

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОДРЕССОРИВАНИЯ

К.Т.Н. Ципилев А.А., д.т.н. Наказной О.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

alexts@bmstu.ru

При разработке новых подвесок гусеничных и колесных машин, а также при так называемом реверс-инжиниринге уже существующих конструкций (в том числе, в образовательном процессе подготовки профильных кадров) необходимо решить задачу по нахождению упругой характеристики подвески. В первом случае необходимо обеспечить выполнение заданных тактико-технических требований, во втором – восстановить вид характеристики по известной конструкции. Обе эти задачи сильно затрудняются при отсутствии точных и универсальных аналитических зависимостей, пригодных для определения характеристик упругих элементов подвески различных конструктивных реализаций. Опыт взаимодействия с некоторыми заводами показывает, что конструкторы, не имея возможности качественно рассчитать упругие характеристики, пользуются методом подбора и аналогий, когда для новой машины используют подвеску как на старой, масштабируя ее по размерам, чтобы приблизительно сохранить значения рабочих давлений. Для этого проводят многочисленные стендовые испытания, по результатам которых выбирают требуемые зарядные объем и давление. Особую сложность вызывают подвески с противодавлением, так как не только итоговая характеристика, но и работоспособность всего узла зависит от комбинации объемов и давлений двух камер, которые работают в противофазе: когда одна нагружается, другая разгружается, и наоборот. Использование аналитических зависимостей позволит сократить время, затрачиваемое на проектирование; параметризовать в определенной мере кинематику подвески, получить значения эквивалентной жесткости подвески, а также иметь возможность разработки характеристик модельного ряда пневмогидравлических рессор для машин различной весовой категории.

В настоящей статье представлена методика аналитического определения характеристик пневмогидравлических рессор различных конструкций. Среди вариантов исполнения как реально используемые в современной и исторической технике (в частности, на БМД-1, 2, 3, 4; ГМ-352; Урал «Тайфун»; Объект 775 и др.), так и полученные путем комбинации различных конструктивных элементов, реализация которых может быть полезной в образовательном процессе при подготовке профильных кадров. Представленные в статье зависимости позволяют получить статические и динамические упругие характеристики при различных показателях полнотропы и пригодны при проектировании подвесок колесных и гусеничных машин разного назначения.

Ключевые слова: гусеничные машины, колесные машины, подвеска, пневмогидравлическая рессора, система подрессоривания.

Для цитирования: Ципилев А.А., Наказной О.А. Аналитическое определение статических и динамических упругих характеристик пневмогидравлических систем подрессоривания // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 4 (50). С. 60–72. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-60-72

Введение

Использование пневмогидравлических устройств, в частности, пневмогидравлических (также встречается – гидропневматических) рессор (ПГР), является перспективным способом совершенствования систем подрессоривания быстроходных гусеничных и колесных машин. Это отмечено во многих работах, например, в [1–6], а пути достижения этой цели представлены в диссертациях ряда российских

ученых, к примеру [7–11]. Вместе с тем, вопросы аналитического определения конструктивных параметров ПГР зачастую подробно не рассматриваются, хотя возможность параметризации упругой характеристики, особенно с учетом кинематических связей ПГР и опорного катка (колеса для колесных машин), является интересной и актуальной задачей.

В статье [12] была представлена методика определения характеристик упругого элемен-

та подвески для случая использования ПГР. Показанные в статье зависимости пригодны для получения характеристик упругого элемента, при которых показатель политропы n остается неизменным. В частности, рассматривался случай с $n = 1,4$. Однако в реальных условиях отличный от единицы показатель политропы характерен только для режима движения машины, когда сжатие и расширение газа происходят достаточно быстро, так что теплообменом ПГР с окружающей средой, и, в частности, теплообменом газа со стенками ПГР можно пренебречь. При нахождении машины в неподвижном положении, например, после установки ПГР на заводе или после ремонта элементов ходовой части, нагретый вследствие сжатия газ полностью отдает избыточную энергию окружающей среде. Медленно протекающие процессы сжатия-расширения можно считать изотермическими, то есть проходящими при неизменной температуре рабочего тела. В этом случае показатель политропы n равен единице, а рассчитанное зарядное давление по зависимостям в [12] будет недостаточным для обеспечения заданного статического хода подвески. В связи с этим разделяют понятия статической и динамической упругих характеристик ПГР.

Под статической упругой характеристикой ПГР понимают зависимость силы сопротивления газа от хода штока, полученную при крайне медленном сжатии, когда показатель политропы $n = 1$, а процесс сжатия можно считать изотермическим. Динамической упругой характеристикой называют зависимость, при которой показатель политропы n отличен от единицы.

Определение основных параметров ПГР, таким образом, должно производиться для двух случаев: когда $n = 1$ и когда $n \neq 1$. В настоящей статье представлены с частичным выводом зависимости, которые позволяют получить основные конструктивные параметры, а также статические и динамические упругие характеристики ПГР различных конфигураций.

Исходные данные

Исходными данными для определения основных параметров ПГР [12, 13] являются следующие:

– значения силовой $u(\beta)$ передаточной функции при начальном β_0 , статическом $\beta_{ст}$ и максимальном β_{max} угловых положениях балансира;

- статический $f_{ст}$ и полный $f_{полн}$ ходы подвески, м, соответствующие статическому и максимальному угловому положениям балансира;
- статический $x_{ст}$ и полный $x_{полн}$ ходы штока, м, соответствующие статическому и максимальному угловому положениям балансира;
- статическая сила, приходящаяся на один опорный каток $P_{ст}$, Н;
- эффективные площади основного $S_{п}$ и вложенного $S_{в.п}$ (для двухпоршневой ПГР) поршней, м²;
- коэффициент динамичности для подвески $K'_{дин}$ и коэффициент динамичности для ПГР $K'_{дин} = K_{дин} u(\beta_{ст})/u(\beta_{max})$.

Однопоршневая однокамерная ПГР без противодействия

В общем виде упругая характеристика ПГР может быть выражена известной зависимостью [12, 13]:

$$P_{шт}(x_{шт}) = \left(\frac{V_0}{V_0 - S_{п} x_{шт}} \right)^n p_0 S_{п}, \quad (1)$$

где $P_{шт}$ – сила упругого сопротивления газа, приведенная к штоку ПГР, Н; $x_{шт}$ – ход штока, м;

V_0 – зарядный (начальный) объем пневмокамеры, м³; p_0 – зарядное (начальное) давление газа в ПГР, Па.

Для статической упругой характеристики $n = 1$, в качестве p_0 следует брать зарядное давление, для динамической – $n = 1,4$, а в качестве p_0 следует брать начальное давление. Объем в обоих случаях остается неизменным.

В первую очередь получение необходимых параметров производится для зарядной температуры $T_{зар}$. Как правило, она соответствует нормальной температуре. Начальный объем пневмокамеры V_0 для однопоршневой однокамерной ПГР определяется по формуле [12, 13]

$$V_0 = \frac{(x_{полн} \sqrt[n]{K'_{дин}} - x_{ст}) S_{п}}{\sqrt[n]{K'_{дин}} - 1}, \quad (2)$$

при этом $n = 1,4$, так как требуемый коэффициент динамичности должен обеспечиваться для динамической упругой характеристики.

