

4. ГОСТ 24705-2004 «Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры», Стандартиформ, Москва, 2005, 19 с.
5. ГОСТ 1050-88 «Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат, калиброванная сталь» Москва, 1996, 25 с
6. Ануриев, В. И. Справочник конструктора машиностроителя в трех томах. том 1, Машиностроение Москва. 2001, 920 с.
7. Детали машин: учебник для вузов / Л. А. Андриенко, Б. А. Байков, И. К. Ганулич и др.; под ред. О. . Ряховского. // Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 520 с.
8. Захаров, М. Н. Прочностная надежность оборудования. Москва / М. Н. Захаров — Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 123 с.
9. Иванов, А. С. Уточнение распределения нагрузки в резьбовом соединении по виткам резьбы путем учета их контактной жесткости. / Б. А. Байков, Н. А. Щеголев // Вестник машиностроения, 2004, № 4, с. 20–23.
10. Биргер, И. А. Расчет резьбовых соединений. / И. А. Биргер – Москва, Оборонгиз, 1959, 252с.

УДК .135:532.32

Воронович Г.К.¹, Коробко Е. В.²

**ДИНАМИКА ВИБРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С МРС
В КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯ**

1. Белорусский национальный технический университет

2. ИТМО им. А.В. Лыкова НАН РБ

Минск, Беларусь

Виброзащита актуальна для многих процессов, происходящих в механических колебательных системах, подвергаемых внешним вынужденным возмущениям. Для усиления виброзащитного эффекта в вибропреобразователе используются неньютоновские жидкости такие как магнитореологические суспензии (МРС). Они изменяют свои реологические свойства под воздействием внешнего магнитного поля. В связи с этим возникла необходимость детального исследования влияния реологических особенностей МРС на динамику и линейные арактеристики колебательной системы. В такой постановке задача поставлена впервые. Представлена математическая модель колебательной системы громкоговорителя как разновидности вибропреобразователя. Задача сформулирована для нестационарных неизотермических условий с внешней вынуждающей гармонической силой. Неизотермичность условий учитывалась с использованием принципа температурно-временной суперпозиции. Задано реологическое уравнение состояния МРС. Представлено уравнение, описывающее связь подаваемого напряжения с вызываемой при этом электромеханической силой и соответствующим смещением КС. Учтены начальные условия и особенности упругой возвращающей силы. Дан анализ влияния реологических особенностей МРС на динамику колебательной системы в зависимости от соотношения между силами, участвующими в колебательном процессе. Численные расчеты показывают убедительные преимущества для виброзащиты введения МРС в зазор громкоговорителя по сравнению с воздухом. Имеет место согласование с экспериментальными данными.

Ключевые слова: вибропреобразователь, магнитореологическая суспензия, нестационарные неизотермические условия, громкоговоритель, реология, внешняя гармоническая вынуждающая сила, динамика колебательной системы.

Исследование влияния реологических особенностей МРС на динамику КС рассматривается на примере громкоговорителя (рис. 1) как разновидности вибропреобразователя.

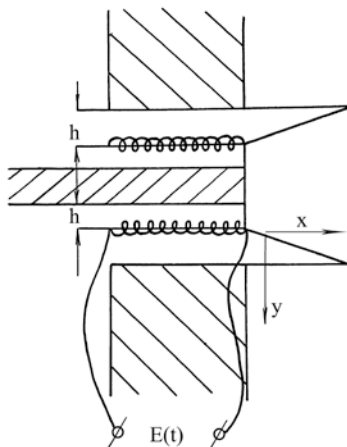


Рис. 1. Схема громкоговорителя

Одна из практических задач, решаемых в промышленности – повышение мощности подаваемого сигнала на обмотку катушки электродинамического преобразователя. За счет структурных особенностей МРС обладает повышенной по сравнению с воздухом теплопроводностью и вязкостью, что способствует более интенсивному отводу тепла с поверхности катушки. Это позволяет увеличить мощность громкоговорителя. Введение в зазор МРС улучшает амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) КС, демпфирует КС громкоговорителя в области резонанса, что делает более равномерной его частотную характеристику. Опыты показывают убедительные преимущества введения МРС в зазор КС по сравнению с воздухом и феррожидкостью [2].

С практической точки зрения с целью создания алгоритмов управления свойствами МРС важно знать, каким образом изменение реологии суспензии сказывается на установившихся характеристиках КС, на ее АЧХ и линейных свойствах. Встает задача комплексного исследования влияния введения сильно неньютоновской термочувствительной МРС на тепловые и механические характеристики преобразователя в процессе работы, изучение реодинамики МРС. В такой постановке теоретическая задача решалась впервые.

Математическая модель течения МРС. При получении описания математической модели такой КС учитывалось, что преобразование электрического сигнала в механический осуществляется в электродинамическом преобразователе индуктивного типа путем использования электродинамической силы, действующей на движущийся проводник с током в магнитном поле. На катушку громкоговорителя в радиальном магнитном поле действует электромагнитная сила, изменяющая свое направление по закону изменения тока в ее обмотке.

Математическое моделирование процессов течения МРС проводятся в предположениях:

– рассматривается движение катушки громкоговорителя с магнитным зазором заполненным МРС. Ширина зазора много меньше длины катушки и ее радиуса кривизны. Поэтому можно ограничиться рассмотрением плоского куэттовского течения;

– колебательное число Рейнольдса мало ($Re_{\omega} \ll 1$), $Re_{\omega} = \frac{\rho \omega h^2}{\eta_0}$,

где ρ – плотность жидкости, η_e – эффективная вязкость МРС, ω – круговая частота. Инерционными силами при движении катушки можно пренебречь. В этом случае касательное напряжение поперек зазора не изменяется и определяется скоростью сдвига

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{h} \frac{dX}{dt},$$

где X – смещение катушки. Связь между касательным напряжением τ и скоростью сдвига $\dot{\gamma}$ устанавливается реологическим уравнением состояния (РУС) для МРС. Движение катушки и изменение тока в цепи при заданном напряжении $E(t)$, подаваемом на обмотку катушки, описывается системой двух уравнений [2]. Учтена и сила гидродинамического сопротивления F_2 . Тогда, уравнение описывающее механику КС, имеет вид:

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + r \frac{dX}{dt} + F_2 + F_y(X) + \alpha I + 0, \dot{\gamma} = \frac{\dot{X}}{h}, \quad (1)$$

где $F_y(X)$ – упругая возвращающая сила.

Уравнение, описывающее связь подаваемого напряжения с возникающей при этом электромеханической силой и соответствующим смещением КС, имеет вид

$$RI - \alpha \frac{dX}{dt} = E(t), \quad (2)$$

где m – колеблющаяся масса, r – коэффициент механического сопротивления КС, $F_2 = \tau S$ – гидродинамическое сопротивление, S – площадь поверхности катушки громкоговорителя, соприкасающейся с МРС; $\alpha = Bl$ – коэффициент электромеханической связи; B – индукция магнитного поля в зазоре, l – длина обмотки катушки, αI – электромеханическая сила, I – ток в цепи, R – омическое сопротивление в цепи. Индуктивность катушки при низких частотах не учитывается.

