

В. В. Новиков, Д. А. Чумаков, А. В. Поздеев

**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ РЕССОРЫ ПОВЫШЕННОЙ
«ЖИВУЧЕСТИ» ДЛЯ ПОДВЕСКИ БЫСТРОХОДНОЙ МАШИНЫ**

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

nvv_60@mail.ru, chda1991@yandex.ru, avp24897@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Андреевич Чумаков, *chda1991@yandex.ru*

Представлены конструкция и принцип действия адаптивной пневмогидравлической рессоры (ПГР) повышенной «живучести», предназначенной для подвески быстроходных машин, эксплуатируемых в условиях значительных динамических и ударных нагрузок. Описана оригинальная система адаптивного демпфирования, обеспечивающая автоматическое увеличение сопротивления при возникновении максимальных ходов сжатия и отбоя, а также устройство предохранительного и аварийного клапанов, обеспечивающих ограничение силы неупругого сопротивления на ходе сжатия и предотвращение разрушения рессоры при критических перегрузках, включая подрыв на mine. Приведена методика расчета элементов рессоры.

Ключевые слова: быстроходная машина, пневмогидравлическая рессора, адаптивное демпфирование, плавность хода, методика расчета

V. V. Novikov, D. A. Chumakov, A. V. Pozdeev

**DEVELOPMENT OF ADAPTIVE PNEUMOHYDRAULIC SPRINGS OF INCREASED
"SURVIVABILITY" FOR THE SUSPENSION OF A HIGH-SPEED VEHICLE**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Presents the design and principle of operation of an adaptive pneumohydraulic spring (PHS) with increased durability, designed for the suspension of high-speed vehicles operating under significant dynamic and impact loads. An original adaptive damping system is described, which provides an automatic increase in resistance when maximum compression and rebound strokes occur, as well as safety and emergency valves that limit the force of inelastic resistance during compression and prevent the spring from collapsing during critical overloads, including mine detonation. The method of calculating the elements of the spring is given.

Keywords: high-speed machine, pneumohydraulic spring, adaptive damping, smooth running, calculation method

Введение

Разработка подвески транспортного средства, сочетающей требования к высокой подвижности, комфорту и надежности в условиях сложного рельефа, остается одной из актуальных задач машиностроения [2; 5]. Пневмогидравлические рессоры (ПГР), объединяющие преимущества пневматических и гидравлических систем, широко применяются в подвесках быстроходных машин благодаря их способности адаптироваться к изменяющимся нагрузкам и гасить колебания различной амплитуды [1; 3]. Однако традиционные решения часто не обеспечивают достаточную защиту в условиях экстремальных воздействий, таких как ударные перегрузки или подрыв на mine [4; 6].

Актуальность повышения живучести ПГР обусловлена необходимостью надежного функционирования подвески в условиях резких динамических нагрузок, в том числе при полном растяжении или резком сжатии рессоры. Это требует разработки конструктивных решений, включающих адаптивные демпфирующие узлы и предохранительные механизмы, реагирующие на превышение давления и тем самым предотвращающие разрушение ПГР.

Ниже представлено описание и методика расчета адаптивной ПГР повышенной «живучести», которая автоматически изменяет сопротивление в зависимости от режимов работы: при малых и больших амплитудах колебаний, при полном растяжении, при воздействии ударных перегрузок.

1. Описание устройства и работы адаптивной ПГР

Адаптивная ПГР (рис. 1) состоит из рабочего цилиндра 1 и гидроаккумулятора 2, установленных в корпусе 3 и соединенных между собой через адаптивный демпфирующий узел, размещенный в корпусе 3 и включающий демпфер максимального хода сжатия и демпфер максимального хода отбоя, выполненные в виде двух подпружиненных ступенчатых плунжеров 20 и 28, установленных в ступенчатых отверстиях 12 и 13 и перекрывающих при сра-

батывании поперечный канал 17 дополнительного дроссельного канала. В среднем соединительном канале 11 установлены предохранительный клапан 38 с основным дроссельным отверстием 45 и аварийный блок 46 с запорным 47 и срезным 56–58 элементами, защищающими рессору при критических перегрузках.

