

УДК 532.528.5:621.671

Л.Г. ЗАПОЛЬСКИЙ

*Институт технической механики НАН и НКА Украины, Украина***СТЕНД ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕМПФИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ЖРДУ**

В работе описана конструкция стенда и методика проведения испытаний по исследованию характеристик различных классов демпфирующих устройств для систем питания ЖРДУ и экспериментальной отработке их конструкций. Представлены результаты экспериментального исследования динамических характеристик питающей магистрали стенда в частотном диапазоне до 24 Гц по определению зависимостей комплексной величины входного импеданса и коэффициента усиления питающей магистрали стенда при различных значениях давления и расхода жидкости на входе в насосный агрегат. Стенд позволяет проводить экспериментальную отработку конструкций демпфирующих устройств, использующих гидродинамические, термодинамические способы создания демпфирующей полости, так и газовых демпферов. Показано, что разработанная методика экспериментального определения импеданса питающей магистрали и демпферов путем прямого измерения мгновенных значений давления и расхода позволяет на данном стенде производить подбор конструктивных параметров демпфирующих устройств и получение заданных значений импеданса системы на входе в насосный агрегат для широкого круга систем "питающая магистраль – шнекоцентробежный насос", требующих установки демпфирующих устройств.

**динамические испытания, методика испытаний, мгновенные значения расхода, система питания ДУ, демпфирующее устройство, импедансный метод, комплексные сопротивления, коэффициент передачи гидравлической системы**

**Введение**

Для решения проблемы обеспечения динамической совместимости жидкостной ракетной двигательной установки (ЖРДУ) с упругим корпусом ракеты на большинстве современных ракет носителей устанавливаются демпфирующие устройства на питающих магистралях ДУ. Этот способ гашения колебаний нашел наибольшее распространение.

До недавнего времени в отечественной и зарубежной практике наиболее эффективным средством гашения колебаний в питающих магистралях были газовые демпферы различного объема, устанавливаемые в питающую магистраль, для снижения собственных частот колебаний жидкости в магистрали. Принципиально новым средством обеспечения продольной устойчивости ракет стал разработанный и созданные в ИТМ НАНУ и НКАУ – гидродинамические и термодинамические демпфирующие устройства, которые при значительно меньших габаритно-массовых параметрах по сравнению с газо-

выми демпферами обеспечивают динамическую совместимость ДУ с корпусом ракеты.

**Формулирование проблемы.** Кавитационные автоколебания, возникающие в насосных агрегатах ДУ, создают колебания столба жидкости в питающей магистрали. Выбор рациональных параметров демпфирующего устройства расчетными методами затруднен, а иногда и не возможен из-за большого количества взаимосвязанных параметров, которые на этапе проектирования определить невозможно. Для обеспечения высокой надежности работы в ракетной технике, как правило, проводится экспериментальная отработка разрабатываемых устройств на реальных режимах работы, и системы для таких работ дорогие и требуют наличия специальных производственных площадей для обеспечения безопасности работ. Возможность экспериментальной отработки широкого класса систем демпфирования на малогабаритном стенде, работающем на модельных жидкостях и имеющем регулируемые динамические

характеристики, позволяет в сжатые сроки и с минимальными затратами проводить разработку новых средств демпфирования и получать данные, необходимые для расчетного определения динамических характеристик систем реальных систем питания ДУ, работающих как на высококипящих компонентах, так и на криогенных. Поэтому создание средств для испытаний и методов экспериментальной отработки конструкций устройств демпфирования колебаний жидкости, возникающих в системе "питающий трубопровод – ДУ", вызванных кавитационными явлениями в насосных системах, и их динамическая совместимость является актуальной научно-практической задачей.

**Постановка задачи исследования.** Целью настоящей работы является создание средств экспериментального исследования перспективных демпфирующих устройств и экспериментальное определение динамических характеристик гидравлической системы стенда и зависимости этих характеристик от режимных параметров на входе в насосный агрегат.

### Основная часть

Для обеспечения адекватного применения данных, получаемых на стенде, и перехода к реальным системам питания ДУ параметрические характеристики стенда имеют собственные частоты колебаний жидкости, инерционные сопротивления трубопроводов питания, скорости движения жидкости в них и давления на входе соответствуют реальным, реализуемым в системах питания тяжелых РН на жидком топливе. При создании стенда для экспериментальных исследований новых термодинамических демпфирующих устройств в качестве рабочей жидкости использовалась перегретая вода, которая по своим термодинамическим свойствам может моделировать процессы, происходящие в демпфирующем устройстве, работающем на криогенной жидкости.