Исследования показали, что при малых смещениях коэффициент жесткости K для упругой возвращающей силы зависит от смещения и имеет два предельных значения при малых и больших отклонениях [3]. Введение МРС в магнитный зазор громкоговорителя еще более усиливает проявление этого эффекта. Зная особенности этой силы $F_y(X) = F_y(-X)$, предложена формулировка, учитывающая этот факт:

$$F_y = KX = \left[K_\infty + \frac{K_0 - K_\infty}{1 + \left(\frac{X}{Q} \right)^2} \right] X, K_0 > K_\infty \quad (3)$$

При малых смещениях $|X| \ll Q$ $F_y = K_0 X$, при больших смещениях $|X| \gg Q$ $F_y = K_\infty X$. Величина Q определяется смещением катушки громкоговорителя, при котором происходит резкое изменение коэффициента жесткости (упругости) возвращающей силы. При этом, в зависимости от амплитуды колебаний, изменяется и резонансная частота КС.

Уравнения теплообмена. При длительной работе громкоговорителя изменяются его тепловой режим и характеристики течения МРС при диссипативных потерях в жидкости и тепловых потерях в электрической цепи, что приводит к разогреву катушки, МРС и магнитопровода. Рассматриваются тепловые процессы длительности значительно большей характерного времени распространения тепловой волны поперек зазора

$$t_T = \frac{h^2}{A_*},$$

где A_* – температуропроводность МРС. Поперечное распространение температуры жидкости в зазоре можно считать квазистационарным. Как правило, мощность диссипируемой энергии W_2 в жидкости значительно меньше мощности тепловыделения в электрической цепи W_3

$$\frac{\langle W_2 \rangle}{\langle W_3 \rangle} = \frac{\langle \tau S \dot{X} \rangle}{\langle I^2 R \rangle} \ll 1,$$

где $\langle \rangle$ – мощность тепловыделения за период колебаний $\frac{2\pi}{\omega}$. В силу этого (1) сформулировано без диссипативных потерь жидкости в зазоре.

Для данной задачи диссипативный разогрев жидкости создает перепад температуры в зазоре $\Delta T_{\text{диссип}} \approx \frac{(\eta_3 \dot{X}^2)}{\Lambda}$ (Λ – теплопроводность МРС), что не превышает нескольких градусов и существенно меньше разогрева из-за тепловыделения в электрической цепи громкоговорителя. Поэтому им можно пренебречь.

Распределение температуры поперек зазора представляется следующим образом:

$$T_{жс} = T + \frac{T_0 - T}{h} y,$$

где y – поперечная координата ($0 \leq y \leq h$); T , T_0 – температура жидкости и магнитопровода соответственно; T , T_0 медленно по сравнению с $\frac{h^2}{A_*}$ изменяются во времени.

Тепловой поток, отдаваемый катушкой $\hat{Q} = \frac{\Lambda(T - T_0)S}{h}$. Мощность тепловыделения в катушке $I^2 R$. Изменение во времени температуры катушки и жидкости в зазоре определяется уравнением теплового баланса:

$$\frac{dH}{dt} = I^2 R - \frac{\Lambda(T - T_0)S}{h},$$

где H – энтальпия катушки и жидкости:

$$H = \left(C_K M_K + \frac{C_{жс} M_{жс}}{2} \right) T + \frac{C_{жс} M_{жс} T_0}{2},$$

где $C_K, C_{жс}$ – теплоемкость катушки и МРС; $M_K, M_{жс}$ – их массы.

Тогда уравнение теплового баланса «катушка-магнитопровод» запишется в виде

$$\left(C_K M_K + \frac{C_{жс} M_{жс}}{2} \right) \frac{dT}{dt} + \frac{C_{жс} M_{жс}}{2} \frac{dT_0}{dt} = IR^2 - \Lambda \frac{T - T_0}{h} S, \quad (4)$$

где $\frac{T + T_0}{2}$ – средняя температура жидкости.

При работе громкоговорителя происходит медленный разогрев и магнитопровода. Характеристики этого теплового процесса зависят от конкретного вида устройства КС и значения коэффициента теплообмена на его поверхности. Ввиду линейности уравнения кондуктивного теплопереноса в магнитопроводе, медленный его разогрев можно описать уравнением теплового баланса «магнитопровод-окружающая среда» следующим образом:

$$\tilde{K} C_M M_M \frac{dT_0}{dt} = \frac{\Lambda(T - T_0)S}{h} - \alpha_* S_{нов} (T - T_\infty) \quad (5)$$

Безразмерный коэффициент \tilde{K} учитывает характер распределения температуры в магнитопроводе; α_* и $S_{нов}$ – коэффициент теплообмена и площадь теплоотдающей поверхности магнитопровода, T_∞ – температура окружающей среды. В (5) считается, что разогрев магнитопровода вызван только теплоотводом от катушки. Параметры в (5) можно найти из опытов, измеряя медленное изменение T_0 магнитопровода. Температурная зависимость сопротивления обмотки катушки громкоговорителя определяется известным соотношением

$$R = R_\infty \left(1 + \hat{\beta}(T - T_\infty) \right), \quad (6)$$

где R_∞ – омическое сопротивление при начальной температуре окружающей среды, $\hat{\beta}$ – температурный коэффициент сопротивления.

Выбор РУС МРС. Таким образом, нестационарный неизотермический процесс течения жидкости и колебаний системы описывается системой уравнений (1 – 6) с начальными условиями $X = \dot{X} = 0$ и $T = T_\infty$ при $t = 0$. Для ее замыкания необходимо иметь реологическое уравнение состояния (РУС) МРС [3].

Поскольку эффективная вязкость МРС с ростом скорости сдвига снижается до значения вязкости дисперсионной среды η_∞ , РУС МРС представляется следующим образом ($n = 0,1-0,2$):

$$\tau = \tau_1 + \tau_2,$$

$$\tau_1 = \eta_1(|\dot{\gamma}|)\dot{\gamma}, \tau_2 = \eta_\infty\dot{\gamma}, \eta_1 = \frac{\tau_*}{\dot{\gamma}_*} \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_*} \right|^{n-1} \quad (7)$$

При малых скоростях сдвига вклад второй составляющей вязкости не существен. Величина τ_* определяет касательное напряжение при скоростях сдвига $\dot{\gamma}_*$.

