

## ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОАКСИАЛЬНОГО ГАЗОВОГО ДЕМПФЕРА ДЛЯ ТОПЛИВНОЙ МАГИСТРАЛИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

© 2017

**Д. А. Одинок** аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[deo @rambler.ru](mailto:deo@rambler.ru)

**А. Г. Гимадиев** доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[gimadiev\\_ag@mail.ru](mailto:gimadiev_ag@mail.ru)

При разработке и эксплуатации ракеты-носителя (РН) важно обеспечить её устойчивость по отношению к продольным колебаниям корпуса (продольную устойчивость) при всех возможных возмущающих воздействиях. Известно, что одним из эффективных способов обеспечения продольной устойчивости РН является применение газовых демпферов-аккумуляторов, устанавливаемых в топливоподающей магистрали на входе в двигатель. Демпфер создаёт в магистрали дополнительную податливость и позволяет тем самым исключить совпадение собственной частоты колебаний давления жидкости в топливной магистрали с собственными частотами колебаний корпуса РН, что является необходимым условием для обеспечения продольной устойчивости. В работе с использованием уравнения состояния идеального газа для случая адиабатического процесса и уравнений Бернулли и Сен-Венана–Ванцеля разработана нелинейная математическая модель коаксиального газового демпфера. Математическая модель использована для расчёта частотных характеристик демпфера в виде входной акустической проводимости. Полученные результаты позволяют учитывать вклад проходных сечений дросселей в работу демпфера на стадии проектирования, а также выбирать его параметры при моделировании процессов в составе топливных магистралей при решении задачи обеспечения продольной устойчивости РН.

*Ракета-носитель; продольная устойчивость; топливная магистраль; газовый демпфер; математическая модель; Delphi; акустическая проводимость; частотные характеристики.*

---

*Цитирование:* Одинок Д.А., Гимадиев А.Г. Частотные характеристики коаксиального газового демпфера для топливной магистрали ракеты-носителя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 1. С. 62-74. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-1-62-74

### Введение

В задачи экспериментальной отработки демпферов продольной устойчивости РН входит снятие амплитудно-фазовых частотных характеристик демпфера в условиях, максимально приближенных к штатным. Возможны два варианта испытаний демпфера при экспериментальной отработке: в составе топливной магистрали и обособленно от неё.

В первом варианте экспериментальная установка включает в себя бак с компонентом, расходную магистраль с демпфером и пульсатор, имитирующий пульсации давления, близкие ожидаемым. При этом могут быть использованы натурные крупномасштабные топливные баки или модельные магистрали питания [1]. Такой эксперимент позволяет непосредственно получить частотную характеристику топливной магистрали с демпфером. Однако создание такой установки сопряжено с большими трудностями (длина топливной магистрали может превышать 10 м и сопоставимую высоту имеет натуральный топливный бак) и требует соответствующих материальных затрат. Ис-

пользование же конструктивно-подобных уменьшенных моделей связано с трудностями при разработке и изготовлении самих этих моделей. Кроме того, на частотные характеристики топливной магистрали в полёте существенное влияние оказывает работающий ракетный двигатель, что трудно учесть при отработке демпфера на стенде. Влияние двигателя связано прежде всего с наличием кавитационных каверн на входе в турбонасосный агрегат, а также с влиянием собственных амплитудно-фазовых частотных характеристик двигателя по каналу «давление – расход компонента».

Во втором варианте есть возможность обойтись значительно меньшей по размеру и мощности экспериментальной установкой, которая позволит получить частотные характеристики демпфера, обособленного от топливной магистрали. При таком подходе полагается, что частотные характеристики топливной магистрали с достаточной точностью могут быть получены расчётным путём, например, как это сделано в [2;3]. Соответствие результатов расчёта фактическим характеристикам тем точнее, чем проще геометрия топливных магистралей. В [4] отмечается, что частотные характеристики демпфера полностью описываются его входной акустической проводимостью – отношением комплексных амплитуд установившихся колебаний расхода к комплексным амплитудам колебаний давления жидкости на его входе в рассматриваемом частотном диапазоне. Вместо акустической проводимости может использоваться обратная ей величина – входной импеданс демпфера. Входная акустическая проводимость характеризует податливость демпфера при различных частотах колебаний. В той же статье [4] приведена математическая модель демпфера с упругим разделителем газовой и жидкостной полостей в виде металлического сиффона и рассчитана его входная акустическая проводимость. Особенность применения вероятностного подхода при проектировании демпфера с сиффонным разделителем и ампулизированной газовой полостью для РН Antares рассмотрены в [5].

Целью настоящей статьи являются разработка математической модели и исследование входной проводимости коаксиального газового демпфера, в конструкции которого отсутствует сиффонный разделитель между газовой и жидкостной полостями (рис. 1). Ввиду отсутствия в конструкции подвижных механических частей такой демпфер обладает большей надёжностью и низкой стоимостью изготовления, но имеет и недостатки, связанные с необходимостью исключения прорыва газа из газовой полости в топливоподающую магистраль в процессе полёта РН. Несмотря на отмеченный недостаток, коаксиальный демпфер может успешно применяться для обеспечения продольной устойчивости РН.

Анализ возможных схем системы продувки коаксиального демпфера на РН Arges I показан в [6]. В [7] приведена схема газового демпфера без разделителя и на основе [2] предложена упрощённая нелинейная математическая модель его работы. Нелинейность модели обусловлена предположением о том, что параметры газа меняются согласно адиабатическому закону. Обозначенная в [7] нелинейность не является единственной в демпфере. Нелинейными зависимостями также характеризуются течения жидкости и газа через проходные сечения демпфера. К ним относятся отверстия в поясе перфорации, дренажные отверстия и дроссельное отверстие системы продувки. Приведённые конструктивные элементы и геометрическая форма газожидкостной полости непосредственно влияют на работу демпфера и поэтому их необходимо учитывать при составлении математической модели.

### Математическая модель

Рассмотрим принципиальную схему газового демпфера (рис. 1).

