

# ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ РЕССОРА С АДАПТИВНЫМ САМОРЕГУЛИРУЕМЫМ ДЕМПФЕРОМ ДЛЯ ПОДВЕСКИ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ И МЕТОДИКА ЕЕ РАСЧЕТА

## PNEUMOHYDRAULIC SPRING WITH ADAPTIVE SELF-ADJUSTING DAMPER FOR SUSPENSION OF A HIGH-SPEED TRACKED VEHICLE AND ITS CALCULATION PROCEDURE

**В.В. НОВИКОВ**, д.т.н.  
**И.М. РЯБОВ**, д.т.н.  
**К.В. ЧЕРНЫШОВ**, к.т.н.  
**А.В. ПОЗДЕЕВ**, к.т.н.  
**А.В. ПОХЛЕБИН**, к.т.н.  
**Г.В. МАРКОВ**

Волгоградский государственный технический  
университет, Волгоград, Россия,  
markov-gennadiy@yandex.ru

**V.V. NOVIKOV**, DSc in Engineering  
**I.M. RYABOV**, DSc in Engineering  
**K.V. CHERNYSHOV**, PhD in Engineering  
**A.V. POZDEEV**, PhD in Engineering  
**A.V. POHLEBIN**, PhD in Engineering  
**G.V. MARKOV**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.  
markov-gennadiy@yandex.ru

В настоящее время дальнейшее повышение подвижности быстроходных машин во многом ограничено существующими системами поддрессирования, которые в основном имеют нерегулируемые характеристики, а разработанные регулируемые подвески с внешним управлением очень сложны, дороги и менее надежны. Поэтому разработка относительно простых и надежных саморегулируемых подвесок для быстроходных машин является актуальной задачей. На кафедре «Автоматические установки» ВолГТУ разработана оригинальная конструкция пневмогидравлической рессоры (ПГР) с адаптивным саморегулируемым демпфером для подвески быстроходной гусеничной машины (БГМ). Особенностью ее адаптивного демпфера является обеспечение двухступенчатого неупругого сопротивления в зависимости от амплитуды, частоты и направления колебаний, что позволяет значительно уменьшить ускорения «тряски» и нагрев ПГР при движении БГМ по мелким неровностям, а также практически исключить пробой подвески при возникновении больших вертикальных и угловых колебаний корпуса машины в процессе движения по большим неровностям или трамплинам с отрывом катков от опорной поверхности. Данные режимы работы обеспечиваются с помощью установки в корпусе серийной ПГР двух подпружиненных ступенчатых плунжеров, которые в статическом положении и при небольших ходах штока рессоры открывают дополнительный дроссельный канал, существенно уменьшающий неупругое сопротивление подвески, а при больших ходах перекрывают этот канал, тем самым значительно усиливая демпфирование колебаний. Благодаря тому, что эти плунжеры снабжены системой задержки их перемещения в обратном направлении, обеспечивается сохранение повышенного сопротивления в течение нескольких периодов колебаний.

В статье также представлены инженерная методика и численный пример определения параметров основных элементов адаптивного саморегулируемого демпфера, приведены упругая и демпфирующие характеристики ПГР с учетом работы предохранительного клапана хода сжатия и обратного клапана хода отбоя.

**Ключевые слова:** пневмогидравлическая рессора, адаптивный саморегулируемый демпфер, плавность хода, методика расчета демпфера.

Currently, a further increase in the mobility of high-speed vehicles is largely limited by the existing suspension systems, which mainly have unregulated characteristics, and the developed adjustable suspension systems with external control are very complex, expensive and less reliable. Therefore, the development of relatively simple and reliable self-adjusting suspensions for high-speed machinery is an urgent task. At the Department of Automatic Installations of Volgograd State Technical University an original design of an air-hydraulic spring (AHS) with an adaptive self-regulating damper for suspension of a high-speed tracked vehicle (HSTV) was developed. A feature of its adaptive damper is the provision of a two-stage inelastic resistance depending on the amplitude, frequency and direction of oscillation, which can significantly reduce the acceleration of the «shaking» and heating of AHS when the HSTV moves along small irregularities, as well as practically eliminate suspension breakdowns when large vertical and angular vibrations occur at the vehicles body when driving on large bumps or springboards with a takeoff of the rollers from the supporting surface. These modes of operation are ensured by installing two spring-loaded step plungers in the serial AHS body, which in a static position and with small spring lift open an additional throttle channel, which significantly reduces the inelastic resistance of the suspension, and at large strokes they block this channel, thereby significantly increasing damping fluctuations. Due to the fact that these plungers are equipped with a system for delaying their movement in the opposite direction, the increased resistance is maintained for several periods of oscillation. The article also presents an engineering methodology and a numerical example of determining the parameters of the main elements of an adaptive self-regulating damper, the elastic and damping characteristics of the AHS taking into account the operation of the pressure relief valve and the rebound check valve.

