

Математическая модель регулируемого газожидкостного аккумулятора

© И.Г. Благовещенский, Е.Б. Гартиг

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Предложена математическая модель газожидкостного аккумулятора как системы с сосредоточенными параметрами, позволяющая учесть изменение степени воздействия на динамические свойства гидравлической системы путем их регулирования (например, изменением газового объема или массы подвижных элементов).

Ключевые слова: математическая модель, стенд гидродинамический, аккумулятор газожидкостный.

Одно из основных требований, предъявляемых к стендам для гидродинамических испытаний, состоит в соблюдении динамического подобия между стендовыми системами и натурными изделиями. Течения в гидравлических системах и динамические процессы в них будут подобными, если равны соответствующие числа Рейнольдса (Re), Струхала (Sh), Маха (M), приведенные гидравлические потери в тракте и безразмерные граничные импедансы.

Гидравлические тракты испытательных стендов обычно сильно отличаются от гидравлических магистралей реальных систем по динамическим и другим характеристикам. В связи с этим приходится принимать специальные меры, направленные на приближение условий испытаний на стенде к условиям, имеющимся на натурном объекте [1–3]. Конструктивно это удобно сделать не для всей стендовой гидросистемы, а для некоторой ее части с помощью введения специальных устройств: демпферов, гасителей, аккумуляторов, резонаторов (рис. 1, *а*, *б*) и др. Для большей эффективности воздействия на динамические свойства гидравлической системы в полости аккумуля-

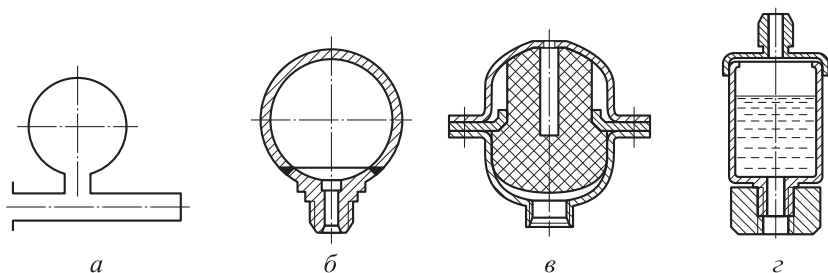


Рис. 1. Элементы регулирования газожидкостного аккумулятора:
а — схема установки ответвленного резонатора; *б* — его конструктивное исполнение; *в* — аккумулятор с внутренним упругим наполнением; *г* — аккумулятор со свободным газовым объемом

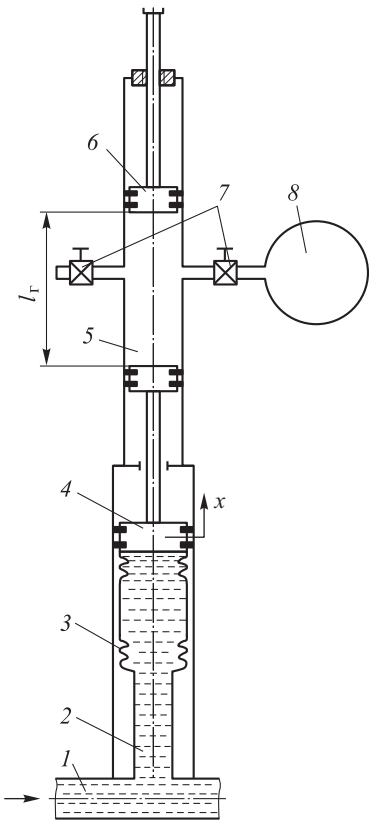


Рис. 2. Схема регулируемого газожидкостного аккумулятора:
 1 — рабочая магистраль; 2 — подводный патрубок; 3 — сиффон; 4 — подвижный поршень; 5 — газовая полость; 6 — поршень для регулирования объема газовой полости; 7 — управляющие вентили; 8 — баллон с газом высокого давления (l_r — длина газовой полости; x — смещение системы от положения статического равновесия)

$i = \sqrt{-1}$; $c^* = V_{z0}/kp_0$ — объемная податливость газа в подушке аккумулятора; p_0, V_{z0} — давление и объем газа; k — показатель адиабаты.

Таким образом, если исследуемый диапазон частот таков, что $\omega_{ак} \gg \omega$, то $z_{ак}(\omega) = S_m/i\omega c^*$, т. е. установка аккумулятора в этом случае эквивалентна введению в гидромагистраль сосредоточенной податливости.

