

опорной на целевую орбиту, учитывающее продолжительность работы, время начало работы и количество включений ЭРД. Результаты моделирования показали, что при различных вариантах выведения МГ КА Starlink время достижения целевой орбиты составляет от 109 до 151 дня.

Представленная модель выведения КА Starlink на целевую орбиту позволяет получить объективные данные о динамике изменения параметров их орбит. Модель может быть использована при совершенствовании алгоритмов функционирования информационных средств мониторинга космического пространства.

Библиографический список

1. NORAD Online Satellite Catalog (SATCAT) / CELESTRAK. – URL: <https://www.celestrak.com/> (дата обращения 08.03.2022).

2. Эксперт: спутники Starlink Илона Маска стали самыми опасными на орбите / SpaceX. URL: https://www.google.ru/amp/s/m.gazeta.ru/amp/science/news/2021/08/19/n_16404206.shtml (дата обращения 08.03.2022).

3. Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу, утверждённые Президентом Российской Федерации от 19 апреля 2013 г. № Пр-906.

4. Двигательные установки космических летательных аппаратов. Часть 1 / В.В. Синявский, А.Е. Тютюкин, И.А. Уртминцев, Д.А. Мосин, М.Н. Лавникевич / под редакцией профессора В.В. Синявского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 236 с.

УДК 629.764; 629.78

Лазарев А.А., Давыдов И.Е.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОАКСИАЛЬНОГО ДЕМПФЕРА ДЛЯ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ И ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ В СОСТАВЕ ТОПЛИВНОЙ МАГИСТРАЛИ

На устойчивость и управляемость полёта ракет космического назначения (РКН) оказывают значительное влияние упругие свойства их корпусов и жидкое наполнение. Пренебрежение или не учёт упругих свойств корпуса и движения жидкого топлива может привести к возникновению нерасчётных режимов работы. Один из таких нежелательных режимов получил название потери продольной устойчивости и состоит в нарастании амплитуды низкочастотных колебаний (0-30 Гц) растяжения-сжатия ракеты в результате взаимодействия между колебаниями составных элементов РН, одним из которых являются топливные маги-

страли. Потеря продольной устойчивости может приводить к невыполнению условий по точности выведения, отказу оборудования ракеты и, в отдельных случаях, к разрушению её корпуса, так как прочностные характеристики последнего не рассчитаны на дополнительную знакопеременную нагрузку. Целью настоящей работы является разработка нелинейной математической модели для определения частотных характеристик коаксиального газового демпфера, в конструкции которого отсутствует разделитель между газовой и жидкостной полостями (рис. 1).

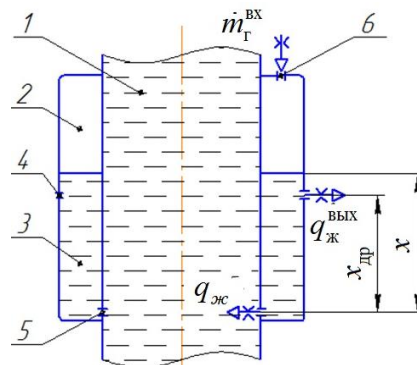


Рис. 1. Схема коаксиального газового демпфера:

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

Обеспечение продольной устойчивости жидкостных ракет является одной из крупных научно-технических проблем ракетно-космической техники. Если она не решена своевременно (на этапе эскизного проектирования), то при первых же лётно-конструкторских испытаниях ракет могут возникнуть колебания конструкции корпуса в направлении продольной оси ракеты на активном участке траектории её полёта. Продольные колебания могут достичь опасных уровней и способны нарушить нормальную работу приборов системы управления и привести к различным аварийным ситуациям. При пилотируемых полётах, собственные частоты колебаний головного мозга человека и некоторых других его внутренних органов лежат в диапазоне 5-15 Гц, поэтому воздействие на человека с такой частотой может нанести вред здоровью даже при небольших амплитудах колебаний, неопасных для ракеты.

Известно, что одним из эффективных способов обеспечения продольной устойчивости РН является применение газовых демпферов-аккумуляторов, устанавливаемых в топливоподающей магистрали на входе в двигатель [1]. Демпфер создаёт в магистрали дополнительную податливость, корректный выбор характеристик которого позволяет исключить совпадение собственной частоты колебаний давле-

ния жидкости в топливной магистрали с собственными частотами колебаний РН, что является необходимым условием для обеспечения продольной устойчивости.

Полученная модель позволяет на стадии проектирования газового демпфера учитывать влияние геометрической формы и проходных сечений на его работу, а также получить частотную характеристику демпфера. Целью работы является анализ эффективности применения данного демпфера в составе топливной магистрали РН.