Принцип ТВС. Вязкость МРС меняется с изменением температуры жидкости в магнитном зазоре громкоговорителя. Ее температурная зависимость такая же, как и для несущей среды ПМС-100 [4]. Для МРС применим принцип температурно-временной суперпозиции [5], согласно которому влияние изменения температуры жидкости на касательное напряжение сводится к изменению эффективной скорости сдвига. Температурная зависимость вязкости МРС определяется соотношением

$$\tau = f[a(T)\dot{\gamma}]$$

где $a(T) = \frac{\eta_\infty(T_{жс})}{\eta(T_\infty)}$, $f(\dot{\gamma})$ – зависимость от скорости сдвига при температуре T_∞ .

Оценка роли релаксационных процессов в МРС. Громкоговорители ЧГД– 35 имеют частоты электромеханического резонанса равные 50 Гц. Для МРС время механической релаксации $\lambda = 10^{-3}$ с, что соизмеримо с периодом колебаний подвижной части громкоговорителя. В связи с этим проведена оценка влияния релаксационных процессов в МРС на установившиеся характеристики течения МРС и колебаний громкоговорителя в изотермических условиях для широкого диапазона параметров:

$$m = 7,5 \cdot 10^{-3} \div 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}, B_0 = 0,9 \text{ Тл}, l = 3 \text{ м}, R_\infty = 3 \div 9 \text{ Ом}, S = (3,6 \div 6) 10^{-3} \text{ м}^2, r = 0,001 \div 0,57 \text{ кг/с},$$

$$K_0 = 6075 \text{ Н/м}, K_\infty = 570 \text{ Н/м}, Q = 10^{-6} \cdot 10^{-3} \text{ м}, h = (0,15 \div 0,30) 10^{-3} \text{ м}, E_0 = 0,1 \div 3,5 \text{ В}, \tau_* = 200 \div 430 \text{ Па},$$

$$\dot{\gamma}_* = 450 \text{ с}^{-1}, \eta_\infty = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}, \lambda = 10^{-5} \div 10^{-2} \text{ с}.$$

Расчеты показывают, что для $\lambda \leq 10^{-3}$ с релаксационные процессы в МРС, связанные с изменением скорости сдвига, практически не влияют на АЧХ громкоговорителя и частотную характеристику скорости сдвига. Поэтому для расчетов характеристик течения МРС и колебаний громкоговорителя можно использовать данные для эффективной сдвиговой вязкости МРС при стационарном течении и задавать РУС МРС в виде степенного закона (7).

Неизотермическое течение МРС. Возможность пренебрежения релаксационными процессами в МРС и инерционными силами в жидкости ($Re_\omega < 1$) значительно упрощает расчет касательных напряжений в жидкости для колебательного куэттовского течения в неизотермических условиях [3]. В этом случае касательное напряжение для неизотермических условий совпадает с соответствующей величиной для изотермических с температурой $T_{экр}$. Значение $T_{экр}$ определяется поперечным профилем температур не-

изотермического режима. В данном случае, при линейном профиле температур и экспоненциальной зависимости вязкости от температуры она определяется соотношением

$$a(T_{экс}) = h \int_0^h \frac{dy}{a(T(y))} = \frac{\alpha_g \Theta}{\exp \alpha_g \Theta [1 - \exp(-\alpha_g \Theta)]}, \Theta = T - T_\infty,$$

где α_g – коэффициент термочувствительности МРС по вязкости.

Безразмерные параметры. В сформулированную систему дифференциальных уравнений (1-7) входят величины r, K_0, K_∞, Q отражающие особенности конструкции конкретного громкоговорителя ЧГД = 35. Для их определения использованы экспериментальные данные по измерению АЧХ громкоговорителя в изотермических условиях, когда в зазоре воздух и МРС. Расчет показал, что

$$K_0 = 838,916 \text{ Н/м}, K_\infty = 757,22 \text{ Н/м}, Q = 0,38 \cdot 10^{-3} \text{ м}, r = 0,5 \text{ кг/с}.$$

Обезразмеривание (1 – 7) проводилось следующим образом:

$$X - X_0 \bar{X}, t = t_0 \bar{t}, t_0 = \frac{1}{\omega_0},$$

где ω_0 – частота собственных колебаний системы

$$\tau = \tau_0 \bar{\tau}, \eta_\infty = \eta_0 \bar{\eta}_\infty,$$

где $X_0, t_0, \tau_0 \eta_0$ – характеристики смещения, время собственных колебаний системы, касательное напряжение и вязкость жидкости соответственно

$$I = I_0 \bar{I}, R = R_\infty \bar{R}, r = \frac{\alpha^2 \bar{r}}{R_\infty}, v = v_0 \bar{v}, X_0 = \frac{\alpha E_0}{Rm(2\pi v_0)^2}, E = E_0 \bar{E}, Ed = E_0 \bar{E} \bar{d}, \Delta T = \frac{I_0^2 R_\infty}{\left(\frac{\Lambda S}{h}\right)}$$

- масштабный температурный перепад;

$$I_0 = \frac{\alpha^2 E_0}{R_\infty^2 m 2\pi v_0}, R_\infty, v_0$$

- масштабы величин тока в цепи, сопротивления в цепи и частоты колебаний катушки громкоговорителя соответственно, $\Theta = T - T_0, \hat{\xi} = T_0 - T_\infty$ – разогрев катушки и магнитопровода, $\Theta = \Delta T \bar{\Theta}, \hat{\xi} = \Delta T \bullet \hat{\xi}$. При обезразмеривании системы дифференциальных уравнений получены следующие безразмерные комплексы:

$$A = \frac{a^2}{Rm2\pi\nu_0}, \bar{B} = \frac{S\eta_0}{2mh\pi\nu_0}, b = \frac{\frac{C_{жс}M_{жс}}{2}}{C_k M_k + \frac{C_{жс}M_{жс}}{2}}, \quad (12)$$

$$C_3 = \beta\Delta T, C_4 = \frac{1}{A}, C_5 = \frac{\Lambda S}{h\omega_0 \tilde{K} C_M M_M}, C_6 = \frac{a_* S_{нов}}{\omega_0 \tilde{K} C_M M_M}$$

Они характеризуют соотношение различных факторов, влияющих на реодинамику МРС и колебание катушки: A – коэффициент демпфирования КС, возникающий за счет электромеханических особенностей изучаемой КС, \bar{B} – определяет соотношение

сил гидродинамического сопротивления и сил инерции, $a_1 = \frac{\frac{C_{жс}M_{жс}}{2}}{C_k M_k}$ – характеризует

долю теплоемкости жидкости в общей теплоемкости колеблющейся катушки громкоговорителя; b – отношение теплоемкости жидкости (МРС) к суммарной теплоемкости жидкости и катушки; C_3 – относительное приращение электросопротивления обмотки

катушки: $a_2 = \frac{\alpha^2}{R_\infty r}$ – указывает соотношение сопротивлений, возникающих в цепи за

счет индукции и механического сопротивления КС. Значение C_5 представляет собой отношение величины теплоотвода от жидкости к величине теплоемкости магнитопровода. Параметр C_6 характеризует отношение теплоотдачи в воздух к теплоотводу от жидкости. Значение $a_3 = \frac{S\eta_0}{hr}$ – отношение гидродинамической силы сопротивления

к механической силе. В безразмерной системе присутствует параметр

$t_{менл} = \frac{C_k M_k + \frac{C_{жс}M_{жс}}{2}}{\frac{\Lambda S}{h}}$, который является характерной величиной, определяющей

тепловую инерционность всей теплопередающей системы «катушка – МРС – магнитопровод – окружающая среда». $t_0 = \frac{1}{\omega_0}$ характеризует период собственных колебаний

системы. Отношение $\frac{t_0}{t_{менл}}$ показывает во сколько раз характерное время колебаний

системы меньше характерного теплового времени (время тепловой релаксации термомеханической КС $t_{менл}$), за которое система выходит на стационарный тепловой обмен.