Если $\omega_{ак} = \omega$, то $z_{ак}(\omega) = 0$ и в сечении, где установлен аккумулятор, выполняется условие, эквивалентное наличию акустически от-

торов может находиться упругое наполнение или газовая подушка (рис. 1, в, з).

Установка аккумулятора на входе рабочего участка научно-учебного гидродинамического стенда, созданного для исследования динамики течений с ограниченной искусственной газовой каверной [4–6], необходима для регулирования динамических свойств подводной гидролинии вплоть до полной акустической развязки между совершающей автоколебания каверной и колебаниями потока жидкости в трубопроводе. В связи с этим в предложенной конструкции аккумулятора (рис. 2) предусмотрена возможность изменения свободного газового объема, жесткостных и массовых характеристик элементов.

В работе [7] показано, что граничный импеданс аккумулятора со свободным газовым объемом определяется зависимостью

$$z_{ак}(\omega) = \frac{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{ак}^2}\right) S_m}{i\omega c^*},$$

где ω — частота колебаний жидкости в гидравлической системе; $\omega_{ак}$ — собственная частота аккумулятора; S_m — площадь поперечного сечения трубопровода перед аккумулятором;

крытого конца и совпадающее с условием на выходе из расходного бака в трубопровод большого объема жидкости.

Рассмотрим динамику аккумулятора такого типа, разработанного для научно-учебного стенда, более подробно [6] (см. рис. 2). Частота собственных колебаний подвижной механической системы гасителя может изменяться вследствие изменения объема газовой полости при перемещении фиксируемого поршня и, таким образом, вследствие изменения податливости газа в этом объеме, а также при изменении массы подвижного поршня.

Дифференциальное уравнение движения подвижного поршня с учетом присоединенной массы жидкости в подводящем патрубке и сильфоне при смещении из положения статического равновесия можно представить в виде

$$(m + m_{\text{ж}}) \ddot{x} = p_{\text{ж}} S_{\text{сл}} + c_{\text{сл}} (\lambda_{\text{ст}} - x) + \Phi_{\text{сх}} - p_{\text{г}} S_{\text{г}} - mg, \quad (1)$$

где m — масса подвижных элементов механической системы аккумулятора; $m_{\text{ж}}$ — масса присоединенной жидкости в газовой полости и сильфоне; x — смещение системы от положения статического равновесия; $p_{\text{ж}}$ — давление жидкости в рабочей магистрали; $S_{\text{сл}}$ — эффективная площадь поперечного сечения сильфона; $c_{\text{сл}}$ — жесткость сильфона; $\lambda_{\text{ст}}$ — статическая деформация; $\Phi_{\text{сх}}$ — проекция сил вязкого сопротивления на ось x ; $p_{\text{г}}$ — давление в газовой полости; $S_{\text{г}}$ — площадь поперечного сечения газовой полости; g — ускорение свободного падения.

Будем считать, что

$$p_{\text{ж}} = p_{\text{ж}0} + \delta p_{\text{ж}};$$

$$p_{\text{г}} = p_{\text{г}0} + \delta p_{\text{г}},$$

где $p_{\text{ж}0}$ и $p_{\text{г}0}$ — установившиеся давления жидкости и газа в положении статического равновесия гидромеханической системы; $\delta p_{\text{ж}}$ и $\delta p_{\text{г}}$ — изменения давления жидкости и газа при колебаниях в гидравлической системе.

Найдем $\delta p_{\text{г}}$ — изменение давления вследствие изменения объема упругого газа. Полагая этот процесс адиабатическим ($p_{\text{г}} V_{\text{г}}^k = \text{const}$), получаем

$$\delta p_{\text{г}} = -\frac{k p_{\text{г}0}}{V_{\text{г}0}} \delta V_{\text{г}}. \quad (2)$$

Вариация объема V_{Γ} газовой полости определяется исключительно изменением ее длины, поэтому

$$\delta V_{\Gamma} = -S_{\Gamma}x. \quad (3)$$

Из (2) и (3) получим

$$\delta p_{\Gamma} = \frac{kp_{\Gamma 0}S_{\Gamma}}{V_{\Gamma 0}}x, \quad (4)$$

где $V_{\Gamma 0}$ — номинальный объем газа.

