

УДК 685.511.012

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОСИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРОУСТОЙЧИВЫХ КРЕПЛЕНИЙ

© 2011 Д.М. Гаврилов<sup>1</sup>, В.Г. Кулаков<sup>2</sup>, А.М. Джафаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Объединенная авиационная корпорация (Ульяновский филиал)

<sup>2</sup> ЗАО «Авиастар-СП», г. Ульяновск

<sup>3</sup> ФНПЦ ОАО «НПО «Марс», г. Ульяновск

Поступила в редакцию 12.05.2011

В статье авторы проводят анализ конструкции креплений трубопроводов гидросистемы самолета на основе виброустойчивых креплений. Приводят: различные варианты креплений через вибродемпфирующие опоры с виброупругими гасителями; условия для оптимального усилия затяжки хомута; изделия из упругодемпфирующего пористого материала и др.

Ключевые слова: предприятие машиностроительное; аппарат летательный; система гидравлическая; крепление, устойчивое к вибрации; жидкость рабочая; производство инструментальное; условия рыночные; цепь логистическая; модель информационная; обслуживание техническое.

Проблема защиты от вибрации и ударов изделий существует на каждом машиностроительном предприятии, в организациях, осуществляющих грузовые и пассажирские перевозки, при использовании вентиляционного, холодильного, компрессорного оборудования и т.п. Везде где есть движение, вращение, соударение существует проблема возникновения вибрации. Устранение или уменьшение вибрации во многих случаях невозможно без установки защищаемого или вибрирующего объекта на виброизоляторы.

Эксплуатация гидравлических систем различных технических объектов всегда сопровождается наличием динамических процессов в рабочей жидкости, обусловленных, например, дискретным характером работы качающих узлов насосных агрегатов. Пульсационные процессы в жидкости определяют силовое возбуждение, действующее на элементы трубопроводных систем, которое приводит к их вибрации. Механические колебания трубопроводов снижают надежность и работоспособность систем, сопровождаются поломками и разгерметизацией [6].

Трубопроводы летательного аппарата в полете подвержены воздействию разнообразных переменных сил и вибрации. При частоте вибрации, близкой к собственной частоте гидравлической подсистемы, возможно генерирование интенсивных колебаний давления рабочей жидкости, что, в свою очередь, может привести к снижению их

работоспособности. Среди наиболее существенных действующих сил можно выделить кинематическое возбуждение от работающих агрегатов и силовое возбуждение от пульсаций рабочих сред. Таким образом, трубопроводная система представляет собой совокупность динамически взаимодействующих между собой механической и гидравлической подсистем [5].

Для выдачи сертификата на самолет транспортной категории гидросистемы самолета должны удовлетворять нормам летной годности согласно п.25.1435 и п.25.251 АП-25 [1]:

«Каждый элемент гидравлической системы должен быть спроектирован так, чтобы выдерживать нагрузки от расчетного рабочего давления в комбинации с максимальными эксплуатационными нагрузками на конструкцию, которые должны восприниматься без деформации, препятствующей его функционированию.

Каждый элемент гидравлической системы должен выдерживать без разрушения нагрузки от расчетного рабочего давления, умноженного на коэффициент 1,5, в комбинации с предельными нагрузками на конструкцию, одновременное воздействие которых умеренно вероятно.

При оценке соответствия требованиям необходимо учитывать перемещение элементов системы, вибрацию, давление рабочего тела при переходных процессах и усталость.

Должно быть продемонстрировано в полете, что на самолете отсутствуют любые вибрация и бафтинг, которые препятствовали бы длительному безопасному полету в любых возможных эксплуатационных условиях»

Надежность и ресурс современных изделий высокой удельной мощности во многом определяются уровнем вибрации его узлов и деталей.

*Гаврилов Дмитрий Михайлович, инженер УФКБ ОАО «Туполев»*

*Кулаков Виктор Геннадьевич, первый заместитель генерального директора – технический директор ЗАО «Авиастар-СП». Тел. (8422)22-06-16.*

*Джафаров Ариф Мехдиевич, кандидат технических наук, заместитель главного инженера по производству*

Около половины отказов и поломок энергетических установок транспортных систем и элементов их конструкций происходит из-за повышенной вибрации. К основным причинам вибрационных дефектов можно отнести наличие в рабочей зоне резонансов и малое демпфирование при прохождении резонансных частот.

