

УДК 629.1.032

**В. В. ДУЩЕНКО**, д-р. техн. наук, проф. НТУ «ХП»;

**О. М. АГАПОВ**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХП»

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ДВОСТУПІНЧАСТИХ ПНЕВМОГІДРАВЛІЧНИХ РЕСОР СИСТЕМ ПІДРЕСОРИЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Пропонується методика розрахунку заправних тисків і об'ємів пневмоциліндрів та побудови пружних характеристик двоступінчастих пневмогідролічних ресор підвіски транспортних засобів, відповідно до необхідної приведеної жорсткості та з урахуванням змінної величини силового та кінематичного чисел підвіски. Методика дозволяє підвищити точність розрахунків параметрів ресор та забезпечити розташування власних частот коливань підресореного корпусу у необхідних межах, що позитивно позначиться на плавності ходу транспортного засобу.

**Ключові слова:** транспортний засіб, пневмогідролічна ресора, приведена жорсткість підвіски, заправний тиск, заправний об'єм, силове передатне число, кінематичне передатне число.

**Вступ.** Суперечливість вимог, що зростають, які висуваються до підвісок транспортних засобів, викликає, поряд з удосконаленням традиційних пружних елементів (ресор, пружин, торсіонів), необхідність застосування пневматичних пружних елементів та розробки методик їх розрахунку.

**Аналіз останніх досліджень.** На цей час, при розрахунках параметрів та характеристик пневмогідролічних ресор (ПГР) підвіски транспортних засобів використовуються або досить спрощені методики [1,2], що забезпечують попередній вибір параметрів з подальшим їх уточнення в процесі стендових та натурних випробувань, або складні математичні моделі, призначені для проведення параметричної оптимізації [3,4].

**Постановка проблеми.** Актуальною є проблема розробки методик знаходження параметрів та побудови характеристик ПГР, що дозволяє інженерам-конструкторам, без застосування складного математичного апарату, доволі точно розраховувати та оцінювати вплив тих чи інших параметрів ПГР і забезпечувати необхідну плавність ходу транспортного засобу.

**Результати досліджень.** Розглянемо методику, що пропонується, на прикладі розрахунку параметрів та характеристик двоступінчастої ПГР гусеничної машини із наступними вихідними даними: підресорена вага машини  $G_n = 42000$  кг, момент інерції підресореного корпусу машини відносно поперечної вісі, що проходить через ц.в.  $I_y = 16000$  кг·м<sup>2</sup>, коефіцієнт динамічності підвіски  $K_\delta = 5$ , динамічний хід підвіски  $h_\delta = 0,32$  м, число опорних котків одного борту  $NK = 6$ , довжина опорної поверхні гусениці  $L = 4$  м, радіус опорного котка  $R_k = 0,33$  м, довжина балансира  $R = 0,38$  м, довжина важеля балансира  $r_\delta = 0,17$  м, кут між балансиром і важелем  $\xi = 120^\circ (2,0944)$ , кут між балансиром і горизонталлю у статичному стані  $\beta = 30^\circ$ ,  $L_n = 0,5$  м,  $H_n = 0,3$  м. Підвіску будемо вважати симетричною, виставку всіх котків однаковою. Отже, у цьому випадку, приведені жорсткості підвісок  $C_{ni}$  також будуть однаковими і рівними  $C_n$ .

Принципова схема даної ПГР представлена на рис. 1. Робота підвіски відбувається наступним чином. При русі котка нагору (прямий хід) поршень 3 витісняє робочу рідину з порожнини гідроциліндра 4, по двом трубопроводам 5, через золотникові розподільники 6, отвори 8, у порожнини 1-го та 2-го пневмоциліндрів, що