В положении статического равновесия системы из (1) получим

$$p_{ж0}S_{сл} + c_{сл}\lambda_{ст} - p_{\Gamma 0}S_{\Gamma 0} - mg = 0. \quad (5)$$

Полагая, что возмущение давления на входе аккумулятора

$$\delta p_{ж} = P \sin(\omega t), \quad (6)$$

где P и ω — амплитуда и частота колебаний давления жидкости в магистрали в месте установки аккумулятора, из (1) с учетом (4)–(6) получим уравнение вынужденных колебаний системы в виде

$$(m + m_{ж})\ddot{x} + \mu\dot{x} + \left(c_{сл} + \frac{kp_{\Gamma 0}S_{\Gamma}^2}{V_{\Gamma 0}} \right)x = PS_{сл} \sin(\omega t), \quad (7)$$

где μ — коэффициент вязкого сопротивления.

Дифференциальное уравнение (7) можно представить следующим образом:

$$\ddot{x} + 2\varepsilon\dot{x} + \omega_{ак}^2x = h_{ж} \sin(\omega t),$$

где ε — приведенный коэффициент затухания, характеризующий вязкое сопротивление,

$$\varepsilon = \frac{\mu}{2(m + m_{ж})};$$

$\omega_{ак}$ — частота собственных колебаний аккумулятора с учетом присоединенной массы жидкости и податливости его газового объема,

$$\omega_{ак} = \sqrt{\frac{c_{сл} + kp_{\Gamma 0}S_{\Gamma 0} / V_{\Gamma 0}}{m + m_{ж}}};$$

$h_{ж}$ — приведенная амплитуда возмущающего воздействия,

$$h_{\text{ж}} = \frac{PS_{\text{сл}}}{m + m_{\text{ж}}}.$$

Для реализации условия, соответствующего наличию акустически открытого конца в гидравлической системе, при установке в ней аккумулятора необходимо, чтобы в процессе проведения динамических испытаний реализовалось равенство

$$\omega_{\text{ак}} = \omega.$$

Отсюда, учитывая, что при цилиндрической форме газовой полости $V_{\Gamma} = l_{\Gamma}S_{\Gamma}$, находим требуемую длину газовой полости l_{Γ} при проведении испытаний с частотой ω :

$$l_{\Gamma} = \frac{kp_{\Gamma 0}S_{\Gamma}}{\omega^2(m + m_{\text{ж}}) - c_{\text{сл}}}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что при проведении частотных испытаний элементов гидросистем с аккумулятором рассматриваемого типа должно выполняться условие

$$\omega > \sqrt{\frac{c_{\text{сл}}}{m + m_{\text{ж}}}}. \quad (9)$$

Соотношение (9) позволяет по заданному диапазону изменения частоты ω пульсации давления оценить необходимые значения жесткости $c_{\text{сл}}$ сильфона и массы m подвижных элементов механической системы аккумулятора.

Если в положении статического равновесия механической системы выполняется условие

$$c_{\text{сл}}\lambda_{\text{ст}} = mg,$$

то из (5) следует

$$p_{\Gamma 0} = p_{\text{ж}0} \frac{S_{\text{сл}}}{S_{\Gamma}}. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет определить требуемое давление газа при статическом равновесии механической системы аккумулятора. С учетом (10) формулу (8) можно представить в виде

$$l_{\Gamma} = \frac{kp_{\text{ж}0}S_{\text{сл}}}{\omega^2(m + m_{\text{ж}}) - c_{\text{сл}}}. \quad (11)$$

Таким образом, при изменении частоты ω и различных сочетаниях значений давления $p_{\text{ж}0}$ жидкости в гидравлической системе

и массы m подвижных элементов гасителя длину l_T газовой полости можно определять по формуле (11).

Исходными параметрами для расчетов являются следующие: $c_{сл}$ — жесткость сильфона; $S_{сл}$ — эффективная площадь поперечного сечения сильфона; $m_{ж}$ — масса жидкости в отводе; m — масса подвижных элементов гасителя; $p_{ж0}$ — давление жидкости в гидросистеме в месте установки аккумулятора.