Необходимо предложить устройство, позволяющее снизить силовое возбуждение и действие переменных сил. В данной работе предлагается внедрить в конструкцию гидравлической системы виброустойчивые крепления трубопроводов, снижающие вибрацию системы.

Виброизолятор — это устройство, предназначенное для защиты человека, радиоэлектронной аппаратуры, хрупких грузов, фундаментов зданий, металлоконструкций и других объектов от воздействия вибрации и ударов.

Проектирование рациональной виброизолирующей защиты заключается в выборе оптимальной конструкции виброизолятора, необходимого их количества и в расположении относительно изолируемого объекта.

Использование рациональной виброударозащитной системы продлевает срок службы защищаемого объекта в несколько раз.

Методы виброзащиты:

1. *Демпфирование.* Демпфирование существенно влияет на вибрацию лишь в области резонансных частот, но именно резонансные колебания представляют основную опасность. Демпфирование полезно самостоятельно и в сочетании с виброизоляцией. Нередко оно является практически единственно приемлемым методом борьбы с вибрацией.

Реализация этого метода заключается в установке источника колебаний или защищаемого объекта на демпферы. В демпферах происходит рассеяние энергии колебаний.

2. *Виброизоляция.* Методом виброизоляции решаются две задачи:

- уменьшение вибрации, передаваемой источником колебаний на основание;
- уменьшение вибрации защищаемого объекта.

Решение обеих задач виброизоляции заключается в установке конструкций на виброизоляторы или пружины. Этот метод эффективен при частоте колебаний в несколько раз выше, чем собственная частота системы.

Задача определения амплитуд колебаний рабочей жидкости при вибрации трубопровода имеет существенное практическое значение. Ее решение позволит более полно оценить особенности процессов виброакустического взаимодействия в элементах гидромеханических систем летательных аппаратов.

В работе [6] представлена аналитическая мо-

дель, которая позволяет определить параметры пульсаций рабочей жидкости при установившихся колебаниях трубопровода.

Анализ этой модели показывает, что, если трубопроводы летательного аппарата в полете подвержены воздействию вибрации с частотой, близкой к собственной частоте гидравлической подсистемы, то возможно генерирование интенсивных колебаний давления рабочей жидкости. Это может привести к возникновению незатухающих колебаний клапанов, золотников, трубопроводов и снижению их работоспособности. Использование данной аналитической модели на стадии доводки трубопроводных систем летательных аппаратов позволит не только снизить затраты на доводку, но и значительно повысить надежность этих систем в эксплуатации [5].

Разработанная в статье [2] методика моделирования виброакустических характеристик трубопроводных систем позволяет прогнозировать уровни вибропараметров элементов уже на стадии проектирования, предлагать мероприятия по снижению вибронпряжённости, оценивать эффективность корректирующих устройств по повышению работоспособности систем.

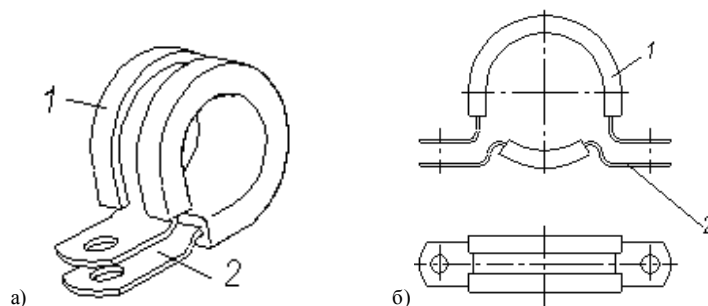
Дальнейшее развитие исследований заключается в моделировании упругих опор, анализе влияния вибропараметров на изменение пульсационного состояния гидравлической подсистемы, расчёте акустического излучения от вибрирующего трубопровода в окружающую среду.

Еще одним из эффективных методов борьбы с виброакустическими нагрузками является применение гасителей колебаний давления. Установка в гидравлическую систему гасителя колебаний приводит не только к уменьшению амплитуд колебаний, но и к изменению формы волны давления [3].