**Keywords:** air-hydraulic spring, adaptive self-adjusting damper, smoothness of movement, damper calculation procedure.

В настоящее время благодаря развитию технологий двигателестроения у быстроходных гусеничных машин (БГМ) появляется возможность значительного увеличения их подвижности. Но для увеличения скорости и сохранения комфорта передвижения также необходимо развивать и качество системы поддрессоривания. При неудовлетворительном качестве подвески водитель испытывает дискомфорт и чрезмерные перегрузки, что приводит к быстрой утомляемости и может нанести вред организму человека. Поэтому при движении по разбитым дорогам и пересеченной местности водитель вынужден ограничивать скорость движения машины. Это предъявляет дополнительные требования к системам поддрессоривания. Для решения данных задач наиболее подходящими являются пневмогидравлические подвески с регулируемым демпфированием. Однако в практике машиностроения отсутствуют простые технические решения данной сложной задачи [1...4].

Разработка конструкции пневмогидравлические подвески для БМГ с регулируемым демпфированием и методики ее проектирования.

В ВолГТУ на кафедре «Автоматические установки» и при содействии АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады» разработана конструкция пневмогидравлической рессоры (ПГР) для подвески БГМ, которая обеспечивает адаптивное саморегулирование демпфирования в зависимости от амплитуды, частоты и направления колебаний, а также имеет предохранительный клапан хода сжатия и обратный клапан хода отбоя, выполненные в виде единого узла, в котором размещен основной дроссель (рис. 1). Прототипом данной конструкции является ПГР по патенту РФ 2694706, недостатком которой является сравнительно высокая сложность адаптивного саморегулируемого демпфирующего узла, что увеличивает габариты корпуса рессоры, а также отсутствие ограничения мак-



симального перепада давлений между поршневой полостью и полостью гидроаккумулятора на ходе сжатия, что негативно влияет на плавность хода и надежность работы подвижных уплотнений [5, 6, 7].

ПГР состоит из гидравлического 1 и пневмогидравлического 2 цилиндров, установленных в корпусе 3. В цилиндре 1 установлен поршень 4 со штоком 5, образующие в цилиндре 1 поршневую 6 и штоковую 7 полости. Плавающий поршень 8 находится в пневмогидравлическом цилиндре 2 и разделяет его на гидравлическую 9 и пневматическую 10 полости. Поршневая полость 6 и гидравлическая полость 9 постоянно сообщены между собой через выполненное в корпусе отверстие 13, первое ступенчатое отверстие 11, нижнее отверстие 14, предохранительный клапан 15 и основное дроссельное отверстие 39 с большим сопротивлением. Кроме того, полости 6 и 9 могут периодически сообщаться через поперечный канал 16, второе ступенчатое отверстие 12 и дополнительное дроссельное отверстие 17 с малым сопротивлением.

Клапан максимального хода сжатия 18 и клапан максимального хода отбоя 26 выполнены в виде подпружиненных ступенчатых плунжеров. Клапаны 18 и 26 расположены в ступенчатых отверстиях 11 и 12 соответственно и разделяют их на надплунжерные 19 и 27, подплунжерные 20 и 28, кольцевые плунжерные 21 и 29 полости. Надплунжерные полости 19 и 27 отделены от кольцевых плунжерных полостей 21 и 29 с помощью уплотнений 22 и 30, установленных в проточках в корпусе 3. Клапаны 18 и 26 снабжены системами временной задержки возврата их в исходное положение, рассчитанными на 1,5–2 периода собственных колебаний корпуса машины, которые представлены в виде подпружиненных клапанных тарелок 24 и 32 с осевыми дроссельными отверстиями 25 и 33.

При работе ПГР с малыми амплитудами клапаны 18 и 26 постоянно открыты, поэтому жидкость между полостями 6 и 9 перетекает с малым сопротивлением через основное дроссельное отверстие 39 в предохранительном клапане 15 и дополнительное дроссельное отверстие 17.

При возникновении больших амплитуд колебаний клапаны 18 и 26 перекрывают поперечный канал 16, и жидкость между полостями 6 и 9 перетекает с большим сопротивлением только через основное дроссельное отверстие

39 в предохранительном клапане 15. При этом на ходе сжатия ПГР плунжер 18 под действием высокого давления перемещается до упора вверх, дополнительно сжимая пружину 23, а на ходе отбоя ПГР при низком давлении плунжер 26 под действием пружины 31 перемещается до упора вниз. После уменьшения колебаний ПГР клапаны 18 и 26 открываются.

