

УДК 539.373+621.7.044

З.А. Годжаев, д-р техн. наук

ОАО «Федеральный научно-исследовательский центр машиностроения» («ФНИЦ М»), г. Москва, Россия

Ф.А. Фараджев, канд. техн. наук

ОАО «ТМЗ» («Тушинский машиностроительный завод»), г. Москва, Россия

Е.А. Матвеев, канд. физ.-мат. наук

МГТУ «МАМИ», г. Москва, Россия

E-mail: fizuli_farajov@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
НЕЛИНЕЙНОГО ПНЕВМОУПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Цель исследования – проведение нелинейного статического анализа напряженно-деформированного состояния пневмоподушки городского автобуса «Московит», нагруженной внутренним давлением и обжимаемой вертикальной нагрузкой.

Ключевые слова: исследование, несущая система, пневмоупругий элемент, напряженно-деформированное состояние

Совершенствование конструкций современных транспортных средств (ТС) является актуальной и перспективной задачей автомобильной промышленности. При этом отечественное автомобилестроение заметно отстает от зарубежных производителей. Создание перспективных и современных методов расчета элементов и конструкций ТС позволит сократить время проектирования и, тем самым, ускорить процесс создания нового модельного ряда. Это поможет сократить отставание от зарубежных производителей и одновременно повысить уровень создаваемой автомобильной техники.

В работе представлены результаты исследования упругих и демпфирующих характеристик пневматической рессоры городского автобуса. Автобус давно уже стал одним из самых массовых видов пассажирского транспорта и, очевидно, таким останется в обозримом будущем. И в то же время автобусов постоянно не хватает, особенно в городах. Поэтому развитие автобусов идет по многим направлениям.

При моделировании рассматривались случаи нагружения подушки гидростатическим внешним давлением изнутри (давление пневмосистемы автобуса) и внешним осевым сжатием, соответствующим нагружению реального объекта (автобус с пассажирами).

На основе проведенных в ОАО «ФНИЦ М» стендовых испытаний пневматических упругих элементов, проводились численные эксперименты с использованием метода конечных элементов, реализованного в пакете MSC.Patran/Nastran/Marc. Для дискретизации математической модели использовались объемные конечные элементы второго порядка аппроксимации типа Solid. Конечно-элементная модель упругого элемента пневморессоры и нагрузки показана на рисунке. При моделировании рассматривались различные типы поведения материала пневмобаллона, в том числе нелинейные с учётом 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 и Огдена.

Общий вид геометрической модели пневмоподушки представлен на рисунке 1.

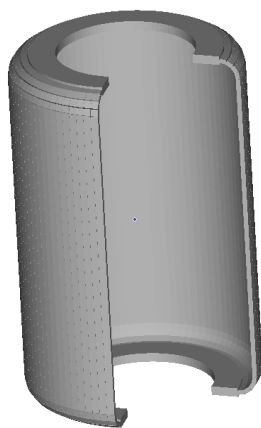


Рисунок 1 – Геометрия объекта

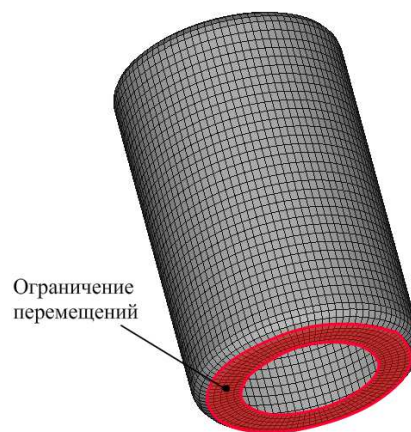


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель пневмоподушки с граничными условиями

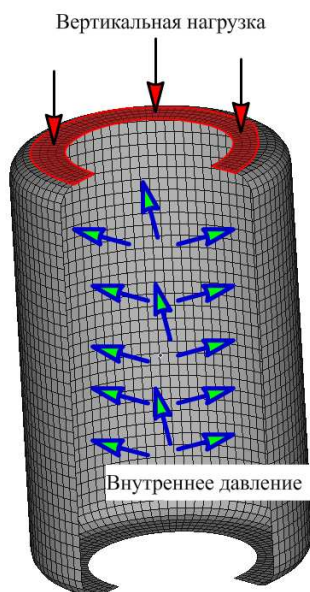


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель пневмоподушки с нагрузками

Модель пневмоподушки разбита на объёмные 8-ми узловые конечные элементы линейной аппроксимации, имеющие по 3 степени свободы в каждом узле. Степень дискретизации модели – порядка 6 тыс. конечных элементов, что позволяет производить анализ без привнесения ощутимой погрешности в расчёт.