При малых амплитудах колебаний ступенчатые плунжеры 20 и 28 находятся в исходных положениях, основной и дополнительный дроссельные каналы открыты и жидкость свободно перетекает между полостями 6 и 9 через элементы 14, 11, 40, 39, 45, 43, 15 и 16, 23, 17, 31, 32, обеспечивая минимальное сопротивление и плавный ход. При увеличении амплитуд колебаний давления в полостях 9 и 10 изменяются. При превышении или снижении заданных значений происходит либо сжатие пружины 24, либо разжатие пружины 33, вследствие чего плунжеры 20 и 28 перемещаются, соответственно, вверх и вниз, перекрывая поперечный канал 17, что закрывает дополнительный дроссельный канал и увеличивает демпфирование. При уменьшении амплитуд колебаний плунжеры 20 и 28 с некоторой задержкой возвращаются в исходное положение, открывая поперечный канал 17, что снижает демпфирование.

При резких ударах или наезде на препятствие давление в подпоршневой полости 6 открывает предохранительный клапан 38 и жидкость через отверстие 40 обходит основной дроссель 45, ограничивая рост сопротивления. При подрыве на mine срабатывает аварийный клапан 47, открывая отверстие 48. При этом давление воздействует на поршень 56, срезается штифт 58 и жидкость сбрасывается наружу через отверстия 55 и 60, предотвращая разрушение рессоры. После снижения давления пружина 54 возвращает клапан 47 в рабочее положение, обеспечивая работоспособность подвески.

Таким образом, адаптивная ПГР автоматически регулирует сопротивление в зависимости от амплитуды и скорости колебаний, повышая плавность хода и «живучесть» подвески. Подробное описание конструкции приведено в патенте [7].