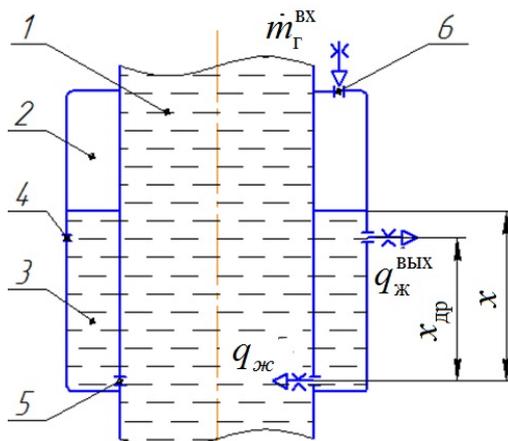


Рис. 1. Принципиальная схема коаксиального газового демпфера:

1 – топливоподающая магистраль; 2 – газовая полость демпфера; 3 – жидкостная полость демпфера; 4 – дренажные отверстия; 5 – пояс перфорации; 6 – дроссель

Его корпус представляет собой закрытый с торцов участок коаксиальной трубы, установленной в топливоподающей магистрали 1. Корпус демпфера совместно со стенкой трубы образует замкнутый объём, содержащий газовую полость 2 и жидкостную полость 3. Жидкостная полость сообщается с топливоподающей магистралью через пояс перфорации 5, представляющий собой один или несколько рядов отверстий в стенке трубы. Через дренажные отверстия 4 непрерывно осуществляется дренаж жидкости и/или газа в зависимости от уровня жидкости в демпфере. Через дроссель 6 осуществляется непрерывная подача газа в газовую полость демпфера.

Параметры газа в газовой полости демпфера связаны уравнением:

$$p_g = \rho_g R T_g, \quad (1)$$

где  $p_g$  – давление, Па;  $\rho_g$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(кг К);  $T_g$  – температура, К. Далее по тексту индекс «г» характеризует принадлежность параметра к газу, индекс «ж» – к жидкости.

Аналогично [2] принимается допущение, что изменение давления в газовой полости протекает по адиабатному закону:

$$\frac{p_g}{\rho_g^k} = \text{const}, \quad (2)$$

где  $k$  – показатель адиабаты.

Продифференцировав уравнение адиабаты (2) и преобразовав полученное выражение, получим

$$p_g = \frac{\rho}{k \dot{\rho}_g} \dot{p}_g. \quad (3)$$

Подставив (3) в (1) и преобразовав полученную зависимость, будем иметь:

$$\dot{p}_g = k R T_g \dot{\rho}_g. \quad (4)$$

Продифференцировав зависимость для плотности газа, получим выражение

$$\dot{\rho}_r = \frac{\dot{m}_r V_r - m_r \dot{V}_r}{V_r^2},$$

где  $m_r$  – масса газа, кг;  $V_r$  – объём газа, м<sup>3</sup>.

Подставив последнее равенство в (3), получим:

$$\dot{p}_r = \frac{kRT_r}{V_r} \left( \dot{m}_r - m_r \frac{\dot{V}_r}{V_r} \right). \quad (5)$$

Изменение массы газа в газовой полости определяется из соотношения

$$\dot{m}_r = \dot{m}_r^{\text{BX}} - \dot{m}_r^{\text{ВЫХ}}, \quad (6)$$

где  $\dot{m}_r^{\text{BX}}$  – массовый расход газа, поданный через дроссель *б* (рис. 1), кг/с;  $\dot{m}_r^{\text{ВЫХ}}$  – массовый расход газа, дренируемый из газовой полости через отверстия *4* (рис. 1), кг/с.

Непрерывная подача газа через дроссель *б* осуществляется в закритической области перепада давления на нём. В этом случае расход  $\dot{m}_r^{\text{BX}}$  определяется по формуле

$$\dot{m}_r^{\text{BX}} = \mu_r^{\text{BX}} F_{\text{пит}} p_{\text{пит}} \sqrt{\frac{k}{RT_r}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}, \quad (7)$$

где  $\mu_r^{\text{BX}}$  – коэффициент расхода;  $F_{\text{пит}}$  – площадь отверстия дросселя питания, м<sup>2</sup>;  $p_{\text{пит}} = \text{const}$  – давление газа в системе подачи, Па.

Дренаж газа из полости демпфера происходит в том случае, когда уровень жидкости находится ниже уровня дренажного отверстия. Массовый расход газа через дренажные отверстия *4* определяется соотношением Сен-Венана – Ванцеля

$$\dot{m}_r^{\text{ВЫХ}} = \mu_r^{\text{ВЫХ}} N_{\text{др}} F_{\text{др}} p_r u_r. \quad (8)$$

Здесь

$$u_r = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{RT_r} \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_\infty}{p_r} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_\infty}{p_r} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & \text{при } \frac{p_r}{p_\infty} < \beta_{\text{кр}} \text{ и } x < x_{\text{др}} + r_{\text{др}}; \\ \sqrt{\frac{k}{RT_r}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} & \text{при } \frac{p_r}{p_\infty} \geq \beta_{\text{кр}} \text{ и } x < x_{\text{др}} + r_{\text{др}}; \\ 0 & \text{при } x \geq x_{\text{др}} + r_{\text{др}}, \end{cases}$$

$\mu_{\Gamma}^{\text{вых}}$  – коэффициент расхода;  $N_{\text{др}}$  – число дренажных отверстий;  $F_{\text{др}}$  – площадь дренажных отверстий, м<sup>2</sup>;  $x$  – уровень жидкости в демпфере, м;  $x_{\text{др}}$  – абсцисса центра дренажного отверстия, м;  $r_{\text{др}}$  – радиус дренажного отверстия, м;  $p_{\infty}$  – давление окружающей среды, Па;  $\beta_{\text{кр}} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}$  – критический перепад давления.

