

К вопросу о расчете гидропневматических рессор

11, ноябрь 2015

Верещака В. А.

УДК 62-522.2

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

publications-rk3@yandex.ru

Введение

Применение гидропневматических рессор (ГПР) в системе подвески большегрузных автомобилей высокой проходимости (БАВП) позволяет существенно повысить плавность хода этих транспортных средств, проходимость, среднюю скорость их движения и долговечность, снизить затраты на горючее [1,2,3].

Работа ГПР в системе подвески БАВП имеет ряд особенностей, главным образом связанных с термодинамическим характером процессов, протекающих в изменяющемся объеме газа, заключенного в ГПР. Эти особенности необходимо учитывать при расчете характеристик и конструктивных элементов ГПР, а также плавности хода БАВП.

Изучению рабочих процессов в ГПР и их расчету посвящен ряд работ [1,2]. Характерным для большинства из них является использование в качестве исходного - уравнения, описывающего политропный процесс, что значительно упрощает расчеты [2]:

$$pv^n = const \quad (1)$$

Более точные результаты дает использование уравнения 1-го закона термодинамики и теплопередачи в дифференциальной форме [3]:

$$ART \frac{dv}{v} + c_v dT = \lambda c_v (T_{окр} - T) dt. \quad (2)$$

ГПР телескопического типа имеет, как правило, встроенный гидравлический амортизатор, в результате работы которого, происходит нагрев жидкости, находящейся в ГПР. Часть тепла от жидкости передается газу, а на штоке ГПР происходит суммирование усилий, развиваемых упругим и гасящим устройствами. Указанные особенности необходимо учитывать при расчете динамических характеристик ГПР.

Уравнение (2) позволяет учесть основные факторы, влияющие на рабочие процессы в ГПР, а его решение дает возможность определить изменение величины давления жидкости над поршнем с учетом этих факторов [3]:

$$p = \frac{F}{c_o^*} \frac{dx}{dt} + p_0 \varepsilon^k e^{-\lambda t} \left\{ e^{\frac{\Delta S_2}{c_v}} + \frac{1}{T_0} \left[T_{окр} + \frac{Ak_{ам} V_{cp}^2}{Gc_v \lambda} + \frac{A\Delta L_{mp}}{Gc_v \lambda} \right] \varepsilon_{cp}^{1-k} (e^{\lambda t} - 1) \right\}, \quad (3)$$

где λ - коэффициент, учитывающий теплопередачу в ГПР; k - коэффициент теплопередачи от газа в окружающую среду; G - масса рабочего тела; c_v - теплоемкость при $v = const$; ε - степень сжатия газа в ГПР; ΔS_y - изменение энтропии эквивалентного термодинамического процесса; $T_{окр}$ - температура окружающей среды; $V_{ср}$ - средняя скорость поршня ГПР; $\Delta L_{тр}$ - работа трения в цилиндре ГПР; T_0 - температура газа при $t = 0$; p_0 - давление газа при $t = 0$; p - давление жидкости над поршнем; t - текущее время; $k = 1,41$; $e = 2,718$; $A = 1/427$; c_a^* - гидравлическая проводимость дросселя ГПР.

Анализируя уравнение (3), можно отметить, что величина первого члена правой части зависит от скорости перемещения поршня ГПР. При его перемещении по гармоничному закону, принимая жидкость несжимаемой и пренебрегая деформациями корпуса ГПР, можно считать, что объем жидкости, вытесняемой поршнем, равен объему жидкости, поступающей в газовый баллон, то есть объем газа также изменяется по гармоничному закону. Тогда, принимая $x = x_0 \sin \omega t$, первый член правой части уравнения (3) можно записать как:

$$\frac{F}{c_a^*} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{F}{c_a^*} \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

а переменный параметр ε 2-го члена правой части:

$$\varepsilon = \frac{V_0}{V_0 - \Delta V} = \frac{V_0}{V_0 - F \cdot x_0 \cdot \sin \omega t} \quad (5)$$

Подставляя выражения (4) и (5) в уравнение (3), можно получить выражение, характеризующее изменение давления жидкости над поршнем ГПР, то есть дает возможность построить и исследовать характеристики ГПР при различных исходных параметрах.

При наличии дросселирования жидкости процесс изменения величины давления газа p^* в баллоне ГПР происходит с запаздыванием по отношению к перемещению поршня. При отсутствии дросселирования при гармоническом законе перемещения поршня максимальное значение p^* будет при $\omega t = \frac{\pi}{2}$. В случае установки на пути жидкости дросселирующей системы, как это обычно имеет место в ГПР телескопического типа, происходит запаздывание.

Применяя методы сложения графиков гармонических функций, можно записать следующее выражение:

$$p^*(t) = \sqrt{p_0^2 + \frac{F^2 x_0^2 \omega^2}{(c_a^*)^2}} \cdot \sin \left[\omega t + \arctg \left(-\frac{F x_0 \omega}{c_a^* p_0} \right) \right] \quad (6)$$

Проведенные расчеты для ГПР с симметричной характеристикой амортизатора показали, что величина запаздывания для каждой конструкции ГПР телескопического типа зависит от сопротивления амортизатора, частоты колебаний и величины давления газа в баллоне, то есть от зарядного давления. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

При расчетах принималось: $F = 0,00636 \text{ м}^2$, $x_0 = 0,05 \text{ м}$. Из таблицы, где значениям угла запаздывания φ_1^0 соответствует $c_d^* = 20$, а $\varphi_2^0 - c_d^* = 200$, видно, что величина запаздыва-

ния убывает с увеличением давления газа в ГПР при всех значениях c_a^* , что можно объяснить уменьшением разницы между значениями $p(t)$ и $p^*(t)$.

Таблица 1. Результаты расчета ГПР симметричной характеристикой амортизатора

p_0	25			50			100		
ω	5,24	7,34	9,43	5,24	7,34	9,43	5,24	7,34	9,43
φ_1^0	75	82	84	60	65	71	39	52	55
φ_2^0	18	25	35	7,5	14,5	24,5	4,5	4,8	8,1

Были проведены стендовые испытания ГПР телескопического типа со встроенным амортизатором, при которых фиксировались процессы изменения давления газа, давления жидкости над поршнем и перемещения поршня. Данные, полученные в результате испытаний, в сравнении с расчетными приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний ГПР

Диаметр дросселя, m^2	Степень сжатия	1,53			3,06		
	ω , сек ⁻¹	5,3	8,06	13,1	5,3	8,06	13,1
0,0035	$\varphi_{0\text{расч}}$	75	82	84	39	52	58
	$\varphi_{0\text{эксп}}$	69	79	100	57	73	92
	$n_{\text{усл}}$	1,24	0,18	- 0,53	0,61	0,4	0,37
	λ_0	0,18	2,32	6,49	1,57	3,64	2,75
0,008	$\varphi_{0\text{расч}}$	18	25	46	7,5	18	34
	$\varphi_{0\text{эксп}}$	29	42	76	29	51	69
	$n_{\text{усл}}$	1,03	1,83	1,18	0,42	0,51	0,71
	λ_0	3,95	0,11	1,79	4,12	2,89	4,73

Из таблицы видно, что характер изменения расчетных и экспериментальных данных совпадает, а расхождение в абсолютных величинах можно объяснить принятыми допущениями. Приведенные значения показателя политропы получены по результатам эксперимента.

Анализ полученных результатов показывает, что использование уравнения политропного процесса фактически ограничивает изучение рабочих процессов в ГПР лишь работой упругого устройства и не может быть использовано даже для обработки данных эксперимента в случае исследования ГПР телескопического типа со встроенным амортизатором. В то же время определение величины коэффициента λ_0 , учитывающего теплопередачу в пневморессоре, не представляет затруднений (2). Величины λ_0 приведены в таблице 2.

Таким образом, для оценки нагрузочных характеристик ГПР со встроенным амортизатором и определения их конструктивных размеров следует использовать решение дифференциального уравнения, составленного на основе 1-го закона термодинамики и теплопередачи.

Представляется целесообразным производить оценку влияния различных источников тепла и теплопередачи с окружающей средой путем сравнения процесса изменения давления газа в ГПР с адиабатным, особенно при полной деформации ГПР, то есть при помощи величины $\Delta = p / p_0 \cdot \varepsilon^k$, характер изменения которой определяется расчетным путем. При этом установлено, что величина Δ может быть, как меньше, так и больше 1, то есть рабочие процессы газа в ГПР в исследуемом диапазоне частот колебаний, условий теплопередачи и степеней сжатия могут происходить как с отводом, так и с подводом тепла к газу (рис. 1). Кроме того, величина коэффициента Δ характеризует динамическую энергоемкость подвески. Установлено, что величина Δ возрастает с увеличением частоты колебаний, а увеличение степени сжатия газа вызывает уменьшение величины Δ .

Подвод тепла, связанный с работой встроенного гидравлического амортизатора, вызывает увеличение коэффициента Δ на 5...20% в зависимости от частоты колебаний и условий теплопередачи. При расчетах величина трения внутри цилиндра ГПР принималась постоянной.

Влияние встроенного гидравлического амортизатора на динамические характеристики ГПР проявляется также в создаваемом им перепаде давлений жидкости вследствие дросселирования. Усилие на штоке ГПР и, следовательно, ее характеристики зависят от давления жидкости над поршнем.

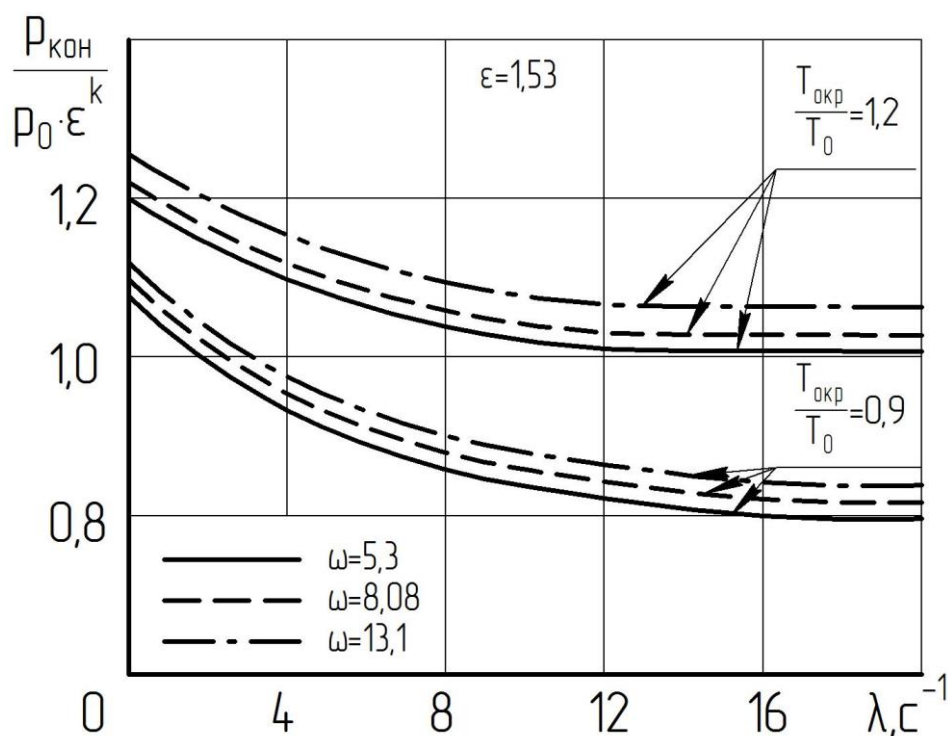


Рис. 1. К изменению давления газа в ГПР

Работа ГПР в реальных дорожных условиях характеризуется рядом специфических режимов. К их числу можно отнести: движение по дороге с неровностями небольшой высоты, восприятие ударных нагрузок, преодоление отдельных значительных неровностей, изменение внешних атмосферных условий. Для каждого режима работы наибольшее значение приобретают определенные параметры ГПР, по которым и должен вестись расчет.

Большое значение имеет правильный выбор конструктивных размеров ГПР, обеспечивающих выполнение предъявляемых к системе подвески требований. Одним из основных параметров ГПР является объем газа при статической нагрузке V_0 , который определяет частоту собственных колебаний подрессоренной массы и, как следствие, плавность хода БАП. Из выражения:

$$\lambda_0 = \frac{k \frac{p_0}{V_0} + \left(\frac{\Delta p}{\Delta V} \right)_0}{p_0 \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)^{-1} \left(1 - \frac{T_{i\dot{\epsilon}\delta}}{T_0} \right)}, \quad (7)$$

и с учетом:

$$c_0 = F^2 \left(\frac{dp}{dV} \right)_0, \quad (8)$$

можно определить жесткость ГПР при положении, соответствующем статической нагрузке:

$$c_0 = p_0 F^2 \left[-\frac{k}{V_0} - \lambda \left(\frac{dV}{dt} \right)^{-1} \left(1 - \frac{T_{окр}}{T_0} \right) \right], \quad (9)$$

откуда:

$$V_0 = \frac{p_0 k F^2}{c_0 - \frac{\lambda}{V_i} p_0 F^2 \left(1 - \frac{T_{i\dot{\epsilon}\delta}}{T_0} \right)}, \quad (10)$$

где $V_i = \frac{dV}{dt}$.

Величинами λ_0 , V_n , $\frac{T_{окр}}{T_0}$ для расчета задаются на основе предварительных экспериментов при соответствующих режимах работы.

Таким образом, при определении конструктивных размеров ГПР имеется возможность учитывать основные факторы, влияющие на ее работу: действие встроенного гидравлического амортизатора, трение между подвижными деталями, теплообмен с окружающей средой.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что характер термодинамических процессов, происходящих в объеме газа, заключенного в ГПР, зависит не только от теплообмена с окружающей средой, но и от подвода тепла вследствие работы встроенного гидравлического амортизатора и взаимного трения деталей в ГПР.

Наличие термодинамических процессов в ГПР показывает, что понятие жесткости для ГПР достаточно условное.

Влияние теплообмена с окружающей средой, встроенного гидравлического амортизатора, трения деталей в ГПР, необратимых внутренних потерь энергии – целесообразно оценивать коэффициентами λ_0 и c_a^* .

Эффект встроенного гидравлического амортизатора сказывается также в появлении запаздывания процесса изменения давления газа по отношению к процессу перемещения поршня ГПР. Величина запаздывания увеличивается с повышением частоты колебаний и лежит в диапазоне от 0° до 100° . С увеличением зарядного давления газа – величина угла запаздывания уменьшается.

Список литературы

- [1]. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет. / Под общ. Ред. Б.Н. Белоусова. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана. 2006. 729 с.
- [2]. 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 // Наука и образование. Электронное издание МГТУ им Н.Э. Баумана. 2011. №12. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/346642.html> (дата обращения 07.11.2015)
- [3]. Жилейкин М.М., Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Методика расчета характеристик пневмогидравлической управляемой подвески с двухуровневым демпфированием многоосных колесных машин // Наука и образование. Электронное издание МГТУ им Н.Э. Баумана. 2012. №1. Режим доступа <http://technomag.edu.ru/doc/346660.html> (дата обращения 07.11.2015).