

УДК 621.311.1

Б.А. Гордеев^{1,2}, С.Н. Охулков^{1,2}, Д.Ю. Титов², А.С. Плехов²**СТАБИЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ ДЕМПФЕРОВ
УДАРНЫХ НАГРУЗОК КОНТУРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБОЙ**Институт проблем машиностроения Российской академии наук¹,
Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева²

Рассмотрены некоторые подходы к проектированию магнитореологических трансформаторов (МРТ) демпферов ударных нагрузок. В частности, выяснено влияние температуры на стабильность работы демпфера при длительной его эксплуатации. Рассмотрены способы и предложены средства стабилизации температуры МР-демпера для обеспечения эффективного управления им.

Ключевые слова: магнитореологический трансформатор, гидропора, МР-демпер, стабилизация температуры, контурная тепловая труба.

Интенсивное развитие в машиностроении электротехнических комплексов и других видов техники требует разработки, создания и внедрения активных средств их виброзащиты – управляемых демпферов с МРТ, оснащенных высокоэффективными и компактными системами термостабилизации. В процессе работы магнитоуправляемых демпферов ударных нагрузок и широкополосной вибрации ввиду интенсивного поглощения механической энергии происходит нагрев рабочей магнитореологической жидкости (МРЖ) и, как следствие, снижение эффективности работы МР-демпера. Для решения задачи стабилизации работы демпферов при изменении температуры рассматриваются способы передачи поглощенной энергии на другие объекты посредством контурных тепловых труб (КТТ), которые являются эффективными и надежными элементами систем обеспечения тепловых режимов термостатируемых объектов. В статье рассмотрено применение в МР-демперах ударных нагрузок контурных тепловых трубок, широко используемых в различных технических устройствах [11-15].

Модель МР-демпера ударных нагрузок с цилиндрическим МРТ

При создании новых гидравлических виброопор с МРТ, предназначенных для гашения ударных нагрузок и рассчитанных на работу в определенном частотном диапазоне, необходимо учитывать изменение физических свойств рабочей МРЖ при работе гидропоры с МРТ ввиду проявления магнитореологического эффекта с одной стороны и термодинамических явлений с другой [1, 4, 5, 7].

На рис. 1 представлена физическая модель (МР-демпера) с коаксиальным каналом с МРЖ и электромагнитной системой из трёх соленоидов [4].

В МР-демпере цилиндрический зазор 2, заполненный МРЖ, образован внутренней и внешней цилиндрическими рабочими поверхностями основной диамагнитной камеры 3 и ферромагнитного штока-поршня 1. На внешнюю поверхность основной диамагнитной камеры 3 устанавливаются соленоиды, которые создают продольные встречные магнитные поля. Цилиндрический зазор пронизывается переменным ортогональным магнитным полем.

Замедление и ускорение штока-поршня при работе МРТ определяются возникающей пондеomotorной силой Лоренца, $F_L = q \cdot v \times B$, где: v [м/с] – скорость штока-поршня в цилиндрическом зазоре; B [Тл] – магнитная индукция; q – заряд ионизированных ферромагнитных частиц МРЖ.

В области одноименных полюсов соленоидов встречные электромагнитные поля $+B$ и $-B$

противодействуют друг другу и могут прекращать дросселирование МРЖ в цилиндрическом зазоре. Результирующее магнитное поле встречных электромагнитных полей в области одноименных полюсов становится неоднородным и ортогональным, и его силовые линии в цилиндрическом зазоре с МРЖ направлены по нормали к направлению движения штока.

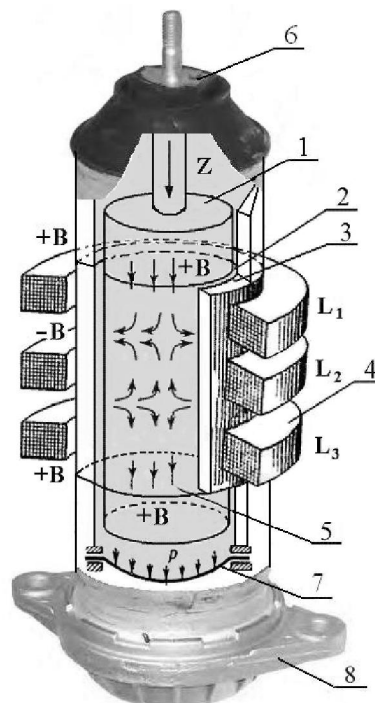


Рис. 1. Физическая модель МР-демпфера с цилиндрическим МРТ и электромагнитной системой из трёх соленоидов:

1 – ферромагнитный шток-поршень; 2 – коаксиальный цилиндрический зазор с МРЖ; 3 – цилиндрический корпус; 4 – соленоид; 5 – МРЖ; 6 – обечайка; 7 – эластичная мембрана; 8 – основание МР-демпфера [4]

Построение гидропор по физической модели МРТ с коаксиальным зазором и электромагнитной системой из трёх соленоидов позволяет осуществлять замедление и ускорение ферромагнитного штока-поршня в коаксиальном цилиндрическом канале за счёт магнито-реологического эффекта в МРЖ [4].

Гидродинамика МРЖ в коаксиальном зазоре МР-демпфера

Рабочим органом в МР-демпфере является шток-поршень, который перемещается в цилиндрическом коаксиальном зазоре с МРЖ под действием разности давлений $\Delta p = |P_1 - P_0|$, создаваемой общей массой нагрузки m .

Поскольку длина хода штока-поршня Δl и внутреннее сечение цилиндрического корпуса МР-демпфера S_{Π} известны, то объем МРЖ, вытесняемый за один ход поршня $V = S_{\Pi} \cdot \Delta l$. Если за время τ шток-поршень делает n ходов, то полный измеренный объем составит $V = S_{\Pi} \cdot \Delta l \cdot n$. Однако этот показатель нуждается в дополнении [9, 10]. Некоторое количество рабочей жидкости V_3 будет утекать из-за зазоров между штоком-поршнем и внутренней концентрической поверхностью рабочей камеры МР-демпфера. Таким образом, фактическое количество жидкости $V_{\text{д}}$, вытекшее из зазора, будет:

$$V_{\text{д}} = n \cdot S_{\Pi} \cdot \Delta l + V_3. \quad (1)$$

Течение жидкости в узких цилиндрических коаксиальных зазорах представляет прак-

тический интерес при решении задач по гашению вибрации посредством МР-демпферов. В них гашение механических колебаний возможно тогда, когда коаксиальный зазор составляет порядка 100-150 микрон.

Работа МРЖ при гашении вибрации в МР-демпфере основана на физических свойствах реальных (вязких) жидкостей оказывать сопротивление течению. Математически величина искомого сопротивления ньютоновской жидкости определяется зависимостью Ньютона [9,10], согласно которой касательное напряжение между двумя слоями ламинарного потока пропорционально градиенту скорости dv/dt вдоль нормали к оси потока.

Установлено, что течение рабочей жидкости в узких коаксиальных цилиндрических зазорах подчиняется общим законам гидравлики. Критическое число Рейнольдса, при превышении которого нарушается ламинарность потока, обычно соответствует $Re = v \cdot s / \zeta$, где s – величина щели; v , ζ – скорость течения и коэффициент кинематической вязкости рабочей жидкости соответственно.

Ширина коаксиального цилиндрического зазора s в МР-демпфере не должна превышать 100-150 микрон, и поток МРЖ для распространенных условий работы (давлений и вязкостей жидкостей) носит обычно ламинарный характер. Исключением могут выступать гидропоры, работающие в условиях высоких температур и давлений (> 200 кг/см²).

Течение МРЖ в МР-демпфере происходит под действием перепада давления $\Delta p = |P_1 - P_0|$ между двумя параллельными кольцевыми поверхностями. При этом предполагается, что одна из них неподвижна, а вторая перемещается относительно первой со скоростью v (рис. 1). Кинематическая вязкость МРЖ в коаксиальном цилиндрическом зазоре принимается постоянной. В действительности же вязкость рабочей жидкости зависит от меняющихся во времени температуры и давления, что особенно явно выражено по мере движения жидкости [9, 10].

Поскольку изменения кинематической вязкости рабочей жидкости в зазоре носят нелинейный характер, то при практических расчетах используют среднее значение кинематической вязкости

$$\zeta_{cp} = \frac{\zeta_1 + \zeta_2}{2}, \quad (2)$$

где ζ_1 и ζ_2 – кинематическая вязкость входящей и выходящей из зазора жидкости при фактических температурах и давлениях.