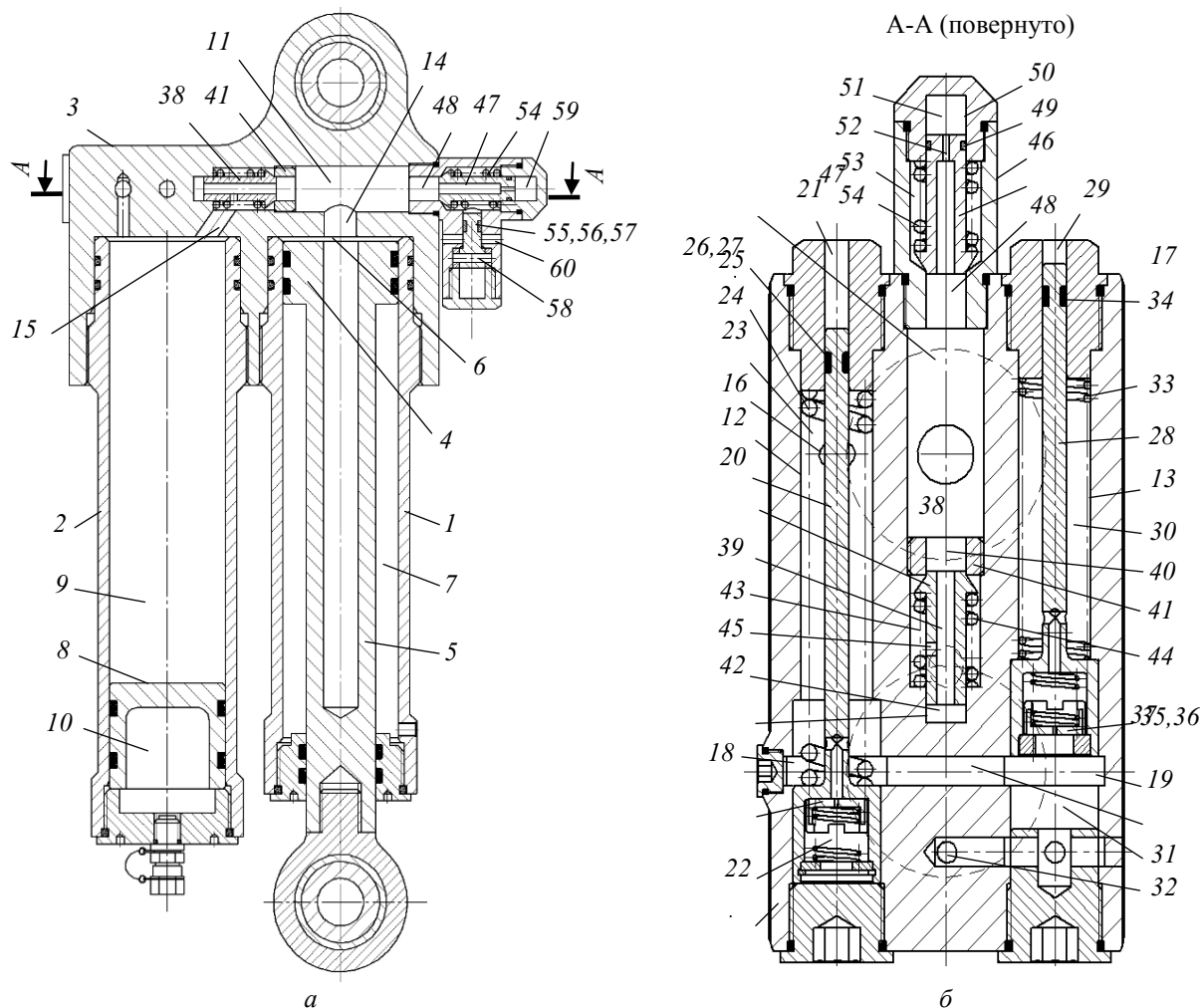


Рис. 1. Пневмогидравлическая рессора:

а – продольный разрез; *б* – поперечный разрез А-А корпуса (увеличено); 1 – цилиндр; 2 – гидроаккумулятор; 3 – корпус; 4 – поршень; 5 – шток; 6 – поршневая полость; 7 – штоковая полость; 8 – плавающий поршень; 9 – гидравлическая полость; 10 – пневматическая полость; 11 – соединительный канал; 12 – первое ступенчатое отверстие; 13 – второе ступенчатое отверстие; 14 – верхнее отверстие; 15, 16 – косые отверстия; 17 – поперечный канал; 18 и 19 – протоки; 20 – ступенчатый плунжер хода сжатия; 21 и 29 – надплунжерные полости; 22 и 31 – подплунжерные полости; 23 и 30 – кольцевые плунжерные полости; 24 и 33 – пружины сжатия адаптивных клапанов максимальных ходов сжатия и отбоя; 25, 34 и 49 – уплотнения; 26 – обратный клапан хода сжатия с дроссельным отверстием 27; 28 – ступенчатый плунжер хода отбоя; 32 – отверстие дополнительного дроссельного канала; 35 – обратный клапан хода отбоя с дроссельным отверстием 36; 37 и 50 – глухие отверстия; 38 – плунжер предохранительного клапана с осевым отверстием 39; 40 – отверстие в шайбе 41; 42 – нижняя полость; 43 – кольцевая полость; 44 и 54 – пружины сжатия предохранительного и запорного (аварийного) клапанов; 45 – радиальное отверстие основного дроссельного канала; 46 – аварийный блок; 47 – плунжер запорного (аварийного) клапана с осевым дроссельным отверстием 52; 48 – отверстие; 51 – верхняя полость; 53 – кольцевая полость; 54 – пружина сжатия; 55 – боковое отверстие; 56 – поршень; 57 – уплотнение аварийного клапана; 58 – штифт; 59 – боковая полость; 60 – радиальные отверстия

2. Методика расчета демпфирующих узлов адаптивной ПГР

Методика расчета предохранительного 38 и запорного (аварийного) 47 клапанов ходов сжатия на рабочее и предельно допустимое давления в ПГР основана на их практически одинаковом устройстве, в котором на запорный элемент, выполненный в виде подпружиненного полого плунжера с разными диаметрами на концах, действует с двух сторон одинаковое давление жидкости. Поэтому при известных диаметрах концов плунжера и заданных перепадах давлений расчет сводится к определению силы поджатия пружины:

$$P_{\text{пр}} = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \Delta p_{1,2}, \quad (1)$$

где $P_{\text{пр}}$ – сила поджатия пружины предохранительного клапана на рабочий или предельно допустимый перепады давлений; D_1 – диаметр меньшей ступени плунжера; D_2 – диаметр перекрываемого отверстия; $\Delta p_{1,2}$ – рабочий и предельно допустимый перепады давлений.