На ходе сжатия при перекрытом поперечном канале 16 и возникновении резкого перепада давления между полостями 6 и 9 происходит срабатывание предохранительного клапана 15, и плунжер 34 перемещается вправо, сжимая пружину 40 и открывая косые отверстия 37, благодаря чему обеспечивается ограничение силы сопротивления при больших скоростях хода сжатия.

На ходе отбоя, при перекрытом поперечном канале 16 и возникновении резкого перепада давления между полостями 6 и 9, обратный клапан 41 открывается, и жидкость течет не только через основное дроссельное отверстие 39, но и через отверстия 42, кольцевую плунжерную полость 36, косые отверстия 38 и плунжерную полость 35, вызывая резкое уменьшение сопротивления.

#### *Методика расчета адаптивного саморегулируемого демпфирующего узла ПГР*

Методика расчета саморегулируемого адаптивного демпфирующего узла ПГР заключается в определении условий срабатывания клапанов 18 и 26 в зависимости от амплитуды, частоты и направления колебаний подвески.

Для этого необходимо знать упругую характеристику подвески, уравнения которой при деформациях по координатам  $\lambda$  и  $h$  имеют следующий вид:

$$P_k = \left( \frac{V_n}{V_n - F\lambda / i} \right)^n p_n F / i$$

или

$$P_k = \left( \frac{V_{ct}}{V_{ct} - Fh / i} \right)^n p_{ct} F / i, \quad (1)$$

где  $p_n$  и  $V_n$  – начальное давление и начальный объем газа;  $p_{ct}$  и  $V_{ct}$  – давление и объем газа в рессоре под статической нагрузкой;  $n$  – показатель политропы (для ПГР с плавающим поршнем  $n = 1,3 \dots 1,4$ );  $F$  – площадь вытеснителя (поршня или штока) рессоры;  $i$  – передаточное отношение в подвеске;  $\lambda$  – ход катка на ходе

сжатия от полностью растянутой ПГР;  $h$  – ход катка от статического положения (на ходе сжатия берется со знаком «+», на ходе отбоя – со знаком «-»).

Для расчета параметров клапана 18 (клапан защиты от колебаний подвески с большой амплитудой) зададимся условием его срабатывания (закрытия) путем перемещения вверх, зависящим от величины хода сжатия:

$$h \geq \Delta, \quad (2)$$

где  $\Delta$  – наиболее вероятная амплитуда деформаций подвески при движении БГМ по относительно ровной поверхности дороги, вызывающей ускорения «тряски» (например, равна 5 см).

Тогда давление начала закрытия клапана 18 определится по зависимости:

$$p_1 = \frac{P_{к1}}{F/i} = \left( \frac{V_{ст}}{V_{ст} - F\Delta/i} \right)^n \cdot p_{ст}. \quad (3)$$

Этому давлению соответствует сила предварительного поджатия пружины 23:

$$P_{пр1} = p_1 F_{пл1} = \left( \frac{V_{ст}}{V_{ст} - F\Delta/i} \right)^n \cdot p_{ст} F_{пл1}, \quad (4)$$

где  $F_{пл1}$  – площадь меньшей ступени плунжера 18.

$$P_{пр1} = c_1 x_{01}, \quad (5)$$

$c_1$  – жесткость пружины 23;  $x_{01}$  – величина предварительного сжатия пружины 23.

Величины  $F_{пл1}$ ,  $c_1$  и  $x_{01}$  выбираются исходя из компоновки клапана 18 в корпусе 3 и минимального диаметра меньшей ступени плунжера 18.

В большей ступени плунжера 18 установлен обратный клапан 24, выполненный в виде подпружиненной тарелки с дросселем 25, диаметр которого определяется из следующего уравнения:

$$P_{пр1} = \Delta p_{пл1} F_{пл.к1} = \frac{\rho F_{пл.к1}^3}{2\mu^2 f_{др1}^2} \cdot v_{пл1}^2, \quad (6)$$

где  $F_{пл.к1}$  – площадь поперечного сечения кольцевой полости плунжера 18;  $\Delta p_{пл1}$  – перепад давлений на большей ступени плунжера 18 между полостями 20 и 21;  $\rho$  – плотность жидкости ( $\rho = 0,85$  г/см<sup>3</sup>);  $\mu$  – коэффициент расхода (для ПГР  $\mu = 0,8...0,9$ );  $v_{пл1}$  – скорость перемещения плунжера 18 под действием пружины 23 вниз при условии уменьшения давлений в полостях 9 и 10 меньше  $p_1$ .

Скорость перемещения плунжера можно найти из уравнения:

$$v_{пл1} = \frac{\delta_1}{t_{откр1}} = \frac{\delta_1}{(1...3)T} = \sqrt{\frac{gnF}{iV_{ст}}} \cdot \frac{\delta_1}{(1...3)2\pi}, \quad (7)$$

где  $\delta_1$  – полный ход плунжера 18;  $t_{откр1}$  – время открытия плунжера 18 (равно 1...3 периодам колебаний подвески);  $T$  – период собственных колебаний рессоры;  $g$  – ускорение свободного падения.