Четырёхполюсник, моделирующий волновые процессы на участке трубопровода с однородными характеристиками с учётом сжимаемости жидкости и упругости стенок трубопровода

$$\begin{aligned} \delta \underline{G}_1 &= \cos \cos \Omega l \delta \underline{G}_0 - i \frac{\omega F}{c^2 \Omega} \sin \sin \Omega l \delta \underline{p}_0, \\ \delta \underline{p}_1 &= -i \frac{c^2 \Omega}{\omega F} \sin \sin \Omega l \delta \underline{G}_0 + \cos \cos \Omega l \delta \underline{p}_0, \\ \Omega^2 &= \frac{\omega^2}{c^2} - i \frac{\omega}{c^2} \frac{2F \Delta p}{lG}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\delta \underline{p}_0$, $\delta \underline{p}_1$ – соответственно амплитуда колебаний давления на входе и выходе, Па; $\delta \underline{G}_0$, $\delta \underline{G}_1$ – соответственно амплитуда массового расхода на входе и выходе, кг/с; l , F – соответственно длина осевой линии участка трубопровода и площадь его поперечного сечения; G , Δp – соответственно номинальный массовый расход и гидравлическая потеря давления; ω – частота возмущающей силы; $c = \left(\frac{1}{c_0^2} + \frac{\rho D}{E \delta} \right)^{-\frac{1}{2}}$ – скорость распространения волн давления в соответствии с формулой Н.Е. Жуковского, где ρ – плотность жидкости; D – диаметр трубопровода; E – модуль упругости материала трубопровода; c_0 – скорость распространения волн давления в вакууме. Представим четырёхполюсник в виде матрицы:

$$\begin{bmatrix} \delta \underline{G}_1 & \delta \underline{p}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \underline{G}_0 & \delta \underline{p}_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{10} & a_{11} \end{bmatrix},$$

где некоторые элементы заменены коэффициентами:

$$\begin{aligned} a_{00} &= \cos \cos \Omega l ; a_{01} = -i \frac{\omega F}{c^2 \Omega} \sin \sin \Omega l ; \\ a_{10} &= -i \frac{c^2 \Omega}{\omega F} \sin \sin \Omega l ; a_{11} = \cos \cos \Omega l . \end{aligned}$$

Динамическое поведение элемента сосредоточенной упругости (в том числе и ДАГ), расположенной в расходной магистрали, при установившемся колебательном режиме давления и массового расхода компонента в общем случае описывается соотношением:

$$\{W(i\omega)\delta \underline{p} = \delta \underline{G}_1 - \delta \underline{G}_0 \delta \underline{p}_1 = \delta \underline{p}_0 = \delta \underline{p},$$

где $\underline{\delta p}$ – комплексная амплитуда колебаний давления в сечении сосредоточенной упругости; $\underline{\delta G}_0$, $\underline{\delta G}_1$ – комплексная амплитуда колебаний массового расхода перед сосредоточенной упругостью и за ней соответственно; ω – частота возмущающей силы; $i^2 = -1$; $W(i\omega) = \frac{\underline{\delta G}}{\underline{\delta p}}$ – частотная передаточная функция (акустическая проводимость) сосредоточенной упругости, увязывающая комплексные амплитуды колебаний давления и массового расхода компонента.

Акустическая проводимость является уникальной характеристикой сосредоточенной упругости, отражающей, в том числе, конструктивный способ её организации. Акустическая проводимость может быть получена как аналитически, так и с использованием численных методов моделирования или непосредственно в эксперименте. Графическое представление акустической проводимости – амплитудно-фазовая частотная характеристика (рис. 2).