Рассмотрим математическое описание динамики системы "питающая магистраль – ДУ" и определим основные параметры, которые однозначно будут характеризовать характеристики системы питания и демпфирующего устройства.

Неустановившееся движение жидкости в трубопроводе может быть описано системой дифференциальных уравнений для неустановившегося движения жидкости в трубопроводе:

$$\begin{aligned} -\frac{d\delta P}{\delta X} &= \frac{1}{gF} \cdot \left( \frac{d\delta P}{dt} + k_t \delta G \right); \\ -\frac{d\delta P}{dt} &= \frac{C^2}{gF} \cdot \frac{d\delta G}{dx}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k_t$  – коэффициент гидравлического сопротивления трубы, равный  $k_t = \frac{2\Delta P F g}{G X}$ ; а  $\delta P, \delta G$  – отклонения давления и весового расхода от установившегося режима течения в трубопроводе;  $F$  – площадь проходного сечения магистрали;  $C$  – скорость звука в трубопроводе;  $\Delta P$  – потери давления по трубе.

Применительно к установившимся вынужденным гармоническим колебаниям система уравнений (1) примет вид

$$\begin{aligned} -\frac{d\delta P}{dx} &= \frac{1}{gF} \cdot (j\omega + k_t) \delta G; \\ -j\omega \delta P &= \frac{C^2}{gF} \cdot \frac{d\delta G}{dx}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\delta \bar{P}, \delta \bar{G}$  – амплитуды колебаний давления и весового расхода жидкости в трубопроводе.

Дифференцируя уравнения (2) по осевой координате и подставляя в выражение для производной, получаем уравнение для определения амплитуды колебаний давления:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \delta P}{dx^2} + \frac{\omega^2}{C} \left( 1 + \frac{k_t}{j\omega} \right) \delta \bar{P} &= 0; \\ \frac{d^2 \delta \bar{P}}{dx^2} &= \gamma^2 \delta \bar{P}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\gamma = \frac{j\omega}{C} \sqrt{1 + \frac{k_t}{j\omega}}$  – комплексная постоянная рас пространения волн на единицу длины трубопровода.

Амплитуду колебаний весового расхода жидкости можно определить, используя уравнение, полученное аналогично (3):

$$\frac{d^2 \delta \bar{G}_t}{dx^2} = \gamma^2 \delta \bar{G}. \quad (4)$$

Как известно, решение системы (3), (4) можно записать в виде [1]:

$$\begin{aligned} \delta \bar{P}(x, \omega) &= c_1 ch \gamma x + c_2 sh \gamma x; \\ \delta \bar{G}(x, \omega) &= \frac{1}{Z_b} (c_1 ch \gamma x + c_2 sh \gamma x), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $Z_b = \frac{C}{gF} \sqrt{1 + k_t / j\omega}$  – волновое сопротивление трубопровода.

Основной динамической характеристикой системы питания является ее импеданс в различных сечениях. Экспериментальное определение комплексного сопротивления магистрали в заданном сечении – отношения комплексных амплитуд колебаний давления и весового расхода жидкости

$$\frac{\delta \bar{P}(x, \omega)}{\delta \bar{G}(x, \omega)} = Z_b \cdot \frac{c_1 + c_2 th \gamma x}{c_2 + c_1 th \gamma x} = Z_m, \quad (6)$$

что однозначно определяет импеданс магистрали в заданном сечении. Суммарный импеданс системы (импеданс на входе в насосный агрегат) при наличии демпфера определяется как  $Z_b = \frac{Z_m \cdot Z_D}{Z_m + Z_D}$ .

Наличие компактных датчиков мгновенного расхода жидкости (ДМРЖ) разработки ИТМ дает возможность прямым экспериментальным путем определять импеданс системы в необходимом сечении магистрали, на выходе демпфирующего устройства или входе в насосный агрегат, в этих сечениях установлены датчики давления и расхода. Используя импедансный метод определения динамических характеристик систем питания [1] и зная экспериментальные зависимости импеданса в конкретном сечении стенда, возможно расчетным путем определить динамические характеристики для широкого круга систем питания ДУ и демпфирующих устройств различных конструкций [2].

Стенд является средством для исследований характеристик демпфирующих устройств в составе системы питания, и проточная часть включает питающий бак, питающую магистраль, бустерный насосный агрегат БНА, газовый демпфер имитатор кавитационных явлений в проточной части штатного осевого шнекового преднасоса и напорный трубопровод. Схема гидравлической части стенда приведена на рис. 1.