Рассеиваемая при этом мощность эквивалентна работе, затрачиваемой на продавливание рабочей жидкости через зазор, образованный кольцевыми поверхностями:

$$N_p = \Delta p \cdot Q = |P_1 - P_0| \cdot Q = \frac{s^3 \Delta p^2}{12 \cdot \eta \cdot \Delta l} \cdot w, \quad (3)$$

где $w = \pi \cdot d$ – длина средней линии коаксиального зазора; d – диаметр средней линии зазора; Δl – длина цилиндрического зазора в направлении движения потока жидкости (рис. 2).

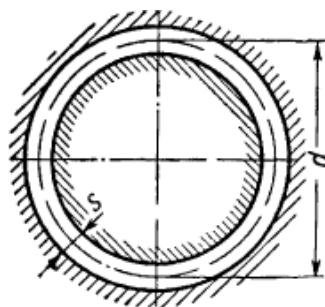


Рис. 2. Коаксиальный цилиндрический зазор в разрезе

Кольцевая поверхность штока-поршня в МР-демпфере перемещается со скоростью v относительно неподвижной кольцевой поверхности корпуса. В соответствии с этим в рассмотренных в работе [9] уравнениях, описывающих движение рабочей жидкости, учтен перенос МРЖ, движущейся кольцевой поверхностью поршня-штока (с учетом фрикционного движения жидкости).

$$Q = \frac{|P_1 - P_0| \cdot s^3 \cdot w}{12 \cdot \eta \cdot \Delta l} = \frac{\Delta p \cdot s^3 \cdot w}{12 \cdot \eta \cdot \Delta l} = \frac{\Delta p \cdot s^3 \cdot w \cdot g}{12 \cdot \eta \cdot \gamma \cdot \Delta l}, \quad (4)$$

где $\frac{dp}{dy} = \frac{|P_1 - P_0|}{\Delta l}$ – градиент давления по длине зазора в направлении потока; η – коэффициент динамической вязкости; γ и g – объемный вес рабочей жидкости и ускорение свободного падения.

Тогда течение через коаксиальный зазор (рис. 2) рассчитывается при ламинарном течении по выражению (4) с заменой $w = \pi \cdot d$:

$$Q = \frac{\pi \cdot d \cdot \Delta p \cdot s^3}{12 \cdot \eta \cdot \Delta l}. \quad (5)$$

Среднюю скорость течения МРЖ в МР-демпфере можно представить как:

$$v_{cp} = \frac{Q}{\pi \cdot ds}, \quad (6)$$

где $\pi \cdot ds$ – площадь сечения зазора; для расчетов применительно к единице длины $w = \pi \cdot d = 1$ величина $\pi \cdot ds$ равна величине зазора s .

Подставив (5) в формулу (6), получим:

$$v_{cp} = \frac{\Delta p \cdot s^2}{12 \cdot \eta \cdot \Delta l}. \quad (7)$$

Из формулы (7) может быть выражен перепад давления:

$$\Delta p = \frac{12 \cdot \eta \cdot \Delta l \cdot v_{cp}}{s^2}. \quad (8)$$

Для выражения закона течения рабочей жидкости в МР-демпфере в безразмерной форме вводится понятие гидравлического радиуса для коаксиального зазора, под которым понимается отношение удвоенной площади поперечного сечения потока к смоченному периметру штока-поршня [9,10]. Для коаксиальных цилиндрических зазоров гидравлический радиус в этом случае равен ширине зазора (его номинальной величине) s . В соответствии с этим число Рейнольдса будет определяться по формуле:

$$Re = v \cdot s / \zeta = v \cdot s \cdot \rho / \eta. \quad (9)$$

Применяемые рабочие МРЖ в МР-демпферах представляют собой суспензии микрочастиц магнитных материалов в органических маслах. Под действием магнитного поля частицы, распределенные в объеме дисперсной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля, что вызывает увеличение вязкости жидкости более чем в 10^5 раз [1-6].

Главным показателем всех традиционных рабочих жидкостей газогидравлических виброопор и демпферов, качественно влияющих на характеристики их сопротивления, является коэффициент кинематической вязкости рабочей жидкости [8]:

$$\nu = \frac{\mu'}{\rho} = \frac{dP_{\tau}}{dS \frac{du}{dz} \cdot \rho}, \quad (10)$$

где μ' - динамический коэффициент вязкости; dP_τ - элементарная величина силы вязкого трения, Н; dS - площадь соприкосновения слоев в частице МРЖ, мм²; du/dz - модуль градиента скорости; du - разница скоростей на сдвиговых плоскостях рабочей МРЖ; dz - расстояние между рабочими плоскостями цилиндрического зазора МР-демпфера.

Для любой реологической среды сдвиговая вязкость определяется отношением касательного напряжения к градиенту скорости, поперечному направлению движения, который для МРЖ зависит от напряженности приложенного магнитного поля. Если считать МРЖ линейно вязкопластичной средой, то ее поведение описывается моделью Шведова-Бингама, учитывающей влияние вязкости и пластичности на касательные напряжения и может быть описана следующим образом [8]:

$$\eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \eta_p, \quad (11)$$

где τ_y - предельное напряжение сдвига (предел текучести) МРЖ, Па; $\dot{\gamma}$ - сдвиговая скорость, м/с; η_p - показатель консистенции МРЖ, являющийся аналогом коэффициента пластической вязкости, т.е. вязкости при отсутствии магнитного поля.

Диапазон перемещений штока-поршня МР-демпфера определяется перепадом давлений Δp [Па], создаваемом в рабочем цилиндрическом зазоре с МРЖ. Перепад давлений состоит из двух составляющих [1, 5]: Δp_η – вязкая составляющая, определяющей течением рабочей МРЖ с вязкостью η ; Δp_τ – составляющая, заданная пределом текучести структурированной магнитным полем магнитовязкой среды.

Принцип действия МР-демпфера основан на магнитореологическом эффекте, описанном ранее. Регулируя внешним магнитным полем вязко-упруго-пластичные свойства МРЖ, используемой в качестве рабочей среды, можно сверхточно управлять определяемым сдвиговыми напряжениями τ перепадом давлений в гидравлической системе МРТ МР-демпфера или упругими деформациями структурированной суспензии, за счет чего осуществляется прецизионное демпфирование колебаний [1-6].

Поскольку в реальных условиях работы МР-демпфера вязкость рабочей МРЖ зависит от температуры и давления, которые являются величинами переменными [9, 10], то возникает задача отвода тепла от цилиндрического коаксиального зазора с рабочей МРЖ в МР-демпфере [4, 5, 7, 8]. Одним из способов решения данной задачи является применение КТТ, которые являются эффективными теплоотводами [12, 15].

Отвод тепла в МР-демпферах с МРЖ

Проведённые авторами экспериментальные исследования на предмет воздействия температуры МРЖ на динамические характеристики МР-демпферов показали, что с ростом температуры МРЖ невозможно предварительно настроить МР-демпфер на заданные резонансные частоты при изменяющейся нагрузке [4, 5]. Этого невозможно достичь из-за неизбежного падения с ростом температуры МРЖ гидравлических и общих коэффициентов трения МР-демпфера при его работе. Динамическая вязкость МРЖ падает с ростом температуры [9,10], а для должной работы МР-демпфера её динамическую вязкость необходимо поддерживать на уровне определённого значения.

Для предварительной настройки МР-демпфера на заданные резонансные частоты необходимо принимать меры по принудительному охлаждению МРЖ [4,5]. Одним из технических решений является применение контурных тепловых трубок (КТТ), которые осуществляют быструю передачу тепла от одних устройств к другим и являются непревзойденными теплоотводами [12, 15, 16].

Отличаясь малыми массогабаритными показателями, КТТ способны передавать тепла

в сотни раз больше, чем сплошные стержни из меди и серебра [11-16]. КТТ работают по замкнутому испарительно-конденсационному циклу, используя капиллярное давление для прокачки теплоносителя. Устройства обладают сверхвысокой эффективной теплопроводностью, не содержат механически подвижных элементов, не потребляют дополнительной энергии (на прокачку теплоносителя) и имеют практически неограниченный рабочий ресурс.

КТТ успешно применяют в системах терморегулирования космических аппаратов, для охлаждения теплонапряженных компонентов электронных устройств и компьютерной техники и утилизации лишнего тепла [12, 15, 16].

Одна из схем такого устройства [15, 16] представлена на рис. 3.

