

УДК 532.528.5:621.671

О.В. ПИЛИПЕНКО, Л.Г. ЗАПОЛЬСКИЙ

*Институт технической механики НАН и НКА Украины, Днепропетровск, Украина*

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТИПОВ ДЕМПФИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ЖРДУ

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований импеданса системы «питающий трубопровод – демпфер – бустерный насосный агрегат» на модельной жидкости без демпфера и с подключением к ней различных типов демпферов. Получены зависимости импеданса системы питания без демпфера и с подключением к системе питания газожидкостным, гидродинамическим, и термодинамическим демпфером, конструкции которых имеют одинаковый объем газовой, паровой полости, в частотном диапазоне от 1 до 22 Гц. Экспериментально показано, что в части снижения собственной частоты колебаний жидкости в системе и уменьшения максимальных значений модуля импеданса системы, подключение к системе питания ЖРДУ термодинамического демпфера эффективнее, чем газожидкостного или гидродинамического демпфера в ~4,3 раза и ~1,4 раза соответственно. При этом также происходит снижение максимальных значений модуля импеданса системы в ~7,6 раз и ~1,7 раз по сравнению со значениями, полученными при подключении к системе газожидкостного или гидродинамического демпфера соответственно. Экспериментально показано, что податливость гидродинамического и термодинамического демпфера превышает податливость газожидкостного демпфера в 2,1 и 18,4 раза соответственно, при прочих равных условиях.*

**Ключевые слова:** Система питания ЖРДУ, импеданс системы, газожидкостной, гидродинамический, термодинамический демпфер, собственная частота колебаний жидкости в питающем трубопроводе, комплексные сопротивления, экспериментальная отработка демпфирующих устройств.

### Введение

Решение проблемы обеспечения динамической совместимости жидкостной двигательной установки (ЖРДУ) с упругим корпусом ракеты на большинстве современных ракет носителей решается путем установки демпфирующих устройств на питающих магистралях ДУ.

Распространенным средством стабилизации ракет на жидком топливе (по отношению к продольным колебаниям) в отечественной и зарубежной практике ракетостроения являются газожидкостные аккумуляторы либо демпферы, устанавливаемые в питающую магистраль на входе в ДУ для снижения собственных колебаний жидкости в трубопроводе. Таким путем разносятся собственные частоты колебаний жидкости и частоты упругих колебаний корпуса.

К недостаткам таких устройств следует отнести большой объем газовой полости у пассивных демпферов и сложность системы управления у адаптивных и невозможность установки демпфера на достаточно близком расстоянии от входа в двигатель. Для тяжелых носителей задача значительно усложняется, так как частоты колебаний упругого корпуса понижаются до нескольких герц и разносение частот с помощью газожидкостного демпфера требует объе-

ма газовой подушки, превышающей 400 л. Для систем многократного использования разносение частот очень затруднительно из-за весьма плотного спектра частот упругих колебаний корпуса в низкочастотной области, что требует от демпфирующего устройства обеспечения достаточно малых коэффициентов усиления питающей магистрали по давлению, которые газовый демпфер обеспечить не в состоянии.

Из вышеизложенного следует, что поиск новых эффективных средств обеспечения стабилизации РН на жидком топливе по отношению к продольным колебаниям продолжает оставаться актуальной задачей в ракетостроении.

ИТМ разработан ряд принципиально новых демпфирующих устройств, использующих специально организованную кавитационную полость заданных размеров в потоке жидкости в качестве элемента обеспечивающего требуемую податливость демпфирующего устройства. Такая полость в устройствах создается с использованием гидродинамического или термодинамического способа создания кавитационной полости.

### 1. Формулирование проблемы

В связи с большими потенциальными возможностями демпфирующих устройств такого типа за-

дача экспериментального исследования их характеристик и сравнение эффективности таких устройств с газожидкостными демпферами аналогичного объема является актуальной задачей для определения сфер применения новых конструкций демпфирующих устройств.

### **1.1. Обзор публикаций и выделение нерешенных задач**

Коррекция динамической характеристики питающей магистрали ДУ РН с помощью демпфирующих устройств, устанавливаемых на них, является наиболее простым и эффективным способом стабилизации системы по отношению к продольным колебаниям и впервые была применена на отечественном "Востоке" и американском "Титане-2". В литературе приводится много вариантов и способов использования демпфирующих устройств, использующих газовые полости. [1 – 5].