Задаваясь скоростью  $v_{пл1}$  и зная силу поджатия пружины 23 при закрытом клапане 18, можно определить площадь дроссельного отверстия в обратном клапане 24:

$$f_{др1} = \sqrt{\frac{\rho F_{пл.к1}^3}{2\mu^2 P_{пр1}^*}} \cdot v_{пл1}, \quad (8)$$

где  $P_{пр1}^*$  – сила поджатия пружины 23 при закрытом клапане 18,

$$P_{пр1}^* = c_1 (x_1 + \delta_1). \quad (9)$$

Тогда диаметр дроссельного отверстия в обратном клапане 24 рассчитывается по формуле:

$$d_{др1} = \sqrt{\frac{4f_{др1}}{\pi}}. \quad (10)$$

Для расчета параметров клапана 26 (клапан защиты от пробоя подвески после полного растяжения ПГР при отрыве катков после преодоления трамплина и последующего приземления) зададимся условием его срабатывания (закрытия) путем перемещения вниз, зависящим от величины хода отбоя:

$$h \geq -\Delta_{отб}, \quad (11)$$

где  $\Delta_{отб}$  – величина растяжения ПГР, при которой необходимо закрыть клапан 26 (например, равна 80 % от статического хода подвески).

Тогда давление начала закрытия клапана 26 определится по зависимости:

$$p_2 = \frac{P_{к2}}{F/i} = \left( \frac{V_{ст}}{V_{ст} + F\Delta_{отб}/i} \right)^n \cdot p_{ст}, \quad (12)$$

Этому давлению соответствует сила предварительного поджатия пружины 31:

$$P_{пр2} = p_2 F_{пл2} = \left( \frac{V_{ст}}{V_{ст} + F\Delta_{отб}/i} \right)^n \cdot p_{ст} F_{пл2}, \quad (13)$$

где  $F_{пл2}$  – площадь меньшей ступени плунжера 26;

$$P_{пр2} = c_2 x_{02}, \quad (14)$$

$c_2$  – жесткость пружины 31;  $x_{02}$  – величина предварительного сжатия пружины 31.



Величины  $F_{пл2}$ ,  $c_2$  и  $x_{02}$  выбираются исходя из компоновки клапана 31 в корпусе 3 и минимального диаметра меньшей ступени плунжера 26.

В большей ступени плунжера 26 установлен обратный клапан 32, выполненный в виде подпружиненной тарелки с дросселем 33, диаметр которого определяется по следующего уравнения:

$$P_{пр2} = \Delta p_{пл2} F_{пл.к2} = \frac{\rho F_{пл.к}^3}{2\mu^2 f_{др2}^2} \cdot v_{пл2}^2, \quad (15)$$

где  $F_{пл.к2}$  – площадь поперечного сечения кольцевой полости плунжера 26;  $\Delta p_{пл2}$  – перепад давлений на большей ступени плунжера 26 между полостями 28 и 29;  $v_{пл2}$  – скорость перемещения плунжера 26 под действием пружины 31 вверх при условии увеличения давления в полостях 9 и 10 больше меньше  $p_2$ .

Скорость перемещения плунжера можно найти из уравнения:

$$v_{пл2} = \frac{\delta_2}{t_{откр2}} = \frac{\delta_2}{(1...3)T} = \sqrt{\frac{gnF}{iV_{ст}}} \cdot \frac{\delta_2}{(1...3)2\pi}, \quad (16)$$

где  $\delta_2$  – полный ход плунжера 26;  $t_{откр2}$  – время открытия плунжера 26 (равно 1...3 периодам колебаний подвески).

Задавая скорость  $v_{пл2}$  и зная силу поджатия пружины 31 при закрытом клапане 26, можно определить площадь дроссельного отверстия в обратном клапане 32:

$$f_{др2} = \sqrt{\frac{\rho F_{пл.к2}^3}{2\mu^2 P_{пр2}^*}} \cdot v_{пл2}, \quad (17)$$

где  $P_{пр2}^*$  – сила поджатия пружины 23 при закрытом клапане 18,

$$P_{пр2}^* = c_2(x_2 + \delta_2). \quad (18)$$

Тогда диаметр дроссельного отверстия в обратном клапане 24 рассчитывается по формуле:

$$d_{др2} = \sqrt{\frac{4f_{др2}}{\pi}}. \quad (19)$$

Демпфирующая характеристика ПГР рассчитывается по формуле:

$$R_k = \frac{\rho F^3}{2\mu^2 f_0^2 t^3} v_k^2, \quad (20)$$

где  $f_0$  – площадь дроссельного отверстия в головке ПГР;  $v_k$  – скорость вертикальных перемещений катка.

## Результаты и обсуждение

### Пример расчета адаптивного саморегулируемого демпфирующего узла ПГР

Ниже приведен пример расчета основных параметров ПГР с саморегулируемым адаптивным демпфирующим узлом для пневмогидравлической подвески БГМ при следующих исходных данных: статический объем газа  $V_{ст} = 270 \text{ см}^3$ ; площадь поршня  $F = 19,63 \text{ см}^2$ ; полный ход подвески  $h_{полн} = 32 \text{ см}$ ; передаточное число подвески  $i = 2,5$ ; статическое давление  $p_{ст} = 10 \text{ МПа}$ ; ступенчатые плунжеры 18 и 26 имеют одинаковые размеры:  $d_{пл1} = 6 \text{ мм}$  и  $d_{пл2} = 22 \text{ мм}$ . Графики статической и динамической упругих характеристик пневмогидравлической подвески, построенные с помощью расчета по формуле (1), показаны на рис. 2.

Из условия (2) зададимся параметром срабатывания клапана 18 на ходе сжатия подвески от статического положения  $\Delta = 5 \text{ см}$ . Тогда из формулы (3) давление, при котором начнет закрываться клапан 18,  $p_1 = 12,45 \text{ МПа}$ . Этому давлению при площади меньшей ступени плунжера 18  $F_{пл1} = 0,283 \text{ см}^2$  соответствует сила предварительного поджатия пружины 23  $P_{пр1} = 352 \text{ Н}$ .

Зная силу предварительного поджатия пружины 23, можно подобрать саму пружину по ГОСТ 18793, либо, зная наружный диаметр, длину и ход пружины, спроектировать собственную пружину.

В нашем случае пружина 23 имеет следующие параметры (рис. 3): наружный диаметр  $D_{нар} = 18 \text{ мм}$ ; диаметр прутка  $d = 2 \text{ мм}$ ; внутренний диаметр  $D_{вн} = 14 \text{ мм}$ ; длина без нагрузки  $l_0 = 322 \text{ мм}$ , контрольная длина  $l_1 = 92 \text{ мм}$ ; сила пружины (при  $l_1$ )  $P_1 = 352,55 \text{ Н}$ ; контрольная длина  $l_2 = 80 \text{ мм}$ , сила пружины (при  $l_2$ )  $P_2 = 370,94 \text{ Н}$ ; длина в сжатом состоянии  $l_3 = 53 \text{ мм}$ ; сила пружины (при  $l_3$ )  $P_3 = 412,33 \text{ Н}$ ; расстояние между витками  $t = 12,76 \text{ мм}$ ; рабочее число витков  $n = 25 \text{ шт.}$ ; жесткость пружины  $c_1 = 1,53 \text{ Н/мм}$ ; материал – сталь 60С2А, ГОСТ 14959-79.

При времени открытия клапана 18  $t_{откр1} = 2T$ , согласно формуле (7), скорость перемещения плунжера  $v_{пл1} = 0,6 \text{ см/с}$ .

Зная скоростью  $v_{пл1}$  и силу поджатия пружины 23 при закрытом клапане 18, можно определить площадь дроссельного отверстия в обратном клапане 24 по формуле (8). При кольцевой

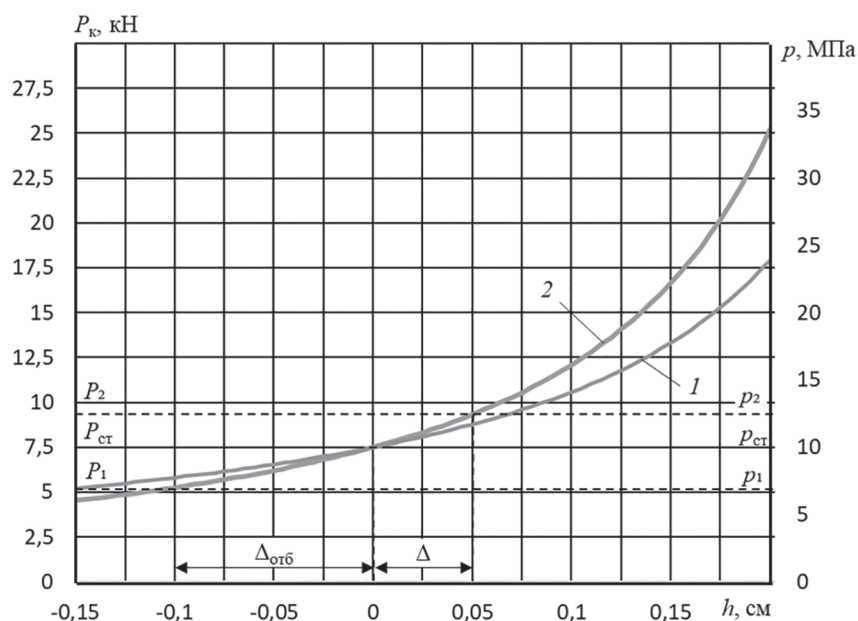


Рис. 2. Упругие характеристики пневмогидравлической подвески БГМ:  
1 – статическая ( $n = 1$ ); 2 – динамическая ( $n = 1,39$ )

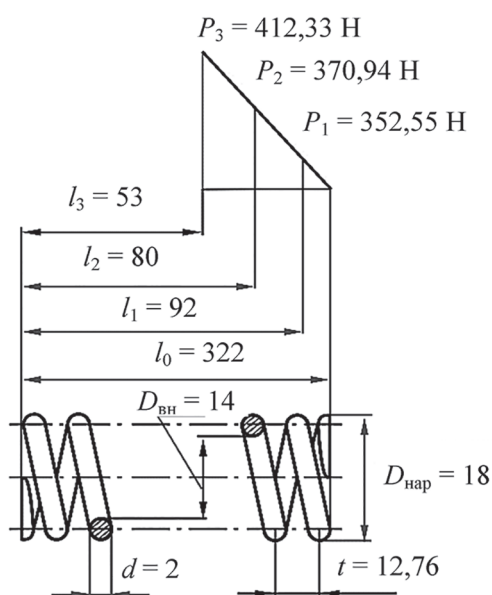


Рис. 3. Пружина 23

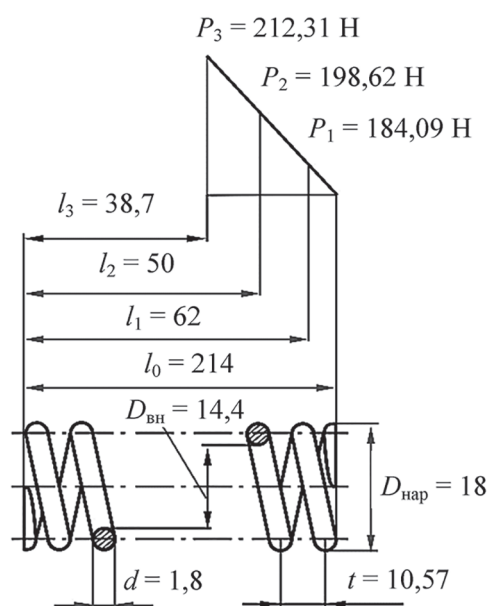


Рис. 4. Пружина 31

площади плунжера 18  $F_{пл.к1} = 1,72 \text{ см}^2$  площадь дроссельного отверстия  $f_{др1} = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ . Этой площади, согласно формуле (10), соответствует диаметр дроссельного отверстия в обратном клапане 24  $d_{др1} = 0,26 \text{ мм}$ .

Для расчета параметров клапана 26 (клапан защиты от пробоя подвески после полного растяжения ПГР при отрыве катков после преодоления трамплина и последующего приземления) зададимся условием его срабатывания на ходе отбоя подвески при  $\Delta_{отб} \geq 10 \text{ см}$ . Тогда, согласно формуле (12), дав-

ление начала закрытия клапана 26  $p_2 = 7 \text{ МПа}$ . Этому давлению при площади меньшей ступени плунжера 26  $F_{пл1} = 0,283 \text{ см}^2$  соответствует сила предварительного поджатия пружины 31  $P_{пр2} = 198 \text{ Н}$ .

Зная силу предварительного поджатия пружины 31, можно подобрать саму пружину по ГОСТ 18793, либо, зная наружный диаметр, длину и ход пружины, спроектировать собственную пружину.

В нашем случае пружина 31 имеет следующие параметры (рис. 4): наружный диа-

метр  $D_{\text{нар}} = 18$  мм; диаметр прутка  $d = 1,8$  мм; внутренний диаметр  $D_{\text{вн}} = 14,4$  мм; длина без нагрузки  $l_0 = 214$  мм; контрольная длина  $l_1 = 62$  мм; сила пружины (при  $l_1$ )  $P_1 = 184,09$  Н; контрольная длина  $l_2 = 50$  мм; сила пружины (при  $l_2$ )  $P_2 = 198,62$  Н; длина в сжатом состоянии  $l_3 = 38,7$  мм; сила пружины (при  $l_3$ )  $P_3 = 212,31$  Н; расстояние между витками  $t = 10,57$  мм; рабочее число витков  $n = 20$  шт.; жесткость пружины  $c_1 = 1,21$  Н/мм; материал сталь 60С2А, ГОСТ 14959-79.

При времени открытия клапана  $26$   $t_{\text{откр1}} = 2T$ , согласно формуле (16), скорость перемещения плунжера  $26$  равна скорости перемещения плунжера  $18$ :  $v_{\text{пл1}} = v_{\text{пл2}} = 0,6$  см/с.

Зная скоростью  $v_{\text{пл2}}$  и силу поджатия пружины  $31$  при закрытом клапане  $26$ , можно определить площадь дроссельного отверстия в обратном клапане  $26$  по формуле (17). При кольцевой площади плунжера  $26$   $F_{\text{пл.к2}} = 1,72$  см<sup>2</sup> площадь дроссельного отверстия  $f_{\text{др2}} = 7,2 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>. Этой площади, согласно формуле (19), соответствует диаметр дроссельного отверстия в обратном клапане  $26$   $d_{\text{др1}} = 0,3$  мм.

Демпфирующие характеристики данной подвески, рассчитанные по формуле (20) при открытых и закрытых клапанах  $18$  и  $26$ , показаны на рис. 5. Эти характеристики построены при следующих исходных данных: диаметр основного дроссельного отверстия  $d_0 = 5$  мм; диаметр дополнительного дроссельного отверстия  $d_{\text{доп}} = 10$  мм.

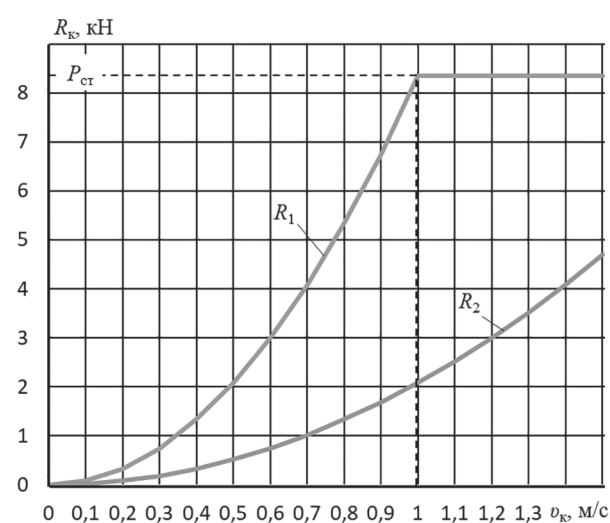


Рис. 5. Демпфирующие характеристики ПГР:

$R_1$  – при закрытых клапанах  $18$  и  $26$  на ходе сжатия;  
 $R_2$  – при открытых клапанах  $18$  и  $26$  на ходах сжатия и отбоя

## Заключение

1. Разработанная ПГР с адаптивным демпфирующим узлом саморегулируемым по амплитуде, направлению и частоте колебаний, имеет простую конструкцию и позволяет значительно уменьшить ускорения «тряски» при движении БГМ по мелким неровностям (клапаны  $18$  и  $26$  открыты), практически исключить пробои подвески при возникновении больших вертикальных и угловых колебаний корпуса машины (клапан  $18$  закрыт), а также максимально задемпфировать подвеску после полного выдвижения штока (клапан  $26$  закрыт) при движении БГМ через трамплины с отрывом катков от опорной поверхности.

2. Изложенная в статье инженерная методика расчета позволяет определять параметры основных элементов адаптивного демпфирующего узла, строить упругие и демпфирующие характеристики ПГР с учетом работы предохранительного клапана хода сжатия и обратного клапана хода отбоя.

3. Применение разработанной ПГР с адаптивным саморегулируемым демпфером позволит повысить подвижность БГМ и уменьшить потери энергии в подвеске, а также, по сравнению с регулируемым подвесками с внешним управлением – существенно снизить стоимость системы поддрессоривания и повысить надежность ее работы.

## Литература

- Новиков В.В., Рябов И.М., Горобцов А.С., Чернышов К.В., Подзоров А.В. Пневмогидравлическая рессора подвески транспортного средства: патент на изобретение № 23196020, Российская Федерация; ВолгГТУ. Бюл. № 3, 2008.
- Новиков В.В., Рябов И.М., Чернышов К.В. Виброзащитные свойства подвесок автотранспортных средств: монография; ВолгГТУ. Волгоград, 2009. 338 с.
- Поздеев А.В., Новиков В.В., Дьяков А.С., Похлебин А.В., Рябов И.М., Чернышов К.В. Регулируемые пневматические и пневмогидравлические рессоры подвесок автотранспортных средств: монография; ВолгГТУ. Волгоград, 2013. 244 с.
- Новиков В.В., Рябов И.М., Похлебин А.В., Поздеев А.В., Марков Г.В. Пневмогидравлическая рессора с адаптивным демпфированием для подвесок быстроходных машин высокой проходимости // Прогресс транспортных средств и систем – 2018: материалы междунар. науч.-практ. конф.

