

УДК 621.671:532.528:629.76.017.2

Ю.А. ЖУЛАЙ¹, С.И. ДОЛГОПОЛОВ²¹ *Институт транспортных систем и технологий НАНУ, Украина,*² *Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Украина***ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИЙ КОНСТРУКЦИИ И ПУЛЬСАЦИЙ ЖИДКОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ПИТАЮЩЕГО ТРУБОПРОВОДА**

Получено выражение для коэффициента усиления питающего трубопровода жидкостной ракетной двигательной установки при совместных продольных колебаниях конструкции трубопровода с сильфоном, и жидкости в нем. Для конкретной системы питания показано, что взаимодействие продольных колебаний конструкции трубопровода и жидкости может существенно изменять модуль коэффициента усиления питающего трубопровода и его собственную частоту колебаний. Это обусловлено близостью частот колебаний парциальных систем конструкции трубопровода и жидкости, а также учетом демпфирования в трубопроводе.

Ключевые слова: жидкостная ракета, продольные колебания корпуса, жидкостная ракетная двигательная установка, кавитация в насосах, коэффициент усиления, взаимодействие колебаний.

Введение

Механизм потери устойчивости по отношению к продольным колебаниям (POGO) жидкостных ракет связан [1, 2] с возрастанием кругового коэффициента усиления замкнутой динамической системы жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ) – корпус ракеты вследствие близости резонансных частот колебаний жидкости в питающем трубопроводе и собственных частот колебаний корпуса ракеты. Основными звеньями этой системы являются корпус ракеты (колебательное звено), двигатель (источник энергии) и его питающие трубопроводы, осуществляющие положительную обратную связь [2]. Входным параметром питающего трубопровода как звена рассматриваемой системы ЖРДУ – корпус ракеты является давление компонента топлива на выходе из бака, а выходным – давление на входе в двигатель. Поэтому основной характеристикой питающего трубопровода как звена системы является коэффициент усиления.

В работах [3, 4] показано, что в системах питания ЖРДУ взаимодействие продольных колебаний конструкции питающего трубопровода и жидкости может оказывать существенное влияние на границу области устойчивости по отношению к кавитационным колебаниям и их частоты. При анализе же устойчивости по отношению к продольным колебаниям жидкостных ракет это взаимодействие, как правило, не учитывается [5].

Целью данной работы является исследование влияния совместных продольных колебаний конструкции трубопровода и жидкости в нем на коэффициент усиления питающего трубопровода.

1. Коэффициент усиления

Расчетная схема питающего трубопровода ЖРДУ при взаимодействии продольных колебаний конструкции питающего трубопровода и жидкости в нем представлена на рис. 1.

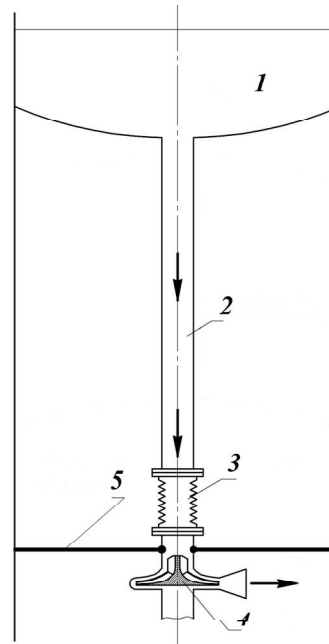


Рис. 1. Расчетная схема питающего трубопровода:
1 – бак; 2 – питающий трубопровод;
3 – сильфон; 4 – шнекоцентробежный насос;
5 – крепление двигателя

В состав питающего трубопровода входит сильфон, который при продольных колебаниях конструкции трубопровода может иметь определяющее

значение, так как при равной продольной силе продольные перемещения у сильфона, обычно, значительно больше, чем у трубопровода.

Для определения коэффициента усиления питающего трубопровода ЖРДУ при совместных продольных колебаниях конструкции и жидкости может быть использована математическая модель, представленная в работах [3, 4]. Она включает уравнение движения жидкости в питающем трубопроводе, уравнения для определения давлений на входе и выходе из насоса, уравнение движения жидкости в напорном трубопроводе, уравнения движения и состояния конструкции трубопровода с сильфоном. После преобразования Лапласа эти уравнения примут вид:

$$\begin{cases} \delta \bar{p}_B = \delta \bar{p}_1 + [R_1 + (J_1 + J_{OT})s] \delta \bar{G}_1 - R_{1M} \delta \bar{u}_z, \\ s \delta \bar{p}_1 = \left(-\frac{B_1}{\gamma_{ж}} + R_{K1}s \right) \delta \bar{G}_1 + \left(\frac{B_1}{\gamma_{ж}} + R_{K2}s \right) \delta \bar{G}_2 - \\ - d_{ж} \delta \bar{u}_z, \\ \delta \bar{p}_2 = (1+m) \delta \bar{p}_1 + s_2 \delta \bar{G}_2, \\ \delta \bar{p}_2 = (R_2 + s J_2) \delta \bar{G}_2, \\ C_M s \delta \bar{F}_z = (1 + \mu_z s) \delta \bar{u}_z + d_M s \delta \bar{p}_1, \\ m_M s \delta \bar{u}_z = -\delta \bar{F}_z, \end{cases} \quad (1)$$