Топливная магистраль и демпфер сообщаются через пояс перфорации 5 (рис. 1). Объёмный расход жидкости через пояс перфорации определяется уравнением Бернулли

$$q_{\text{ж}} = \mu_{\text{ж}} N_0 F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho_{\text{ж}}} |p_{\text{м}} - p_{\Gamma} - \rho_{\text{ж}} g x| \text{sign}(p_{\text{м}} - p_{\Gamma} - \rho_{\text{ж}} g x)}, \quad (9)$$

где  $\mu_{\text{ж}}$  – коэффициент расхода;  $N_0$  – число отверстий в поясе перфорации;  $F_0$  – площадь отверстия, м<sup>2</sup>;  $p_{\text{м}}$  – давление жидкости в топливоподающей магистрали, Па;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$  м<sup>2</sup>/с.

Дренаж жидкости из жидкостной полости демпфера происходит, когда уровень жидкости превышает уровень дренажных отверстий. Объёмный расход жидкости через дренажные отверстия по аналогии с (9) равен

$$q_{\text{ж}}^{\text{вых}} = \begin{cases} \mu_{\text{ж}}^{\text{вых}} F_{\text{др}} u_{\text{ж}} & \text{при } x > x_{\text{др}} - r_{\text{др}}; \\ 0 & \text{при } x < x_{\text{др}} - r_{\text{др}}, \end{cases} \quad (10)$$

где

$$u_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_{\Gamma} + \rho_{\text{ж}} g (x - x_{\text{др}} - r_{\text{др}}) - p_{\infty})}.$$

Объём газожидкостной полости демпфера  $V_{\text{д}}$  складывается из объёма газовой  $V_{\Gamma}(x)$  и жидкостной  $V_{\text{ж}}(x)$  полостей:

$$V_{\text{д}} = V_{\Gamma}(x) + V_{\text{ж}}(x). \quad (11)$$

При  $V_{\text{д}} = \text{const}$  справедливо равенство

$$\dot{V}_{\Gamma} = -\dot{V}_{\text{ж}}. \quad (12)$$

Зависимость объёмов газовой и жидкостной полостей от уровня жидкости позволяет учитывать в расчётах геометрическую форму корпуса демпфера.

Соотношения (4) – (12), представляющие собой математическую модель коаксиального газового демпфера, позволяют в результате моделирования газогидродинамических процессов исследовать частотные характеристики с учётом геометрической формы, объёма газожидкостной полости и площадей проходных сечений дросселирующих элементов.

### Входная акустическая проводимость коаксиального демпфера

При изучении колебательных процессов в коаксиальном демпфере давление жидкости на входе в демпфер и объёмный расход выражаются соотношениями:  $p_m = p_{m0} + \bar{p}_m e^{j\omega t}$ ;  $q_{ж} = q_{ж0} + \bar{q}_{ж} e^{j\omega t}$ , где  $p_{m0}$ ,  $q_{ж0}$  – постоянные составляющие давления и расхода;  $\bar{p}_m = A e^{j\alpha}$ ,  $\bar{q}_{ж} = B e^{j\beta}$  – комплексные амплитуды колебаний давления и расхода;  $A$ ,  $\alpha$  – амплитуда и начальная фаза колебаний давления;  $B$ ,  $\beta$  – амплитуда и начальная фаза колебаний расхода;  $\omega$  – частота колебаний;  $t$  – время;  $j = \sqrt{-1}$ .

Входная акустическая проводимость определяется в виде отношения комплексных амплитуд расхода и давления

$$Y(\omega) = \frac{\bar{q}_{ж}}{\bar{p}_m} = M(\omega) e^{j\arg(\omega)},$$

где  $M(\omega) = \frac{B}{A}$ ,  $\arg(\omega) = \beta - \alpha$  – соответственно модуль и аргумент входной акустической проводимости демпфера.

Для выполнения расчёта и обработки результатов в среде Delphi 2007 разработана программа. Для интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений в программе реализован метод Рунге-Кутты. Для вычисления входной акустической проводимости демпфера со стороны топливной магистрали задаются гармонические колебания давления и определяется расход жидкости через пояс перфорации. Так как система уравнений нелинейная, то установившиеся колебания расхода имеют вид полигармонического сигнала (рис. 2).

Обработка расчётных данных проводилась по основным гармоникам, совпадающим по частоте с частотой колебаний давления. При различных конструктивных параметрах была рассчитана входная акустическая проводимость на входе в демпфер (в сечении пояса перфорации).

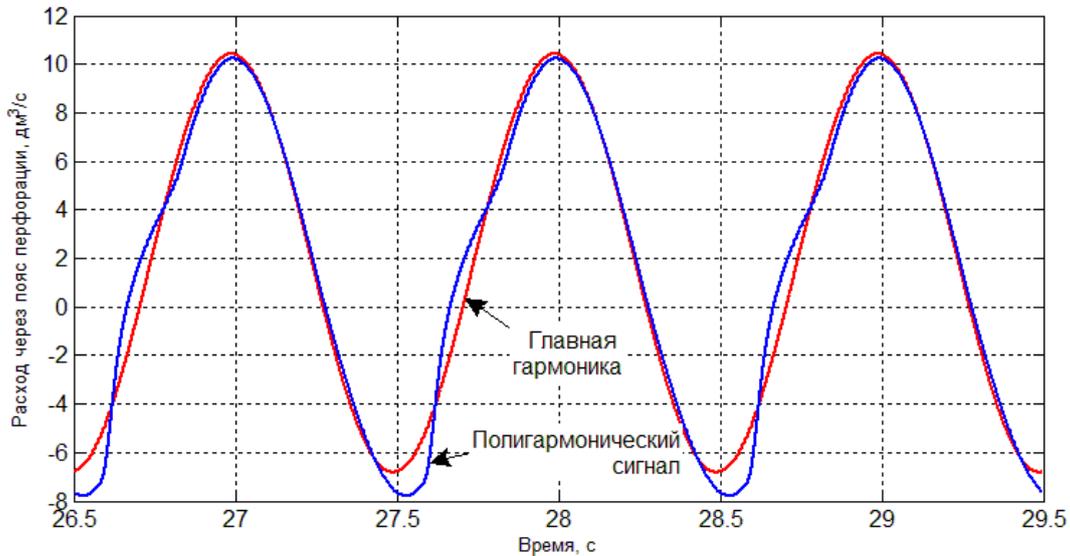


Рис. 2. Оциллограмма расхода жидкости через пояс перфорации демпфера

Расчёт проводился в частотном диапазоне от 0,5 до 30 Гц с шагом 0,5 Гц, шаг интегрирования  $10^{-5}$  с.

Моделирование выполнялось с использованием следующих номинальных параметров демпфера и рабочих сред:  $\rho_{ж}=1152$  кг/м<sup>3</sup>;  $k=1,67$ ;  $R=2077$  Дж/кг/К;  $T_r=90$  К;  $N=20$ ;  $F_0=3,15$  см<sup>2</sup>;  $x_{др}=0,5$  м;  $F_{др}=0,79$  см<sup>2</sup>;  $V_d=5 \cdot 10^{-2}x$  м<sup>3</sup>;  $0 \leq x \leq 1$  м;  $m_r^{вх}=2$  г/с.

Дренажное отверстие в демпфере полагалось единственным.

При увеличении амплитуды колебаний давления жидкости в топливной магистрали модуль входной акустической проводимости демпфера снижается (рис. 3). Это связано с тем, что пояс перфорации обладает ограниченной пропускной способностью, которая, начиная с некоторой амплитуды колебаний давления жидкости, возрастает слабо.

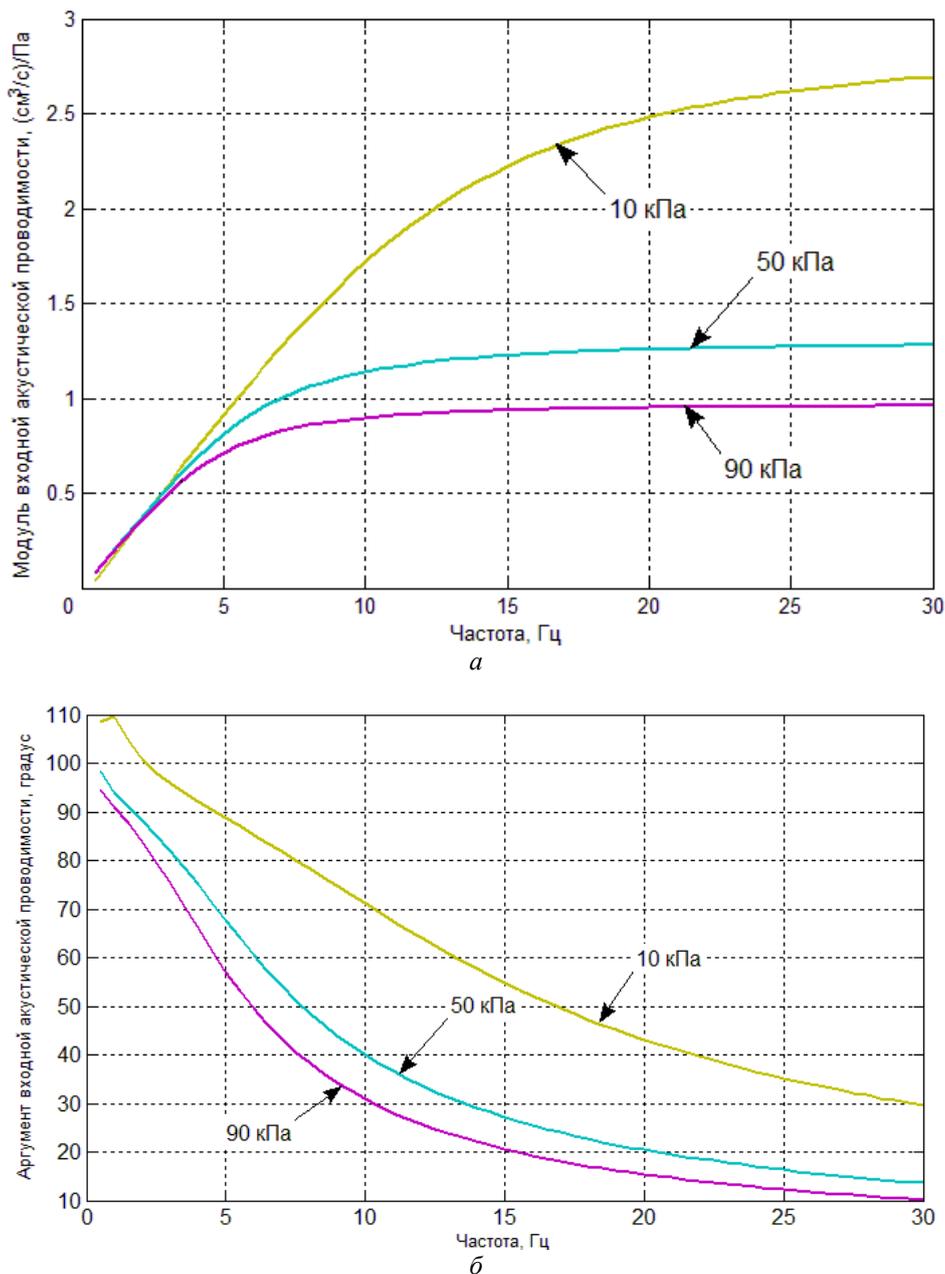


Рис. 3. Модуль (а) и аргумент (б) входной акустической проводимости демпфера при различных амплитудах колебаний давления в топливной магистрали

По этой же причине при увеличении количества отверстий с постоянной площадью проходных сечений в поясе перфорации податливость демпфера возрастает (рис. 4).