мають відповідно поршні-роздільники 1 і 2. При цьому стискується газ спочатку в 1-му пневмоциліндрі, а потім і у 2-му, де заправний тиск у два-три рази вищий. Спрацьовування клапана амортизатора 7 відбувається при певному перепаді тиску  $p_1$  і  $p_2$ . На зворотньому ході, під дією енергії, що запасена стисненим газом, відбувається витиснення робочої рідини з порожнин 2-го та 1-го пневмоциліндрів у порожнину гідроциліндра 4, причому з 2-го пневмоциліндра робоча рідина витісняється тільки через отвори 8. Таким чином, робота підвіски забезпечується за допомогою пружних елементів – пневмоциліндрів, а демпфірування коливань корпусу машини здійснюється при перетіканні робочої рідини по трубопроводах, золотникових розподільниках, через отвори 8 та клапан амортизатора 7.

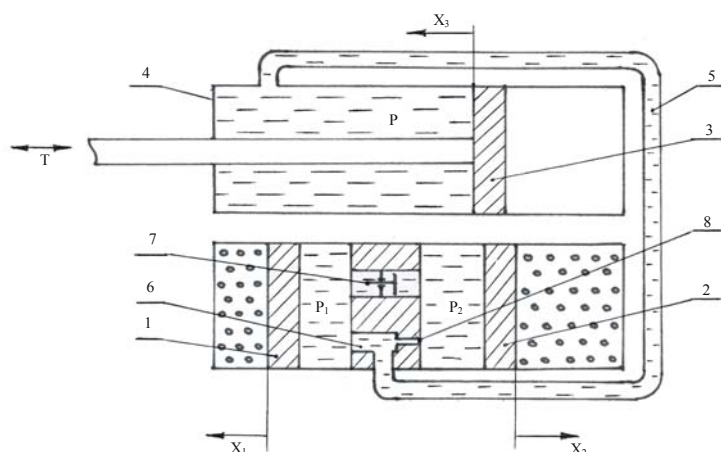


Рисунок 1 – Принципова схема двоступінчастої ПГР:

1,2 – поршні-роздільники; 3 – поршень гідроциліндра; 4 – гідроциліндр;  
5 – трубопровід; 6 – золотниковий розподільник; 7 – клапан амортизатора;  
8 – отвір

1. Визначимо можливі межі зміни приведеної жорсткості підвіски  $C_n$  в статичному положенні та виберемо її попереднє значення, виходячи із припустимих меж зміни власних частот  $n_z$  і  $n_\varphi$  вертикальних і повздожньо-кутових коливань підресореного корпусу, які з ергономічних вимог повинні знаходитися у межах 0,8...2,0Гц. Припустимий діапазон кругових частот буде

$$n_z, n_\varphi = 0,8 \dots 2 \text{ Гц}; \Rightarrow \omega_z, \omega_\varphi = 2\pi(0,8 \dots 2) = 5 \dots 12,6 \text{ с}^{-1}.$$

Оскільки, підвіска симетрична, відстань між котками буде дорівнювати  $L/(NK-1) = 4/(6-1) = 0,8$  м, а масив відстаней від ц.в. до вісей котків по горизонталі (значення береться з "+" до носа машини і з "-" до корми) буде мати такі значення:  $l_k$  (2,0, 1,2, 0,4, -0,4, -1,2, -2,0).



**б)** Визначимо величину переміщення поршня гідроциліндра  $X_{3CT}$ , що відповідає статичному ходу підвіски.

$$X_{3CT} = B_{CT}O_1 - B_1O_1 \quad (4)$$

По теоремі косинусів

$$\begin{aligned} B_{CT}O_1 &= \sqrt{r_6^2 + OO_1^2 - 2 \cdot r_6 \cdot OO_1 \cdot \cos(\gamma_o + \psi_o)}; \\ B_1O_1 &= \sqrt{r_6^2 + OO_1^2 - 2 \cdot r_6 \cdot OO_1 \cdot \cos(\gamma_o)}. \end{aligned} \quad (5)$$

де  $OO_1 = \sqrt{L_{II}^2 + H_{II}^2} = 0,583 \text{ м}; \quad \gamma_o = \xi - \psi_o - \beta - \arctg \frac{H_{II}}{L_{II}} = 40,22^\circ$ . (6)

Кут  $\gamma_o$  відповідає повністю засунутому штоку ПГР.