где s – переменная преобразования Лапласа;

δ – символ, указывающий на малые отклонения параметра от его установившегося значения;

p_B – давление жидкости на выходе из бака;

p_1, G_1, p_2, G_2 – давление и расход на входе и выходе из насоса;

$F_z, \dot{u}_z$ – продольная сила и скорость перемещения конструкции трубопровода;

R_1, J_1, R_2, J_2 – коэффициенты линеаризованного гидравлического и инерционного сопротивления питающего и напорного трубопроводов;

$\gamma_{ж}$ – удельный вес жидкости;

J_{OT} – коэффициент инерционного сопротивления, обусловленный наличием обратных течений на входе в насос;

B_1, B_2, T_K – упругость, сопротивление и постоянная времени кавитационных каверн;

m – тангенс угла наклона касательной к кавитационной характеристике насоса;

s_2 – тангенс угла наклона касательной к напорной характеристике насоса;

m_M – масса трубопровода;

C_M – податливость конструкции трубопровода с сильфоном;

μ_z – коэффициент демпфирования конструкции трубопровода;

$$R_{1M} = R_1 A_{ж} \gamma_{ж};$$

$$R_{K1} = B_2 - \frac{B_1 T_K}{\gamma_{ж}}; \quad R_{K2} = \frac{B_1 T_K}{\gamma_{ж}};$$

$$d_{ж} = -B_1 A_{ж}; \quad d_M = C_M A_{ЭФ};$$

$A_{ж}$ – площадь поперечного сечения трубопровода, занятого жидкостью;

$A_{ЭФ}$ – эффективная площадь сильфона.

В данной работе принято дополнительное предположение о том, что коэффициент формы колебаний питающего трубопровода по длине трубопровода постоянен.

Исключая из системы уравнений (1) все параметры, кроме $\delta \bar{p}_B$ и $\delta \bar{p}_1$ можно получить выражение для коэффициента усиления питающего трубопровода ЖРДУ:

$$k_p = \frac{\delta \bar{p}_1}{\delta \bar{p}_B} = 1 / \left[1 + k_1 + \frac{R_1 + s(J_1 + J_{OT})}{-\frac{B_1}{\gamma_{ж}} + R_{K1}s} \times \left(s - \frac{\left(-\frac{B_1}{\gamma_{ж}} + R_{K1}s \right) (1+m)}{R_2 - s_2 + s J_2} - k_2 \right) \right], \quad (2)$$

$$\text{где} \quad k_1 = \frac{R_{1M} d_M s}{m_M C_M s^2 + \mu_z s + 1};$$

$$k_2 = \frac{d_{ж} d_M s}{m_M C_M s^2 + \mu_z s + 1}.$$

Здесь параметры k_1 и k_2 отражают взаимодействие продольных колебаний конструкции трубопровода и жидкости. При $k_1=0$ и $k_2=0$ (2) обращается в известное выражение для коэффициента усиления k_p [6].

2. Результаты расчета коэффициента усиления

Рассмотрим влияние продольных связанных колебаний конструкции питающего трубопровода с сильфоном и жидкости в нем на его коэффициент усиления применительно к шнекоцентробежному насосу, которые представлены в работе [3]. Расчеты проводились для номинального режима работы насоса по числу кавитации $k^* = 0,146$ и параметру режима $q = 0,44$. Параметры, учитывающие кавитационные явления в насосе B_1, B_2 и T_K , определялись по гидродинамической модели [6–8].

В соответствии со значениями этих параметров частота колебаний парциальной системы жидкости

в питающем трубопроводе составляет $f_{ж} = 22,7$ Гц. Это подтверждается характером изменения коэффициента усиления питающего трубопровода, представленном на рис. 2 (кривая 1). Учет взаимодействия продольных колебаний конструкции питающего трубопровода и жидкости в нем приводит к существенному изменению его коэффициента усиления. Это наблюдается иногда даже при значительно отличающихся частотах колебаний парциальных систем жидкости $f_{ж}$ и конструкции питающего трубопровода f_T .