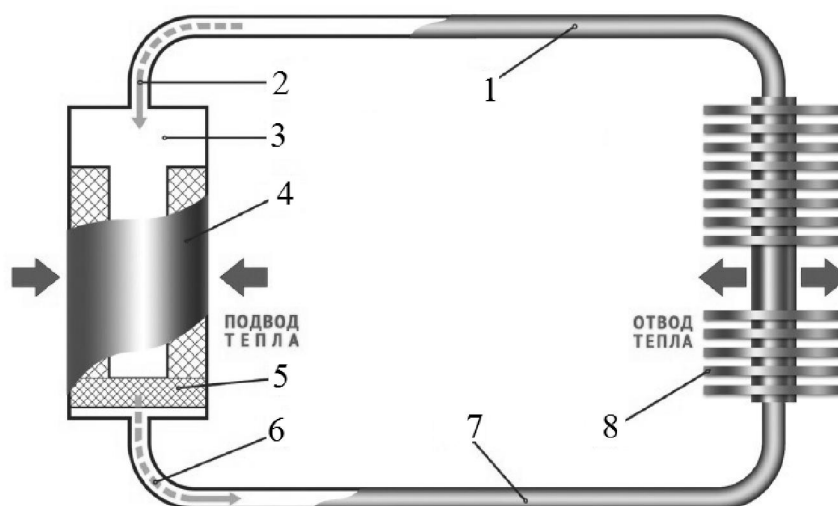


Рис. 3. Принципиальная схема контурной тепловой трубы:

1 – конденсато-провод; 2 – жидкость; 3 – компенсационная полость;
4 – испаритель; 5 – фитиль; 6 – пар; 7 – паропровод; 8 – конденсатор

Испаритель соединен с конденсатором посредством отдельных гладкостенных трубопроводов для пара и жидкости, имеющих относительно малый диаметр, благодаря чему они могут легко принимать различную конфигурацию и обеспечивать минимальное гидравлическое сопротивление. Основные технические характеристики КТТ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики КТТ [15]

Наименование характеристики	Величина
Максимальная мощность, Вт	20-2000
Максимальная плотность тепловой нагрузки, Вт/см ²	130
Термическое сопротивление, °С/Вт	0,02-0,2
Рабочая температура, °С	10-180
Эффективное расстояние теплопереноса, м	0,1-21
Эффективное расстояние теплопереноса при работе против сил тяжести, м	4,5
Длина зоны нагрева испарителя, мм	10-300
Диаметр испарителя, мм	5-32
Диаметр трубопроводов для пара и жидкости, мм	1,8-8
Материал корпуса	Нержав. сталь, медь
Теплоноситель	Вода, аммиак, фреоны

К числу миниатюрных относятся КТТ, диаметр испарителей которых не превышает 8 мм, а диаметр паропровода и конденсатопровода составляет не более 3 мм. Традиционная концепция испарителя, который является основной частью КТТ, уже не работает при таких малых диаметрах. Способность КТТ эффективно работать при любой ориентации является одним из основных преимуществ этих устройств, но в значительной степени нивелируется при таких небольших размерах. На рис. 4 представлена схема охлаждения микропроцессора мобильного компьютера, построенного на основе КТТ [15].

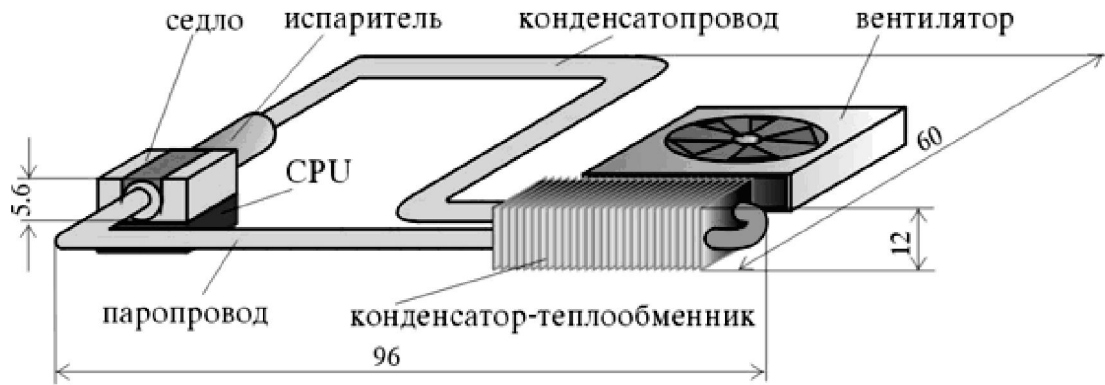


Рис. 4. Схема охлаждения процессора мобильного компьютера на основе КТТ

Применение КТТ труб является альтернативной концепцией и для отвода тепла от разогретой МРЖ в кольцевых зазорах МР-демпферов (рис. 5).

Действие КТТ в МР-демпферах также основано на принципе кипения теплоносителя (воды) в испарителе (источнике тепла) при более низкой температуре воздуха с пониженным давлением [11–14, 16]. Создавая вакуум в КТТ МР-демпферов, можно достичь температуры кипения меньшей, чем 100 °С. Испарители КТТ, которые могут применяться в МР-демпферах, должны иметь температуру кипения около 30 °С, поскольку при нагревании испарителя выше 30 °С вода будет испаряться, а пар будет быстро подниматься по паровому каналу передачи тепла к приёмнику тепла – конденсатору (рис. 5).

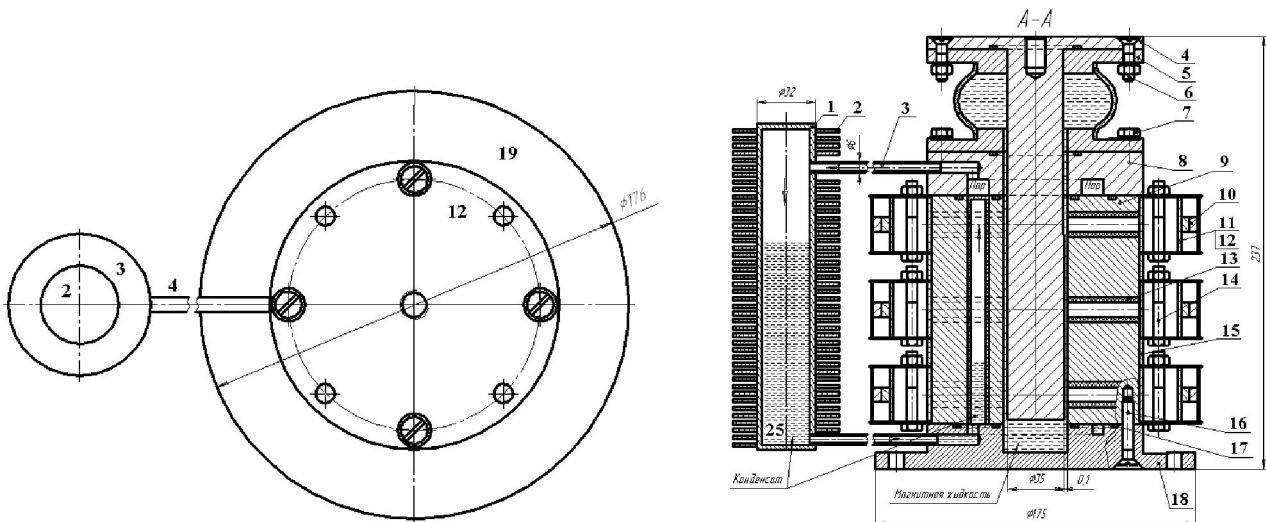


Рис. 5. Схема охлаждения МРТ МР-демпфера на основе КТТ:

1 – испаритель; 2 – конденсатор; 3 – ребристый радиатор конденсатора; 4 – паровой канал; 5 – жидкостный канал; 6 – мелкопористый фитиль; 7 – штуцер; 8 – компенсаторную полость; 9, 10 – фланцы упругого жаростойкого сильфона; 11 – стягивающий болт; 12 – опорная плата со штоком-поршнем; 13, 14, 15 – уплотнительные кольца; 16 – винтовое соединение; 17 – стягивающий винт; 18 – соленоиды-индукторы; 19 – упорные кольца; 20 – ребристые радиаторы соленоидов; 21 – основание

Схема охлаждения МР-демпфера (рис. 5) содержит КТТ, которая состоит из герметичного корпуса, содержащего испаритель 1, помещённый внутри диамагнитного корпуса МР-демпфера и расположенный достаточно близко к источнику тепла, конденсатор 2, подключённый к приёмнику тепла – радиатору 3. Испаритель и конденсатор между собой соединены паропроводом 4 и конденсаторопроводом 5. Мелкопористый фитиль 6 плотно посажен в корпус последнего. Откачка воздуха и заполнение трубы теплоносителем осуществляется через штуцер 7 [12, 15, 16].