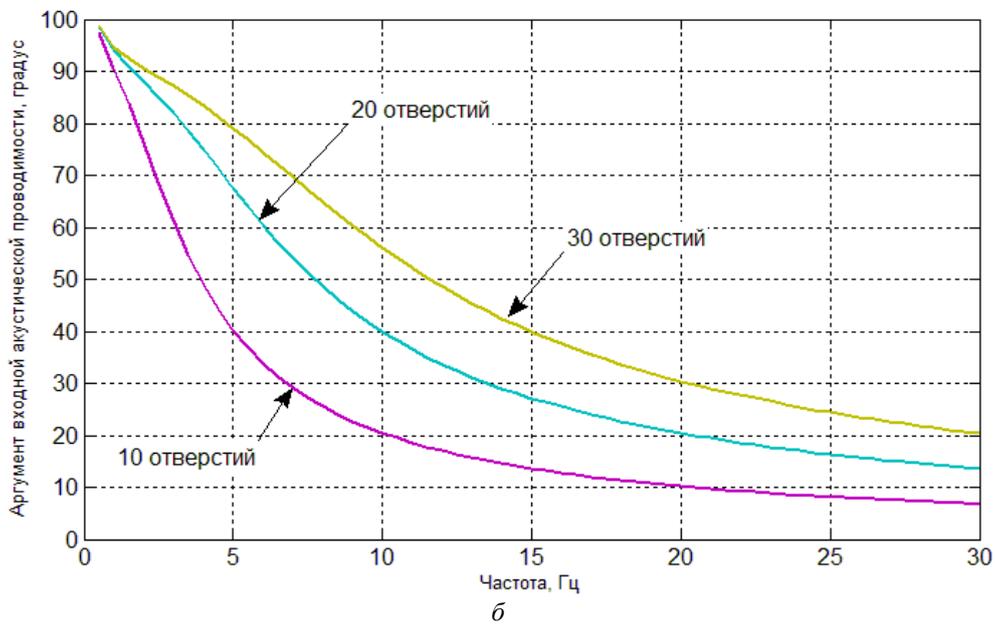
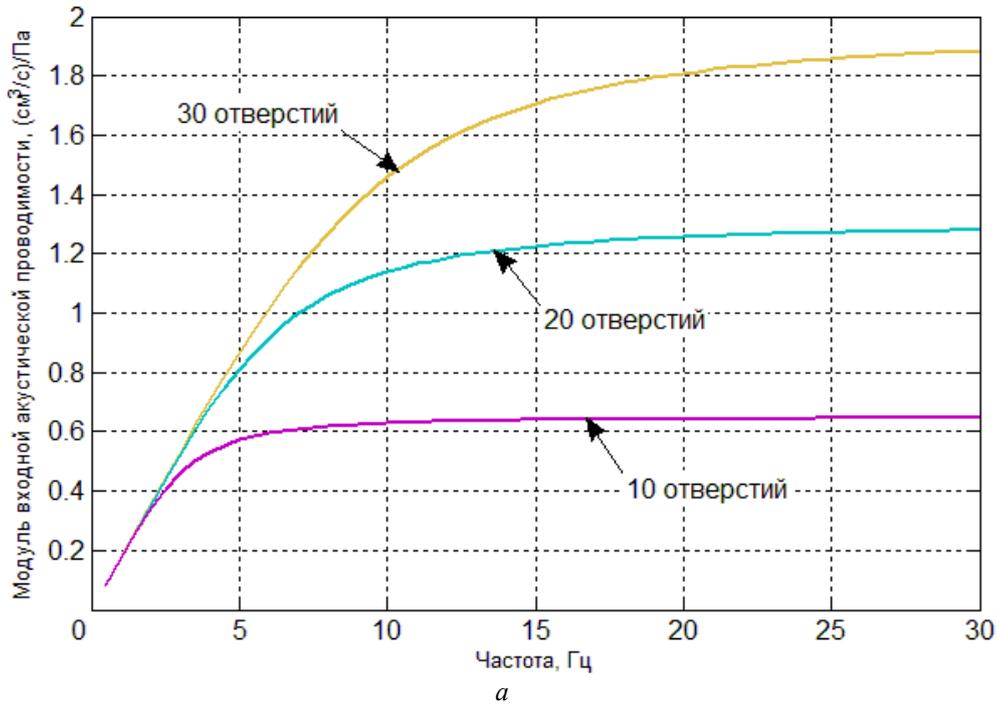
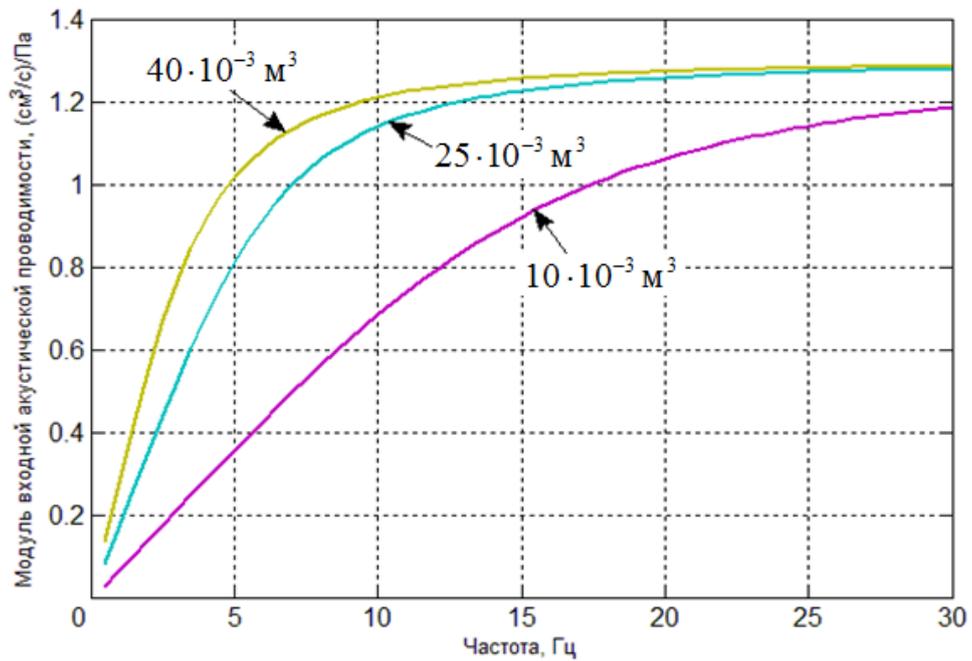
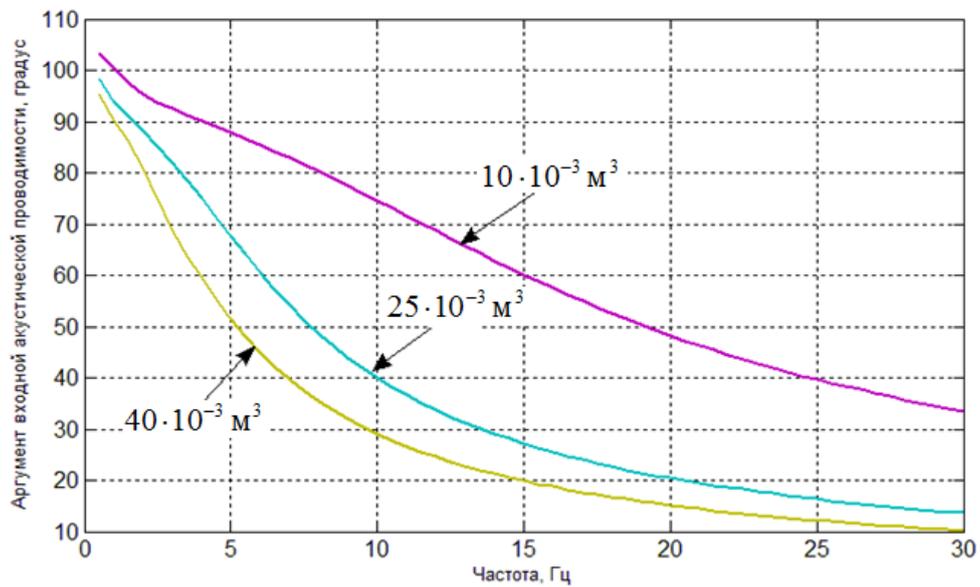