На второй ступени ракеты "Сатурн-5" на линии окислителя использовался кольцевой демпфер объемом 13,9 л. с гелиевой газовой полостью. На ракете "Титан-3" на линии горючего использовался демпфер, в котором газовый объем реализовался в 8 резиновых баллончиках объемом 4,9 л каждый, заполненных азотом под давлением 0,15 МПа. На линии окислителя использовался демпфер сильфонного типа, который наддувался до давления 0,35 МПа перед запуском [6]. На РН "Энергия" для обеспечения необходимых характеристик объем газожидкостного демпфера на линии окислителя превышает 500 л [7]. Динамические характеристики этих устройств подбирались экспериментально в ходе натурных испытаний топливных баков и расходных магистралей с пульсатором расхода.

Конструкции газожидкостных демпферов достаточно многочисленны. Принцип их работы состоит в снижении собственных частот колебаний жидкости в питающем трубопроводе за счет податливости газовой полости и рассеивания энергии на гидравлических сопротивлениях при движении всего потока жидкости через перфорированные вставки или перетекании части жидкости через отверстия в трубопроводе в полость демпфера.

К достоинствам газожидкостных демпферов можно отнести наличие экспериментально отработанных и проверенных в эксплуатации прототипов, простоту расчета их характеристик, отсутствие влияния на статические характеристики двигателя независимо от места установки, независимость их основной характеристики – податливости от частоты и амплитуды возмущающего воздействия. Наряду с этим они имеют и существенные недостатки: большие весовые характеристики, наличие системы

регулирования и систем подачи газа на наддув газовой полости, возможность выноса газа на вход двигателя в момент запуска, компоновка демпфера может быть только вертикальной из-за свободной границы раздела между газом и жидкостью.

Для повышения эффективности газожидкостных демпферов предлагается два основных способа повышения их эффективности, конструкторские реализации которых можно найти в патентной литературе. Первый способ предполагает понижение собственной частоты магистрали питания за счет периодического подключения демпфера, осуществляемое системой управления. Второй способ основан на управлении податливостью демпфера, газовая полость которого в этом случае состоит из основного и дополнительного объемов, которые соединяются через управляемый клапан. Система управления периодически включает и выключает клапан с частотой, превышающей собственную частоту колебаний питающей магистрали с основным демпфером. Питающая магистраль в этом случае "утрачивает резонансные свойства во всем диапазоне частот". Однако этот способ повышения эффективности демпфера имеет и ряд недостатков, таких как сложная конструкция, наличие источника высокочастотных вибраций и неизученность диапазона его эффективной работы.

Одним из возможных путей улучшения весовых характеристик РН и исключение негативного влияния на работу ее двигательной установки есть путь заполнения демпфирующей полости не газом, а парами компонентов топлива. В этом случае отпадает необходимость в наличии на борту емкостей с газом и исключается возможность прорыва газа на вход двигательной установки.

В 1978 академиком В.В. Пилипенко предложен новый оригинальный способ демпфирования колебаний в системах питания ДУ, в котором основным элементом, обеспечивающим податливость, является газопаровая кавитационная полость, которая образуется в специально организованном байпасном трубопроводе [7].

Теоретический анализ возможности создания демпферов со стабильной парожидкостной полостью заданного объема в закрученном потоке жидкости, расчетный анализ характеристик таких устройств приведен в работах [8 – 12]. В этих работах также показана высокая эффективность устройств, работающих на таких принципах организации рабочей полости демпфирующего устройства для обеспечения устойчивости различных гидравлических систем, включающих питающую магистраль и кавитирующий шнекоцентробежный насос.

Выбор параметров таких демпфирующих устройств и применение их в конкретной системе пита-

ния ЖРДУ во многих случаях требует экспериментального определения комплексной величины сопротивления демпфирующего устройства – импеданса демпфера. Определение таких характеристик в одинаковых условиях и их сравнительный анализ для демпфирующих устройств, работающих на разных физических принципах, позволит оценить эффективность применения новых способов организации полости, обеспечивающей податливость устройства.

### 1.2. Постановка задачи исследования

Целью настоящей работы является сравнение в стендовых условиях эффективности работы разных типов демпфирующих устройств, имеющих одинаковый объем газовой или паровой полости путем прямого экспериментального определения импеданса системы "питающая магистраль – демпфер – бустерный насос" и экспериментальное определение значений собственных частот колебаний жидкости и максимальных значений модуля импеданса системы питания ЖРДУ.