Граничными условиями для рассматриваемой модели является ограничение перемещений нижней части пневмоподушки в местах крепления к балке через фланец – запрет линейных перемещений соответствующих узлов модели. Конечно-элементная модель пневмоподушки с граничными условиями представлена на рисунке 2.

В качестве вариантов нагружения рассматривались два силовых фактора вертикальная нагрузка сжатия, приходящаяся на верхнюю часть подушки от массы автобуса (с учётом массы пассажиров) и внутреннее давление в подушке.

Конечно-элементная модель пневмоподушки с приложенными нагрузками представлена на рисунке 3. Для дискретизации математической модели использовались объёмные конечные элементы второго порядка аппроксимации типа Solid.

Для описания свойств материала пневмоподушки (резины) обычно используется гиперупругая модель несжимаемого материала, основанная на уравнениях Муни-Ривлина:

$$U(J_1, J_2) = \sum_{i+j=1} A_{ij} (J_1 - 3)^i (J_2 - 3)^j,$$

где энергия деформации U выражается через первый J_1 и второй J_2 инварианты деформаций, с введением упругих констант материала A_{10} и A_{01} . Последние связаны с модулем сдвига в пределах указанных деформаций $2(A_{01} + A_{10}) = G$.

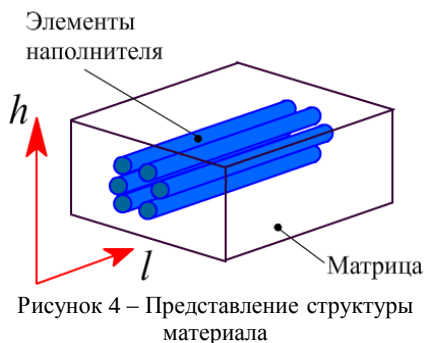


Рисунок 4 – Представление структуры материала

Однако для рассматриваемого случая, когда материал пневмоподушки представляет собой анизотропный материал, который рассматривается в настоящей работе, такой подход не является удовлетворительным. При рассмотрении материала как композитного, с матрицей с резиновым наполнителем предлагается методика, основанная на подходе Хальпин-Цая. В этом случае в рассматриваемый композиционный материал (см. рисунок 4) вводят дополнительные элементы наполнителя, свойства которого отличаются от свойств самой резины.

Для расчёта необходимых констант использовалось уравнение смещения в виде:

$$P_c = \xi(P_f v_f + P_m v_m). \quad (1)$$

В этом случае уравнение Хальпин-Цая будет записано в виде:

$$P = P_m \frac{(1 + \xi \eta v_f)}{(1 - \eta v_f)}, \quad \text{где } \eta = \frac{(P_f - P_m)}{(P_f + \xi P_m)}, \quad (2)$$

где P представляют собой упругие свойства композита – модули упругости, коэффициенты Пуассона и сдвиговые модули для матрицы и заполнителя. Используя уравнение смещения (1) и, приняв эмпирический коэффициент $\xi = 1$, получим уравнения, по структуре совпадающие с (2):

$$E_h = E_{hm} \frac{(1 + \xi \eta v_f)}{(1 - \eta v_f)}, \quad \text{где } \eta = \frac{(E_{hf} - E_{hm})}{(E_{hf} + \xi E_{hm})},$$

здесь E_{hm} – поперечный модуль упругости матрицы, E_{hf} – поперечный модуль упругости элементов заполнителя. Эмпирические коэффициенты для E_h , G_{lh} , G_{hh} можно вычислить по следующим формулам:

$$\xi_{E_h} = 2 + 40v_f^{10}, \quad \xi_{G_{lh}} = 1 + 40v_f^{10}, \quad \xi_{G_{hh}} = \frac{1}{(4 - 3v_m)},$$

где v_m – коэффициент Пуассона связующего, рассматриваемый как изотропный материал.

На рисунке 5 представлены распределения деформаций в пневмоподушке, находящейся в условиях описанного нагружения. Максимальная величина деформаций – 2,6 мм в верхней части пневмоподушки.

На рисунке 6 представлено распределение эквивалентных напряжений (по гипотезе Мизеса). Максимальные напряжения соответствуют области посадки пневмоподушки на нижнюю опору и не превышают 100 МПа.