Например, если рабочий и предельно допустимый перепады давлений в ПГР составляют $\Delta p_1 = 10$ МПа и $\Delta p_2 = 50$ МПа, то для предохранительного клапана при $D_1 = 10$ мм и $D_2 = 9$ мм сила предварительного поджатия пружины со-

ставит 150 Н, а для запорного клапана при $D_1 = 10$ мм и $D_2 = 9,8$ мм – 160 Н. Таким образом, при значительном разбросе перепадов давлений силы предварительного поджатия пружин предохранительного и запорного (аварийного) клапанов, имеющих практически одинаковые габариты их затворов, отличаются незначительно и имеют небольшую величину, что обеспечивает хорошую компоновку внутри и снаружи ПГР.

Демпфирующие характеристики ПГР с двумя ступенями сопротивления на дроссельном участке на ходах сжатия и отбоя имеют одинаковый вид и рассчитываются по формулам:

$$R_{к1} = \frac{\rho F^3}{2\mu^2 f_o^2 i^3} v_k^2, \quad (2)$$

$$R_{к2} = \frac{\rho F^3}{2\mu^2 (f_o + f_d)^2 i^3} v_k^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости ($\rho = 0,85$ г/см³); μ – коэффициент расхода (для ПГР $\mu = 0,8 \dots 0,9$); F – площадь поршня; f_o – площадь основного дроссельного отверстия 45; f_d – площадь дополнительного дроссельного отверстия 32; i – передаточное отношение в подвеске; v_k – вертикальная скорость колеса.

Демпфирующая характеристика ПГР на клапанном участке при скорости катка, превышающей скорость открытия предохранительного клапана ($v_k \geq v_{пр}$), рассчитывается по формуле:

$$R_{к3} = R_{пк} + \frac{\rho F^3}{2\mu^2 (f_o + f_{пк})^2 i^3} v_k^2, \quad (4)$$

где $f_{пк}$ – площадь отверстия 40 в шайбе 41; $R_{пк} = \Delta p_{пк} F / i$ – сила ПГР, приведенная к колесу, в момент открытия предохранительного клапана 38 при заданной скорости на катке, $\Delta p_{пк}$ – заданный перепад давлений на шайбе 41. Обычно для быстроходных машин сила ПГР, приведенная к колесу, при скорости колеса 1 м/с равняется статической нагрузке $P_{ст}$.

Методика расчета саморегулируемого адаптивного демпфирующего узла ПГР заключается в определении условий срабатывания клапанов 20 и 28 в зависимости от амплитуды, частоты и направления колебаний подвески, в результате чего обеспечивается практически мгновенное закрытие дополнительного дроссельного канала, вследствие перекрытия плунжерами 20 и 28 поперечного канала 17. Она основана на определении давления в пневматической полости рессоры, при превышении или понижении которого выше или ниже заданных значений срабатывают адаптивные клапаны максимальных ходов сжатия или отбоя, кратковременно перекрывающие дополнительный дроссельный канал. Методика предполагает определение параметров предварительного поджатия пружин этих клапанов и диаметра дросселя-замедлителя, обеспечивающих задержку открытия дополнительного канала при уменьшении амплитуды колебаний подвески. Все формулы и порядок расчета приведены в [5].

Демпфирующие характеристики данной адаптивной подвески, рассчитанные по ф. (2) – (4) при открытых и закрытых клапанах 20 и 28 и работе предохранительного клапана 38, показаны на рис. 2.

