. Для снижения жесткости необходимо увеличить радиус скругления до 30...45 мм. После огибания верхнего угла зависимость жесткости  $C$  от прогиба  $f$  рессоры имеет плавно падающую характеристику до удара в отбойник на всех исследованных рабочих давлениях воздуха от 1,0 до 5,0 bar.

3. Полученные плавные зависимости жесткости пневморессоры  $C$  от прогиба  $f$  позволяют сделать вывод о том, что плавность хода транспортного средства не будет зависеть от нагрузки на пневморессору при условии автоматической регулировки по давлению воздуха. Это является главным преимуществом пневморессор в сравнении с полуэллиптическими стальными рессорами, пружинами и торсионами.

4. При увеличении рабочего давления воздуха и увеличении нагрузки, коэффициенты рассеяния энергии  $\Psi$ , поглощения энергии  $\Psi_D$  и логарифмический декремент затухания  $\delta$  будут увеличиваться в степени 1,9 увеличения рабочего давления воздуха. Для магистральных транспортных средств автобусов и грузовых автомобилей резинокордная оболочка работоспособна на давлениях воздуха  $P_w = 5,6$  и  $7,0$  bar, так как ход рессоры имеет малую величину.

Для транспортных средств, работающих на бездорожье и армейских машин высокой проходимости, для повышения работоспособности пневморессоры необходимо стремиться к снижению рабочего давления воздуха до  $3,0 \div 4,0$  bar увеличением габаритов пневморессоры, то есть установкой более грузоподъемной рессоры.

5. Пневморессора 370-230 BL 121 Taurus, имея диапазон регулирования жесткости от 27,9 кН/м при рабочем давлении воздуха 1,0 bar до 142 кН/м при рабочем давлении воздуха 5,0 bar, обеспечивает по сравнению с рессорной, практически постоянную частоту колебаний от 1,6 до 1,1 Гц, независимо от нагрузки или степени заполнения автобуса пассажирами, имеет меньшую чувствительность к толчкам и вибрациям и лучшую защиту металлоконструкции рамы и корпуса автобуса от воздействия микропрофиля дороги.

6. Полученные упругодемпфирующие характеристики – петля гистерезиса (рисунок 2), зависимость коэффициента демпфирования от рабочего давления воздуха, характеристики радиальной жесткости, зависимости жесткости от различных давлений пневматической подушки и другие характеристики являются очень ценным материалом для расчета и оценки НДС конструкции и их динамической нагруженности и как следствие сопротивление усталости и трещиностойкости.

7. Все эти данные ценны при моделировании НДС элементов конструкции и машины в целом, служат для оптимизации надежности и прочности. Полученные результаты могут быть распространены для исследования и расчетной оценки НДС, динамической нагруженности других аналогичных конструкций мобильных машин. Момент инерции, коэффициент демпфирования и жесткость входят в уравнения Лагранжа и уравнение Даламбера, которые являются базовыми при оценке НДС и динамических свойств колебательной системы.

#### **Бibliографический список использованной литературы**

1. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин. — М.: Госстройиздат, 1960. — 122 с.
2. Проведение стендовых испытаний пневматического упругого элемента в виде резинокордной оболочки автобуса «Московит» // Отчет о НИОКР ОАО «ФИИЦ М» — ВНИИЦ 02201057221. — М., 2010. — 94 с.
3. Бочаров Н.Ф. Конструирование и расчет колесных машин высокой проходимости / Н.Ф. Бочаров, И.С. Цитович, А.А. Полунгян. — М.: Машиностроение, 1983. — 299 с.

*Поступила в редакцию 31.05.2011 г.*

#### **Годжаев З.А., Поповський А.А., Гончаренко С.В. Дослідження характеристик пневматичного пружного елемента рукавного типу в залежності від тиску повітря, перебігу та форми поршня**

Проведено дослідження пневматичної елемента рукавного типу Taurus BL121 370-230. Дано оцінку ефективності використання пневмоелементів рукавного типу в автобусах і вантажних автомобілях.

**Ключові слова:** підвіска пневматична, пневмоелементи рукавного типу, навантажувальна характеристика, петля гістерезису, коефіцієнт демпфування, жорсткість пневмоелементу.

#### **Godjajev Z.A., Popovskiy A.A., Goncharenko S.V. Research on the performance of the pneumatic elastic sleeve element depending on air pressure, piston stroke and form**

The research of the pneumatic element of the air bag-type Taurus VL121 370-230 is conducted. Evaluation of the effectiveness for pneumoelements of the sleeve-type is conducted in buses and trucks.

**Keywords:** air suspension, pneumoelement of sleeve-type, load characteristic, the hysteresis loop, damping, stiffness of a pneumoelement.