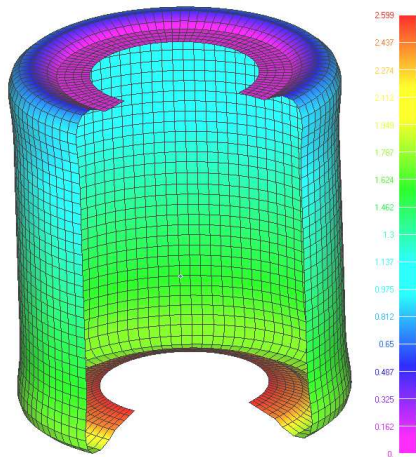


Рисунок 3 – Распределение деформаций в пневмоподушке, мм

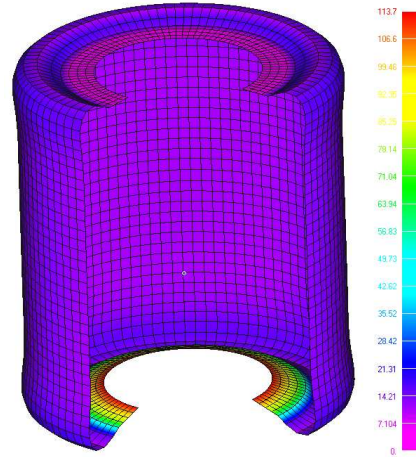


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений, МПа.

С целью исследования эксплуатационных характеристик пневматического рукавного элемента щелкающего типа размерности 370-230 и оценки эффективности использования данного пневмоэлемента в ОАО «ФииЦ М» были проведены натурные испытания.

Объектом исследования являлся пневматический резинокордный рукавный элемент диафрагменного типа Taurus 370-230, показанный на рисунке 7. Пневматическая рессора предназначена для эксплуатации в подвесках автобусов, грузовых автомобилях и других транспортных средствах с полной массой свыше 10 тонн. Допускается эксплуатация во всех климатических зонах при температуре окружающей среды от -45°C до $+55^{\circ}\text{C}$. Давление соответствующее статической нагрузке в рабочем положении $5,0 \pm 0,5 \text{ кгс/см}^2$. Давление соответствующее максимальной нагрузке в рабочем положении $7,0 \pm 0,5 \text{ кгс/см}^2$.

В качестве испытательной установки использовался стенд для испытаний шин СИБ-1М ОАО «ФииЦ М», переоборудованный под испытания пневморессор.

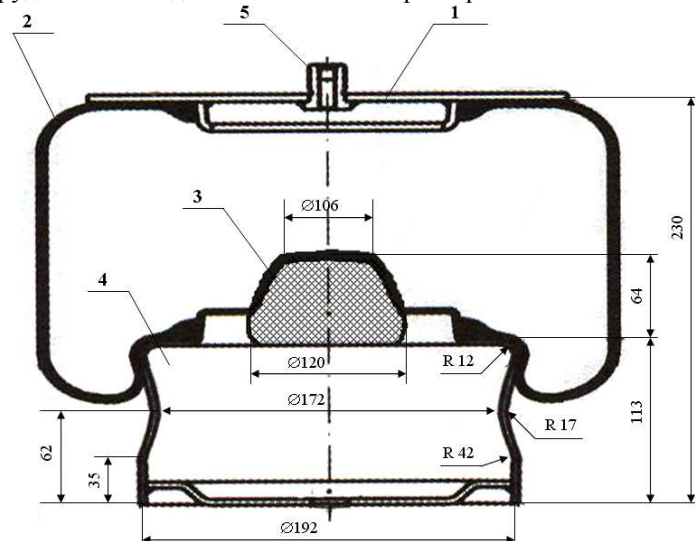


Рисунок 7 – Вид рукавного пневматического элемента Taurus 370-230 в разрезе.

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

Для определения программы испытаний и вариантов нагружения проводилась предварительная обжимка пневморессоры на давлениях воздуха $P_w = 1 \text{ бар}$ в самом верхнем устойчивом положении рессоры, в среднем рабочем положении, когда поршень вдавливался до уровня минимального диаметра,

и в самом нижнем положении, когда верхняя крышка касалась отбойника. Аналогичные положения реализовывались для внутреннего давления воздуха $P_w = 3 \text{ bar}$ и $P_w = 5 \text{ bar}$.

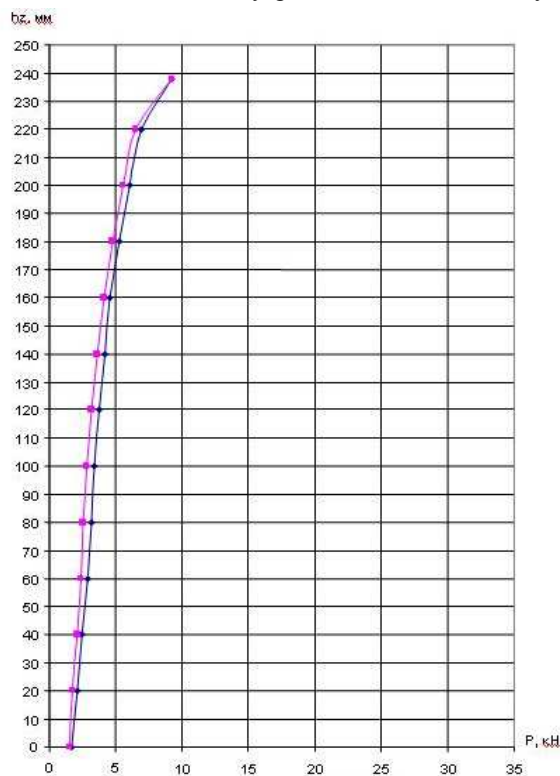


Рисунок 8 – Петля гистерезиса рукавного пневмоэлемента щелкающего типа модели Taurus 370-230 при рабочем давлении воздуха $P_w = 1,0 \text{ bar}$

нагрузка
разгрузка

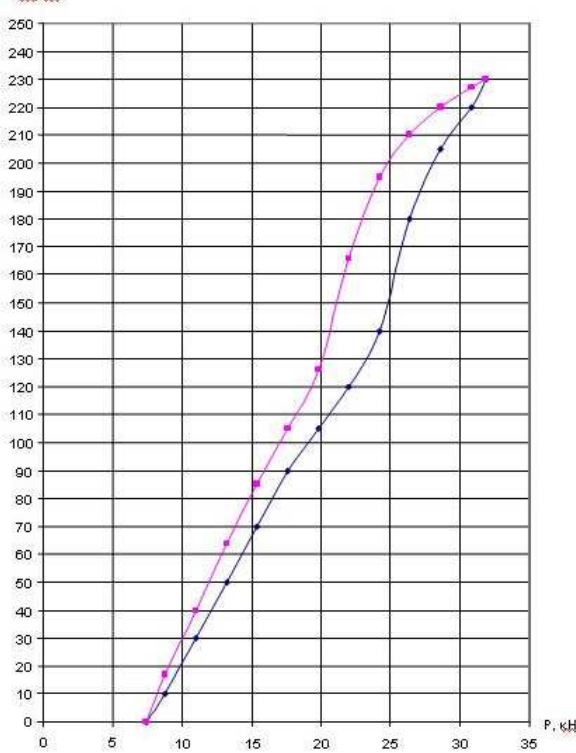


Рисунок 10 – Петля гистерезиса рукавного пневмоэлемента щелкающего типа модели Taurus 370-230 при рабочем давлении воздуха $P_w = 5,0 \text{ bar}$

нагрузка
разгрузка

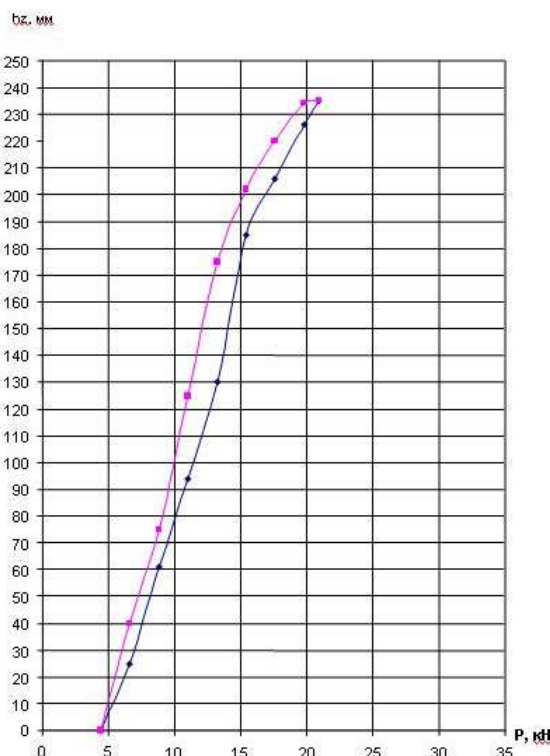


Рисунок 9 – Петля гистерезиса рукавного пневмоэлемента щелкающего типа модели Taurus 370-230 при рабочем давлении воздуха $P_w = 3,0 \text{ bar}$

нагрузка
разгрузка

Рабочее положение определялось по среднестатистическому предварительному поджатию пневмоэлементов из практики заводских и лабораторных испытаний, которое для рукавного типа составляет 77 % от максимальной деформации.

Для данного рукавного пневмоэлемента оно составляет

$$f_{раб} = 240 - 0,77 \cdot 240 = 55 \text{ мм} (H_{раб} = 385 \text{ мм}).$$

Это положение выбрано в качестве рабочего при котором и устанавливалось давление воздуха. При установке рабочего давления $P_w = 5 \text{ bar}$ конечное давление составляет $P_m^{max} = 8,6 \text{ bar}$. Это превышает предельно допустимое давление $P_{w\text{дон}} = 7 \text{ bar}$, поэтому положение $H_{раб} = 385 \text{ мм}$ и $P_{w\text{раб}} = 5 \text{ bar}$ можно считать максимально допустимым для проведения испытаний.

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

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

где 0,082; 0,005 $[\text{bar}]^{-1,9}$; 1,9 – постоянные для

пневмоэлемента 370-230 коэффициенты; P_w [bar] – рабочее давление воздуха в пневмоэлементе.

Коэффициент поглощения энергии Ψ_L , логарифмический декремент затухания δ и относительный коэффициент рассеяния энергии Ψ связаны между собой зависимостью в соответствии с работой [1].

Протокол снятия «нагрузки-разгрузки» пневморессоры приведен в таблице 1. При этом:

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

Таблица 1 – Протокол испытаний пневморессоры 370-230 BL121 Taurus

$P_w=1,0$ bar						$P_w=3,0$ bar					
μA		μA	f , мм	H , мм	G_z , кН			f , мм	H , мм	G_z , кН	
н	р	н	р	н	р	н	р			н	р
7,5	20	0	0	440	440	4,4	7	0	440	1,65	1,54
9,5	30	25	40	415	400	6,6	8	20	420	2,09	1,76
11	40	61	75	379	365	8,8	9,4	40	400	2,42	2,07
13	50	94	125	346	315	11,0	10,8	60	380	2,86	2,38
14,5	60	130	175	310	265	13,2	11,4	80	360	3,19	2,51
15,5	70	185	202	255	238	15,4	12,7	100	340	3,41	2,79
17	80	206	220	234	220	17,6	14,3	120	320	3,74	3,15
19	90	226	234	214	206	19,8	16,3	140	300	4,18	3,59
20,5	95	235		205		20,9	18,5	160	280	4,51	4,07
23,8							21,5	180	260	5,24	4,73
27,4							25,3	200	240	6,03	5,57
31,5							29,5	220	220	6,93	6,49
42								238	202	9,24	
$P_w=4,0$ bar						$P_w=5,0$ bar					
μA	f , мм		H , мм		G_z , кН	μA	f , мм		H , мм		G_z , кН
	н	р	н	р	н		н	р	н	р	н
28	0	5	440	435	6,2	34	0	0	440	440	7,48
40	30	35	410	405	8,8	40	10	17	430	423	8,8
50	50	55	390	385	11,0	50	30	40	410	400	11
60	75	90	365	350	13,2	60	50	64	390	376	13,2
70	100	110	340	330	15,4	70	70	85	370	355	15,4
80	116	152	324	288	17,6	80	90	105	350	335	17,6
90	145	192	295	248	19,8	90	105	126	335	314	19,8
100	195	207	245	233	22,0	100	120	166	320	274	22
110	210	220	230	220	24,2	110	140	195	300	245	24,2
120	220	231	220	209	26,4	120	180	210	260	230	26,4
125	232		208		27,5	130	205	220	235	220	28,6
						140	220	227	220	213	30,8
						145	230		210		31,9

н – нагрузка;

р – разгрузка;

μA – показания тарированного прибора I класса.

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 11 и 12).

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

$$C = \frac{\Delta G_z}{\Delta H_z} = \frac{\Delta G_z}{\Delta f}, \left[\frac{\text{кН}}{\text{м}} \right]$$

где ΔG_z – приращение нормальной нагрузки на пневмоэлемент, [кН]; ΔH_z – приращение хода сжатия, [м]; Δf – приращение осевой деформации пневмоэлемента, [м].

Зависимости осевой жесткости C пневмоэлемента рукавного типа при переменных рабочих давлениях воздуха от деформации f приведены на рисунке 13. Анализ формы кривой $C = \beta(f)$ позволяет представить ее в виде эмпирической зависимости

$$C = C_o + \frac{\Delta G_f}{f}, \text{ кН/м}$$

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 ; ΔG_f – постоянная величина для данного рукавного пневмоэлемента, имеющая размерность силы [кН] при фиксированном рабочем давлении P_W ; f – осевая деформация пневмоэлемента, [м].

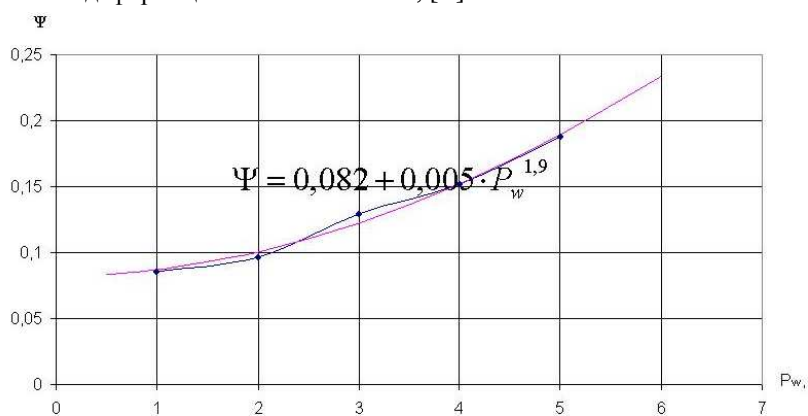


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента демпфирования рукавного пневматического элемента Taugus 370-230 от давления воздуха

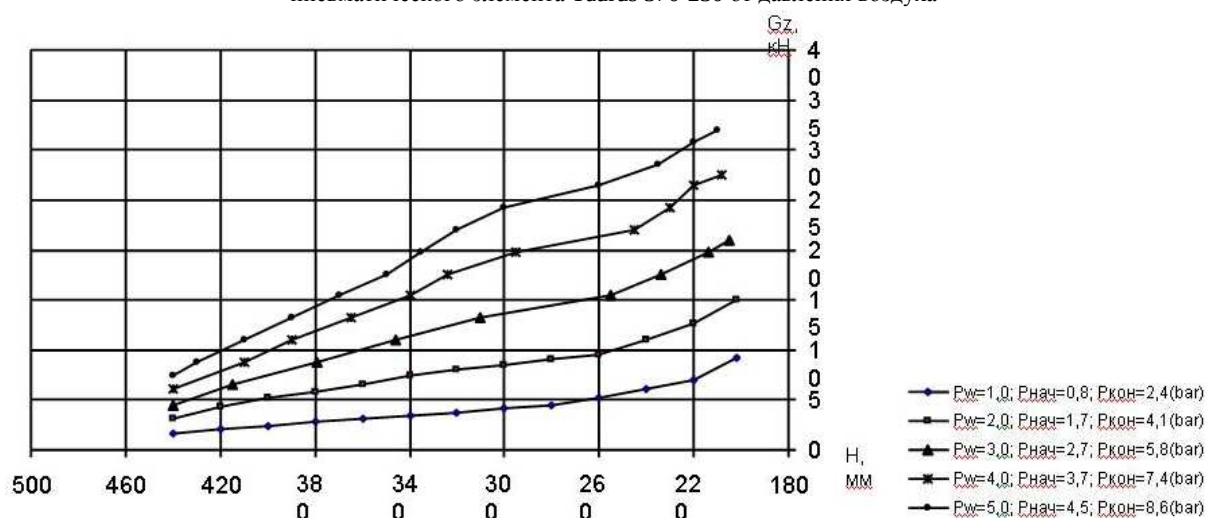


Рисунок 12 – Нагрузочная характеристика рукавного пневмоэлемента щелкающего типа модели Taugus размера 370-230

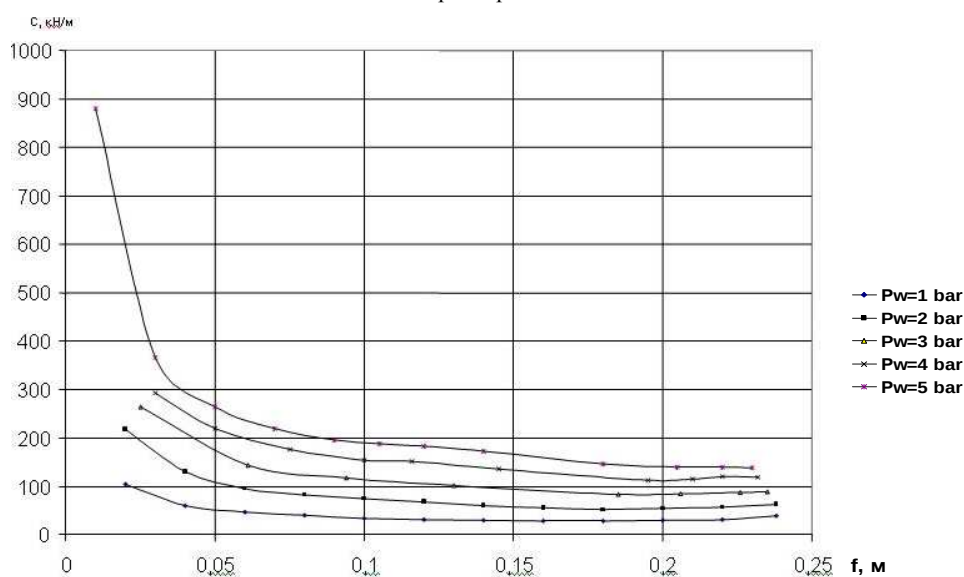


Рисунок 13 – Зависимость радиальной жесткости рукавного пневматического элемента 370-230 от радиальной деформации при переменных давлениях воздуха

Графики зависимостей $C = \beta(f)$ в численном виде после математической обработки приведены на рисунках 14 – 16. Зависимости внедрения характерных точек поршня в рукавный пневмоэлемент (РПЭ) при различных рабочих давлениях воздуха приведены в таблице 2.

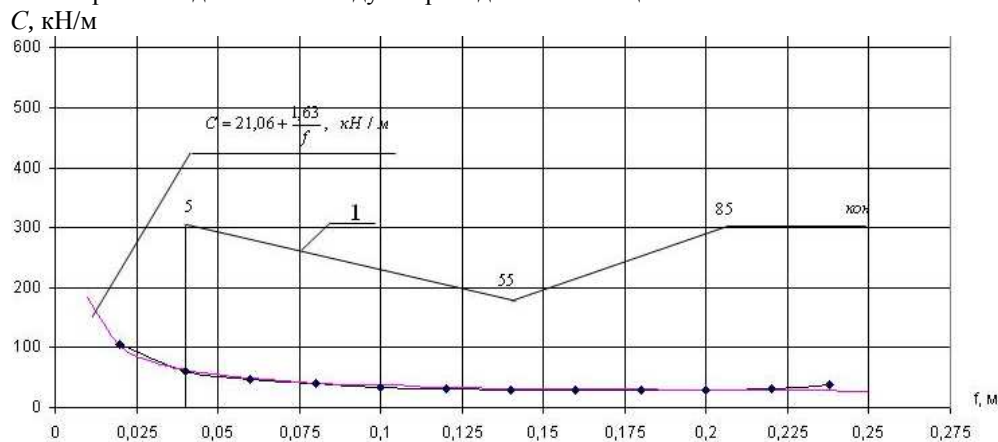


Рисунок 14 – График зависимости жесткости рукавного пневматического элемента щелкающего типа модели Taurus размера 370-230 от прогиба, при $P_w = 1,0$ bar:

1 – упрощенная форма поршня; 5, 55, 85, кон – координаты характерных точек поршня

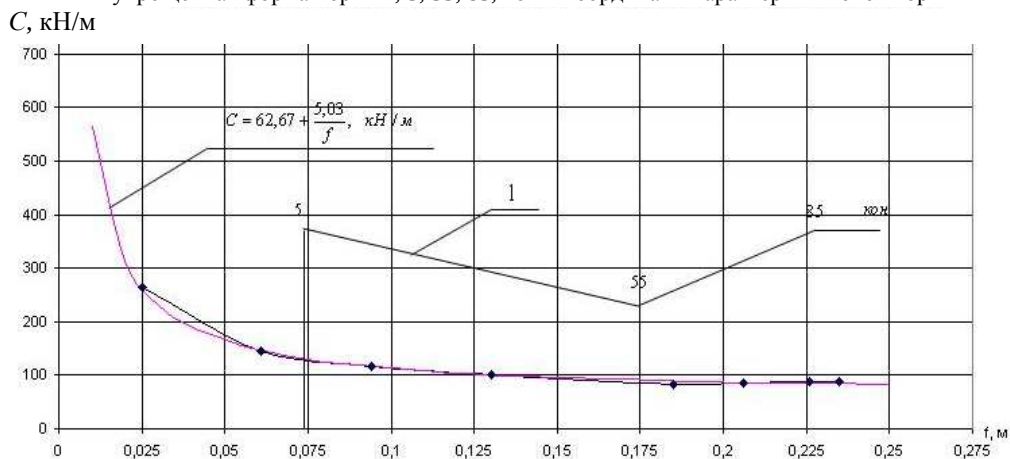


Рисунок 15 – График зависимости жесткости рукавного пневматического элемента щелкающего типа модели Taurus размера 370-230 от прогиба, при $P_w = 3,0$ bar:

1 – упрощенная форма поршня; 5, 55, 85, кон – координаты характерных точек поршня