Учитывая все вышеперечисленные факторы, предлагается внедрить в производство вибродемпфирующую опору (патент Российской Федерации 2078275).

Вибродемпфирующая опора предназначена для использования в строительстве трубопроводов для гашения их вибрации. Опора содержит хомут с элементами крепления, расположенный между ним и трубопроводом вязкоупругий слой - набор уложенных по периметру трубопровода виброгасителей из металлорезины (МР). Усилие затяжки хомута зависит от диаметра трубопровода, оптимальной нагрузки на виброгаситель из металлорезины и длины вязкоупругого слоя вдоль оси трубопровода.

В установленных на данное время креплениях для поглощения вибраций используются резиновые уплотнения 2 (рис. 1), в которых происходит диссипация колебаний. Использование резины



**Рис. 1.** Крепления с резиновыми уплотнениями:  
1 – хомут, 2 – резиновое уплотнение

снижает ресурс устройства (рис. 2), при эксплуатации остается открытым вопрос об эффективности устройства в широком диапазоне частот.

Крепления, в котором в качестве вибродемпфирующих элементов служит набор настроенных на определенные частоты вязкоупругих демпферов, расширяет диапазон частот гашения вибраций. Однако это устройство имеет неразвитую площадь контакта вязкоупругих элементов с поверхностью трубопровода, в результате снижается эффективность виброгашения.

Известен упругий элемент для систем демпфирования, изготовленный из материала металлорезина. Элемент имеет высокие упругие, демпфирующие и стойкостные свойства в широком диапазоне изменений внешних условий, технология его изготовления позволяет получать различные наперед заданные формы элемента, такой элемент может быть с успехом использован в вибродемпфирующих устройствах.

Описанные конструкции устройств достаточно сложны для изготовления и эксплуатации, кроме того, монтаж этих устройств на трубопроводах представляет трудности, связанные с тем, что наружный хомут, охватывающий трубопровод с демпферами, является неразъемным.

Целью внедрения является эффективное в



**Рис. 2.** Крепления с резиновыми уплотнениями с неисправностями, выявленными в процессе эксплуатации

широком диапазоне частот снижение уровня вибраций трубопровода и соответствующее повышение надежности и долговечности его эксплуатации.

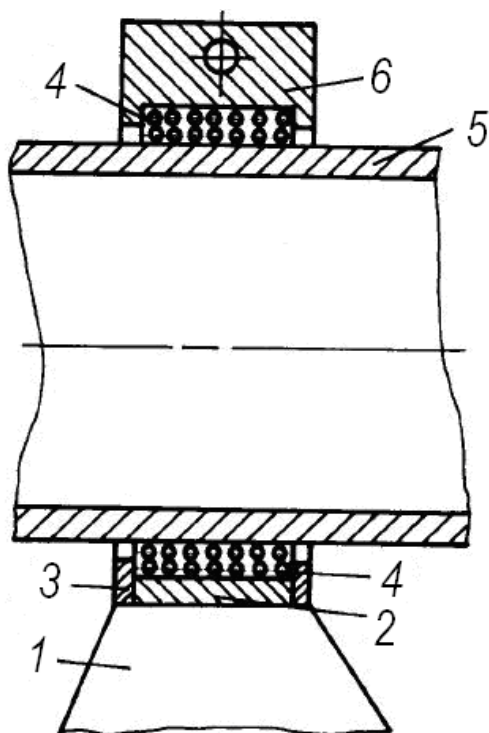
Это достигается тем, что в качестве поглощающего энергию колебаний слоя используется набор виброгасителей из металлорезины, уложенных по периметру трубопровода вплотную, стянутых не менее чем трехсекционным хомутом, одна из секций которого жестко закреплена на ложементе опоры, хомут снабжен элементами фиксации вязкоупругого слоя и элементами крепления, при этом выбирается оптимальное усилие затяжки хомута, которое обеспечивает максимальное виброгашение трубопровода.

На рис. 3 изображено сечение вибродемпфирующей опоры и вязкоупругие гасители из металлорезины.

На ложементе 1 вибродемпфирующей опоры жестко закреплена одна секция не менее чем трехсекционного хомута 2 с элементами фиксации 3 вязкоупругого слоя 4, расположенного между хомутом 2 и трубопроводом 5. Вязкоупругий слой 4 набран из уложенных вплотную по периметру трубопровода виброгасителей из металлорезины. Элементы крепления с вкладышами 6 обеспечивают жесткую связь трех секций хомута 2 между собой и с ложементом 1, а также обеспечивают заданное усилие затяжки хомута 2 и вязкоупругого слоя 4.

Вибродемпфирующая опора работает следующим образом. При возникновении вибраций трубопровода 5 происходит перемещение последнего относительно хомута 2, жестко скрепленного с ложементом опоры, сопровождающееся деформацией вязкоупругого слоя 4, составленного из металлорезиновых виброгасителей.

Деформация металлорезиновых виброгасителей сопровождается интенсивной диссипацией механических колебаний в тепло трения в материале металлорезины, для структуры которой характерна развитая поверхность контакта составляющих ее элементов в единице объема. На этой поверхности совершается работа сил трения при относительном движении элементов метал-



**Рис. 3.** Вибродемпфирующая опора с вязкоупругими гасителями из резины: 1 – ложемент, 2 – хомут, 3 – элементы фиксации, 4 – вязкоупругий слой, 5 – трубопровод, 6 – вкладыш

лорезины, сопровождающем ее деформацию, с высоким коэффициентом демпфирования.

Применение не менее чем трехсекционного хомута 2 помимо упрощения монтажа вибродемпфирующей опоры на трубопроводе 5 в сочетании с элементом фиксации 3 вязкоупругого слоя 4 обеспечивает дополнительную жесткость изгибу хомута 2 в радиальном направлении к оси трубопровода и способствует равномерности затяжки вязкоупругого слоя 4. Элементы фиксации 3 вязкоупругого слоя 4 препятствуют также нарушению целостности системы хомут 2 вязкоупругий слой 4 при тепловой деформации трубопровода 5 вдоль его оси. При вибрации трубопровода 5 элементы фиксации 3 вязкоупругого слоя 4 обеспечивают жесткость, целостность, равномерность деформации и высокий ресурс работы вязкоупругого слоя.

Для максимального демпфирования вибраций существует оптимальное усилие затяжки хомута 2, поскольку при очень большом усилии затяжки при вибрациях отсутствует деформация вязкоупругого слоя 4, а при нулевом усилии затяжки сила упругости и трения вязкоупругого слоя 4 практически отсутствуют.

Вибродемпфирующая поверхность трения имеет высокие противозадирочные и электроизоляционные свойства и низкий коэффициент трения.

Крепления подобного рода имеют малые габариты и вес, обеспечивают удобство включения в силовую схему, обладают широким диапазоном изменения упругих и диссипативных свойств, собственной надежностью работы и достаточным ресурсом, высокой эффективностью гашения колебаний, наличием простой расчетной модели, обладают работоспособностью в широком диапазоне температур и при воздействии агрессивных сред.

Условия для оптимального усилия затяжки хомута, которому соответствует максимальное снижение уровня вибраций, можно представить в виде

$$A = \frac{2N_{opt}}{l \cdot D \cdot P_{opt}}, \quad (1)$$

где  $N_{opt}$  – оптимальное усилие затяжки хомута, кг;  
 $l$  – ширина вязкоупругого слоя, см (вдоль оси трубопровода);

$D$  – диаметр трубопровода, см;

$P_{opt}$  – оптимальная удельная нагрузка виброгасителя из МР, кг/см<sup>2</sup>.

По расчетам получается, что среднеквадратичная по времени виброскорость по суммарному сигналу спектра вибраций в диапазоне частот 2-6000 Гц после установки вибродемпфирующих опор снизилась с 220 мм/с до 30 мм/с, то есть примерно в 7 раз.

Многолетняя практика показала высокую эффективность материала МР в экстремальных условиях эксплуатации при:

- воздействию интенсивных динамических нагрузок;
- высоких и низких температурах;
- в условиях вакуума, радиации и агрессивных сред, свойственных эксплуатации авиационной, ракетно-космической и другой техники.

Преимущества изделий из упругодемпфирующего пористого материала:

- высокая стойкость в агрессивных средах;
- широкий диапазон рабочей температуры 20-500 К;
- высокая упругость;
- диссипация энергии деформации;
- срок консервации до 25 лет.

Металлорезина является новым конструкционным материалом. Это цельнометаллический пористый аналог резины, получаемый холодным прессованием заготовок, сформированных из растянутой проволоочной спирали. Детали из металлорезины после прессования не требуют дополнительной механической обработки. Изделия из МР обладают упругими свойствами, подобными свойствам как резины, так и пластмассы, но имеют в 10 раз большую прочность, не подвержены старению, в 2...3 раза лучше поглощают ударные и вибрационные нагрузки, могут

работать в агрессивных средах, не подвержены воздействию масел, грязи, пыли, выдерживают температуру от -50 до +400 °С, не боятся радиации и не воспламеняются. Энергия механических колебаний благодаря трению между проводочками спирали быстро рассеивается и превращается в теплоту.

Металлорезина нашла широкое применение в авиации и космической технике и химической промышленности. МР используется для изготовления амортизаторов, компенсаторов, рабочих элементов упругих муфт и упругих зубчатых колес, цельнометаллических упругих уплотнений, мощных малогабаритных пружин, гидравлических демпферов дроссельного типа, уплотнений, для армировки подшипников скольжения, виброгасителей, различных виброизоляторов и др. изделий, предназначенных для защиты и в качестве звукопоглощающего материала. В сравнении с резинами и полимерами металлорезина имеет ряд существенных преимуществ, определяющих эффективность ее использования (табл. 1).

В зависимости от давления при прессовании получается металлорезина разной пористости, то есть с разным отношением её плотности к плотности металла спирали. Соответственно она по-разному поглощает колебания различных частот. Как показали исследования, в диапазоне частот 10-4000 Гц наилучшими вибропоглощающими свойствами обладает металлорезина с пористостью 0,75. Амплитуда колебаний при этом снижается в 6-10 раз. Варьировать свойства виброгасителей можно также подбором материала спирали, толщины проволоки, нанесением покрытий.

Металлическая резина - анизотропный цельнометаллический материал для защиты от вибрации, обладающий высокой прочностью и демпфированием. Исследована способность этого материала сохранять свои свойства (жесткость и коэффициент рассеивания энергии) при воздействии кратковременной значительной нагрузки (сжатие в различных направлениях, растяжение, сдвиг). Результаты исследования позволяют рассчитывать системы вибрационной защиты на воздействие удара [5].

Виброизоляторы из материала МР широко используются в виброзащитных системах. Они имеют высокую прочность, высокий коэффициент рассеивания энергии, способны работать экстремальных условиях: в условиях высокой и низкой температуры, в агрессивной среде, вакууме, радиации и т.д. При работе виброизолятор подвергается как вибрационному, так и ударному нагружению. Есть исследования предела усталости материала МР при длительном нагружении. Однако кратковременная ударная нагрузка может изменить параметры материала МР так, что он перестанет обеспечивать нужные для вибрационной защиты характеристики (жесткость и коэффициент рассеивания энергии). Нет никаких данных по предельным нагрузкам для материала МР, не считая очень общей рекомендации о нежелательности при сжатии в направлении прессования превышать силу прессования более чем на 30%. Предельные нагрузки в направлении, перпендикулярном направлению прессования, при сдвиге и растяжении ранее не исследовались.

Полученные результаты позволяют рассчитывать виброизоляторы из материала МР на работоспособность при действии повышенных нагрузок. Видно, что наибольшие нагрузки материал МР способен выдержать в направлении прессования. Изменение жесткости виброизолятора на 20% происходит при нагрузке  $0.22 \sigma_{press}$  при сжатии в направлении оси X, и только  $0.1 \sigma_{press}$  при растяжении,  $0.04 \sigma_{press}$  при сжатии в направлении оси Y и  $0.01 \sigma_{press}$  при сдвиге.

Это ограничивает применение материала МР в направлении оси Y (хотя в этом направлении значительно больше несущая способность материала МР) и при сдвиге.