Рис. 4. Модуль (а) и аргумент (б) входной акустической проводимости коаксиального демпфера при различном количестве отверстий в поясе перфорации

Рис. 5 иллюстрирует, что разработанная модель адекватно отражает известное свойство газового демпфера, согласно которому его податливость тем выше, чем больше объём его газовой полости.



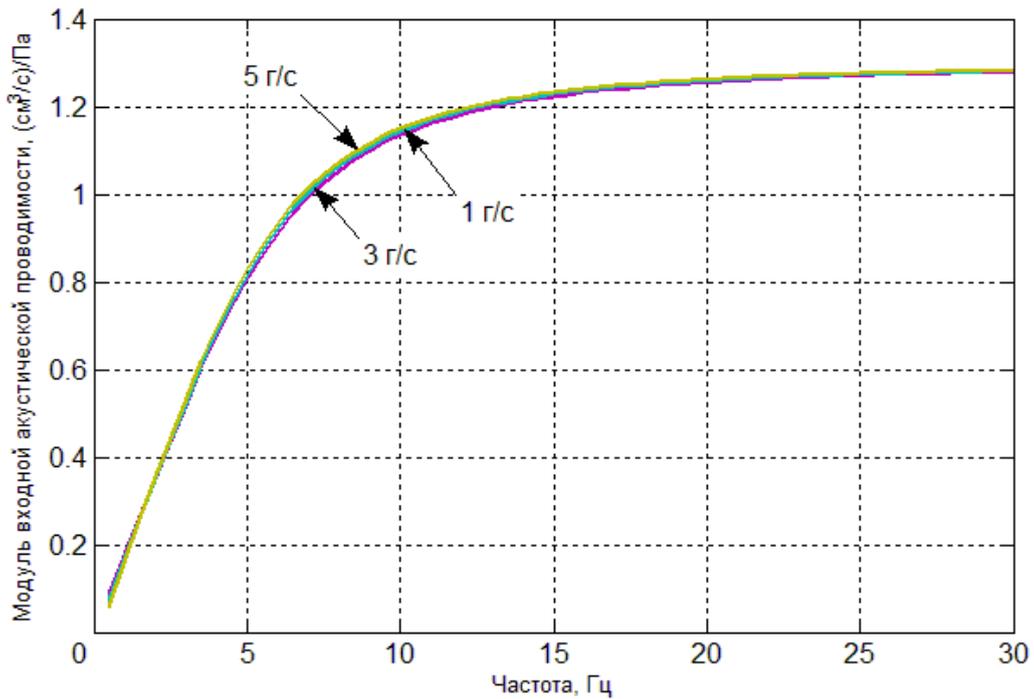
а



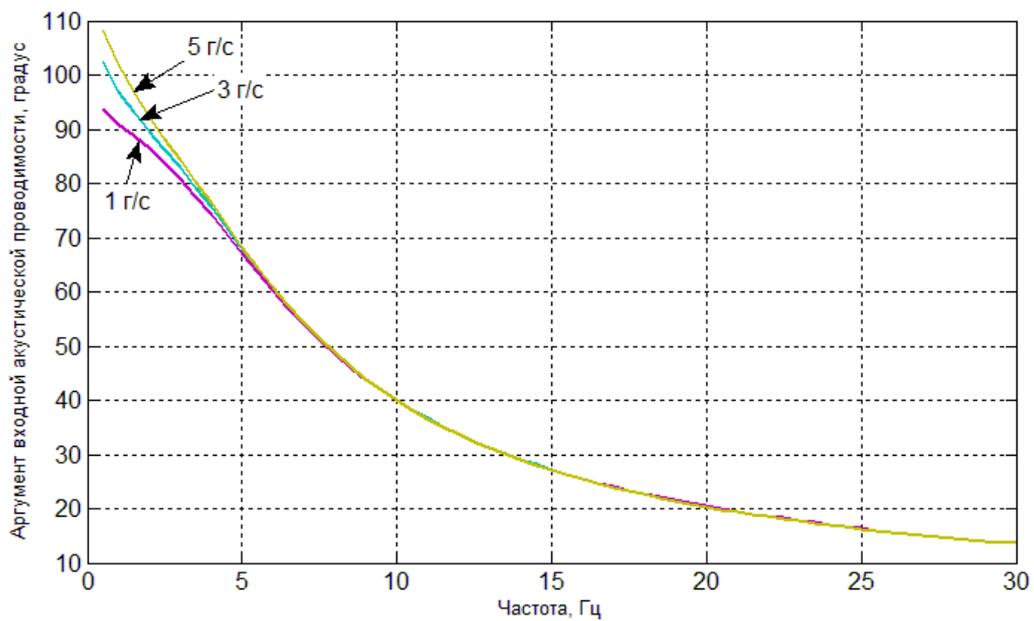
б

Рис. 5. Модуль (а) и аргумент (б) входной акустической проводимости коаксиального демпфера при различных объёмах газовой полости