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_M C_M}}.$$

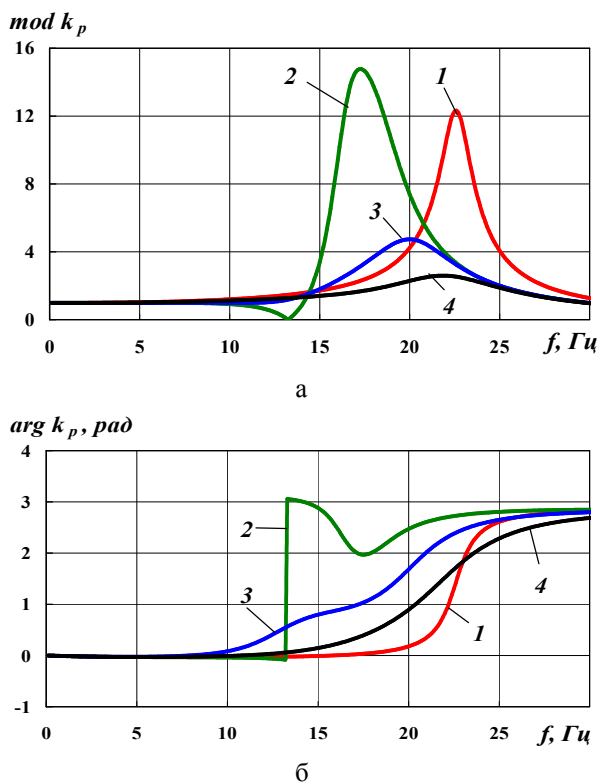


Рис. 2. Зависимости модуля (а) и аргумента (б) коэффициента усиления жидкости в питающем трубопроводе от частоты колебаний ($f_T = 13,2$ Гц): 1 – без учета взаимодействия конструкции трубопровода и жидкости; 2 – с учетом взаимодействия, $\mu_Z = 0$; 3 – с учетом взаимодействия, $\mu_Z = 0,005$; 4 – с учетом взаимодействия, $\mu_Z = 0,005$ и $f_T = 20$ Гц

Как показывает кривая 2 рис.2, полученная при $f_{ж} = 22,7$ Гц и $f_T = 13,2$ Гц ($\mu_Z = 0$) модуль коэффициента усиления k_p увеличился с 12,2 до 14,7, а резонансная частота колебаний связанной системы сместилась с 22,7 Гц до 17,4 Гц. Причиной такого сильного взаимодействия, при отличающихся значениях $f_{ж}$ и f_T , а также при отсутствии демпфиро-

вания в конструкции питающего трубопровода, являются большие значения коэффициентов связи R_{1M} , $d_{ж}$ и d_M для рассматриваемой системы питания ЖРДУ.

Существенное влияние на коэффициент усиления при совместных продольных колебаниях конструкции трубопровода и жидкости в нем оказывает демпфирование конструкции трубопровода. Это демонстрирует кривая 3, отличающаяся от кривой 2 (рис. 2) ненулевым демпфированием, которое не только уменьшает модуль коэффициента усиления, но и смещает резонансную частоту колебаний связанной системы в сторону частоты колебаний парциальной системы жидкости.

Одновременное введение демпфирования конструкции трубопровода в расчет коэффициента усиления и сближение частот колебаний парциальных систем жидкости $f_{ж} = 22,7$ Гц и конструкции питающего трубопровода $f_T = 20$ Гц приводит к дальнейшему смещению резонансной частоты колебаний связанной системы и уменьшению модуля коэффициента усиления (кривая 4). Таким образом, конструкция питающего трубопровода с сильфоном может играть роль демпфера продольных колебаний, так и уменьшения модуля коэффициента усиления.

Следует отметить, что в данной работе влияние сильфона на коэффициент усиления жидкости в питающем трубопроводе коренным образом отличается от встречаемого в литературе [2], где предполагается, что установка сильфона приводит лишь к дополнительной податливости жидкости. Здесь податливость сильфона вместе с массой конструкции питающего трубопровода составляет отдельное колебательное звено. Его взаимодействие с колебательной системой, которую составляют масса жидкости в питающем трубопроводе и, в основном, податливость кавитационных каверн в шнекоцентробежном насосе, и определяет коэффициент усиления питающего трубопровода ЖРДУ.

Заключение

Получено выражение для коэффициента усиления питающего трубопровода ЖРДУ при совместных продольных колебаниях его конструкции, включающей сильфон, и жидкости в нем. Для конкретной системы питания ЖРДУ показано, что такое взаимодействие существенно изменяет модуль коэффициента усиления жидкости в питающем трубопроводе и собственную частоту колебаний питающего трубопровода. Это обусловлено близостью частот колебаний парциальных систем конструкции

и жидкости, а также учет демпфирования в трубопроводе.

Перспективным в данном направлении исследования является проведение анализа устойчивости по отношению к продольным колебаниям корпуса жидкостной ракеты с учетом взаимодействия продольных колебаний конструкции питающего трубопровода и жидкости в нем.

Литература

1. Натанзон, М.С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты [Текст] / М.С. Натанзон. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Колесников, К.С. Продольные колебания ракеты с жидкостным ракетным двигателем [Текст] / К.С. Колесников. – М.: Машиностроение, 1971. – 260 с.
3. Жулай, Ю.А. Математическое моделирование совместных продольных колебаний конструкции трубопровода и жидкости при кавитационных колебаниях в линиях питания ЖРД [Текст] / Ю.А. Жулай, С.И. Долгополов, Т.А. Грабовская // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 5 (62). – С. 58 – 63.

4. Пилипенко, О.В. Математическое моделирование совместных продольных колебаний конструкции трубопровода и жидкости в гидравлической системе при установке байпасного демпфирующего трубопровода [Текст] / О.В. Пилипенко, Ю.А. Жулай, С.И. Долгополов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 1/78. – С. 21 – 25.

5. Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей [Текст] / В.В. Пилипенко, В.А. Задонцев, Н.И. Довготько, Ю.Е. Григорьев, И.К. Манько, О.В. Пилипенко // *Техническая механика*. – 2001. – № 2. – С. 11 – 37.

6. Пилипенко, В.В. Кавитационные колебания и динамика гидросистем [Текст] / В.В. Пилипенко, В.А. Задонцев, М.С. Натанзон. – М.: Машиностроение, 1977. – 352 с.

7. Пилипенко, В.В. Кавитационные автоколебания [Текст] / В.В. Пилипенко. – К.: Наук. думка, 1989. – 316 с.

8. Пилипенко, В.В. Экспериментально-расчетное определение коэффициентов уравнения динамики кавитационных каверн в инекоцентрических насосах различных типоразмеров [Текст] / В.В. Пилипенко, С.И. Долгополов // *Техническая механика*. – 1998. – №. 8. – С. 50 – 56.

Поступила в редакцию 12.10.2011

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. каф. технической механики А.А. Приходько, Днепрпетровский национальный университет, Украина.

ВПЛИВ ВЗАЄМОДІЇ ВІБРАЦІЙ КОНСТРУКЦІЇ І ПУЛЬСАЦІЙ РІДИНИ НА КОЕФІЦІЄНТ ПІДСИЛЕННЯ ЖИВИЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

Ю.О. Жулай, С.І. Долгополов

Отримано вираз для коефіцієнта підсилення живильного трубопроводу рідинної ракетної рушійної установки при спільних поздовжніх коливаннях конструкції трубопроводу з сифоном, і рідини в ньому. Для конкретної системи живлення показано, що взаємодія поздовжніх коливань конструкції трубопроводу і рідини може істотно змінювати модуль коефіцієнта підсилення живильного трубопроводу і його власну частоту коливань. Це обумовлено близькістю частот коливань парціальних систем конструкції трубопроводу і рідини, та урахуванням демпфірування в трубопроводі.

Ключові слова: рідинна ракета, поздовжні коливання корпусу, рідинна ракетна рушійна установка, кавітація в насосах, коефіцієнт підсилення, взаємодія коливань.

INFLUENCE OF INTERACTION OF STRUCTURAL VIBRATIONS AND LIQUID PULSATIONS UPON THE AMPLIFICATION FACTOR OF THE FEEDING PIPELINE

Yu.A. Zhulay, S.I. Dolgoplov

An expression for amplification factor of the feeding pipeline of a propulsion system of liquid-propellant rocket at joint longitudinal oscillations of pipeline structure and liquid is received. For the specific power supply system it is shown that interaction of longitudinal oscillations of pipeline structure and liquid may essentially change the module of amplification factor of the feeding pipeline. This is caused by nearness of oscillation frequencies of the partial systems of pipeline structure and liquid, also regarding the damping in the pipeline.

Keywords: liquid-propellant rocket, longitudinal oscillations of the body, propulsion system of liquid-propellant rocket, pump cavitation, amplification factor, interaction of oscillations.

Жулай Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, ст. научн. сотр., ведущий научн. сотр. Института транспортных систем и технологий НАНУ, Днепрпетровск, Украина, e-mail: zhulay@westa-inter.com.

Долгополов Сергей Иванович – канд. техн. наук, ст. научн. сотр., ст. научн. сотр. Института технической механики НАНУ и НКАУ, Днепрпетровск, Украина.