## 2. Основная часть

Исследование эффективности работы различных типов демпфирующих устройств определялось по величине снижения собственной частоты колебаний жидкости в системе "питающая магистраль – демпфер – бустерный насос" и проводилось импедансным методом. Работы проводились на стенде, позволяющем на модельной жидкости – воде, проводить экспериментальные исследования динамических характеристик демпфирующих устройств систем питания ЖРДУ в широком частотном диапазоне возмущающих воздействий. Подробное описание стенда приведено в [13].

Определение импеданса системы при подключении к системе "питающая магистраль – насосный агрегат" демпфирующих устройств различного типа проводилось методом прямого измерения отношения величины пульсаций мгновенного расхода жидкости в питающей магистрали к величине пульсаций давления жидкости в ней, измеренные специальными датчиками мгновенного расхода и полного давления, установленными в одном сечении магистрали. Пульсатором дроссельного типа с электроприводом в питающей магистрали задавались гармонические колебания расхода жидкости в частотном диапазоне от 1 до 22 Гц.

Исследуемая система состоит из емкости, питающего трубопровода, шнекоцентробежного насоса, напорной магистрали и подключаемого к ней демпфирующего устройства. Гидравлическая схема указанной системы представлена на рис. 1.

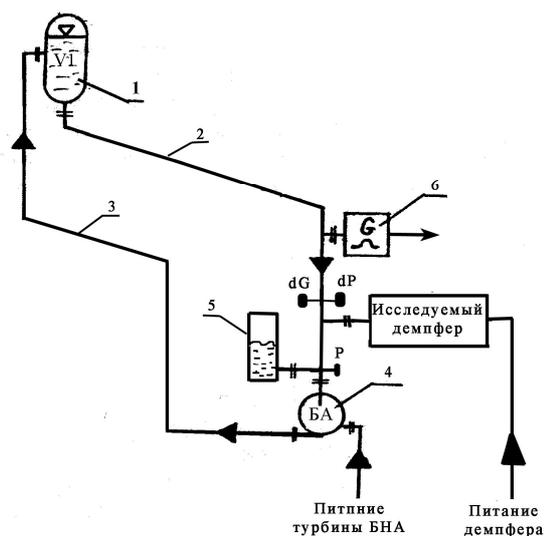


Рис. 1. Гидравлическая схема стенда для исследования демпфирующих устройств:  
 1 – питающая емкость; 2 – питающая магистраль; 3 – напорная магистраль; 4 – бустерный насосный агрегат; 5 – демпфер имитатор кавитации в насосе; 6 – пульсатор

В качестве газового демпфера при испытаниях использовался имеющийся в составе стенда демпфер-имитатор, необходимый объем газовой полости которого устанавливался и поддерживался постоянным в процессе испытаний системой наддува и дренажа стенда. При подключении к системе гидродинамического демпфирующего устройства вода на его питание подавалась от стенда СВД6х320 высокого давления жидкости по отдельной питающей магистрали. При подключении к системе термодинамического демпфирующего устройства его питание осуществлялось от системы горячего водоснабжения стенда. В качестве гидродинамического и термодинамического демпфирующего устройства использовалось устройство, в котором для образования кавитационной полости заданного объема использовался трубопровод диаметром 60 мм и длиной 175 мм, выход которого подключался к питающей магистрали стенда. При испытаниях с гидродинамическим демпфирующим устройством для обеспечения рабочих параметров демпфера и создания в нем кавитационной полости заданного объема, на его вход, от отдельного стенда высокого давления подавалась жидкость (вода) под давлением 2,0 МПа и расходом 2,9 л/с. При этом температура подаваемой на вход демпфирующего устройства жидкости равнялась температуре воды в системе "питающая магистраль – бустерный насос". При испытаниях с термодинамическим демпфирующим устройством для создания в нем кавитационной полости на него подавалась перегретая до 140 °С вода под давлением 2,0 МПа и расходом 1,5 л/с. от системы горячего

водоснабжения стенда. При этом температура воды в питающей магистрали стенда составляла 21 °С.

Описание аналогичных по конструкции демпфирующих устройств приведено в [14, 15].

Сравнительный анализ импеданса системы при подключении к питающей магистрали стенда различных типов демпфирующих устройств проводился при одинаковом давлении на входе в бустерный насосный агрегат (0,1 МПа), с поочередным подключением к питающей магистрали стенда газожидкостного, гидродинамического и термодинамического демпфирующих устройств, объем газовой или паровой полости в которых при данных исследованиях был постоянен и составлял 0,4 л.