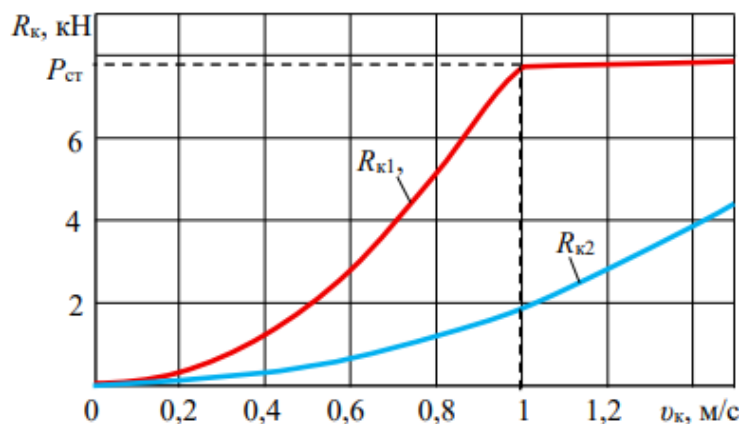


Рис. 2. Демпфирующие характеристики адаптивной пневмогидравлической подвески на ходах сжатия и отбоя:

$R_{к1}$ – при закрытых адаптивных клапанах 20 и 28;

$R_{к2}$ – при открытых адаптивных клапанах 20 и 28

Исходные данные: 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 20 28 имеют одинаковые размеры: $d_{пл1} = 6 \text{ мм}$ и $d_{пл2} = 22 \text{ мм}$; диаметр основного дроссельного отверстия 45 $d_o = 2,9 \text{ мм}$; диаметр дополнительного дроссельного отверстия 32 $d_{доп} = 2,9 \text{ мм}$; диаметр отверстия 40 предохранительного клапана $D_1 = 10 \text{ мм}$.

Выводы

1. Разработана конструкция и инженерная методика расчета адаптивной пневмогидравлической рессоры с улучшенными виброзащитными свойствами и повышенной «живучестью», которая автоматически усиливает демпфирование при больших ходах, в том числе в момент приземления после преодоления трамплинов, а также ограничивает силу при высоких и экстремальных скоростях сжатия, предотвращая ее разрушение при подрыве колеса на mine.

2. Применение разработанной рессоры с адаптивным демпфированием позволит уменьшить энергозатраты и повысить скорость и живучесть быстроходной машины в тяжелых условиях эксплуатации. По сравнению с подвесками с внешним управлением, предлагаемая рессора позволит снизить техническую сложность и стоимость подвесок быстроходных машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2319620 Российская Федерация, МПК В 60 G 11/26, F 16 F 5/00. Пневмогидравлическая рессора подвески транспортного средства / В. В. Новиков, И. М. Рябов, А. С. Горобцов, К. В. Чернышов, Ан. В. Подзоров; заявитель ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – Бюл. № 3, 2008.
2. Поздеев, А. В. Регулируемые пневматические и пневмогидравлические рессоры подвесок автотранспортных средств: монография / А. В. Поздеев, В. В. Новиков, А. С. Дьяков, А. В. Похлебин, И. М. Рябов, К. В. Чернышов; ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – 244 с.
3. Пат. 2694706 Российская Федерация, МПК B60G11/26 Пневмогидравлическая рессора подвески транспортного средства / В. В. Новиков, И. М. Рябов, К. В. Чернышов, А. В. Поздеев, Г. В. Марков; заявитель ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – Бюл. № 20, 2019.
4. Новиков, В. В. Пневмогидравлическая рессора с адаптивным саморегулируемым демпфером для подвески быстроходной гусеничной машины и методика ее расчета / В. В. Новиков, И. М. Рябов, К. В. Чернышов, А. В. Поздеев, А. В. Похлебин, Г. В. Марков // Тракторы и сельхозмашины. – 2020. – № 2. – С. 13–20.
5. Новиков, В. В. Виброзащитные свойства подвесок автотранспортных средств: монография / В. В. Новиков, И. М. Рябов, К. В. Чернышов; ВолгГТУ. – 2-е изд., испр. и доп. – М. ; Вологда, 2021. – 384 с.
6. Новиков, В. В. Перспективные направления повышения виброзащитных свойств пневмогидравлических и пневматических подвесок АТС / В. В. Новиков, А. В. Поздеев, К. В. Чернышов, А. В. Похлебин // Грузовик. – 2022. – № 7. – С. 3–10.
7. Полез. модель 237767 Российская Федерация, МПК В 60 G 11/26. Пневмогидравлическая рессора подвески транспортного средства / В. В. Новиков, А. В. Похлебин, В. И. Карлов, А. В. Поздеев, Д. А. Чумаков, А. Р. Брунилина; заявитель ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – Бюл. № 28, 2025.