Тоді:  $B_{CT}O_1 = 0,516 \text{ м}; B_1O_1 = 0,466 \text{ м}; \Rightarrow X_{3CT} = 0,516 - 0,466 = 0,05 \text{ м}$ .

**в)** Визначимо величину  $X_{3II}$  переміщення поршня гідроциліндра при реалізації повного ходу підвіски  $h_{CT} + h_\delta$ .

$$X_{3II} = B_2O_1 - B_1O_1 = \sqrt{r_6^2 + OO_1^2 - 2 \cdot r_6 \cdot OO_1 \cdot \cos(\gamma_o + \psi_o + \beta + \beta')} - B_1O_1, \quad (7)$$

де  $\beta' = \arcsin\left(\frac{h_\delta}{R} - \sin\beta\right) = 20^\circ$ . Тоді  $X_{3II} = 0,658 - 0,466 = 0,192 \text{ м}$ .

**г)** Знайдемо силове  $i_C$  та кінематичне  $i_K$  передатні числа підвіски

$$i_C = \frac{R \cdot \cos(\psi_o + \beta - \psi_K)}{r_6 \cdot \sin\alpha}; \quad i_K = \frac{h_K}{X_3}. \quad (8)$$

Розташування кутів  $\psi_K$  і  $\alpha$  зрозуміло з рис. 2. Використовуючи теорему косинусів, визначимо, що  $\alpha = \arccos\left(\frac{r_6^2 + BO_1^2 - OO_1^2}{2 \cdot r_6 \cdot BO_1}\right)$ , (9)

де  $BO_1$  вираховується по формулі (5), куди замість кута  $\psi_o$  підставляється кут  $\psi_K$ .

Тоді  $X_3 = BO_1 - B_1O_1$ .

Задаючи послідовно значення кута  $\psi_K$ , побудуємо графіки зміни передатних чисел  $i_C$  і  $i_K$ , в залежності від ходу котка  $h_K$ , враховуючи, що

$$h_K = R [\sin(\psi_o + \beta) - \sin(\psi_o + \beta - \psi_K)]. \quad (10)$$

Із зазначених графіків, які представлено на рис. 3 випливає, що передатні числа в процесі реалізації повного ходу котка збільшуються в 1,25 та 1,4 рази. Таким чином, у подальших розрахунках необхідно використовувати їх змінну величину.

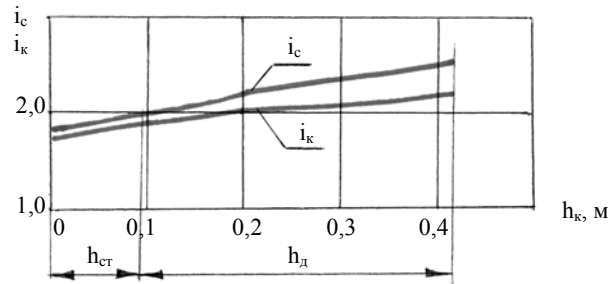


Рисунок 3 – Залежність силового та кінематичного передатних чисел підвіски від ходу котка

3. Визначимо площу  $F$  та діаметр  $D_n$  поршня гідроциліндра, виходячи з заданих коефіцієнта динамічності та максимального допустимого тиску.

$$N_{CT} = \frac{G_n}{2 \cdot N_K} = 34,34 \text{ кН}; \quad N_{max} = K_o \cdot N_{CT} = 171,7 \text{ кН}.$$

Максимальне зусилля на штоці ПГР буде  $T_{max} = N_{max} \cdot i_c = 431 \text{ кН}$ , де значення  $i_c$ , як і в наступних випадках, визначається в залежності від ходу підвіски за графіком, що зображений на рис. 3. Тоді

$$F = \frac{T_{max}}{[p_{max}]} = 0,0123 \text{ м}^2; \quad D_n = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}} = 0,125 \text{ м},$$

де  $[p_{max}] = 35 \text{ МПа}$  – тиск, що допускається за умов працездатності ущільнень.