На рис. 2 приведены полученные в результате исследований зависимости модуля, а на рис. 3 – фазового угла импеданса питающей магистрали при подключении к ней различных типов демпфирующих устройств от частоты колебаний расхода, задаваемого в питающей магистрали пульсатором стенда.

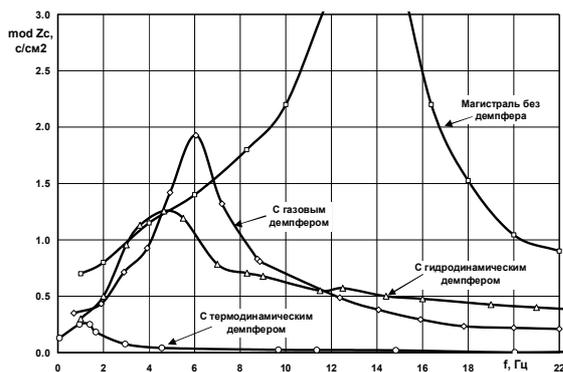


Рис. 2. Зависимость модуля импеданса питающей магистрали при подключении разных демпферов

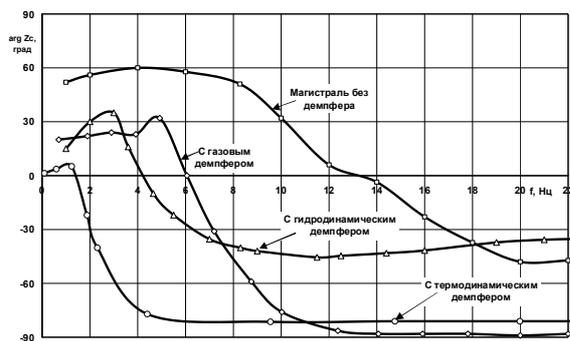


Рис. 3. Зависимость аргумента импеданса питающей магистрали при подключении разных типов демпферов

Из полученных зависимостей видно, что при подключении к питающей магистрали стенда демпфирующих устройств с одинаковым объемом паровой полости наибольшую эффективность по

параметру снижения собственной частоты системы и уменьшения максимального значения модуля импеданса питающей магистрали имеет термодинамический демпфер. В этом демпфере на данном испытании температура паров жидкости в демпфирующей плоскости превышала температуру, соответствующую температуре насыщенных паров при этом давлении на 2 °С. Таким образом, термодинамический демпфер имеет самую высокую эффективность работы и снижает собственную частоту колебаний жидкости в питающей магистрали с 6 до 1,4 Гц по сравнению с газожидкостным демпфером, при этом максимальное значение модуля импеданса системы снижается с  $1,93 \text{ c}^2/\text{см}^2$  до  $0,25 \text{ c}^2/\text{см}^2$ . Таким образом, подключение термодинамического демпфера взамен газожидкостного или гидродинамического с одинаковыми объемами демпфирующей полости обеспечивает понижение собственной частоты колебаний жидкости в питающей магистрали в  $\sim 4,5$  раза больше чем газожидкостной и в  $\sim 1,4$  раза больше чем гидродинамический демпфер. При этом наблюдается также снижение максимального значения модуля импеданса системы, которое в сравнении с газожидкостным демпфером меньше в  $\sim 7,6$  раз и  $\sim 1,7$  раз в сравнении с гидродинамическим демпфером.

О высокой эффективности термодинамического демпфера по сравнению с гидродинамическим и газожидкостным свидетельствуют и зависимости фазового угла импеданса системы ( $\arg Zc$ ) от частоты вынужденных колебаний. Как видно из приведенных зависимостей, фазовый угол импеданса уменьшается, пересекает нулевое значение на собственной частоте системы и далее продолжает убывать. Для газожидкостного демпфера фазовый угол пересекает нулевое значение на частоте 6 Гц и продолжая убывать выходит на уровень  $-90^\circ$  при частоте 13 Гц, в то время как для гидродинамического демпфера значения фазового угла импеданса системы пересекают ось на частоте 4,2 Гц и, продолжая падать, выходят на уровень  $-40^\circ$  при частоте 8 Гц. Для термодинамического демпфера фазовый угол импеданса системы пересекает ось на частоте 1,4 Гц и, продолжая интенсивно падать, принимает более низкие значения ( $\sim 90^\circ$ ) при частоте 4 Гц.