Работа МР-демпфера (рис. 5) основана на действии противоположных магнитных полей соленоидов 18 на ферромагнитный шток-поршень 12 и малый коаксиальный канал с МРЖ размещенных в электромагнитном поле трёх внешних соленоидов 18. Магнитное поле $+B$ соленоидов L_1 и L_3 относительно поля $-B$ соленоида L_2 противоположное. Соленоид L_2 создаёт противоположное поле $-B$ с целью управления перемещением штока-поршня в МР-демпфере.

Технология изготовления фитилей КТТ капиллярно-пористой структуры для МР-демпферов с МРЖ

Испаритель КТТ с порошковым фитилем рассчитывается на мощность испарения до 50 Вт. Корпус испарителя приведен на рис. 6, а.

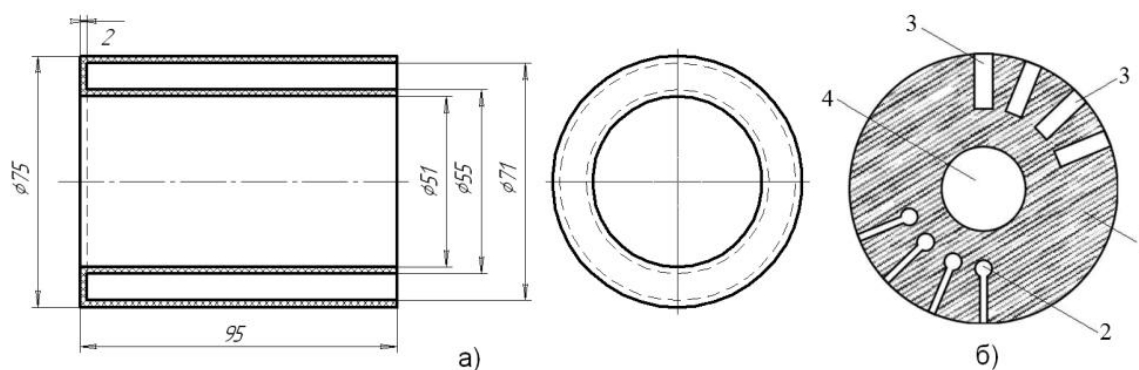


Рис. 6. Цилиндрический фитиль КТТ капиллярно-пористой структуры:

а – эскизный чертёж фитиля; б – возможное поперечное сечение фитиля: 1 – поперечное сечение; 2 – паропроводные микроканалы; 3 – паросборные каналы; 4 – средняя пористая часть

Эскиз его возможного поперечного сечения (рис. 6, б) показан без соблюдения пропорций с целью повышения наглядности рисунка. Фитиль 1 имеет паропроводные микроканалы 2, расположенные радиально, и паросборные каналы 3, расположенные вдоль испарителя. Продольные каналы 3 могут быть выполнены в виде пазов между рёбер на поверхности фитиля [11, 12, 13]. Фитиль КТТ изготавливается из карбонильных порошков никеля путём прессования в цилиндрических прессформах при давлениях 800-900 кг/см² и последующего спекания в течении 4-5 часов при повышении температуры до 800-900 °С [12, 13].

В зависимости от длины ТТ, теплоносителя и передаваемой мощности разность температур может составлять 0,1-30 °С. Длина ТТ при работе в горизонтальном положении может составлять несколько метров [12, 15].

Приведённая технология изготовления цилиндрического фитиля КТТ капиллярно-пористой структуры не является единственной. В МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся комплексные исследования КТТ [16] с использованием различных узлов: фитилей, конденсаторов, компенсационных полостей и т.п.

Использование микроканальных поверхностей с различной геометрией делает возможным применение в качестве капиллярных структур для МР-демпферов как металлических (спеченные никелевые, медные порошки, порошки из коррозионно-стойкой стали), так

и неметаллических пористых материалов (стекловолокно, синтетические волокна, фильтровальная бумага) [16].

Таблица 2

Основные характеристики пористых материалов фитилей КТТ

Пористый материал	Размер пор, мкм	Толщина, мм
Фильтровальная бумага (FP) ГОСТ 12026-76	10	0,4
Коррозионно-стойкая сталь (SS), спеченный порошок	10-15	2,5
Стекловолокно (GF)	2,6	0,4; 1,2; 2,4

Экспериментально установлено, что в качестве фитиля КТТ могут использоваться не только металлические материалы, но и фильтровальная бумага. Ресурсных испытаний не проводилось, но во всех вариантах, в том числе и с фильтровальной бумагой, установки работали длительное время, при этом они многократно выключались и включались. Наиболее полно результаты исследований представлены в работе [16].