4. Визначимо заправні об'єм  $V_{01}$  та тиск  $p_{01}$  1-го пневмоциліндра.

Запишемо закон політропної зміни стану газу:  $pV^n = const$ .

Тут:  $p$  – тиск,  $V$  – об'єм,  $n$  – показник політропи, який для азоту змінюється в межах від 1,0 при дуже повільному стиску-розширенні та повному теплообміні з навколишнім середовищем (ізотермічний процес), до 1,4 при дуже швидкому стиску-розширенні і повній відсутності теплообміну з навколишнім середовищем (адіабатичний процес). Останній випадок відповідає швидкому підйому котка при наїзді на нерівність з великою швидкістю. Зазвичай, у практичних розрахунках при роботі ПГР у динаміці, в залежності від конструкції, використовують постійне значення  $n$  у межах 1,2...1,3.

Знайдемо тиск  $p_{CT}$  і об'єм  $V_{CT}$  1-го пневмоциліндра в статичному положенні.

$$p_{CT} = \frac{T_{CT}}{F} = \frac{N_{CT} \cdot i_c}{F} = 5,58 \text{ МПа}.$$

Щоб визначити  $V_{CT}$ , запишемо у прирістах вираз для заданої приведеної жорсткості підвіски  $C_{п.ст.}$  в окрузі статичного ходу  $C_{п.ст.} = \frac{\Delta N}{\Delta h_K} = 200 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$ .

Нехай  $\Delta h_K = 0,01 \text{ м}$ . Тоді  $\Delta N = C_{п.ст.} \cdot \Delta h_K = 2 \text{ кН}$ .

Запишемо для даного випадку закон політропної зміни стану газу, прийнявши  $n = 1,0$ .

$$p_{CT} \cdot V_{CT} = p^* V^*,$$

де  $p^* = p_{CT} + \Delta p^* = \frac{(N_{CT} + \Delta N) \cdot i_C}{F} = 5,91 \text{ МПа};$

$$V^* = V_{CT} - \Delta V^*; \quad \Delta V^* = \frac{\Delta h_K}{i_K} \cdot F = 64,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Тоді  $V_{CT} = \frac{p^* \cdot \Delta V^*}{p^* - p_{CT}} = \frac{5,91 \cdot 64,7 \cdot 10^{-6}}{5,91 - 5,58} = 1159 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$

З іншого боку  $V_{CT} = V_{01} - \Delta V; \quad \partial e \quad \Delta V = F \cdot X_{3CT} = 615 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$

Тоді

$$V_{01} = V_{CT} + \Delta V = 1774 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3; \quad p_{01} = \frac{p_{CT} \cdot V_{CT}}{V_{01}} = 3,65 \text{ МПа}.$$

5. Знайдемо заправні об'єм  $V_{02}$  та тиск  $p_{02}$  2-го пневмоциліндра. Визначимо динамічний хід підвіски  $h'_0$ , при якому повинен почати роботу 2-й пневмоциліндр, виходячи з умови, що приведена жорсткість підвіски наприкінці роботи тільки 1-го пневмоциліндра (його об'єм і тиск у цей момент будуть відповідно дорівнювати  $V'_K$  та  $p_K$ ), не повинна перевищити  $555,7 \frac{\kappa H}{M}$ , при показнику політропи  $n = 1,4$ . Для цього побудуємо пружну характеристику підвіски у випадку роботи тільки 1-го пневмоциліндра, скориставшись наступними залежностями

$$N = \frac{T}{i_C} = \frac{p \cdot F}{i_C}; \quad p = p_{01} \left( \frac{V_{01}}{V} \right)^{1,4} = p_{01} \left( \frac{V_{01}}{V_{01} - X_3 F} \right)^{1,4}; \quad X_3 = \frac{h_K}{i_K}. \quad (11)$$

Задаючи з певним кроком величину ходу підвіски  $h_K$ , і послідовно обчислюючи вирази (11), можна отримати відповідне значення  $N$  вертикальної реакції на котку та побудувати пружну характеристику, що представлена на рис. 4. Тангенс кута нахилу дотичної, що відповідає жорсткості  $C_{II} = 555,7 \frac{\kappa H}{M}$ , у прийнятому масштабі  $N$  та  $h_K$ , буде дорівнювати

$$\text{tg } \alpha = \frac{55,57}{50} \Rightarrow \alpha = 48^\circ.$$

Під отриманим кутом  $\alpha$ , проведемо дотичну до пружної характеристики і визначимо точку  $A$ , до якої приведена жорсткість не перевищить задану величину. Їй буде відповідати динамічний хід підвіски  $h'_0 = 0,052 \text{ м}$ .

Знайдемо об'єм  $V'_K$  та тиск  $p_K$ , що відповідають точці  $A$ .

$$V'_K = V_{01} - \frac{h_{CT} + h'_0}{i_K} \cdot F = 835,65 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3; \quad p_K = p_{01} \left( \frac{V_{01}}{V'_K} \right)^{1,4} = 10,47 \text{ МПа}. \quad (12)$$



$$N = \frac{T}{i_c} = \frac{p_T F}{i_c}; \quad p_T = p_{02} \left( \frac{V_{02} + V'_K}{V_T} \right)^n; \quad V_T = V_{02} + V'_K - \left( \frac{h_K}{i_K} - \frac{h_{CT} + h'_0}{i_K} \right) F, \quad (15)$$

де передатні числа  $i_c$  та  $i_K$  беруться відповідними до значень ходу підвіски  $h_K$  (див. рис. 3).

При показнику політропи  $n = 1,0$  необхідно визначити нове значення  $h'_0$  та точку  $A'$  початку роботи 2-го пневмоциліндра.

$$V''_K = \frac{p_{01} V_{01}}{p_{02}} = 618,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3; \quad x''_3 = \frac{V_{01} - V''_K}{F} = 0,094 \text{ м.}$$

Тоді  $h''_K = x''_3 i_K = 0,185 \text{ м}; \quad h'_0 = h''_K - h_{CT} = 0,089 \text{ м.}$

По результатам проведених розрахунків будуємо пружну характеристику, що представлена на рис. 5.