Экспериментально определенные величины податливости демпферов показали, что значения податливости гидродинамического и термодинамического демпфера превышает податливость газожидкостного демпфера в 2,1 и 18,4 раза соответственно, при прочих равных условиях.

Сравнение зависимостей модулей и фазовых углов импедансов гидравлической системы от частоты возмущающего воздействия с подключением к питающей магистрали стенда различных типов

демпфирующих устройств наглядно показывает преимущества гидродинамического демпфера перед газожидкостным, а термодинамического перед гидродинамическим демпфером, и подтверждает адекватность разработанных математических моделей рабочих процессов в них и правильность результатов расчетного анализа их основных параметров.

### Выводы

Прямым экспериментом показано, что применение в системах питания насосных агрегатов демпфирующего устройства с образованием термодинамической паровой полости, в части снижения собственной частоты колебаний жидкости в системе питания, эффективнее, чем газожидкостного или гидродинамического демпфера в ~4,3 раза и ~1,4 раза соответственно.

При этом также происходит снижение максимальных значений модуля импеданса системы в ~7,6 раз и ~1,7 раз по сравнению со значениями, полученными при подключении к системе газожидкостного или гидродинамического демпфера соответственно. Экспериментально показано, что при прочих равных условиях податливость гидродинамического и термодинамического демпфера превышает податливость газожидкостного демпфера в 2,1 и 18,4 раза соответственно.

Таким образом, экспериментально подтверждена выполненная ранее теоретическая оценка высокой эффективности термодинамического демпфера для снижения собственной частоты и амплитуды колебаний жидкости в питающей магистрали системы питания ЖРДУ по сравнению с газожидкостными демпферами.

### Литература

1. Колесников К.С. Продольные колебания ракеты с жидкостным ракетным двигателем / К.С. Колесников. – М.: Машиностроение, 1971. – 260 с.
2. Левченко Е.Л. Нестационарное движение жидкости в трубопроводе из вязкоупругого материала / Е.Л. Левченко // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1975. – № 6. – С. 136-143.
3. Пилипенко В.В. О возможности повышения продольной устойчивости ракет на жидком топливе / В.В. Пилипенко // Техническая механика ракетно-космических систем. – 1986. – №1. – С. 5-16.
4. Натанзон М.С. Продольные автоколебания жидкостных ракет / М.С. Натанзон. – М.: Машиностроение, 1977. – 206 с.
5. Bonveret P. A new approach of POGO phenomenon three-dimensional studies on Arian 4

Launcher Aeta / P. Bonveret, C. Bonna., N. David, J. Lemoine // *Astronautica*. – 1987. – P- 15, #7/7.

6. Lozino-Lozinsky G.E. Book of Technical Papers / Under edition of G.E. Lozino-Lozinsky and A.G. Bratukhin. – Moscow : Publishing House of Moscow Aviation Institute, 1997. – 416 p.

7. Пилипенко В.В. Демпфирование колебаний в гидравлической системе со шнекоцентробежным насосом / В.В. Пилипенко // Прикладные задачи гидродинамики и теплообмена в энергетических установках. – К.: Наукова думка, 1988. – С. 38-50.

8. Пилипенко О.В. Теоретическое определение частотной характеристики питающей магистрали ракеты с термодинамическим демпфером / О.В. Пилипенко // Техническая механика. – 1998. – № 8. – С. 133-118.

9. Пилипенко О.В. Механизм рассеяния колебательной энергии в термодинамическом демпфере продольных колебаний жидкостных ракет / О.В. Пилипенко // Техническая механика. – 2000. – № 1. – С. 143-148.

10. Пилипенко О.В. Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей / О.В. Пилипенко // Техническая механика. – 2001. – № 2. – С. 11-37.

11. Пилипенко О.В. Определение динамической податливости термодинамического демпфера при различных временах релаксации температурных полей жидкости, пара и элементов конструкции / О.В. Пилипенко // Техническая механика. – 2002. – № 1. – С. 70-35.

12. Пилипенко О.В. Математическое моделирование равновесных термогидродинамических процессов двухфазного течения закрученного потока жидкости в цилиндрическом трубопроводе / О.В. Пилипенко // Техническая механика. – 2005. – № 2. – С. 30-36.

13. Запольский Л.Г. Стенд для экспериментальных исследований демпфирующих устройств систем питания ЖРДУ / Л.Г. Запольский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 6/32. – С. 35-40.