При изменении массового расхода газа, подаваемого на продувку в газовую полость, податливость демпфера практически не изменяется (рис. 6).



a



б

Рис. 6. Модуль (а) и аргумент (б) входной акустической проводимости коаксиального демпфера при различном расходе газа на продувку

К аналогичному результату приводит и изменение диаметра дренажного отверстия (рис. 7).

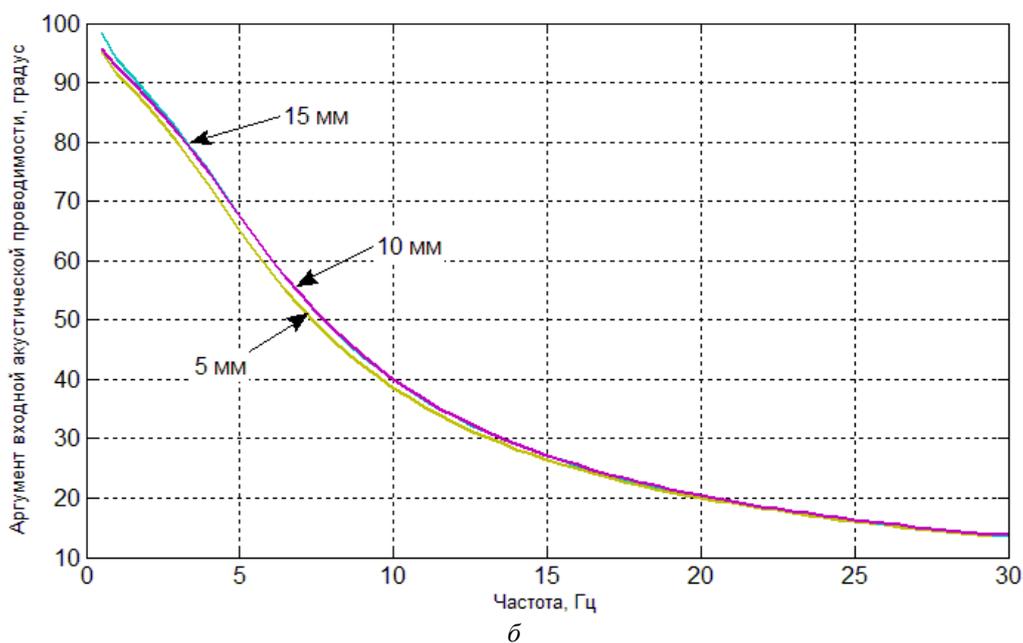
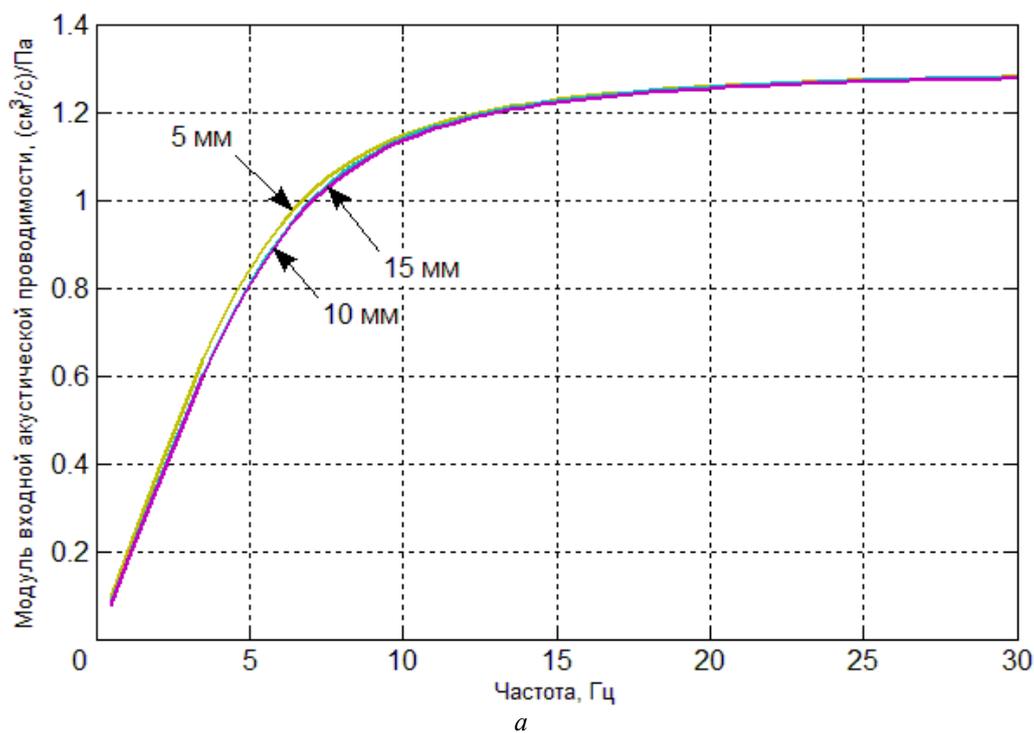


Рис. 7. Модуль (а) и аргумент (б) входной акустической проводимости коаксиального демпфера при различных диаметрах дренажного отверстия

Таким образом, входная акустическая проводимость демпфера определяется в основном объёмом его газовой полости и суммарной площадью отверстий в поясе перфорации. Дроссели, отвечающие за подачу газа на продувку газовой полости и дренаж, являются средствами поддержания постоянным среднего давления в газовой полости и

не оказывают существенного влияния на частотные характеристики демпфера. Важно отметить, что надёжность демпфера определяется не только величиной создаваемой им податливости, но и изменением уровня жидкости в газожидкостной полости во время переходных процессов в двигателе. Основное требование состоит в недопущении прорыва газа в топливную магистраль.