Приведённую технологию изготовления фитилей капиллярно-пористой структуры КТТ можно применить и в МР-демпферах ударных нагрузок.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

Библиографический список

1. **Гордеев, Б.А.** Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.]. – М.: Физматлит, 2004. – 175 с.
2. **Айбиндер, Р.М.** Демпфирование вибрации на резонансных частотах электротехнических комплексов и систем / Р.М. Айбиндер [и др.] // Вестник машиностроения. – 2017. – № 1. – С. 7–14.
3. **Гордеев, Б.А.** Физическая модель магнитореологического трансформатора / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов // ПромИнжиниринг-2017. С. 201-205.
4. **Гордеев, Б.А.** К вопросу создания цилиндрического магнитореологического трансформатора в ортогональных магнитных полях / Б.А. Гордеев [и др.] // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2014. – №2. – С. 15–21.
5. **Гордеев, Б.А.** Влияние температуры рабочей жидкости на динамические характеристики гидропор / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2012. – №12. С. 22–26.
6. **Гордеев, Б.А.** Физическая модель магнитореологических трансформаторов энергетических установок / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, Е.А. Ершова // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб.ст. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2016. – С. 51–56.
7. **Актинов, А.А.** О стойкости магнитных жидкостей к воздействию повышенных температур / Актинов А.А. [и др.] // Физико-химические и прикладные проблемы МЖ: сборник научных трудов. – Ставрополь, СГУ 1997.
8. **Шульман, З.П.** Магнитореологический эффект / З.П. Шульман, В.И. Кордонский. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
9. **Башта, Т. М.** Машиностроительная гидравлика: справочное пособие / Т. М. Башта. – 2-е изд., переработанное. – М. Машиностроение, 1971. – 672 с.
10. **Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1964. – 847 с.
11. **Дан П.Д.** Тепловые трубы: [пер. с англ.] / П. Д. Дан, Д. А. Рей. – М.: Энергия, 1979. – 272 с.
12. **Алексеев, В.А.** Тепловые трубы для охлаждения и термостатирования радиоэлектронной аппаратуры / В. А. Алексеев, В. А.Арефьев. – М.: Энергия, 1979. – 128 с.
13. **Ивановский, М. П.** Технологические основы тепловых труб. / М.П. Ивановский, [и др.]. – М.: Атомиздат, 1980. – 160 с.
14. **Елисеев, В. Б.** Что такое тепловая труба? / В. Б. Елисеев, Д. И. Сергеев. – М.: Энергия, 1971. – 136 с.

15. **Майданик, Ю. Ф.** Контурные тепловые трубы – высокоэффективные теплопередающие устройства // Биржа технологий и контактов. – 2003. – № 5.
16. **Афанасьев, В.Н.** Экспериментальное исследование процессов в “Контурных” тепловых трубах / В.Н. Афанасьев, А.В. Недайвозов, А.А. Якомаскин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2014. – №2. – С. 44–61.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2018*

B.A. Gordeev^{1,2}, S.N. Okhulkov^{1,2}, D. Yu. Titov², A.S. Plekhov²

STABILIZATION OF CONTROLLABLE SHOCK LOAD DAMPERS OPERATION WITH A LOOP HEAT PIPE

Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev²

Purpose: Hydromounts during continuous operation produce a considerable amount of heat. Since the heating of the controllable fluid leads to a displacement of the hydromounts working frequency it becomes necessary to remove heat from it.

Design/methodology/approach: In the paper some approaches to the design magnetorheological transformers (MRT) of dampers operating under shock loads are considered. In particular, the influence of temperature on the stability of the damper operation during long-term operation is determined. The methods are considered and the temperature stabilizing means for the MR-damper are proposed to ensure efficient control of it.

Findings: In this paper the effect of temperature on the viscosity of non-Newtonian fluids was studied and technical solutions that allowed high-effectively remove heat from the heater were proposed.

Research limitations/implications: The present studies can be applied in the development and design of magnetorheological shock absorbers, couplings and brakes.

Originality/value: The design of the magnetorheological hydromount with the use of loop heat pipes as a cooling system was proposed.