14. Пилипенко О.В. Визуальное исследование процесса образования суперкавитационной полости в закрученном потоке жидкого кислорода / О.В. Пилипенко, Л.Г. Запольский // Проблемы высокотемпературной техники: сб. науч. труд. ДНУ. – 2004. – № 2. – С. 90-103.

15. Жулай Ю.А. Экспериментальное исследование влияния байпасного демпфирующего трубопровода на устойчивость насосной системы питания./ Ю.А. Жулай, Л.Г. Запольский // Проблемы высокотемпературной техники: сб. науч. трудов. ДНУ. – 2004. – № 2. – С. 76-82.

*Поступила в редакцию 29.05.2009*

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

### **АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТИПІВ ДЕМПФУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ЖРДУ**

*О.В. Пилипенко, Л.Г. Запольський*

У роботі представлено результати експериментальних досліджень імпедансу системи «живлячий трубопровід – демпфер – бустерний насосний агрегат» на модельній рідині без демпфера і з підключенням до неї різних типів демпферів. Отримано залежності імпедансу системи живлення без демпфера і з підключенням до системи живлення газорідинним, гідродинамічним та термодинамічним демпфером, конструкції яких мають однаковий об'єм газової, парової порожнини, в частотному діапазоні від 1 до 22 Гц. Експериментально показано, що по зниженню власної частоти коливань рідини в системі та зменшенню максимальних значень модуля імпедансу системи, підключення до системи живлення ЖРДУ термодинамічного демпфера ефективніше, ніж газорідинного або гідродинамічного демпфера в  $\sim 4,3$  рази і  $1,4$  рази відповідно. При цьому також відбувається зниження максимальних значень модуля імпедансу системи в  $\sim 7,6$  разів і  $\sim 1,7$  разів в порівнянні із значеннями, отриманими при підключенні до системи газорідинного або гідродинамічного демпфера відповідно. Експериментально показано, що податливість гідродинамічного і термодинамічного демпфера перевищує податливість газорідинного демпфера в  $2,1$  і  $18,4$  разів відповідно, при рівних інших умовах.

**Ключові слова:** Система живлення ЖРДУ, імпеданс системи, газорідинний, гідродинамічний, термодинамічний демпфер, власна частота коливань рідини в живильному трубопроводі, комплексні опори, експериментальне відпрацювання демпфуючих пристроїв.

### **PERFORMANCE ANALYSIS OF PERSPECTIVE TYPES OF THE DAMPING DEVICE FOR SYSTEMS OF FEED OF LPRS**

*O. V. Pylypenko, L. G. Zapolsky*

In work results of experimental researches of an impedance of system «the feeding pipeline – damper device – booster pumping aggregate» modelling power supply system LPRS without damper and with connection to it of various types dampen devices are presented. Comparative dependences of an impedance of the power supply system without damper are received and at connection to the power supply system gas-liquid dampers, hydrodynamic dampers, and thermodynamic dampers which designs have identical volume of a gas or steam cavity in it, in a frequency range of revolving influences from 1 to 22 Hz.

It is experimentally shown, that connection to power supply system LPRS thermodynamic dampers is more effective than the device, regarding decrease in own frequency of fluctuations of a liquid in system and reduction maximum values of the module of an impedance of system, than gas-liquid dampers or hydrodynamic dampers devices in  $\sim 4,3$  times and  $\sim 1,4$  times accordingly. Thus there is a decrease in the maximum values of the module of an impedance of system in  $\approx 7,6$  times and  $\approx 1,7$  times in comparison to the values received at connected to system gas-liquid dampers or hydrodynamic dampers accordingly. It is shown, that the compliance hydrodynamic and thermodynamic dampers exceeds a compliance gas-liquid dampers in  $2,1$  and  $18,4$  times accordingly, with other things being equal.

**Key words:** Dynamic tests, the system impedance, feedline, feedline systems LPRS, gas-liquid dampers, hydrodynamic, thermodynamic dampers, own frequency of fluctuations of a liquid in the feedline pipeline, complex resistance.

**Пилипенко Олег Вікторович** – доктор технических наук, член-корр. Национальной академии наук Украины, директор Института технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск, Украина, e-mail: [OPylypenko@nas.gov.ua](mailto:OPylypenko@nas.gov.ua).

**Запольский Леонид Георгиевич** – научный сотрудник отдела виброзащитных систем Института технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск, Украина, e-mail: [l\\_zapolsky@nas.gov.ua](mailto:l_zapolsky@nas.gov.ua).