Для исследуемой системы вышеуказанные соотношения имеют следующие значения:

$$Re_\omega = 0,011; \quad \bar{B} = 0,334; \quad a_1 = 14; \quad a_2 = 1,7; \quad C_3 = 1,4 \cdot 10^{-3}; \quad C_5 \approx 0,1; \quad C_6 = 1; \quad a_3 = 1,76;$$

$$t_{менл} = 0,48с; \quad \frac{\langle W_z \rangle}{\langle W_{менл} \rangle} = 0,006.$$

В этом случае влиянием нагрева магнитопровода на характеристики течения МРС и КС можно пренебречь. Поэтому расчеты теплового режима проводились в дальней-

шем при условии постоянства температуры последнего, равного температуре окружающей среды: $T_0 = T_\infty$

Режимы течения. Следующие безразмерные параметры определяют режим течения МРС и характер колебаний катушки громкоговорителя (таблица 1):

$$\bar{G} = \frac{\left[r + \frac{\alpha^2}{R_\infty} + \eta_\vartheta(\dot{\gamma})S \right] X_0 \omega_0}{E_0}$$

– отношение сил демпфирования колебательной системы к вынуждающей силе;

$$\bar{A} = \frac{r}{\frac{\alpha^2}{R_\infty}}$$

– отношение сопротивлений механического и электромагнитного;

$$\frac{F_\gamma}{F_\tau} = \tilde{B} = \frac{\left(\frac{\alpha^2}{R} + r \right) X_0 \omega_0}{\frac{\eta(\dot{\gamma}_\vartheta) X_0 \omega_0 S}{h}}$$

– отношение сопротивлений электромеханического и гидродинамического;

$$\tilde{C} = \frac{\eta(\dot{\gamma}_\vartheta)}{\eta_\infty}$$

– параметр реологической нелинейности;

$$\bar{D} = \frac{\Delta T}{\Delta T_*}, \Delta T = \frac{E_d^2}{R_\infty \Lambda S}, \Delta T_* = \frac{I_0^2 R_\infty}{\Lambda S}$$

– разогрев КС за счет низко- и высокочастотных составляющих напряжения;

$$\tilde{E} = \frac{t_0}{t_{\text{тепл}}}$$

– отношение периода собственных колебаний системы ко времени ее тепловой релаксации.

Таблица 1 – Структура режимов течения МРС

<p>Реологическая нелинейность МРС</p> $\tilde{C} = \frac{\eta_1}{\eta_\infty}$	<p>Квазиньютоновские свойства $\eta_1 \ll \eta_\infty$</p> <p>Сопоставимые свойства $\eta_1 = \eta_\infty$</p> <p>Существенно неньютоновские свойства $\eta_1 \gg \eta_\infty$</p>
<p>Температурный режим КС \bar{D}</p>	<p>Квазиизотермический $\bar{D} \ll 1$</p> <p>Существенно неизотермический $\bar{D} \gg 1$</p>
<p>Соотношение времен период колебаний и тепловой релаксации</p> \tilde{E}	<p>Период собственных колебаний больше времени тепловой релаксации $\tilde{E} \gg 1$</p> <p>Период собственных колебаний не превышает времени тепловой релаксации $\tilde{E} \ll 1$</p>
<p>Соотношение сил демпфирования и вынуждающей силы \tilde{G}</p>	$\tilde{G} \ll 1$ $\tilde{G} \gg 1$
<p>Соотношение сил электромеханического и гидродинамического сопротивлений \tilde{B}</p>	$\tilde{B} \gg 1$ $\tilde{B} < 1$
<p>Соотношение сопротивлений механического и электромеханического \tilde{A}</p>	<p>Механическое превышает электромеханическое</p> $\tilde{A} < 1$ <p>Механическое соизмеримо с электромеханическим</p> $\tilde{A} = 1$ <p>Электромеханическое превышает механическое</p> $\tilde{A} \gg 1$

В таблице проведен анализ динамического состояния МРС, дана структура всевозможных режимов ее течения и динамики катушки громкоговорителя. Учтены реологические свойства МРС, температурный режим, соотношение характерных времен периода собственных колебаний системы и тепловой релаксации; соотношение сил демпфирования и вынуждающей; сил электромеханического и гидродинамического сопротивлений; сил механического и электромеханического сопротивлений. В процессе исследований не анализировались случаи, при которых силы демпфирования превосходят вынуждающую силу и когда период собственных колебаний системы превосходит время тепловой релаксации как не реализующиеся в изучаемой КС. Таблица дает наглядное представление о многообразии режимов течения МРС и динамических особенностях реализуемых в изучаемой КС. Все они были подвергнуты тщательному анализу и выявлено их влияние на установившиеся характеристики КС и течения МРС вблизи резонанса, как наиболее важной области исследования динамики КС.

В случае, когда разогрев КС осуществляется низкочастотной составляющей напряжения $\Delta T_* \gg \Delta T$ (квазиизотермический режим), при $\tilde{E} \leq 1$ динамика движения КС и течения МРС в основном определяется \tilde{B} , который, в свою очередь, существенно зависит от \tilde{C} и \tilde{A} , что и показывают расчеты. Аналогичные результаты имеют место при сильном разогреве КС, когда $\Delta T_* \ll \Delta T (\bar{D} \gg 1)$. Исследования проводились для случая, когда период собственных колебаний системы намного превосходит время ее тепловой релаксации ($\tilde{E} \gg 1$). При этом важно выделить два случая: первый – разогрев катушки происходит за счет низкочастотной составляющей подаваемого напряжения ($\bar{D} < 1$). В этом случае в том диапазоне напряжений, при которых работает реальная КС ($E_0 : 0,5 - 2,5B$) разогрев катушки незначительный (порядка = 0,50 C); второй – колебательный процесс и течение МРС происходят в квазиизотермическом режиме

($\bar{D} \ll 1$). В этом случае на динамику движения катушки и установившиеся характеристики течения МРС существенное влияние оказывает соотношение сил демпфирования КС (силы механического, электромагнитного и гидромеханического сопротивлений) и вынуждающей силы (\tilde{G}). На установившиеся характеристики амплитуды колебаний и течения МРС сказывается соотношение сил электромеханического и гидродинамического сопротивлений \tilde{B} .