Заключение. Полученные соотношения позволяют для различных значений частоты пульсаций давления в гидравлической системе проводить резонансную настройку аккумулятора вплоть до формирования в месте его установки условий, соответствующих наличию акустически открытого конца, т. е. полной акустической развязке подводящей магистрали с исследуемым объектом на рабочем участке гидродинамического стенда.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Санчугов В.И., Илюхин В.Н. *Основные виды испытаний гидрооборудования*. Самара, Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008, 40 с.
- [2] Берестовицкий Э.Г., Гладилин Ю.А., Крючков А.Н., Фёдоров А.Е., Шахматов Е.В. Гасители пульсации давления как средство улучшения собственных виброакустических характеристик испытательных гидравлических стендов. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета)*, 2012, № 2 (33), с. 149–154.
- [3] Санчугов В.И., Шорин В.П. Методология создания оборудования для отработки гидроагрегатов пульсирующим давлением жидкости. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 1999, вып. 1, т. 1, с. 141–146.
- [4] Шкапов П.М., Благовещенская М.М. Теоретические и прикладные вопросы динамики течений жидкости с ограниченной искусственной газовой каверной. Ч. 1. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2012, № 3, с. 109–114.
- [5] Шкапов П.М., Благовещенская М.М. Теоретические и прикладные вопросы динамики течений жидкости с ограниченной искусственной газовой каверной. Ч. 2. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2012, № 4, с. 103–111.
- [6] Шкапов П.М., Благовещенский И.Г., Гартиг Е.Б., Дорошенко С.А. Исследование структуры течений с ограниченной искусственной газовой каверной на научно-учебном гидродинамическом стенде. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 2(24). URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1137.html> (дата обращения 30.03.2015).
- [7] Гликман Б.Ф. *Математическое моделирование пневмогидравлических систем*. Москва, Наука, 1986, 368 с.

Статья поступила в редакцию 20.03.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Благовещенский И.Г., Гартиг Е.Б. Математическая модель регулируемого газожидкостного аккумулятора. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 3.

URL <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1385.html>

Благовещенский Иван Германович — д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 печатных работ по динамике механических и гидромеханических систем, математическому моделированию и системному анализу процессов механической обработки твердых и сыпучих материалов. e-mail: fn3@bmstu.ru

Гартиг Елена Борисовна окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана. Старший преподаватель кафедры теоретической механики имени профессора Н.Е. Жуковского МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор восьми научных работ по гидродинамике. e-mail: fn3@bmstu.ru

Mathematical model of regulated gas-liquid oscillation damper

© I.G. Blagoveschenskiy, E.B. Gartig

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Passive gas-liquid oscillation dampers are often used to change the settings and dynamic properties of a hydrodynamic stand. If changing the degree of influence on the dynamic properties of the system is necessary, the possibility of damper regulation should be ensured such as a change in the gas volume or mass of the moving elements. To account for these changes simplified mathematical model of the gas-liquid oscillation damper, as a lumped parameter system, is proposed.

Keywords: mathematical model, hydrodynamic stand, gas-liquid oscillation damper.

REFERENCES

- [1] Sanchugov V.I., Ilukhin V.N. *Osnovnye vidy ispytaniy gidrooborudovaniya* [The Main Types of Hydraulic Equipment Tests]. Samaria, SGAU Publ, 2008, 40 p.
- [2] Berestovitsky E.G., Gladilin Y.A., Kruchkov A.N., Fedorov A.E., Shakhmatov E.V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo yuniversiteta im. S.P. Koroleva – Bulletin of the Korolev Samara State Aerospace University*, 2012, no. 2, pp. 149–154.
- [3] Sanchugov V.I., Shorin V.P. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk – Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 1999, no. 1, pp. 141–146.
- [4] Shkapov P.M., Blagoveschenskaya M.M. *Vestnic MGTU im. N.E. Baumana. Seria Estestvennye nauki – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*, 2012, no. 3, pp. 109–114.
- [5] Shkapov P.M., Blagoveschenskaya M.M. *Vestnic MGTU im. N.E. Baumana. Seria Estestvennye nauki – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*, 2012, no. 4, pp.103–111.
- [6] Shkapov P.M., Blagoveshchenskiy I.G., Gartig E.B., Doroshenko S.A. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovations*, 2013, no. 2(24). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1137.html>
- [7] Glikman B.F. *Matematicheskoe modelirovanie pnevmogidravlicheskih sistem* [Mathematical Modeling Pneumohydraulic Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 368 p.

Blagoveshchenskiy I.G. (b. 1945) graduated from the Moscow Technological Institute of Food Industry in 1967. Dr. Sci. (Eng.), professor of the Department of “Theoretical Mechanics” named after professor N.E. Zhukovsky at Bauman Moscow State Technical University, member of the International Informatization Academy, member of the Presidium of the Scientific and Methodological Council on theoretical mechanics at the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Author of more than 100 publications in the field of dynamics of mechanical and hydromechanical systems, mathematical modeling and system analysis of processes of machining hard and loose materials. e-mail: fn3@bmstu.ru

Gartig E.B. graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1983. Senior lecturer at the Department of "The Theoretical Mechanics" named after professor N.E. Zhukovsky at Bauman Moscow State Technical University. The author of eight scientific papers on hydrodynamics. e-mail: fn3@bmstu.ru