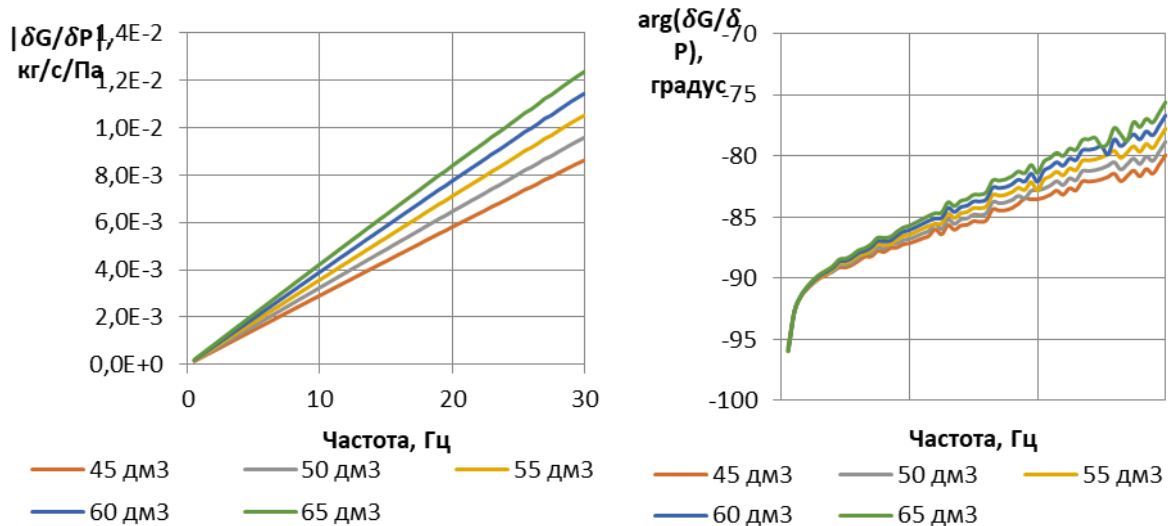


Рис. 2. АФЧХ демпфера при различных объёмах газовой полости

Необходимо отметить, что основная задача ДАГ – снижение собственных частот расходной магистрали (рис. 3) – решается тем эффективнее при прочих равных условиях, чем выше модуль акустической проводимости ДАГ. В [2] показано, что, основным параметром, который влияет на акустическую проводимость является объем газовой полости, который определяется высотой дренажного отверстия, и суммарной площадью отверстий в поясе перфорации.

Результаты работы могут быть использованы для анализа эффективности демпфера в составе магистрали, и должны в первом приближении показать на сколько снижается частота магистрали относительно частоты корпуса и выполняется ли необходимое условия для обеспечения продольной устойчивости РКН.

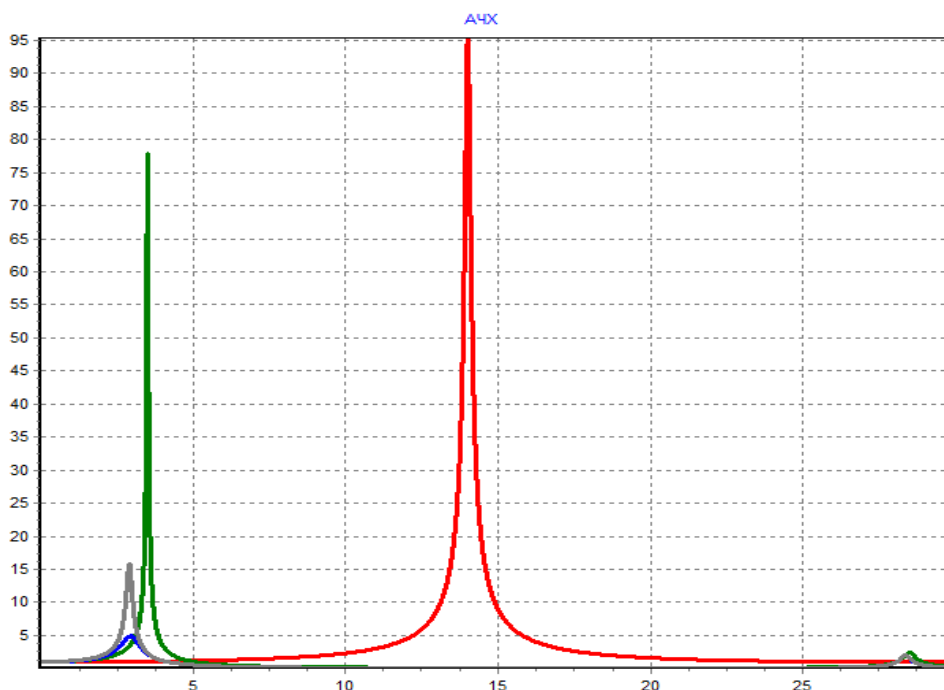


Рис. 3. АЧХ магистрали с демпфера различной формы:
 Красный график – АЧХ магистрали;
 Зелёный график – АЧХ магистрали с газовой каверной (без учёта жидкости);
 Серый и синий график – АЧХ магистрали с демпферами различной формы
 (с учётом жидкости)

Библиографический список

1. Натанзон М.С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты. М.: Машиностроение, 1977. 206 с.
2. Одинокоев 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.
3. Колесников, К.С., Рыбак С.А., Самойлов Е.А. Динамика топливных систем ЖРД/ под общ. ред. К.С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1975. – 171 с.
4. Dr. Curtis E. Larsen NASA Experience with Pogo in Human Spaceflight Vehicles // NATO RTO Symposium ATV-152 on Limit-Cycle Oscillations and Other Amplitude-Limited, Self-Excited Vibrations. Norway, 2008. 23 p.
5. Jun Kyoung Lee. Study on Dynamics Modeling of Pogo Suppression Device (PSD) // Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers. 2007. V 11, Iss. 5. P. 23-30.
6. Гимадиев А.Г., Одинокоев Д.А., Стадник Д.М., Грешняков П.И. Исследование характеристик газового демпфера для топливной магистрали ракеты-носителя // Вестник Самарского университета. 2015. Т. 14, № 1. С. 121-131.