Далее следует определить зарядное давление газа в ПГР $p_{0зар}$, то есть такое давление, до которого газ заряжают в ПГР. Оно необходимо для обеспечения требуемого статического положения штока (опорного катка). Для построения динамической упругой харак-

теристики будем пользоваться другим значением – начальным давлением $p_{0нач}$.

Зарядное давление можно вычислить, зная статический ход штока, по формуле

$$p_{0зар} = \left(\frac{V_0 - S_n x_{ст}}{V_0} \right) \frac{P_{ст}}{S_n u(\beta_{ст})}. \quad (3)$$

В свою очередь, начальное давление определяется по аналогичной зависимости, но с учетом показателя политропы:

$$p_{0нач} = \left(\frac{V_0 - S_n x_{ст}}{V_0} \right)^n \frac{P_{ст}}{S_n u(\beta_{ст})}. \quad (4)$$

При изменении температуры до некоторой произвольной, условно принимаемой за рабочую $T_{раб}$, поменяются значения давлений в ПГР и, как следствие, статического хода штока (опорного катка). Несложно определить новое значение статического хода штока при температуре $T_{раб}$, зная закон Шарля ($p_1/p_2 = T_1/T_2$):

$$x_{шт}(\beta_T) = \frac{S_n x_{ст} T_{раб} - V_0 (T_{раб} - T_{зар})}{S_n T_{зар}}, \quad (5)$$

здесь β_T – угол поворота балансира, при котором обеспечивается новое статическое положение подвески. Его можно вычислить, зная выражение для хода штока при заданной кинематике подвески [13, 14].

Динамическая упругая характеристика будет строиться относительно нового статического положения. Соответственно, выражения для статической и динамической упругих характеристик при температуре $T_{раб}$ примут вид

$$\begin{aligned} P_{шт.Т}(x_{шт}) &= \frac{T_{раб}}{T_{зар}} \left(\frac{V_0}{V_0 - S_n x_{шт}} \right) p_{0зар} S_n, \\ P_{шт.Т.дин}(x_{шт}) &= \left(\frac{V_0 - S_n x_{шт}(\beta_T)}{V_0 - S_n x_{шт}} \right)^n \frac{P_{ст}}{u(\beta_T)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $P_{шт.Т}(x_{шт})$ – выражение для статической упругой характеристики при температуре $T_{раб}$; $P_{шт.Т.дин}(x_{шт})$ – выражение для динамической упругой характеристики при температуре $T_{раб}$.

В ряде случаев, когда разница температур велика, результат вычислений по формуле (5) может получиться меньше нуля. Однако ход штока не может быть отрицательным. В этом случае следует принять его равным нулю, а построение динамической характеристики производить от нулевого хода штока.

Однопоршневая однокамерная ПГР с противодавлением

Характерной особенностью ПГР с противодавлением является тот факт, что камера противодействия разгружает шток. Это позволяет обеспечить любое значение силы на штоке при нулевом его ходе, включая нулевое и отрицательное (то есть использование в качестве отбойника). Общая зависимость для упругой характеристики однопоршневой однокамерной ПГР с противодавлением имеет вид

$$\begin{aligned} P_{шт}(x_{шт}) &= \left(\frac{V_0}{V_0 - S_n x_{шт}} \right)^n p_0 S_n - \\ &- \left(\frac{V_{0п.д} - S_{п.д} x_{шт.полн}}{V_{0п.д} - S_{п.д} (x_{шт.полн} - x_{шт})} \right)^n p_{0п.д} S_{п.д}. \end{aligned} \quad (7)$$

Удобно производить расчет, полагая, что для статической упругой характеристики сила при нулевом ходе штока будет равна нулю. Это возможно при равенстве сил, действующих на шток со стороны основной пневмокамеры и со стороны пневмокамеры противодействия. Введем понятие нулевого давления в пневмокамере, которое достигается для статической упругой характеристике при нулевом ходе штока (и минимальном объеме пневмокамеры противодействия $V_{мин.п.д} = V_{0п.д} - S_{п.д} \cdot x_{шт.полн}$):

$$p_{0п.д} = \frac{p_{0зар} S_n}{S_{п.д}}, \quad (8)$$

где $S_{п.д}$ – эффективная площадь поршня со стороны камеры противодействия, м².

Также без вывода приведем зависимость для начального объема камеры противодействия V_0 . Он рассчитывается так, чтобы давление в камере не падало ниже минимально допустимого всем диапазоном температур эксплуатации:

$$V_{0п.д} = \frac{p_{0п.д} S_{п.д} x_{шт.полн}}{p_{0п.д} - p_{мин}}. \quad (9)$$

Минимально допустимое давление определяется из следующего условия. Сила, создаваемая газом в камере противодействия, должна превышать силу сухого трения в уплотнениях. Силы трения в уплотнениях меняются в широком пределе и зависят как от перепада давления на уплотнении, так и от температуры, материала пар трения, наличия смазанного слоя

и т.д. Минимальное давление p_{\min} , Па можно вычислить по эмпирической зависимости, полагая, что минимальный диаметр поршня-разделителя составляет 0,04 м, сила трения равна 1000 Н (что согласуется с рядом экспериментов), а минимальная температура эксплуатации составляет 223 К:

$$p_{\min} = \frac{1000}{0,25\pi \cdot 0,04^2} \cdot \frac{T_{\text{зар}}}{223} = 3570T_{\text{зар}}. \quad (10)$$

Поскольку камера противодействия разгружает шток ПГР, необходимо откорректировать (увеличить) зарядные давления в пневмокамерах:

$$p'_{0\text{зар}} = p_{0\text{зар}} \left[1 + \left(\frac{z}{1-z} \right)^n \cdot \left(\frac{u(\beta_{\text{ст}})}{u(\beta_0)} \right)^{1/n} \right]^n, \quad (11)$$

$$p'_{\text{п.д.зар}} = p_{\min} \left[1 + \left(\frac{z}{1-z} \right)^n \cdot \left(\frac{u(\beta_{\text{ст}})}{u(\beta_0)} \right)^{1/n} \right]^n,$$

значение коэффициента z вычисляется

$$z = \left[\frac{x_{\text{шт.полн}} (x_{\text{шт.полн}} - x_{\text{ст}}) \sqrt[3]{K'_{\text{дин}}}}{(x_{\text{шт.полн}} \sqrt[3]{K'_{\text{дин}}} - x_{\text{ст}}) \times \left[x_{\text{шт.полн}} + x_{\text{ст}} \left(\sqrt[3]{p_{0\text{п.д}}/p_{\min}} - 1 \right) \right]} \right]^n. \quad (12)$$

В свою очередь, необходимо откорректировать (увеличить) также и зарядный объем основной пневмокамеры. Степень увеличения определяется несколько иначе:

$$V'_0 = V_0 \cdot \delta V, \quad \delta V = \sqrt[n]{\frac{u(\beta_{\text{ст}})}{u(\beta_0)}} \cdot \sqrt[n]{1 + \left(\frac{z}{1-z} \right)^n \cdot \left(\frac{u(\beta_{\text{ст}})}{u(\beta_0)} \right)^{1/n}}. \quad (13)$$

Выражения (11) – (13) справедливы для зарядной и рабочей температур и обеспечивают сохранение статического хода. Они также пригодны для дальнейших расчетов ПГР иных конструкций. Однако их недостатком является несовпадение коэффициентов динамичности для ПГР с противодействием и без него. Аналитическое решение, обеспечивающее одновременное сохранение значений коэффициента динамичности и статического хода, весьма сложно, но может быть получено в каждом отдельном случае путем численного решения системы уравнений в виде равенства зависимостей (1) и (7) для статического и полного ходов штока относительно объема основной пневмокамеры и зарядного давления в ней.