В данный момент самолетостроение развивается в сторону повышения эксплуатационной технологичности изделия, что влечет за собой малую стоимость технического обслуживания и ремонта, то есть уменьшения средств на эксплуатацию изделия. Для того чтобы соответствовать международным стандартам, необходимо обеспечить заданный ресурс соединений. Этого можно достичь, применяя методы, позволяющие по-

**Таблица 1.** Сравнительные технические характеристики металлорезины, резины и полимеров

Наименование параметра	Металлорезина	Резина, полимеры
Максимальная нагрузка, МПа	20...30	3
Допускаемая длительно действующая нагрузка, МПа	7...8	0,5...1
Демпфирующая способность (коэффициент поглощения)	2,5...3,0	1,5...2,0
Предельная температура окружающей среды, °С	до +300	100
Относительная деформация при допускаемых нагрузках, %	5...15	до 50
Релаксация напряжений при заневоливании (снижение усилия сопротивления) образца, %	7	> 15*
* – при длительном заневоливании теряет упругие свойства		

высить ресурс соединений, а также новые материалы и технологии.

В результате проведенной работы были проанализированы проблемы защиты от вибрации и ударов трубопроводов и оборудования и методы защиты от них. Приведены методы определения амплитуд колебаний, использование которых на стадии доводки трубопроводных систем летательных аппаратов позволит снизить затраты на доводку, значительно повысить надежность этих систем в эксплуатации, появится возможность прогнозировать уровни вибропараметров элементов уже на стадии проектирования, предлагать мероприятия по снижению вибронпряжённости, оценивать эффективность корректирующих устройств по повышению работоспособности систем.

Сравнение резины и полимеров с металлорезиной показало ряд существенных преимуществ достаточно нового материала, определяющих более широкий диапазон его использования.

Рассмотренный в этой работе комплекс мероприятий значительно уменьшает влияние колебаний гидросистемы.

Предлагается внедрить в производство вибродемпфирующую опору с вязкоупругим слоем

из металлорезины, что является эффективным решением снижения уровня вибраций трубопровода и повышения надежности и долговечности его эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные Правила, ч. 25, п.25.1435, п.25.251, 2004 г.
2. Макарьянц Г.М., Прокофьев А.Б., Шахматов Е.В. Моделирование виброакустических характеристик трубопровода с использованием метода конечных элементов. Самара: СГАУ, 2002.
3. Михалкин И.К., Пономарев Ю.К., Васюков Е.С., Пономарев Д.Ю. О возможности оптимизации характеристик комбинированных виброизоляторов для объектов транспортного машиностроения // Сборник научных трудов по итогам 8-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении - 2008». Брянск, 2008. Выпуск 8.
4. Уланов А.М., Пономарев Ю.К., Паровой Ф.В. Характеристики материала «МР» при кратковременном значительном нагружении. Самара: СГАУ, 2008.
5. Шахматов Е.В., Прокофьев А.Б., Макарьянц Г.М. Влияние динамических характеристик присоединенных гидравлических цепей на вибрационные характеристики трубопроводов. Самара: СГАУ, 2004.
6. Шахматов Е.В., Прокофьев А.Б., Миронова Т.Б. Возбуждение пульсаций давления в рабочей жидкости при вибрации трубопровода. Самара: СГАУ, 2006.

## ANALYSIS OF HYDROSYSTEM CONSTRUCTION WITH SHAKEPROOF FASTENINGS

© 2011 D.M. Gavrilov<sup>1</sup>, V.G. Kulakov<sup>2</sup>, A.M. Dzhafarov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Incorporated Aviation Corporation (the Ulyanovsk Branch)

<sup>2</sup> Joint-Stock Companies «Aviastar-Я», Ulyanovsk

<sup>3</sup> FNPTs Open Society «NPO «Mars»», Ulyanovsk

In article authors analyze a construction of tubing fastenings of aircraft hydro system with shake proof fastenings. Result are different variants of fastenings through vibrodamping support with shake proof extinguisher; conditions for optimum effort of a clamp tightening; products from an elastically damping porous material, etc.

Keywords: the enterprise machine-building; the device flying; system hydraulic; fastening steady against vibration; a liquid the worker; manufacture tool; conditions market; a circuit logistical; model information; service technical.

*Dmitry Gavrilov, Engineer UF KB Open Society "Tupolev"  
Victor Kulakov, First Deputy General Director – Technical  
Director of Joint-Stock Company "Aviastar-SP".  
Tel. (8422)22-06-16.*

*Arif Dzhafarov, Candidate of Technics, Deputy Chief  
Engineer for the Production.*