В случае преимущественного влияния первой ($\tilde{B} \gg 1$), какие бы свойства не проявляла МРС (ньютоновские $\tilde{C} \ll 1$ или сильно неньютоновские $\tilde{C} \gg 1$), формирование численного значения смещения \bar{X}, \dot{X} определяется только силой электромеханического сопротивления и соотношением между ее составляющими ($\tilde{A} \ll 1, \tilde{A} = 1, \tilde{A} \gg 1$).

Для второго случая, когда преимущественное влияние оказывает сила гидродинамического сопротивления ($\tilde{B} \ll 1$), значение установившихся характеристик течения МРС и колебаний в квазиизотермических условиях определяются тем, какими свойствами обладает при этом МРС (ньютоновские, сильно неньютоновские). Они, в свою очередь, величиной амплитуды E_0 низкочастотной составляющей (скоростью сдвига).

Если разогрев катушки происходит за счет высокочастотной составляющей напряжения ($\bar{D} \gg 1$ – случай существенно неизотермический) могут измениться и соотношение сил демпфирования и вынуждающей силы \tilde{G} (при начальной температуре $\tilde{G} \leq 1$, при разогреве $\tilde{G} > 1$) и свойства, которые при этом проявляет МРС (\tilde{G}). Это объясняется не только термочувствительностью МРС и изменением в связи с этим ее эффективной вязкости, но и степенью изменения ее неньютоновских свойствах (с уменьшением эффективной вязкости растет скорость сдвига, что в свою очередь приводит к падению касательного напряжения и существенно меняет реодинамику МРС). Все эти особенности поведения КС и МРС при различных режимах движения катушки громкоговорителя показаны в результатах проведенных качественных расчетов.

Динамика разогрева катушки и МРС. В безразмерном виде сформулированная система (1–7) решалась методом Рунге-Кутты или как система жестких дифференциальных уравнений. В неизотермических условиях КС работает так, что колебания катушки происходят за счет синусоидальной составляющей подаваемого напряжения низкой частоты 50 Гц.

$$E(t) = \begin{cases} E_0 \sin 2\pi vt, & t \leq 1,5c, \\ E_0 \sin 2\pi vt + E_d \sin 2\pi \beta t, & t > 1,5c, \beta \gg v \end{cases}$$

Время выхода разогрева катушки и жидкости на установившийся режим определяется временем тепловой релаксации

$$t_{менл} = \frac{C_K M_K + \frac{C_{жс} M_{жс}}{2}}{\frac{\Lambda S}{h}}$$

Увеличение $t_{менл}$ затягивает выход разогрева поверхности катушки на установившийся тепловой режим (рис. 2).

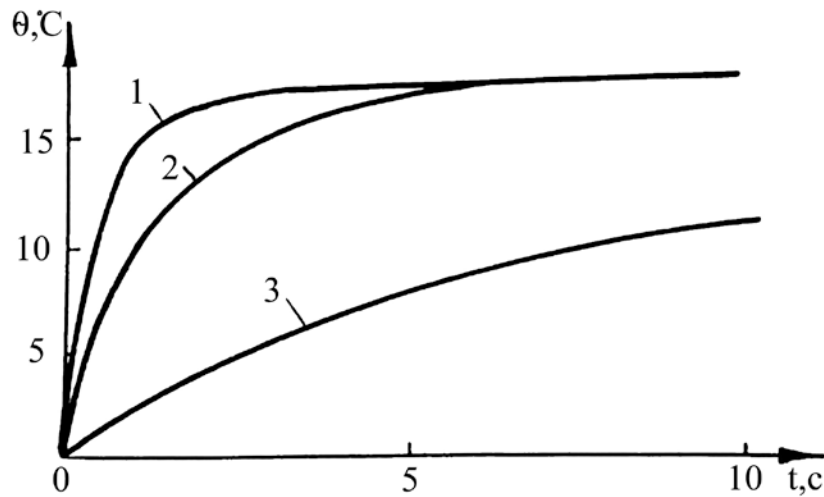


Рис. 2. Нагрев катушки при введении МРС:
 расчет (1,3) для $E_0=2,8В, E_d=2,8В, R_\infty=7,6 \text{ Ом}, t_{\text{тепл.}} \text{ с: } 1-0,43,; 3 - 8,8;$
 2 – опытные данные для условий (1)

Преимущества введения в зазор МРС по сравнению с воздухом видны на (рис. 3): за счет улучшения теплоотвода с катушки ее температура уменьшается в 4 раза.

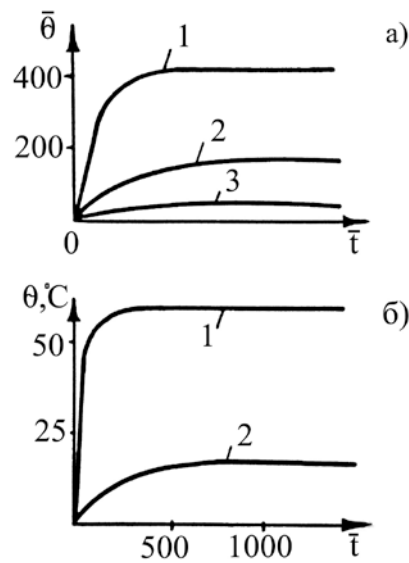


Рис. 3. Нагрев катушки
 а) в зазоре МРС $E_0=2,5В, E_d=7,5$ (1); $6,25$ (2); $2,5$ (3) В;
 б) в зазоре воздух (1) и МРС (2) при $E_0=2,5В, E_d=2,5В$

Падает и температура МРС $T_{жс} = \frac{T + T_\infty}{2}$. Характер изменения размаха колебаний катушки, когда в зазоре воздух (рис. 4), объясняется следующим образом: резкое его увеличение при подключении высокочастотой составляющей напряжения вызвано тем, что омическое сопротивление \bar{R} в силу малости безразмерного коэффициента температурного сопротивления, но достаточно большого значения второй составляющей напряжения, еще не отреагировало на разогрев. С течением времени обмотка катушки разогревается, омическое сопротивление увеличивается, электромагнитная сила, из-за

уменьшения эффективного действующего низкочастотного значения напряжения падает, что приводит к уменьшению размаха колебаний.

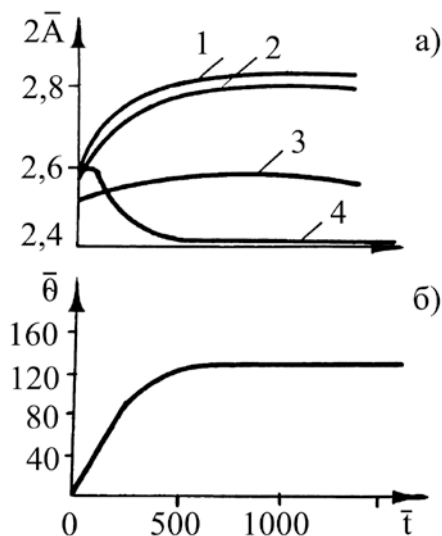


Рис. 4. Влияние E_0 и E_d на зависимость размаха колебаний $2\bar{A}$ от времени при а) $E_0=2,5В$, $E_d=12$ (1.2.4), 0 (3) В; $\alpha_b = 0,0227$ (1); 0,0205 (2, 3) K^{-1} ; 4 – воздух и температура катушки (б) при $E_d=12,5В$; $\alpha_b = 0,0205 K^{-1}$

Со стабилизацией разогрева катушки $\bar{\Theta}$ стабилизируется определяемое при этом омическое сопротивление, а, следовательно, и электромагнитная сила, что приводит к установлению постоянного значения размаха колебаний и характеристик течения МРС. Аналогичным образом ведет себя и амплитуда скорости сдвига МРС.

О влиянии термочувствительности МРС на ее вязкость. Вязкость МРС в значительной мере зависит от температуры в магнитном зазоре катушки громкоговорителя. Закономерность ее изменения с ростом температуры аналогична термочувствительности дисперсной среды ПМС-100 [2]. Анализ приведенных табличных значений вязкости позволяет представить ее в виде функции

$$\ln \eta(T_{жс}) = -\alpha_g(T_{жс} - T_{\infty}) - 2.26,$$

где α_g – коэффициент пропорциональности.

В диапазоне температуры жидкости $0 \leq T_{жс} \leq 60^\circ C$, α_g варьируется от 0,021 1 до 0,02275. Ранее α_g был предельно как коэффициент термочувствительности по вязкости. С ростом α_g амплитуда колебаний и скорость сдвига увеличиваются (рис. 4). Рост коэффициента термочувствительности вязкости α_g приводит к увеличению размаха катушки громкоговорителя при заданном законе изменения температуры МРС от времени. Так например, разогрев катушки на 500С приводит к увеличению амплитуды колебаний на 15 %...19 % для $\alpha_g = 0,0205K^{-1}$ и $\alpha_g = 0,0227K^{-1}$ соответственно. Игнорирование α_g (рис. 4) существенно искажают результаты расчета установившихся характеристик течения МРС и колебаний катушки громкоговорителя.

Показано, что прирост размаха колебаний с учетом коэффициента термочувствительности по вязкости может достигать 30 % от размаха колебаний в случае, когда по-

дается на обмотку катушки только низкочастотная составляющая напряжения E_0 (изотермический случай) (табл. 2).

Таблица 2 – Влияние коэффициента термочувствительности по вязкости на амплитуду колебаний

$E_0(B)$	$E_d(B)$	$\alpha_B\left(\frac{1}{K}\right)$	$2\bar{A}_0$	θ^0C	\bar{A}_∞	$\bar{A}_0 / \bar{A}_\infty$
2,5	7,5	0,0205	2,50	49	2,78	0,8992
2,5	7,5	0,02275	2,500	49	2,82	0,8865
2,5	0	0,0205	2,50	0,2	2,54	0,98
2,5	7,5	0	2,50	49	2,40	1,0416

Сравнение с экспериментом

Экспериментальные исследования переходных характеристик теплообмена и движения катушки громкоговорителя проводились на примере динамического громкоговорителя 4ГД-35 при ее возбуждении на резонансной частоте 40 Гц при наличии в магнитном зазоре КС воздуха, ПМС-100 и МРС. В целом экспериментальное и расчетное значение мгновенных значений амплитуды при избыточной температуре катушки динамика отличается не более, чем на 25 % от экспериментального (рис. 5) [6].

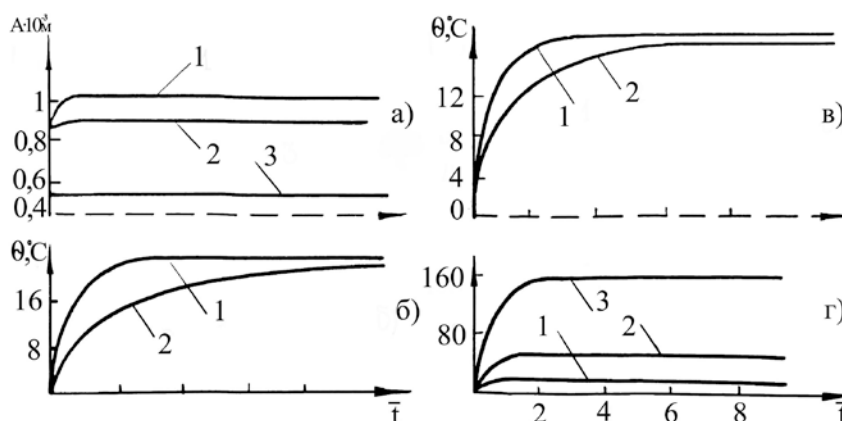


Рис. 5. Изменение характеристик колебаний и температуры катушки во времени:
 а) 1 – опытные данные; 2, 3 – расчетные кривые при $A_{r\tau}$ (2); 2,38 (3); $E_0=0,71B$, $E_d=0,55B$;
 б) 1 – расчетная кривая для $E_0=0,71B$, $E_d=0,55B$; 2 – опытные данные;
 в) 1 – расчетная кривая для $E_0=2,83B$, $E_d=2,81B$, $R_\infty=7,6 \text{ Ом}$; 2 – опытные данные;
 г) $E_0=2,5B$, $E_d=6,25B$ 14,5 (2); 25(3) В

Изменение механических параметров КС не оказывает влияния на разогрев катушки и жидкости при заданной выделяемой мощности. Это логично, так как динамика разогрева катушки громкоговорителя и МРС определяются в основном доминирующими физическими свойствами теплоносителя в магнитном поле.

Роль реологии МРС. Анализ результатов расчета АЧХ катушки нромкоговорителя и характеристик течения МРС в нестационарном неизотермичесом режиме показывает, что численное значение этих величин существенно зависит от соотношения силы механического сопротивления КС и гидродинамического

$$A_{r\tau} = \frac{F_r}{F_\tau} = \frac{rh}{S\eta(\dot{\gamma}_\tau)}$$

отношения первой и второй составляющих вязкости (табл. 3). Для ньютоновской жидкости при начальной температуре нагрева соотношение сил не зависит от величины по-

даваемого на обмотку катушки громкоговорителя. Если $A_{r\tau} \gg 1$ при начальной температуре разогрева, то преимущественное влияние на установившиеся характеристики течения МРС и КС оказывает сила механического сопротивления системы для всего диапазона температур. В этом случае амплитуда скорости сдвига и колебаний за счет термочувствительности жидкости не растет. Если при начальной температуре сила гидродинамического сопротивления превалирует, то на рассчитываемые характеристики она и оказывает решающее значение. При этом существует такое критическое значение температуры жидкости T_* , когда $F_r / F_\tau = 1$. При температурах $T_{жс} < T_*$ наблюдается рост амплитуды колебаний и скорости сдвига за счет падения эффективной вязкости жидкости. Касательное напряжение падает. Если начальная температура жидкости выше критической $T_{жс} > T_*$ и $A_{r\tau} = \frac{F_r}{F_\tau} \gg 1$, то амплитуда колебаний и скорости сдвига

не будут расти под действием нагрева из-за преимущественного влияния силы механического сопротивления системы. В отличие от ньютоновской жидкости для неньютоновской (МРС) величина соотношения сил механического и гидродинамического сопротивлений КС $A_{r\tau}$ при начальной температуре нагрева зависит от электрического напряжения низкочастотной составляющей E_0 . В частности, малые значения амплитуды низкочастотной составляющей колебаний могут быть обусловлены превалированием силы гидродинамического сопротивления системы $A_{r\tau} \ll 1$ и больших значениях E_0 в результате роста скорости сдвига, а следовательно, падения эффективной вязкости жидкости и уменьшения силы гидродинамического сопротивления при начальной температуре нагрева. Соотношение сил механического и гидродинамического сопротивлений при этом изменится $A_{r\tau} > 1$. Наблюдается превалирующее влияние силы механического сопротивления, которая и определяет при этом рассчитываемые характеристики. В случае, когда при начальной температуре в соотношении сил механического и гидродинамического сопротивлений превалирует последнее, разогрев катушки ЭДГ приведет к нагреву жидкости. Это в свою очередь приводит к падению ее эффективной вязкости и, следовательно, к изменению соотношения с $A_{r\tau} \ll 1$ на $A_{r\tau} \gg 1$.

Соотношение неньютоновской и ньютоновской составляющих вязкости. Второй важной характеристикой для неньютоновской жидкости (МРС) является соотношение между первой и второй составляющими эффективной вязкости жидкости $\frac{\eta_1(\dot{\gamma})}{\eta_\infty}$ (табл. 3).

Таблица 3 – Поведение МРС в зависимости от вклада каждой из составляющих вязкости

$\alpha_B \left(\frac{1}{K} \right)$	$\frac{F_r}{F_\tau}$	$\frac{\eta_1}{\eta_\infty}$	$2\bar{A}_0$	$\theta^\circ C$	$\frac{F_r}{F_\tau}$	$\frac{\eta_1}{\eta_\infty}$	$2\bar{A}_\infty$	$\bar{A}_0 / \bar{A}_\infty$
$2,41 \cdot 10^{-2}$	0,04	3,75	2,144	2,7	0,0116	7,54	2,362	0,9077
$2,41 \cdot 10^{-2}$	0,1918	0	3,695	2,7	0,1982	0	4,271	0,865
$2,41 \cdot 10^{-2}$	0,0959	1	3,308	2,7	0,07762	1,03	3,813	0,867
$2,41 \cdot 10^{-2}$	57,54	1	0,636	2,7	58,56	1,03	0,636	1

Для малых значений амплитуды низкочастотной составляющей напряжения E_0 (малых скоростей сдвига), когда $\frac{\eta_1(\dot{\gamma})}{\eta_\infty} \geq 1$, основной вклад в эффективную вязкость вносит первая составляющая вязкости. Течение жидкости и колебания катушки проис-

ходят в области влияния выраженных неньютоновских свойств среды. Для больших значения амплитуды низкочастотной составляющей напряжения (больших скоростей сдвига), когда $\frac{\eta_1(\dot{\gamma})}{\eta_\infty} \leq 1$ основной вклад в эффективную вязкость МРС вносит вторая составляющая. В этом случае эффективная вязкость жидкости $\eta(\dot{\gamma}_s)$ определяется вязкостью дисперсионной основы (полиметилсилоксановая жидкость ПМС-100). Тогда неньютоновская жидкость (МРС) будет вести себя как ньютоновская с эффективной вязкости близкой к η_∞ . Соотношение между первой и второй составляющей вязкости зависит от температуры жидкости $T_{жс}$ и скорости сдвига:

$$\frac{\eta_1}{\eta_\infty} = \frac{\tau^*}{\dot{\gamma}^n \eta_\infty [a(T)|\dot{\gamma}|]^{1-n}}, a(T) = \frac{\eta(T_{жс})}{\eta(T_\infty)} = a\Theta(e^{a\Theta} - 1)$$

Рассмотрим две важнейшие ситуации: когда во всем диапазоне температур реализуются два случая: первый – сила гидродинамического сопротивления МРС в магнитном поле превалирует $A_{r\tau} \leq 1$, и первая составляющая эффективной вязкости преобладает над второй $\frac{\eta_1(\dot{\gamma})}{\eta_\infty} \geq 1$; второй – соотношение сил прежнее, но вторая составляющая

эффективной вязкости преобладает над первой $\frac{\eta_1(\dot{\gamma})}{\eta_\infty} \leq 1$.

В первом случае характер параметров характеристик течения МРС и амплитуды колебаний катушки из-за разогрева жидкости (катушки) существенно отличается от второго. Во втором случае происходит увеличение амплитуды колебаний и скорости сдвига после выхода на стационарный режим колебаний только из-за температурного изменения вязкости, а в первом рост амплитуды колебаний и скорости сдвига обусловлен еще и значительным падением вязкости с ростом скорости сдвига. Если $A_{r\tau} \leq 1$ и $\frac{\eta_1(\dot{\gamma})}{\eta_\infty} \geq 1$ для всего диапазона температур, то на величину установившихся характеристик течения МРС, амплитуду колебаний решающее влияние оказывает первая составляющая эффективной вязкости. В случае, когда $A_{r\tau} \leq 1$ и $\frac{\eta_1(\dot{\gamma})}{\eta_\infty} \leq 1$ на исследуемые ха-

рактеристики течения МРС и колебаний катушки громкоговорителя решающее влияние оказывает вторая составляющая эффективной вязкости и жидкость ведет как ньютоновская.