Выражение для статической упругой характеристики при $T = T_{\text{зар}}$ примет вид

$$P_{\text{шт}}(x_{\text{шт}}) = \left[\left(\frac{V'_0}{V'_0 - S_{\text{п}} x_{\text{шт}}} \right) - \left(\frac{V_{\text{мин.п.д}}}{V_{\text{мин.п.д}} + S_{\text{п.д}} x_{\text{шт}}} \right) \right] p_{0\text{зар}} S_{\text{п}}, \quad (14)$$

а для динамической, соответственно,

$$P_{\text{шт}}(x_{\text{шт}}) = \left[\left(\frac{V'_0}{V'_0 - S_{\text{п}} x_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{V'_0 - S_{\text{п}} x_{\text{ст}}}{V'_0 - S_{\text{п}} x_{\text{шт}}} \right)^n - \left(\frac{V_{\text{мин.п.д}}}{V_{\text{мин.п.д}} + S_{\text{п.д}} x_{\text{ст}}} \right) \left(\frac{V_{\text{мин.п.д}} + S_{\text{п.д}} x_{\text{ст}}}{V_{\text{мин.п.д}} + S_{\text{п.д}} x_{\text{шт}}} \right)^n \right] p_{0\text{зар}} S_{\text{п}}. \quad (15)$$

При изменении температуры до $T_{\text{раб}}$, соответственно, возрастают давления в пневмокамерах, а новое значение статического хода штока можно определить численно из выражения

$$\frac{P_{\text{ст}}}{u(\beta_T) p_{0\text{зар}} S_{\text{п}} \left(1 + z/(1-z) \cdot \left(u(\beta_{\text{ст}})/u(\beta_{\text{max}}) \right)^n \right)} \times \times \frac{T_{\text{зар}}}{T_{\text{раб}}} = \left[\left(\frac{V'_0}{V'_0 - S_{\text{п}} x_{\text{шт}}(\beta_T)} \right) - \left(\frac{(p_{0\text{п.д}} + p_{\min}) x_{\text{шт.полн}}}{(p_{0\text{п.д}} + p_{\min}) x_{\text{шт.полн}} - p_{\min} x_{\text{шт}}(\beta_T)} \right) \right], \quad (16)$$

здесь аргументом является угол β_T .

При температуре $T_{\text{раб}}$ статическая и динамическая упругие характеристики примут вид:

$$P_{\text{шт.Т}}(x_{\text{шт}}) = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{зар}}} \left[\left(\frac{V'_0}{V'_0 - S_{\text{п}} x_{\text{шт}}} \right) - \left(\frac{V_{\text{мин.п.д}}}{V_{\text{мин.п.д}} + S_{\text{п.д}} x_{\text{шт}}} \right) \right] p_{0\text{зар}} S_{\text{п}},$$

$$P_{\text{шт.Т.дин}}(x_{\text{шт}}) = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{зар}}} \left[\left(\frac{V'_0 - S_{\text{п}} x_{\text{шт}}(\beta_T)}{V'_0 - S_{\text{п}} x_{\text{шт}}} \right)^n \times \times p_{\text{ст.1}} S_{\text{п}} - \left(\frac{V_{\text{мин.п.д}}}{V_{\text{мин.п.д}} + S_{\text{п.д}} x_{\text{шт}}} \right)^n p_{\text{ст.1.п.д}} S_{\text{п}} \right], \quad (17)$$

$$p_{\text{ст.1}} = \left(\frac{V'_0}{V'_0 - S_{\text{п}} x_{\text{шт}}(\beta_T)} \right) p_{0\text{зар}},$$

$$p_{\text{ст.1.п.д}} = \left(\frac{V_{\text{мин.п.д}}}{V_{\text{мин.п.д}} + S_{\text{п.д}} x_{\text{шт}}(\beta_T)} \right) p_{0\text{зар}}.$$

При построении динамических характеристик сила упругого сопротивления сравнивается с нулем до достижения вывешенного положения опорного катка, то есть пневмокамера противодействия сработает как ограничитель минимального хода подвески. Это несколько снижает удельную потенциальную энергию подвески, что, однако, может быть скомпенсировано ростом коэффициента динамичности. Вместе с тем, это увеличивает эквивалентную жесткость подвески, одновременно позволяя несколько упростить конструкцию.

Двухпоршневая однокамерная ПГР без противодействия

Для такой ПГР основные зависимости остаются без изменения по сравнению с данными, представленными в [1]. Начальный объем определяется

$$V_{0в.п} = V_0 - x_{ст} (S_{п} - S_{в.п}), \quad (18)$$

где $S_{в.п}$ – площадь вложенного поршня, м².

Зарядное давление можно вычислить

$$P_{0зар.в.п} = \left(\frac{V_0 - S_{п} x_{ст}}{V_{0в.п}} \right) \frac{P_{ст}}{S_{п} u(\beta_{ст})}, \quad (19)$$

а начальное давление для построения динамической характеристики

$$P_{0нач.в.п} = \left(\frac{V_0 - S_{п} x_{ст}}{V_{0в.п}} \right)^n \frac{P_{ст}}{S_{п} u(\beta_{ст})}. \quad (20)$$

Статическая и динамическая упругая характеристики изменяются только для ходов, меньших статического:

$$P_{шт.в.п}(x_{шт}) = \left(\frac{V_{0в.п}}{V_{0в.п} - S_{в.п} x_{шт}} \right) P_{0зар.в.п} S_{в.п}$$

при $x < x_{ст}$,

$$P_{шт.п.дин}(x_{шт}) = \left(\frac{V_{0в.п}}{V_{0в.п} - S_{в.п} x_{шт}} \right)^n P_{0нач.в.п} S_{в.п}$$

при $x < x_{ст}$.

(21)

Для ходов, больших статического, они вычисляются по (1).

При повышении температуры статический ход не изменится, что обеспечивается условием $S_{в.п}/S_{п} > T_{зар}/T_{раб}$. Поэтому при температуре $T_{раб}$ оба выражения в (21) следует домножить на коэффициент $T_{раб}/T_{зар}$. В остальном зависимости остаются неизменными.

Однопоршневая двухкамерная ПГР без противодействия

Для двухкамерной ПГР зарядные давления в пневмокамерах могут быть одинаковыми или различными. Вне зависимости от этого начальные объемы пневмокамер определяются по [12]. Зарядные и начальные давления в пневмокамерах, если они одинаковы, определяются по (3) и (4), а прочие выражения совпадают с таковыми для случая однокамерной однопоршневой ПГР без противодействия. Соответственно, идентичными будут и упругие характеристики.

При разных зарядных давлениях выражения, их определяющие, примут вид

$$P_{0низ.зар} = P_{0низ.нач} = \frac{P_{ст}}{S_{п} u(\beta_{ст})},$$

$$P_{0выс.зар} = \left(1 + \frac{(1+k)x_{ст} \left(\sqrt[n]{K'_{дин}} - 1 \right)}{x_{шт.дин} \sqrt[n]{K'_{дин}}} \right) \frac{P_{ст}}{S_{п} u(\beta_{ст})},$$

$$P_{0выс.нач} = \left(1 + \frac{(1+k)x_{ст} \left(\sqrt[n]{K'_{дин}} - 1 \right)}{x_{шт.дин} \sqrt[n]{K'_{дин}}} \right)^n \frac{P_{ст}}{S_{п} u(\beta_{ст})}, \quad (22)$$

причем индекс «низ» относится к пневмокамере низкой жесткости, индекс «выс» – к пневмокамере высокой жесткости, а коэффициент k характеризует отношение жесткостей этих камер: $k = c_{выс}/c_{низ}$. Также следует обратить внимание, что начальное и зарядное давления для пневмокамеры низкой жесткости совпадают. Это связано с тем, что она не вступает в работу до статического хода (кроме пониженных температур).

При температуре $T_{зар}$ упругая характеристика изменится только для ходов меньших статического:

$$P_{шт.дк}(x_{шт}) = \left(\frac{V_{0выс}}{V_{0выс} - S_{п} x_{шт}} \right) P_{0выс.зар} S_{п},$$

$$P_{шт.дк.дин}(x_{шт}) = \left(\frac{V_{0выс}}{V_{0выс} - S_{п} x_{шт}} \right)^n P_{0выс.нач} S_{п}.$$
(23)

Для ходов больших статического она будет иметь вид (1) вне зависимости от значения показателя политропы. При повышении температуры необходимо, как и прежде, вычислить новое статическое положение штока. Для этого можно воспользоваться формулой (5), а в качестве начального объема взять таковой для пневмокамеры высокой жесткости. По-

сколькx начальное давление в пневмокамере низкой жесткости остается неизменным (в том смысле, что не зависит от хода штока), при $n \neq 1$ включение этой пневмокамеры произойдет несколько ранее. Ход штока, при котором давления сравниваются, составит

$$x'_{шт} = V_0/S_{п} - (V_0/S_{п} - x_{шт}(\beta_T))^n \sqrt[n]{T_{нач}/T_{раб}} \quad (24)$$

Соответственно, изменится и выражение для динамической упругой характеристики:

$$P_{шт.дк.Т.дин}(x_{шт}) = \begin{cases} \left(\frac{V_{0выс} - S_{п}x_{шт}(\beta_T)}{V_{0выс} - S_{п}x'_{шт}} \right)^n \frac{P_{ст}}{u(\beta_T)} \text{ при } x < x'_{шт}, \\ \left(\frac{V_0 - S_{п}x'_{шт}}{V_0 - S_{п}x_{шт}} \right)^n \frac{P_{ст}}{u(\beta_T)} \frac{T_{раб}}{T_{зар}} \text{ при } x \geq x'_{шт}. \end{cases} \quad (25)$$

Для статической упругой характеристики при температуре $T_{раб}$ изменение давления определяется только температурой, поэтому можно воспользоваться выражениями (1) и (23), домножив их на $T_{раб}/T_{зар}$.

Двухпоршневая двухкамерная ПГР без противодействия

Для двухкамерной двухпоршневой ПГР без противодействия с одинаковыми зарядными давлениями все выражения не отличаются от таковых для однокамерной двухпоршневой ПГР, а для вычисления начальных объемов каждой пневмокамеры следует подставлять $V_{0в.п}$ в соответствующие зависимости.

При разных зарядных давлениях начальные давление и объем изменяются только для пневмокамеры высокой жесткости. Выражения для зарядных давлений в камерах имеют вид

$$P_{0выс.зар.в.п} = \frac{P_{ст}(V_0 - S_{п}x_{ст})}{(k+1)V_{0выс.вп}S_{п}u(\beta_{ст})}, \quad (26)$$

$$P_{0низ.зар.в.п} = \frac{P_{ст}}{S_{п}u(\beta_{ст})}.$$

Начальные давления можно вычислить

$$P_{0выс.нач.в.п} = \frac{P_{ст}(V_0 - S_{п}x_{ст})^n}{(V_{0выс.вп}(k+1))^n S_{п}u(\beta_{ст})}, \quad (27)$$

$$P_{0низ.нач.в.п} = \frac{P_{ст}}{S_{п}u(\beta_{ст})},$$

а начальные объемы:

$$V_{0выс.в.п} = V_{0выс} - x_{ст}(S_{п} - S_{в.п}), \quad V_{0низ.в.п} = V_{0низ}. \quad (28)$$

Статическая и динамическая упругие характеристики при $T_{зар}$ совпадают по виду с таковыми для однокамерной двухпоршневой ПГР, однако в качестве начального объема в (21) следует подставлять $V_{0выс.в.п}$, в то время как выражение (1) останется без изменений.

При изменении температуры до $T_{раб}$ статическая упругая характеристика изменится только в части дополнительного множителя $T_{раб}/T_{зар}$, а для динамической упругой характеристики следует учитывать два события: соприкосновение поршней, которое происходит при неизменном ходе штока $x_{ст}$, и включение в работу пневмокамеры низкой жесткости, что происходит при некотором ходе штока $x'_{шт}$, меньшем $x_{ст}$. Включение в работу пневмокамеры низкой жесткости можно вычислить по (24), полагая в качестве площади поршня величину $S_{в.п}$. Динамическая упругая характеристика примет вид

$$P_{шт.дк.в.п.Т.дин} = \begin{cases} \left(\frac{V_{0выс.в.п} - S_{в.п}x_{шт}(\beta_T)}{V_{0выс.в.п} - S_{в.п}x'_{шт}} \right)^n \frac{P_{ст}S_{в.п}}{u(\beta_T)S_{п}} \frac{T_{раб}}{T_{зар}} \\ \text{при } x < x'_{шт}, \\ \left(\frac{V_{0в.п} - S_{в.п}x'_{шт}}{V_{0в.п} - S_{в.п}x_{шт}} \right)^n \frac{P_{ст}S_{в.п}}{u(\beta_T)S_{п}} \frac{T_{раб}}{T_{зар}} \\ \text{при } x'_{шт} \leq x \leq x_{ст}, \\ \left(\frac{V_{0в.п} - S_{в.п}x'_{шт}}{V_{0в.п} - S_{п}x_{шт}} \right)^n \frac{P_{ст}}{u(\beta_T)} \frac{T_{раб}}{T_{зар}} \text{ при } x > x_{ст}. \end{cases} \quad (29)$$

Двухпоршневая однокамерная ПГР с противодействием

Поскольку для двухпоршневой ПГР вид упругой характеристики изменяется только для ходов штока меньших статического (или близкого к нему, соответствующего моменту соприкосновения поршней), различия в получении параметров пневмокамеры противодействия также будут касаться только этого диапазона ходов.

Нулевое давление в пневмокамере противодействия $p_{0в.п.п.д}$ можно вычислить по (8), причем в качестве давления $p_{0зар}$ следует брать таковое для однокамерной двухпоршневой ПГР без противодействия, а в качестве эффективных площадей поршней – для вложенного

поршня. Начальный объем камеры противо-
 давления можно вычислить, несколько преоб-
 разовав зависимость (9), учтя изменение пло-
 щади поршня:

$$V_{0п.д} = \frac{p_{0п.д} (S_{п.д} x_{шт.полн} - (S_{п.д} - S_{в.п.п.д}) x_{ст})}{p_{0п.д} - p_{мин}}, \quad (30)$$

где $S_{в.п.п.д}$ – площадь вложенного поршня
 со стороны камеры противодействия, вычисля-
 ется в зависимости от кинематики ПГР по [1].

Зарядные давления в пневмокамере про-
 тиводействия и основной пневмокамере вы-
 числяются по (11), причем коэффициент z вы-
 числяется по (12), но в качестве $p_{0п.д}$ следует
 подставлять $p_{0в.п.п.д}$. Объем основной пневмока-
 меры увеличивается, как и прежде, и расчи-
 тывается по (13). Статическая и динамическая
 упругие характеристики также изменяются
 только для ходов, меньших статического:

$$P_{шт.в.п} (x_{шт}) = \left[\left(\frac{V_{0в.п} \delta V}{V_{0в.п} \delta V - S_{в.п} x_{шт}} \right) - \left(\frac{V_{мин.п.д}}{V_{мин.п.д} + S_{в.п.п.д} x_{шт}} \right) \right] \left(1 + \frac{z}{1-z} \cdot \left(\frac{u(\beta_{ст})}{u(\beta_{max})} \right)^n \right) \times p_{0зар.вп} S_{в.п} \text{ при } x < x_{ст},$$

$$P_{шт.в.п.дин} (x_{шт}) = \left[\left(\frac{V'_0}{V'_0 - S_{п} x_{ст}} \right) \left(\frac{V_{0в.п} \delta V}{V_{0в.п} \delta V - S_{в.п} x_{шт}} \right)^n - \left(\frac{V_{мин.п.д}}{V_{мин.п.д} + S_{п.д} x_{ст}} \right) \left(\frac{V_{мин.п.д} + S_{в.п.п.д} x_{ст}}{V_{мин.п.д} + S_{в.п.п.д} x_{шт}} \right)^n \right] \times p_{0зар.вп} S_{в.п} \text{ при } x < x_{ст}. \quad (31)$$

А для ходов, больших статического они
 могут быть вычислены по (14)–(17).

Однопоршневая двухкамерная ПГР с противодействием

Для двухкамерной однопоршневой ПГР
 с противодействием при одинаковых заряд-
 ных давлениях все зависимости совпадают
 с таковыми для однопоршневой однокамерной
 ПГР с противодействием, а начальные объемы
 пневмокамер высокой и низкой жесткости вы-
 числяются по [12], но с учетом коэффициента δV .

Если зарядные давления различны, они
 рассчитываются по (22), а результат затем до-
 множается на $1 + z(u(\beta_{ст})/u(\beta_{max}))^n/(1-z)$.
 Начальный объем пневмокамеры высокой

жесткости рассчитывается по [1], а пневмока-
 меры низкой жесткости – $V_{0низ.п.д} = V'_0 - V_{0выс}$.

Двухпоршневая двухкамерная ПГР с противодействием

Для двухпоршневой двухкамерной ПГР
 с противодействием при одинаковых заряд-
 ных давлениях выражения не отличаются
 от случая двухпоршневой однокамерной ПГР
 с противодействием. При разных зарядных
 давлениях коррекции подлежат только объем
 и давление камеры высокой жесткости, кото-
 рые вычисляются по зависимостям (26)–(28),
 а затем давление домножают на выражение
 $1 + z(u(\beta_{ст})/u(\beta_{max}))^n/(1-z)$, а объем – на ко-
 эффициент δV (13). Объем пневмокамеры
 низкой жесткости, как и прежде, опреде-
 ляют разницей между суммарным объемом
 и объемом пневмокамеры высокой жестко-
 сти.

Реализация упругих характеристик подвески

В качестве примера реализации харак-
 теристик рассмотрим гусеничную машину
 с параметрами, представленными в табл. 1.
 Для простоты будем считать, что кинематика
 соответствует кинематике прямого хода ПГР
 с подвижным корпусом.

В таблице 2 представлены рассчитанные
 по зависимостям (2)–(5), (8)–(13), (16), (18)–
 (20), (22), (26)–(28), (30), а также по зависимо-
 стям без ссылок основные параметры для всех
 рассмотренных вариантов конструкции ПГР
 (при температуре $T_{нач}$). Для двухкамерных
 ПГР принято, что зарядные давления различ-
 ны, поскольку при одинаковых зарядных дав-
 лениях вид упругой характеристики не будет
 отличаться от ПГР аналогичной конструкции,
 но однокамерной.

На рис. 1–4 представлены статические и ди-
 намические упругие характеристики ПГР раз-
 личных видов, а в таблице 3 – сравнение коэф-
 фициентов динамичности.

Для ПГР с противодействием в ряде кон-
 струкций (для однокамерных ПГР и двух-
 камерных с одинаковым зарядным давлени-
 ем) коэффициент динамичности получается
 более высоким, нежели для аналогичной кон-
 струкции без противодействия. Это вызвано,
 в первую очередь, тем, что камера противодей-
 ствия разгружает обе основных пневмокамеры,
 а не только пневмокамеру высокой жесткости.

Таблица 1

Параметры гусеничной машины
Table 1. Tracked vehicle parameters

Наименование параметра	Значение
Общая масса M , кг	36700
Момент инерции продольный J_y , кг·м ²	271800
Радиус балансира R_0 , м	0,360
Статическая сила, приведенная к одному опорному катку $P_{ст}$, Н	30019
Статический ход подвески $f_{ст}$, м	0,100
Динамический ход подвески $f_{дин}$, м	0,300
Начальный угол поворота балансира β_0 , град	40,93
Статический угол поворота балансира $\beta_{ст}$, град	61,46
Максимальный угол поворота балансира β_{max} , град	110,83
Угол между рычагами балансира и ПГР α , град	65,23
Радиус рычага ПГР b , м	0,255
Расстояние между точками крепления балансира и ПГР на корпусе c , м	0,711
Угол наклона линии c к горизонту γ , град	44,71
Коэффициент динамичности подвески $K_{дин}$	3,50
Диаметр основного поршня $D_{п}$, м	0,100
Диаметр вложенного поршня $d_{в.п}$, м	0,085
Эффективный диаметр поршня камеры противодействия, м	0,070
Клиренс $H_{кл}$, м	0,450
Начальная (зарядная) температура газа $T_{нач}$, К	293
Рабочая температура газа $T_{раб}$, К	373

Таблица 2

Рассчитанные конструктивные параметры
Table 2. Calculated design parameters

Наименование параметра	Значение
Однопоршневая однокамерная ПГР без противодействия	
Зарядный объем основной пневмокамеры, л	3,385
Зарядное давление основной пневмокамеры, Па	4,42·10 ⁶
Однопоршневая однокамерная ПГР с противодействием	
Зарядный объем основной пневмокамеры, л	3,979
Зарядное давление основной пневмокамеры, Па	6,20·10 ⁶
Зарядный объем пневмокамеры противодействия, л	1,306
Зарядное давление пневмокамеры противодействия, Па	1,47·10 ⁶
Двухпоршневая однокамерная ПГР без противодействия	
Зарядный объем основной пневмокамеры, л	3,224
Зарядное давление основной пневмокамеры, Па	4,64·10 ⁶
Двухпоршневая однокамерная ПГР с противодействием	
Зарядный объем основной пневмокамеры, л	3,715
Зарядное давление основной пневмокамеры, Па	6,76·10 ⁶
Зарядный объем пневмокамеры противодействия, л	1,261
Зарядное давление пневмокамеры противодействия, Па	1,53·10 ⁶
Однопоршневая двухкамерная ПГР без противодействия	
Зарядный объем пневмокамеры высокой жесткости, л	1,282

Окончание таблицы 2

Наименование параметра	Значение
Зарядное давление пневмокамеры высокой жесткости, Па	$2,92 \cdot 10^6$
Зарядный объем пневмокамеры низкой жесткости, л	2,103
Зарядное давление пневмокамеры низкой жесткости, Па	$5,33 \cdot 10^6$
Однопоршневая двухкамерная ПГР с противодавлением	
Зарядный объем пневмокамеры высокой жесткости, л	1,282
Зарядное давление пневмокамеры высокой жесткости, Па	$4,25 \cdot 10^6$
Зарядный объем пневмокамеры низкой жесткости, л	2,571
Зарядное давление пневмокамеры низкой жесткости, Па	$7,77 \cdot 10^6$
Зарядный объем пневмокамеры противодействия, л	1,405
Зарядное давление пневмокамеры противодействия, Па	$1,40 \cdot 10^6$
Двухпоршневая двухкамерная ПГР без противодействия	
Зарядный объем пневмокамеры высокой жесткости, л	1,121
Зарядное давление пневмокамеры высокой жесткости, Па	$3,34 \cdot 10^6$
Зарядный объем пневмокамеры низкой жесткости, л	2,103
Зарядное давление пневмокамеры низкой жесткости, Па	$5,33 \cdot 10^6$
Двухпоршневая двухкамерная ПГР с противодавлением	
Зарядный объем пневмокамеры высокой жесткости, л	1,121
Зарядное давление пневмокамеры высокой жесткости, Па	$4,47 \cdot 10^6$
Зарядный объем пневмокамеры низкой жесткости, л	2,103
Зарядное давление пневмокамеры низкой жесткости, Па	$7,15 \cdot 10^6$
Зарядный объем пневмокамеры противодействия, л	1,340
Зарядное давление пневмокамеры противодействия, Па	$1,40 \cdot 10^6$

Таблица 3

Сравнение коэффициентов динамичности

Table 3. Comparison of dynamic factors

Тип ПГР	$K_{дин}$
ПГР без противодействия (все конфигурации)	3,50
Однопоршневая однокамерная ПГР с противодавлением	3,67
Двухпоршневая однокамерная ПГР с противодавлением	3,70
Однопоршневая двухкамерная ПГР с противодавлением	3,50
Двухпоршневая двухкамерная ПГР с противодавлением	3,50

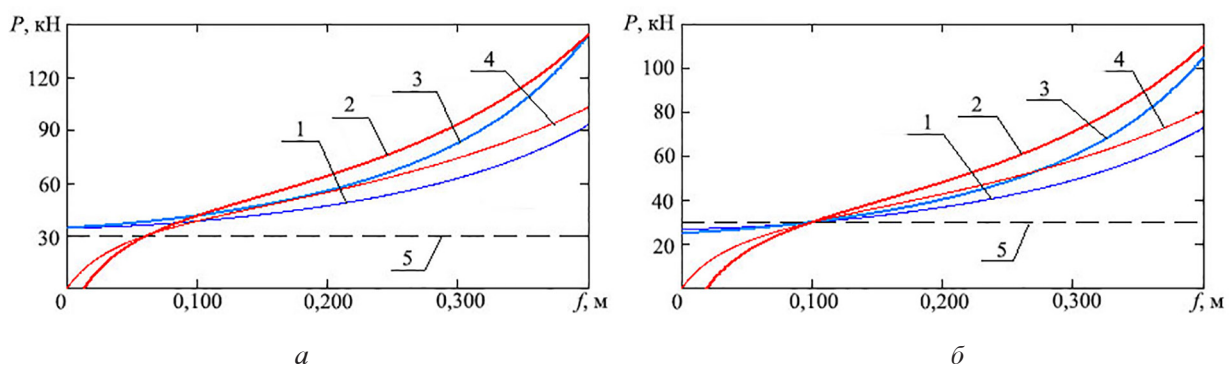


Рис. 1. Статические (1, 4) и динамические (2, 3) характеристики подвески с однокамерной однопоршневой ПГР при рабочей (а) и зарядной (б) температурах:

1, 3 – статическая и динамическая, без противодействия; 4, 2 – статическая и динамическая, с противодавлением; 5 – уровень статической силы

Fig. 1. Static (1, 4) and dynamic (2, 3) characteristics of a suspension with a single-chamber single-piston block at operating (a) and charging (b) temperatures: 1, 3 – static and dynamic, without back pressure; 4, 2 – static and dynamic, with back pressure; 5 – static force level

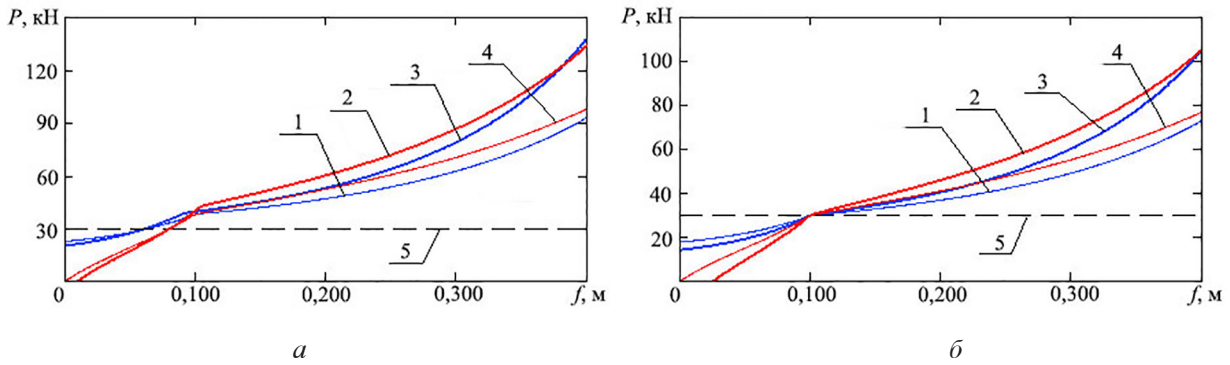


Рис. 2. Статические (1, 4) и динамические (2, 3) характеристики подвески с двухкамерной однопоршневой ПГР при рабочей (а) и зарядной (б) температурах: 1–5 – см. рис. 1

Fig. 2. Static (1, 4) and dynamic (2, 3) characteristics of the suspension with a two-chamber single-piston block at operating (a) and charging (b) temperatures: 1–5 – see Fig. 1

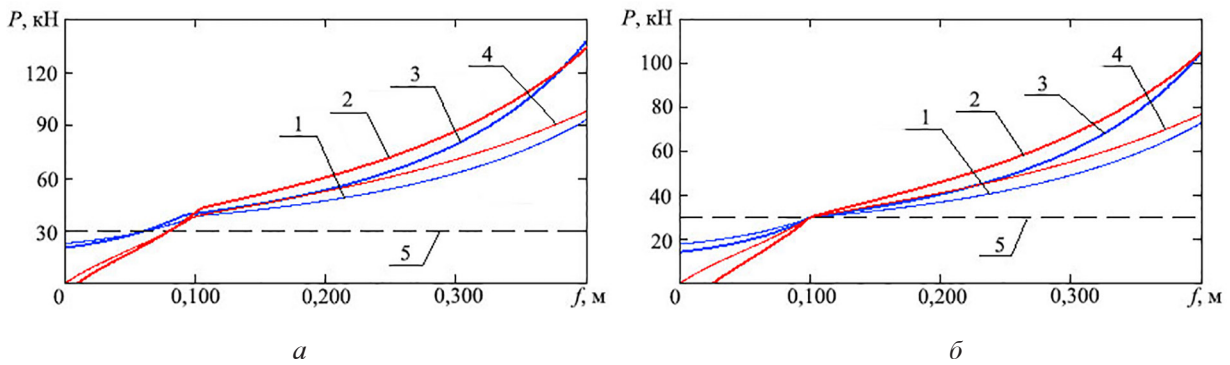


Рис. 3. Статические (1, 4) и динамические (2, 3) характеристики подвески с однокамерной двухпоршневой ПГР при рабочей (а) и зарядной (б) температурах: 1–5 – см. рис. 1

Fig. 3. Static (1, 4) and dynamic (2, 3) characteristics of the suspension with a single-chamber two-piston block at operating (a) and charging (b) temperatures: 1–5 – see Fig. 1

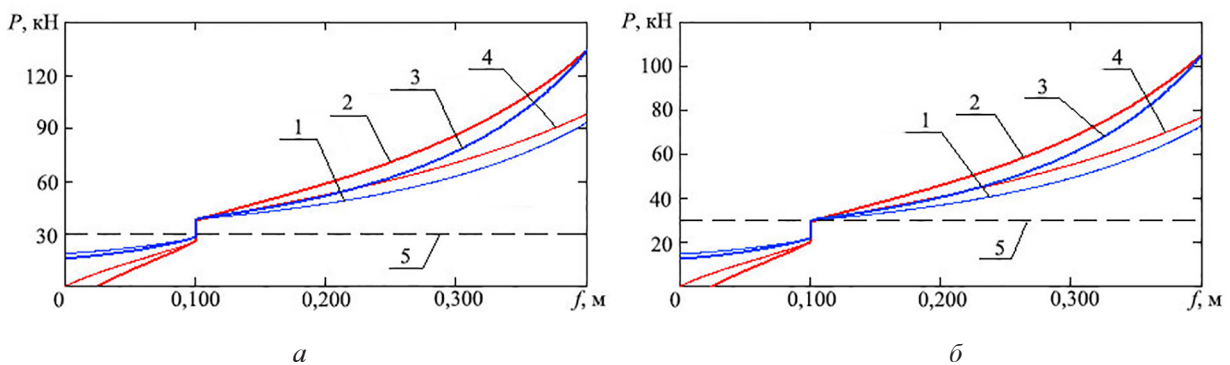


Рис. 4. Статические (1, 4) и динамические (2, 3) характеристики подвески с двухкамерной двухпоршневой ПГР при рабочей (а) и зарядной (б) температурах: 1–5 – см. рис. 1

Fig. 4. Static (1, 4) and dynamic (2, 3) characteristics of a suspension with a two-chamber two-piston block at operating (a) and charging (b) temperatures: 1–5 – see Fig. 1

Кроме того, вид передаточной функции также будет влиять на фактическое значение коэффициента динамичности. Необходимо учитывать, что при значительном изменении значений силовой передаточной функции расхождения коэффициента динамичности с теоретическим значением для ПГР без противодействия также будут расти.

Для приведения коэффициента динамичности в соответствие с заданием необходимо либо корректировать представленные зависимости, либо добиваться изменения значений силовой передаточной функции в пределах 10 %.

Выводы

Представленные в статье зависимости позволяют получить основные конструктивные параметры ПГР (при известной кинематике подвески) практически всех возможных конфигураций. Корректирующие зависимости, позволяющие изменить начальные объемы и зарядные давления, тем не менее, являются удачной полуэмпирической связью, которая дает хорошие результаты при изменениях силовой передаточной функции в пределах 10 %. Рост диапазона значений силовой передаточной функции будет приводить к отклонениям коэффициента динамичности от эталонного значения. Таким образом, для использования корректирующих зависимостей необходимо предварительно подобрать кинематические параметры до получения удачного (рационального) вида силовой передаточной функции.

Следует, однако, отметить, что некоторые конструктивные реализации ПГР не являются рациональными, хотя могут представлять определенный интерес в учебном процессе. В частности, практический смысл проектирования одно- и двухкамерных двухпоршневых ПГР с противодействием, а также двухпоршневой двухкамерной ПГР без противодействия весьма мал, поскольку конструкциякратно усложняется, в то время как возможность стабилизации статического хода обеспечивается не только вложенным поршнем, но также и наличием противодействия либо разных зарядных давлений в основных пневмокамерах. Тем не менее, подобные конструкции могут иметь интерес в образовательной среде, повышая разнообразие вариаций тем курсовых проектов или домашних заданий по соответствующей дисциплине.

Литература

1. Котиев Г.О., Смирнов А.А., Шилкин В.П. Исследование рабочих процессов в пневмогидравлических устройствах систем подрессоривания гусеничных машин: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 80 с.
2. Котиев Г.О. Комплексное подрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач. М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 184 с.
3. Сарач Е.Б., Котиев Г.О., Смирнов И.А. Перспективы развития системы подрессоривания быстроходных гусеничных машин. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 10. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/976.html>.
4. Жилейкин М.М., Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Экспериментальное исследование нагрузочных характеристик двухкамерной пневмогидравлической рессоры подвески автомобильных платформ нового поколения средней и большой грузоподъемности. Электронный журнал: «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». ЭЛ № ФС77-48211. 2011. Выпуск 12. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/346642.html>.
5. Жилейкин М.М., Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Методика подбора характеристик управляемой подвески с двумя уровнями демпфирования многососных колесных машин. Электронный журнал: «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». ЭЛ № ФС77-48211. 2012. Выпуск 1. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/293578.html>.
6. Жилейкин М.М., Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Методика расчета характеристик пневмогидравлической управляемой подвески с двухуровневым демпфированием многоосных колесных машин. Электронный журнал: «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». ЭЛ № ФС77-48211. 2012. Выпуск 1. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/346660.html>.
7. Котиев Г.О. Прогнозирование эксплуатационных свойств систем подрессоривания военных гусеничных машин: Дисс. ... доктора техн. наук. М.: МГТУ, 2000. 265 с.
8. Сарач Е.Б. Метод выбора характеристик системы подрессоривания с нецелым числом степеней свободы для быстроходной гусеничной машины: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ, 2003. 150 с.
9. Смирнов А. А. Математическое моделирование пневмогидравлических устройств систем подрессоривания транспортных средств: Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ, 1999. 154 с.

10. Сухоруков А.В. Управление демпфирующими элементами в системе поддрессирования быстроходной гусеничной машины. Дис. ... канд. техн. наук. М., 2003, 149 с.
 11. Ципилев А.А. Методы определения расчетных характеристик и оценки тепловой нагруженности пневмогидравлических устройств систем поддрессирования быстроходных гусеничных машин на этапе проектирования: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 223 с.
 12. Сарач Е.Б., Ципилев А.А. Методика аналитического подбора конструктивных параметров пневмогидравлических рессор. Электронный журнал: «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». ЭЛ № ФС77-48211. 2014. Выпуск 11. Режим доступа: <http://technomag.neicon.ru/doc/733738.html> (дата обращения: 13.09.2021 г.).
 13. Сарач Е.Б., Ципилев А.А. Основы расчетов пневмогидравлических систем поддрессирования. Учебное пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 112, [2] с.: ил.
 14. Ципилев А.А. Основы расчетов пневмогидравлических систем поддрессирования. Учебно-методическое пособие. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, 53 с.
- ### References
1. Kotiyev G.O., Smirnov A.A., Shilkin V.P. Issledovaniye rabochikh protsessov v pnevmogidravlicheskih ustroystvakh sistem podressorivaniya gusenichnykh mashin [Study of work processes in pneumohydraulic devices of crawler vehicle suspension systems]: Ucheb. posobiye. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001. 80 p.
 2. Kotiyev G.O. Kompleksnoye podressorivaniye vysokopodvizhnykh dvukhzvennykh gusenichnykh mashin [Complex suspension of highly mobile two-link tracked vehicles]. G.O. Kotiyev, Ye.B. Sarach. M. MGTU im. N.E. Bauman, 2010. 184 p.
 3. Sarach Ye.B., Kotiyev G.O., Smirnov I.A. Prospects for the development of a suspension system for high-speed tracked vehicles. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii, 2013, vyp. 10 (in Russ.). URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/976.html>
 4. Zhileykin M.M., Kotiyev G.O., Sarach Ye.B. Experimental study of the load characteristics of a two-chamber pneumohydraulic spring for the suspension of a new generation of medium and heavy-duty automobile platforms. Elektronnyy zhurnal: «Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniYE». EL No FS77-48211. 2011. Vypusk 12 (in Russ.). URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/346642.html>
 5. Zhileykin M.M., Kotiyev G.O., Sarach Ye.B. Method of selection of characteristics of controlled suspension with two levels of damping for multi-axle wheeled vehicles. Elektronnyy zhurnal: «Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniYE». EL № FS77-48211. 2012. Vypusk 1 (in Russ.). URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/293578.html>
 6. Zhileykin M.M., Kotiyev G.O., Sarach Ye.B. Method for calculating the characteristics of pneumohydraulic controlled suspension with two-level damping of multi-axle wheeled vehicles. Elektronnyy zhurnal: «Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniYE». EL No FS77-48211. 2012. Vypusk 1 (in Russ.). URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/346660.html>
 7. Kotiyev G.O. Prognozirovaniye ekspluatatsionnykh svoystv sistem podressorivaniya voyennykh gusenichnykh mashin: Diss. ... doktora tekhn. nauk [Prediction of the operational properties of suspension systems for military tracked vehicles: Dissertation for Degree of DSc in Engineering]. Moscow: MGTU, 2000. 265 p.
 8. Sarach Ye.B. Metod vybora kharakteristik sistemy podressorivaniya s netselym chislom stepeney svobody dlya bystrokhodnoy gusenichnoy mashiny: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Method for selecting characteristics of a suspension system with a non-integer number of degrees of freedom for a high-speed tracked vehicle: Dissertation for Degree of PhD in Engineering]. Moscow: MGTU, 2003. 150 p.
 9. Smirnov A.A. Matematicheskoye modelirovaniye pnevmogidravlicheskih ustroystv sistem podressorivaniya transportnykh sredstv: Diss. ... kand. tekhn. nauk [Mathematical modeling of pneumohydraulic devices of vehicle suspension systems: Dissertation for Degree of PhD in Engineering]. Moscow: MGTU, 1999. 154 p.
 10. Sukhorukov A.V. Upravleniye dempfiruyushchimi elementami v sisteme podressorivaniya bystrokhodnoy gusenichnoy mashiny. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Control of damping elements in the suspension system of a high-speed tracked vehicle: Dissertation for Degree of PhD in Engineering]. Moscow, 2003, 149 p.
 11. Tsipilev A.A. Metody opredeleniya raschetnykh kharakteristik i otsenki teplovoy nagruzhennosti pnevmogidravlicheskih ustroystv sistem podressorivaniya bystrokhodnykh gusenichnykh mashin na etape proyektirovaniya: Dissertatsiya na soiska-

- niye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Methods for determining the design characteristics and assessing the thermal loading of pneumohydraulic devices for suspension systems of high-speed tracked vehicles at the design stage: Dissertation for Degree of PhD in Engineering]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2017. 223 p.
12. Sarach Ye.B., Tsipilev A.A. Method of analytical selection of design parameters of pneumohydraulic springs. *Elektronnyy zhurnal: «Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniYE»*. EL No FS77-48211. 2014. Vypusk 11 (in Russ.). URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/733738.html> (accessed: 13.09.2021 g.).
13. Sarach Ye.B., Tsipilev A.A. *Osnovy raschetov pnevmogidravlicheskih sistem podressorivaniya* [Basics of calculating pneumohydraulic suspension systems]. Uchebnoye posobiye. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2017. 112 s.
14. Tsipilev A.A. *Osnovy raschetov pnevmogidravlicheskikh sistem podressorivaniya* [Basics of calculating pneumohydraulic suspension systems]. Uchebno-metodicheskoye posobiye. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2020, 53 p.

ANALYTICAL DETERMINATION OF STATIC AND DYNAMIC ELASTIC CHARACTERISTICS OF PNEUMOHYDRAULIC SUSPENSION SYSTEMS

PhD in Engineering **A.A. Tsipilev**, DSc in Engineering **O.A. Nakaznoy**
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
alexts@bmstu.ru

When developing new suspensions for tracked and wheeled vehicles, as well as in the so-called reverse engineering of existing structures (including in the educational process of training personnel), it is necessary to solve the problem of finding the elastic characteristics of the suspension. In the first case, it is necessary to ensure the fulfillment of the specified tactical and technical requirements, in the second – to restore the form of characteristics according to a known design. Both of these tasks are greatly complicated in the absence of precise and universal analytical dependencies suitable for determining the characteristics of elastic suspension elements of various design implementations. The experience of interaction with some factories shows that designers, not being able to qualitatively calculate the elastic characteristics, use the method of selection and analogy, when for a new vehicle they use the suspension as on the old one, scaling it in size in order to approximately keep the values of working pressures. The numerous bench tests are carried out, which results are used for selecting required charging volume and pressure. Suspensions with backpressure cause particular difficulty, since not only the final characteristic, but also the performance of the entire unit depends on the combination of volumes and pressures of the two chambers, which work in antiphase: when one is loaded, the other is unloaded, and vice versa. Using analytical dependencies will reduce the time spent on design, to parameterize, to a certain extent, the suspension kinematics, to obtain the values of the equivalent suspension stiffness, and also to be able to develop the characteristics of the model range of pneumohydraulic springs for vehicles of various weight categories.

This article presents a technique for the analytical determination of the characteristics of pneumohydraulic springs of various designs. The options include both actually used in modern and historical technology (in particular, on BMD-1, 2, 3, 4; GM-352; Ural Typhoon; Object 775, etc.), and obtained by combining various structural elements, which implementation can be useful in the educational process in training personnel. The dependences presented in the article make it possible to obtain static and dynamic elastic characteristics at various polytropic indices and are suitable for the design of suspensions for wheeled and tracked vehicles for various purposes.

Keywords: tracked vehicles, wheeled vehicles, suspension, air-hydraulic spring, suspension system.

Cite as: Tsipilev A.A., Nakaznoy O.A. Analytical determination of static and dynamic elastic characteristics of pneumohydraulic suspension systems. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 4 (50), pp. 60–72 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-60-72