### Заключение

На основании уравнения состояния идеального газа для случая адиабатического процесса и уравнений Бернулли и Сен-Венана – Ванцеля разработана нелинейная математическая модель работы коаксиального газового демпфера-аккумулятора, учитывающая помимо объёма газовой полости течение жидкости и газа через его дросселирующие элементы. Показано, что частотные характеристики демпфера определяются в основном объёмом его газовой полости и суммарной площадью отверстий в поясе перфорации. Остальные параметры демпфера на его частотные характеристики влияют слабо.

Полученная модель позволяет:

- на стадии проектирования газового демпфера учитывать вклад геометрических параметров проходных сечений дросселирующих элементов в его работу, оценивать расход газа на продувку, расход жидкости в дренаж, уровень жидкости в демпфере;
- рассчитать частотную характеристику демпфера в виде входной акустической проводимости.

Результаты могут быть использованы:

- для выбора параметров демпфера для конкретной топливной магистрали РН с жидкостным ракетным двигателем;
- для оценки уровня жидкости в демпфере во время переходных процессов в двигателе.

### Библиографический список

1. Аджян А.П., Аким Э.Л., Алифанов О.М. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-22. Кн. 1. Ракетно-космическая техника. М.: Машиностроение, 2012. 925 с.
2. Колесников К.С. Динамика ракет: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2003. 520 с.
3. Натанзон М.С. Продольные колебания жидкостной ракеты. М.: Машиностроение, 1977. 208 с.
4. Гимадиев А.Г., Одинокоев Д.А., Стадник Д.М., Грешняков П.И. Исследование характеристик газового демпфера для топливной магистрали ракеты-носителя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14, № 1. С. 121-131. DOI: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-121-131
5. Ransom D.L. Probabilistic Design Analysis of Bellows Type Pogo Accumulator // 18th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference. San Diego, California, USA. DOI: 10.2514/6.2016-0682
6. Swanson L.A., Geil T.V. Design Analysis of the Ares I POGO Accumulator // 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Denver, Colorado. DOI: 10.2514/6.2009-4950
7. Филипковский С.В., Аврамов К.В., Пирог В.А., Тонконоженко А.М. Нелинейные продольные колебания топлива в трубопроводе ракеты с газожидкостным демпфером // Прикладная гидромеханика. 2014. Т. 16, № 2. С. 76-83.

## FREQUENCY CHARACTERISTICS OF A COAXIAL GAS DAMPER FOR BOOSTER FEED LINE

© 2017

**D. A. Odinokov** postgraduate student of the Department of Power Plant Automatic Systems; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [deo\\_@rambler.ru](mailto:deo_@rambler.ru)

**A. G. Gimadiyev** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Power Plant Automatic Systems; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [gimadiev\\_ag@mail.ru](mailto:gimadiev_ag@mail.ru)

In development and maintenance of liquid rockets it is essential to ensure its stability in relation to longitudinal oscillations of the body (longitudinal stability, pogo effect) for all possible disturbances. It is known that one of the most effective ways to ensure the longitudinal stability is to use gas dampers-accumulators installed in the feed line at the engine inlet. The damper in the feed line produces additional compliance, thus making it possible to eliminate the coincidence of the fundamental natural frequency of the pressure fluctuations in the feed line and the natural frequencies of the rocket body, which is necessary for providing the longitudinal stability. The damper parameters are selected on the basis of mathematical modeling and experimental data. In this paper, a nonlinear mathematical model of a coaxial gas damper is developed with the use of the ideal-gas law equation for an adiabatic process and the Bernoulli and Saint-Venant – Vantsel equations. The mathematical model is used to calculate the frequency characteristics of the damper in the form of input acoustic conductance. The results obtained make it possible to take into account the contribution of passage sections of the throttles to the performance of the damper at the design stage, as well as to select its parameters in simulating processes in the feed lines to solve the longitudinal stability problem.

*Booster; longitudinal stability; feed line; gas damper; mathematical model; Delphi; acoustic conductance; frequency characteristics.*

---

*Citation:* Odinokov D.A., Gimadiyev A.G. Frequency characteristics of a coaxial gas damper for booster feed line. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 1. P. 62-74.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-1-62-74

### References

1. Adzhyan A.P., Akim E.L., Alifanov O.M. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-22. Kn. 1. Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Mechanical engineering. Encyclopedia. V. IV-22. Book 1. Space-rocket engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2012. 925 p.
2. Kolesnikov K.S. *Dinamika raket: uchebnik dlya vuzov* [Rocket dynamics: manual for higher education institutions]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2003. 520 p.
3. Natanzon M.S. *Prodol'nye kolebaniya zhidkostnoy rakety* [Longitudinal oscillations of a liquid propellant rocket]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 208 p.
4. Gimadiyev A.G., Odinokov D.A., Stadnik D.M., Greshnyakov P.I. Study of characteristics of the launch vehicle fuel line gas damper. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2015. V. 14, no. 1. P. 121-131. (In Russ.) DOI: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-121-131
5. Ransom D.L. Probabilistic Design Analysis of Bellows Type Pogo Accumulator. *18th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference*. San Diego, California, USA. DOI: 10.2514/6.2016-0682
6. Swanson L.A., Geil T.V. Design Analysis of the Ares I POGO Accumulator. *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. Denver, Colorado. DOI: 10.2514/6.2009-4950
7. Filipkovsky S.V., Avramov K.V., Pirog V.A., Tonkonozhenko A.M. Nonlinear longitudinal oscillations of fuel in the pipeline of liquid rocket engine with a gas-liquid damper. *Applied hydromechanics*. 2014. V. 16, no. 2. P. 76-83. (In Russ.)