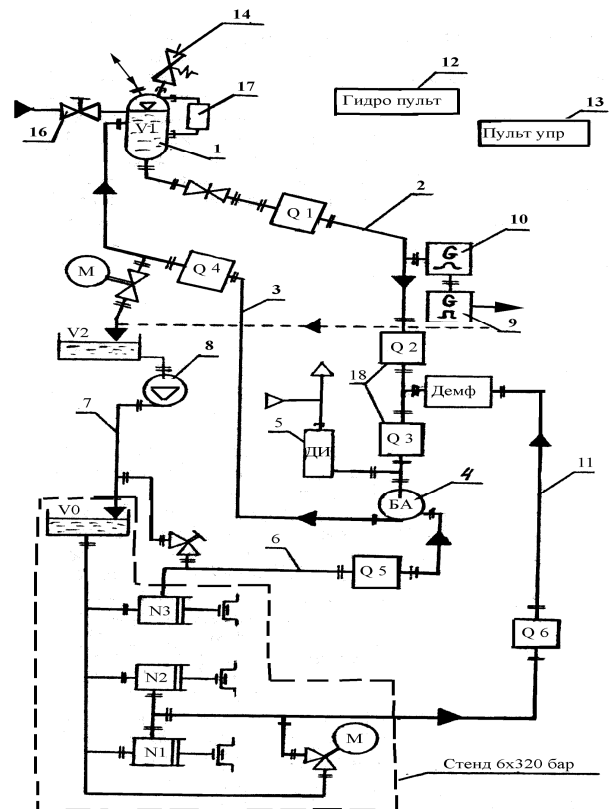


Рис. 1. Гидравлическая схема стенда:

- 1 – питающий бак; 2 – питающая магистраль;
- 3 – напорная магистраль; 4 – бустерный насосный агрегат; 5 – демпфер имитатор; 6 – линия питания турбины БНА; 7 – линия перелива; 8 – насос перекачки; 9 – гидроклапан; 10 – пульсатор; 11 – линия питания исследуемого демпфера; 12, 13 – пульты управления; 18 – ДМРЖ

Как видно из приведенной схемы, в составе стенда, помимо перечисленных составляющих, имеется трубопровод питания турбины бустерного агрегата 6, линия откачки в бак стенда высокого давления, с насосной станцией 8, система задания единичных импульсных 9 и гармонических возмущений

расхода 10, гидравлический пульт управления 12, электрический пульт управления 13, системы наддува и дренажа 15 бака питания, датчиков системы измерений. Для вращения гидротурбины бустерного насосного агрегата стенда используется высоконапорная магистраль стенда высокого давления СВД6х320.

Питающий бак стенда имеет объем  $1 \text{ м}^3$  и работает при давлениях до 10 бар, на нижнем днище бака имеется запорный вентиль для отсечения питающей магистрали при заправке. Для контроля уровня воды на корпусе бака установлен указатель уровня емкостного типа. Питающий бак установлен на подставке для максимального разнесения питающей магистрали стенда по высоте. Питающий трубопровод стенда представляет собой стальную магистраль с диаметром проходного сечения  $d_p = 85 \text{ мм}$ , состоящую из наклонной и вертикальной части длиной 11,23 м и 2 м соответственно. Наклонная часть состоит из 10 универсальных секций различной длины, а вертикальная – из восьми секций длиной 250 мм каждая. Секционность питающего трубопровода необходима для обеспечения возможности установки в заданном сечении датчиков мгновенного расхода жидкости, подключения исследуемых демпфирующих устройств различных типов и пульсатора возмущающих воздействий.

Напорный трубопровод представляет стальную магистраль с  $d_p = 85 \text{ мм}$ , состоящую из нескольких секций, между которыми установлен датчик объемного расхода жидкости, отводного дросселя с электроприводом. Бустерный агрегат представляет собой шнекоцентробежный насос осевого типа с приводом от гидротурбины. На вход БА подается вода из питающего бака по питающей магистрали, а после БА вода по напорному трубопроводу возвращается в питающий бак. Для обеспечения нормальной работы бустерного агрегата не его выходе установлена подпорная шайба диаметром 26 мм. Для установления поддержания и контроля режима работы

турбины БА на линии питания имеется датчик расхода и байпасная линия с ручным вентилем. Циркуляция воды в гидросхеме стенда позволяет при малых расходах воды проводить длительные испытания на различных режимных параметрах.

Демпфер имитатор представляет собой цилиндрическую емкость с емкостным датчиком уровня жидкости и системой наддува дренажа для выставления заданного объема воздушной подушки в нем, объем которой может изменяться от 0 до 1,5 л. Это дает возможность изменять собственную частоту колебаний жидкости в питающей магистрали с 22 до 2 Гц в зависимости от объема воздушной полости.