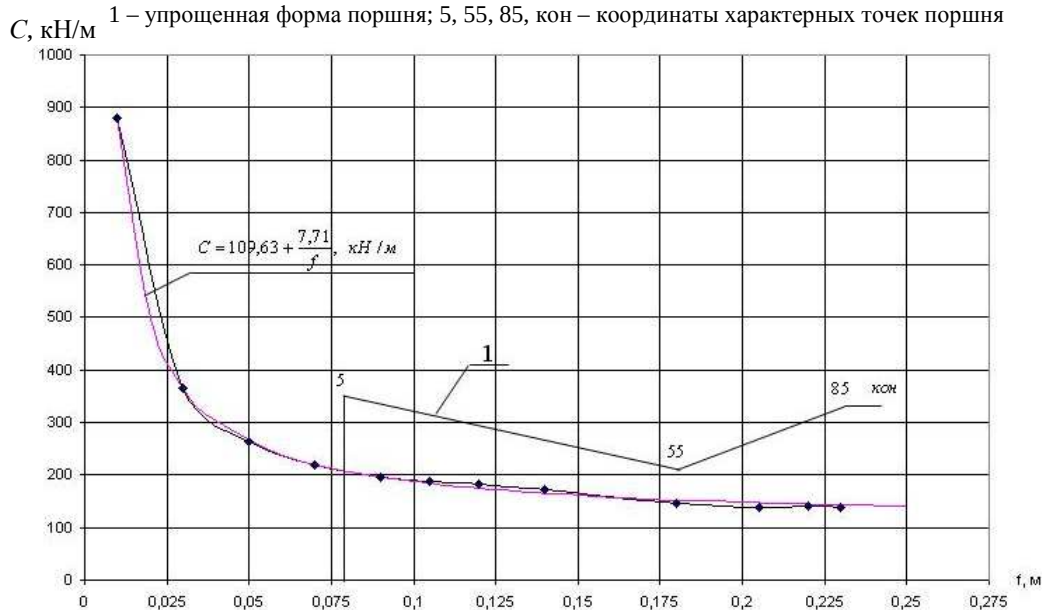


Рисунок 16 – График зависимости жесткости рукавного пневматического элемента щелкающего типа модели Taurus размера 370-230 от прогиба, при $P_w = 5,0$ bar:

1 – упрощенная форма поршня; 5, 55, 85, кон – координаты характерных точек поршня

Таблица 2 – Зависимости внедрения характерных точек поршня в рукавный пневмоэлемент (РПЭ) при различных рабочих давлениях воздуха

		$P_w = 1 \text{ bar}$				$P_w = 3 \text{ bar}$				$P_w = 5 \text{ bar}$			
Координаты точек поршня, мм		5	55	85	кон	5	55	85	кон	5	55	85	кон
Величина сжатия РПЭ	H_1 , мм	400	295	231	190	367	265	215	209	364	259	209	203
	H_2 , мм	400	295	231	192	365	265	214	200	360	258	209	202
	H_3 , мм	401	296	230	190	365	264	214	199	359	258	208	202
	H_4 , мм	400	294	230	190	366	265	213	199	360	258	209	202
Средняя величина сжатия РПЭ, H_{cp} , мм		400,3	295,0	230,5	190,5	365,8	264,8	214,0	201,8	360,8	258,3	208,8	202,3
Радиальная деформация РПЭ, f_{cp} , м		0,040	0,145	0,210	0,250	0,074	0,175	0,226	0,238	0,079	0,182	0,231	0,238

Заключение

Полученные результаты подтверждают как качественное, так и количественное соответствие между экспериментом и компьютерными расчетами. Таким образом, при проведении численного эксперимента удалось достаточно корректно подобрать оптимальную модель описания материала пневмоподушки городского автобуса в виде анизотропного нелинейного материала, соответствующую экспериментальным данным. Построенная модель может быть успешно применена при проектировании пневмоэлементов для новых транспортных средств как пассажирского, так и грузового назначения. Применение полученной модели позволит заметно сократить время производства новых модификаций, что снизит себестоимость продукции и сделает ее конкурентоспособной с зарубежными аналогами.

Библиографический список использованной литературы

1. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин. — М.: Госстройиздат, 1960. — 122 с.
2. Фараджев Ф.А. Некоторые процедуры выбора эффективной технологии производства рамы несущей системы автотранспортного средства / Ф.А. Фараджев, З.А. Годжаев, Ю.К. Сычев. — М., 2005. — 28 с. — Деп. в ВИНТИ 05.12.05, № 1592 – В 2005. (Рукопись представлена Федеральным исследовательским испытательным центром машиностроения)
3. Фараджев Ф.А. Многокритериальный выбор рациональных вариантов конструктивно-технологических решений рам транспортных средств на стадии проектирования (на примере автобуса «Московит»); дис... канд. техн. наук / Ф.А. Фараджев. — М., 2006. — 312 с.

Поступила в редакцию 20.03.2012 г.

Годжаев З.А., Фараджев Ф.А., Матвеев Є.А. Дослідження напружено-деформованого стану нелінійного пневмопружного елементу системи транспортних засобів, що несе

Мета дослідження – проведення нелінійного статичного аналізу напружено-деформованого стану пневмоподушки міського автобуса «Московит», навантаженої внутрішнім тиском та одтисненим вертикальним навантаженням.

Ключові слова: дослідження, система, що несе, пневмопружний елемент, напружено-деформований стан.

Godzhaev Z.A., Faradzhev F.A., Matveev E.A. The search of the deformed condition of an air element of bearing system of vehicles

The purpose of the real work is to carry out the nonlinear behavior analysis of intense the deformed condition of a cushion of the city bus «Moskovit» which is loaded with an internal pressure and pressed out by vertical loading serves.

Keywords: bearing system, deformed condition, air element.