- (г. Волгоград, 9–11 октября 2018 г.); ВолгГТУ, РФФИ, ОАО «ЦКБ «Титан». Волгоград, 2018. С. 53–55.
- Новиков В.В., Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Марков Г.В. Пневмогидравлическая рессора подвески транспортного средства: патент на изобретение № 2694706, Российская Федерация; ВолгГТУ. Бюл. № 20, 2019.
  - Марков Г.В., Сериков С.А. Пневмогидравлическая рессора с адаптивным демпфером для подвески быстроходной гусеничной машины // XXIII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 11–14 декабря 2018 г.): тез. док. / редкол.: А.В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.]; Комитет образования, науки и молодежной политики Волгоградской обл., Совет редакторов вузов Волгоградской обл., Волгоградский гос. техн. ун-т. Волгоград, 2019. С. 50–51.
  - Method of calculating the adaptive damper of the pneumohydraulic spring for the suspension of a high-speed vehicle / В.В. Новиков, А.В. Поздеев, Г.В. Марков, А.В. Похлебин, Д.А. Чумаков, К.В. Чернышов, А.В. Леонард // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 632: International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering (Irkutsk, Russia, 27 May – 1 June, 2019): Proceedings / Irkutsk National Research Technical University. [IOP Publishing], 2019. 8 p. Doi:10.1088/1757-899X/632/1/012057.
- ### References
- Novikov V.V., Ryabov I.M., Gorobcov A.S., CHernyshov K.V., Podzorov A.V. Pnevmoгидравлическая рессора подвески транспортного средства [Vehicle air suspension spring]: patent na izobretenie No 23196020, Rossijskaya Federaciya; VolgGTU. Byul. No 3, 2008.
  - Novikov V.V., Ryabov I.M., CHernyshov K.V. Vibrozashchitnye svojstva podvesok avtotransportnyh sredstv [Vibration protective properties of vehicle suspensions: a monograph]. VolgGTU Publ., Volgograd, 2009. 338 p.
  - Pozdeev A.V., Novikov V.V., D'yakov A.S., Pohlebin A.V., Ryabov I.M., CHernyshov K.V. Reguliruemye pnevmaticheskie i pnevmogidravlicheskie ressoory podvesok avtotransportnyh sredstv [Adjustable pneumatic and pneumohydraulic springs for vehicle suspensions: a monograph]; VolgGTU Publ., Volgograd, 2013. 244 p.
  - Novikov V.V., Ryabov I.M., Pohlebin A.V., Pozdeev A.V., Markov G.V. Pneumo-hydraulic spring with adaptive damping for suspensions of high-speed off-road vehicles. Progress transportnyh sredstv i sistem – 2018: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Volgograd, 9–11 oktyabrya 2018 g.) [Progress of vehicles and systems – 2018: materials of international scientific and practical conference (Volgograd, October 9–11, 2018)]; VolgGTU, RFFI, ОАО «СКВ «Титан». Volgograd, 2018, pp. 53–55 (in Russ.).
  - Novikov V.V., Ryabov I.M., CHernyshov K.V., Pozdeev A.V., Markov G.V. Pnevmoгидравлическая рессора подвески транспортного средства [Vehicle air suspension spring]: patent na izobretenie No 2694706, Rossijskaya Federaciya; VolgGTU. Byul. No 20, 2019.
  - Markov G.V., Serikov S.A. Pneumo-hydraulic spring with adaptive damper for suspension of a high-speed tracked vehicle. XXIII regional'naya konferenciya molodyh issledovatelej Volgogradskoj oblasti (g. Volgograd, 11–14 dekabrya 2018 g.) [XXIII regional conference of young researchers of the Volgograd region (Volgograd, December 11–14, 2018)]: tez. dok. / redkol.: A.V. Navrockij (otv. red.) [i dr.]. Komitet obrazovaniya, nauki i molodezhnoj politiki Volgogradskoj obl., Sovet redaktorov vuzov Volgogradskoj obl., Volgogradskij gos. tekhn. un-t. Volgograd, 2019, pp. 50–51 (in Russ.).
  - Method of calculating the adaptive damper of the pneumohydraulic spring for the suspension of a high-speed vehicle / V.V. Novikov, A.V. Pozdeev, G.V. Markov, A.V. Pohlebin, D.A. CHumakov, K.V. CHernyshov, A.V. Leonard // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 632: International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering (Irkutsk, Russia, 27 May – 1 June, 2019): Proceedings / Irkutsk National Research Technical University. [IOP Publishing], 2019. 8 p. doi:10.1088/1757-899X/632/1/012057.