Система задания единичных импульсов возмущения давления представляет собой блок, состоящий из нормально закрытого пневмогидроклапана, двух электропневмоклапанов управления и дроссельной шайбы, определяющей величину возмущающего импульса. Срабатывание клапана создает в питающей магистрали импульс давления с амплитудой до 0,06 МПа и передним фронтом нарастания давления, равным 0,04 с. Для создания возмущений колебаний расхода в питающей магистрали гармонической формы, используется пульсатор дроссельного типа [3], который позволяет создавать возмущающие воздействия в диапазоне 1 – 24 Гц при амплитудах возмущений по расходу 1 – 2 л/с. Для поддержания заданных уровней жидкости в питающем баке и демпфере имитаторе используется стендовая система воздуха высокого давления с давлением в системе равном 2,5 Мпа.

Система измерений и регистрации параметров испытаний включает в себя датчики физических величин, схема установки которых приведена на рис. 2, и разделяется на подсистему статических параметров, подсистему динамических параметров и систему визуального контроля объемного расхода жидкости, частоты вращения турбины и пульсатора.

Сигналы с датчиков давления и датчиков мгновенных значений расхода (ДМРЖ) после вторичных

преобразователей с помощью АЦП записывались в цифровом виде в ПК. Обработка результатов испытаний проводилась с использованием специально разработанного программного обеспечения.

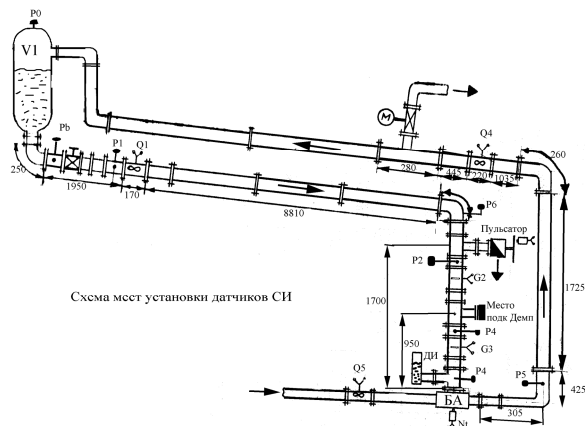


Рис. 2. Схема установки датчиков на магистралях стенда

При обработке сигналов датчиков определялись амплитудно-фазочастотные характеристики системы и модуль импеданса в сечениях установки датчиков ДМРЖ, на входе в БНА и комплексный коэффициент усиления питающего трубопровода.

Разные значения расхода в питающей магистрали в диапазоне 3 – 9 л/с задавались изменением числа оборотов турбины БНА от 2000 об/мин до 6000 об/мин. Изменение давления на входе в БНА осуществлялось путем наддува питающего бака и варьировалось от 0.2 МПа до 0.8 МПа.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что зависимость собственной частоты колебаний давления жидкости в системе от давления в системе практически линейна и не зависит от расхода, т.е. оборотов вращения БА, и при увеличении входного давления от 0,2 МПа до 0,8 МПа увеличивается от 18 Гц до 22 Гц, при отсутствии демпфера имитатора. Модуль коэффициента усиления питающего трубопровода при этом в данном диапазоне изменения входного давления практически не зависит от частоты и изменяется по величине от 0,1 до 0,25. Разность фаз волны давления от возмущения потока пульсатором в начале и конце питающего

трубопровода составляет в среднем 5°– 7°. При наличии воздушной полости в ДИ объемом 0,3 л собственная частота колебаний давления жидкости в питающей магистрали при изменении входного давления увеличивается от 4 Гц до 7 Гц соответственно. Коэффициент усиления питающей магистрали при этом в районе собственной частоты при минимальном давлении на входе в БНА увеличивается до значений 9,7.

Как известно, динамические характеристики системы "питающей трубопровод – насосный агрегат" однозначно определяются импедансом системы на входе в БНА.

Определение динамических характеристик стенда проведено частотным методом при различных значениях давления на входе в БНА, и номинальном расходе жидкости в питающей магистрали равным 7 л/с.

На рис. 3 представлены зависимости модуля входного импеданса питающей магистрали стенда, а на рис. 4 – его аргумента при различных значениях давления на входе в БНА  $P_{вх}$ .