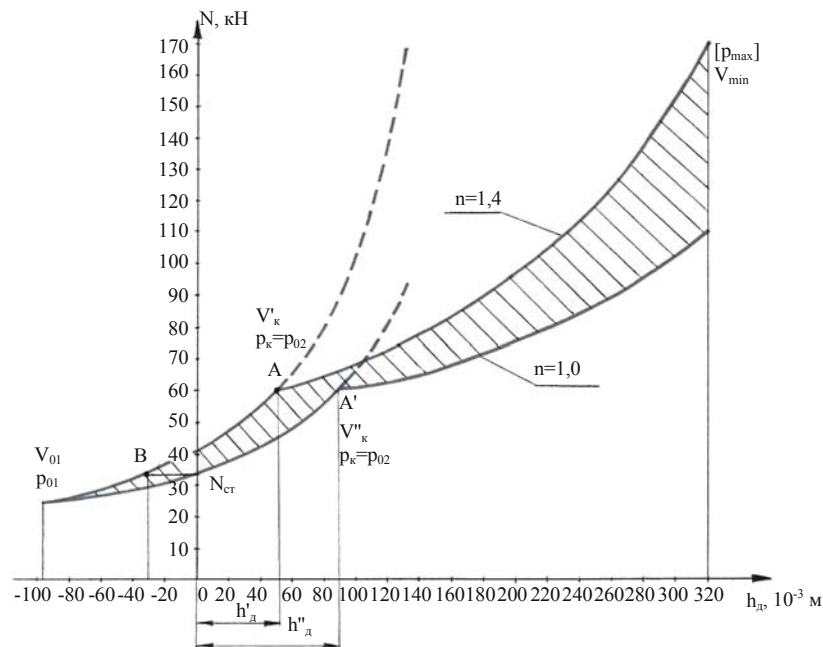


Рисунок 5 – Пружна характеристика підвіски

Аналізуючи дану характеристику, можна якісно оцінити її нестабільність, обумовлену зміною швидкості переміщення опорного котка. Як випливає з графіків, дана нестабільність досить істотна. При показнику політропи  $n = 1,4$  статичний хід підвіски зменшується на 30мм (т. В). Однак, оскільки на практиці у чистому вигляді адіабатичні або ізотермічні процеси не зустрічаються, розглянута нестабільність насправді буде перебувати у менших межах.

**Висновки.** Запропонована методика розрахунку заправних тисків і об'ємів пневмоциліндрів та побудови пружних характеристик двоступінчастих пневмогідролічних ресор підвіски транспортних засобів дозволяє підвищити точність розрахунків параметрів ресор та забезпечити розташування власних частот коливань підресореного корпусу у необхідних межах, що позитивно позначиться на плавності



ходу транспортного засобу. У випадку подальшої параметричної оптимізації пневмогідролічної ресори, дана методика дозволить одержати компоненти вихідного вектора проектних параметрів і визначити обмеження, що на них накладаються.

**Список літератури:** 1. Акоюн Р.А. Пневматическое поддресоривание автотранспортных средств; ч.3 / Акоюн Р.А. – Львов: Вища школа, 1984. – 240 с. 2. Раймпель И. Шасси автомобиля. Конструкции подвесок / Раймпель И.; [пер. с нем. В.П. Агапова]. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с. 3. Колебания в транспортных машинах / [Александров Е.Е., Грита Я.В., Дущенко В.В. и др.]; – Харьков: ХДПУ, 1996. – 256 с. 4. Математическое моделирование процессов возмущенного движения агрегатов и систем бронетанковой техники / [Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Дущенко В.В. и др.]; – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – 354 с.

*Надійшла до редколегії 07.03.2014*

УДК 629.1.032

**Методика розрахунку параметрів двоступінчастих пневмогідролічних ресор систем піддресорування транспортних засобів / В. В. Дущенко, О. М. Агапов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 8 (1051). – С. 120-128. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-6840.**

Предлагается методика расчета заправочных давлений и объемов пневмоцилиндров и построения упругих характеристик двухступенчатых пневмогидравлических ресор подвески транспортных средств, в соответствии с необходимой приведенной жесткостью и учетом переменной величины силового и кинематического чисел подвески. Методика позволяет повысить точность расчета параметров ресор и обеспечить расположение собственных частот колебаний поддресоренного корпуса в необходимых пределах, что благоприятно скажется на плавности хода транспортного средства.

**Ключевые слова:** транспортное средство, пневмогидравлическая ресора, приведенная жесткость подвески, заправочное давление, заправочный объем, силовое передаточное число, кинематическое передаточное число.

**Method of calculating the parameters of the two-stage fluid-pressure spring suspension systems of vehicles / V. V. Dushchenko, O. N. Agapov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Car- and tractorbuilding. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 8 (1051). – P. 120-128. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2078-6840.**

The method of calculation of filling pressures and volumes of air cylinders and two-stage construction of the elastic characteristics of the suspension springs pneumatichydraulic vehicles in accordance with the required stiffness and reduced into account variable force and kinematic properties of the suspension. The technique allows to improve the accuracy of calculating the parameters of springs and provide the location of the natural oscillation frequencies of the cushioning body to the extent necessary, which favorably affect the smooth running of the vehicle.

**Keywords:** vehicle, said fluid spring, reduced stiffness , filling pressure , filling volume , power gear ratio , kinematic ratio.