Влияние разогрева МРС. В зависимости от конкретного режима работы громкоговорителя при разогреве возможно изменение значения соотношения между первой составляющей эффективной вязкости $\frac{\eta_1(\dot{\gamma})}{\eta_\infty}$. Оно может, в частности, стать меньше еди-

ницы и произойдет переход МРС к ньютоновскому поведению с вязкостью близкой к вязкости дисперсной среды. Возможен обратный переход. Кроме того, в силу уменьшения эффективной вязкости при нагреве может измениться и соотношение параметров F_r и F_τ : $A_{r\tau} > 1$ и решающую роль на величину амплитуды колебаний и скорости сдвига будет оказывать сила механического сопротивления системы. Если для начальной температуры $A_{r\tau} \gg 1$, то для любого соотношения первой и второй составляющих

эффективной вязкости $\frac{\eta_1(\dot{\gamma})}{\eta_\infty}$ в неньютоновской жидкости преимущественное влияние

на формирование характеристик течения МРС и амплитуды колебаний оказывает сила механического сопротивления системы. В этом случае амплитуда колебаний и скорости сдвига МРС не увеличиваются за счет термочувствительности МРС и изменения ее вязкости в силу ослабления роли электромеханической силы, вызванной увеличением омического сопротивления за счет разогрева. При соизмеримом соотношении сил $A_{r\tau} \approx 1$ во всем диапазоне температурного разогрева рост амплитуды колебаний катушки и скорости сдвига. Так расчеты показывают, что при $A_{r\tau} \approx 0,04; E_0 = 0,25B, Ed = 15B$ разогрев катушки до 60°C , а амплитуда колебаний уменьшается на 12 %. При $A_{r\tau} = 0,04; E_0 = 0,25B, Ed = 15B$ разогрев катушки до 60°C увеличивает амплитуду колебаний на 40 % при $\frac{\eta_1(\dot{\gamma})}{\eta_\infty} = 3,75$ и на 6 % при $A_{r\tau} = 0,2$

и $\frac{\eta_1}{\eta_\infty} \ll 1$. Значения параметров приведены при начальной температуре.

Таким образом, при нестационарном конвективном теплообмене реодинамика МРС и параметры работы катушки громкоговорителя существенно зависят и от магнито-реологических характеристик используемой МРС и от параметров теплового режима. Численный анализ показал, что:

Коэффициент механического сопротивления КС и параметры возвращающей силы могут оказывать существенное влияние на амплитудно-частотную характеристику КС и характеристики течения МРС как в изотермическом, так и в нестационарном неизотермическом режиме; коэффициент механического сопротивления – величина неоднозначная и зависит от типа конструкции громкоговорителя и его индивидуальных особенностей.

В стационарном тепловом режиме МРС снижает температуру катушки пропорционально коэффициенту теплопроводности МРС. В нестационарном режиме введение МРС уменьшает тепловую постоянную времени переходного процесса за счет увеличения коэффициента теплопроводности.

Варьирование реологических параметров МРС существенно меняет размах подвижной системы громкоговорителя и амплитуды скорости сдвига уже в изометрическом режиме его работы. В силу термочувствительности жидкости (МРС) изменение ее температуры (катушки громкоговорителя), вызванное варьированием подаваемой на обмотку катушки высокочастотной составляющей электрического напряжения, может при прочих равных условиях, увеличить размах катушки (КС) и амплитуду скорости сдвига до 30%.

Существенное влияние на реодинамику МРС и динамику катушки громкоговорителя оказывает соотношение сил механического и гидродинамического сопротивлений. При преимущественном влиянии последней на величину амплитуды колебаний и установившиеся характеристики течения МРС оказывают свойства жидкости, проявляемые в конкретном диапазоне скоростей. Они могут быть сильно неньютоновские и близки к ньютоновским. Реологические особенности в значительной мере влияют на создаваемую при течении гидродинамическую силу сопротивления сдвигу, определяющую в этом случае эффективность КС.

Сравнение расчетных параметров с результатами экспериментов позволило сделать вывод о том, что предложенная математическая модель описания реодинамики МРС и термомеханических процессов приемлемо с точностью до 40 % описывает течение жидкости и колебаний катушки громкоговорителя выбранной конструкции.

Использование МРС в качестве демпфера влечет за собой распределение энергии колебания по частотам кратным частоте собственных колебаний системы. Если воздействие нелинейности механической возвращающей силы проявляется только в областях смещений соизмеримых с Q , то воздействие нелинейности силы гидродинамического сопротивления проявляется во всем диапазоне скоростей сдвига и более существенно там, где неньютоновские свойства жидкости максимальны, т.е. при больших значениях эффективной вязкости МРС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reizina, C. M. Dynamics of vibrotesting system when using controlled damping fluids with hereditary factor. / C. M. Reizina, A. Bubulis, E. V. Korobko, G. K. Voronovich // JVE International Ltd. Vibroengineering PROCEDIA. October 2014. Volum 3. ISSN 2345 – 0533.
2. Шульман, З. П. Магнитореологический эффект / З. П. Шульман, В. И. Кордонский — Мн.: техника, 1982. – 85с.
3. Варгафтин, И. В. Теплофизические свойства веществ: справочник. –Госэнергоиздат, 1959. – 369 с.
4. Сапожков, Н. А. Электроакустика. – М.: Связь. 1978. – 272 с.
5. Шульман, З. П. Нестационарные процессы конвективного переноса в наследственных средах. / З. П. Шульман, Б. М. Хусид — Мн.: Наука и техника, 1983. – 256 с.
6. Кордонский, В. И. Теплообмен звуковой катушки динамического громкоговорителя с магнитным зазором заполненным МРС / В. И. Кордонский, В. И. Кузьмин, К. И. Щекинова — Магнитная гидродинамика, 1984. №2. – С.127–132.

УДК 539.2:669.(6-8)

Гольцев М.В. ¹, Белая О.Н. ¹, Неумержицкая Е.Ю. ², Шепелевич В.Г. ³

МИКРОСТРУКТУРА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА $In_{44}Sn_{53}Zn_3$

1. Белорусский государственный медицинский университет

2. Белорусский национальный технический университет

3. Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

Фольги сплава $In_{44}Sn_{53}Zn_3$, полученные высокоскоростным затвердеванием, состоят из β - и γ -фаз и дисперсных частиц цинка, размер которых не превышает 1 мкм. Фольги имеют микрокристаллическую структуру и текстуру (101) β -фазы и (0001) γ -фазы. Для фольг исследуемого сплава образование текстуры особенно важно из-за того, что β -фаза имеет тетрагональную кристаллическую решетку, а кристаллическая решетка γ -фазы и цинка является простой гексагональной.

В связи с ограничением применения в электронной промышленности свинца, из-за его высокой токсичности, в настоящее время широко изучаются сплавы, в которых свинец заменяется висмутом, индием, цинком [1-3]. Однако из-за высокой стоимости указанных компонентов по сравнению со стоимостью свинца целесообразно, при изготовлении легкоплавких сплавов, применять энерго- и ресурсосберегающие технологии. К таким технологиям относится, например, высокоскоростное затвердевание [4-6], которое позволяет создать микроструктуру и обеспечить механические свойства сплава, недостижимые при использовании традиционных технологий получения и обработки сплавов [5]. В работе исследована микроструктура быстрозатвердевших фольг сплава