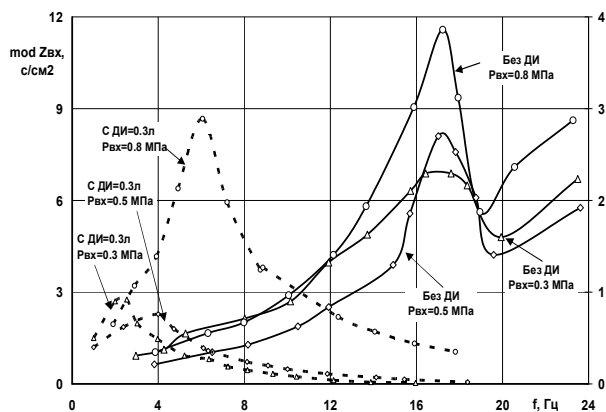


Рис. 3. Зависимость модуля входного импеданса системы от частоты при различных значениях давления на входе в БНА:  
левая ось Y – для значений зависимостей без ДИ  
правая ось Y – для значений зависимостей с ДИ

Как видно из приведенных зависимостей, входной импеданс питающей магистрали стенда имеет четкий максимум в районе ее собственной частоты и его модуль, без демпфера имитатора, достигает ве-

личины  $11,6 \text{ с/см}^2$  при максимальном давлении  $P_{ex} = 0,8 \text{ МПа}$ , а его аргумент в районе собственной частоты переходит через нулевое значение в отрицательную область.

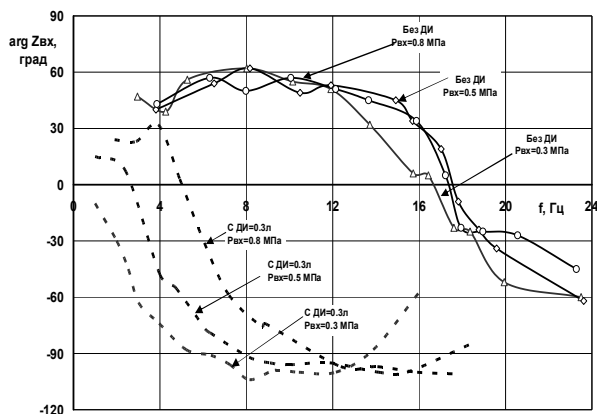


Рис. 4. Зависимость аргумента входного импеданса системы от частоты при различных значениях давления на входе в БНА

Скорость распространения возмущений в питающей магистрали стенда при давлении на входе в БНА, равном  $P_{ex}=0, \text{ МПа}$ , составила около  $900 \text{ м/с}$ , а потери давления по длине трубопровода составляют  $0,07 \text{ МПа}$ .

Отработанная методика проведения испытаний по определению динамических характеристик стенда и разработанное программное обеспечение для обработки результатов испытаний позволяют с достаточной точностью определять импеданс системы в заданных сечениях питающей магистрали, что в дальнейшем позволяет получать высокоточные данные для проведения расчетного анализа систем питания ДУ с использованием методов подобия.

### Выводы

Таким образом, получено средство для исследования различных конструкций демпфирующих устройств и обеспечена возможность экспериментального определения комплексных сопротивлений системы питания в заданном сечении.

Стенд для исследования демпфирующих устройств работает при давлениях на входе в БНА до

$0,8 \text{ МПа}$  и расходах жидкости в питающей магистрали до  $9,0 \text{ л/с}$ .

Системы стенда позволяют задавать возмущение по расходу в питающей магистрали гармонической формы в частотном диапазоне от  $1$  до  $24 \text{ Гц}$  с амплитудами  $1 - 2 \text{ л/с}$  и импульсные возмущения давления с амплитудами до  $0,06 \text{ МПа}$ .

Собственная частота питающей магистрали стенда составляет  $19 - 22 \text{ Гц}$ , а использование демпфера имитатора кавитационных явлений в насосных системах позволяет регулировать собственную частоту системы "питающая магистраль – насосный агрегат" в диапазоне от  $2$  до  $22 \text{ Гц}$ .

Полученные результаты позволяют исследовать конструкции демпфирующих устройств широкого класса систем питания ДУ, а также проводить выбор рациональных конструктивных и режимных параметров этих устройств для достижения заданных динамических характеристик системы питания ДУ.

### Литература

1. Пилипенко В.В., Задонцев В.А., Натанзон М.С. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. – М.: Машиностроение, 1977. – 352 с.
2. Пилипенко В.В. Демпфирование колебаний в гидравлической системе со шнекоцентробежным насосом // Прикладные задачи гидрогазодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. – К.: Наук. думка, 1988. – С. 38-50.
3. Жулай Ю.А., Запольский Л.Г. Экспериментальное исследование влияния байпасного демпфирующего трубопровода на устойчивость насосной системы питания // Проблемы высокотемпературной техники: Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ДНУ, 2004. – С. 76-82.

Поступила в редакцию 15.06.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, доцент А.В. Сичевой, Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск.