

УДК 534.8:537.84

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ

А. Н. Виноградов

(кафедра физической химии)

В работе получены выражения для скорости и коэффициента поглощения ультразвука в полидисперсных магнитных жидкостях. Приведены результаты обработки акустических спектров магнитной жидкости на основе додекана, измеренных в диапазоне частот 12 – 2000 МГц. Распределение частиц дисперсной фазы по размерам для исследуемой жидкости описывается функцией логарифмически нормального распределения. Определены основные характеристики этого распределения и концентрация частиц.

Для более широкого и эффективного применения магнитных жидкостей (МЖ) в различных областях науки и техники, а также для создания новых типов жидкостей с заданными свойствами и повышения их стабильности возникает необходимость в создании методов определения и контроля их физико-химических свойств. Свойства МЖ существенно зависят от числа, размеров и формы магнитных частиц.

По данным электронно-микроскопических исследований [1, 2] частиц магнетита, полученных химическим путем, отклонения формы частиц от сферической носят случайный характер. Поэтому при анализе влияния структуры МЖ на ее макроскопические свойства можно считать все частицы сферическими. Известно [2–5], что магнитное поле приводит к образованию агрегатов в магнитной жидкости, изменению их размеров и формы. При выключении магнитного поля агрегаты принимают сферическую форму.

В этой работе предлагается метод определения концентрации и размеров частиц дисперсной фазы из анализа экспериментальных данных по распространению ультразвука в МЖ. Система уравнений, описывающая распространение слабых возмущений в монодисперсной магнитной жидкости, приведена в работе [6]. Частицы дисперсной фазы рассматриваются как агрегаты, состоящие из магнитных частиц и поверхностно-активного вещества (ПАВ). В простейшем случае агрегат представляет собой магнитную частицу, покрытую стабилизирующей оболочкой ПАВ. Считается, что объемная концентрация агрегатов $\Gamma \ll 1$ и они не взаимодействуют друг с другом. Средняя плотность ρ_a агрегатов определяется через плотности магнитных частиц ρ_m и ПАВ ρ_s и их объемные концентрации Γ_m и Γ_{sm} следующим образом:

$$\Gamma \rho_a = \Gamma_m \rho_m + \Gamma_{sm} \rho_s; \quad \Gamma = \Gamma_m + \Gamma_{sm}. \quad (1)$$

Дисперсионное уравнение относительно мнимой α и действительной k_r частей волнового вектора k ($k = k_r + j\alpha$, $\alpha \ll k_r$) с учетом вязкости дисперсионной жидкости приведено в работе [7]. Из дисперсионного уравнения можно получить выражения для скорости распространения $V = \omega / k_r$ и декремента затухания $\delta = \alpha / k_r = \alpha \lambda / 2\pi$ ультразвука в магнитной жидкости (α и λ – коэффициент поглощения и длина волны звука в МЖ; $\omega = 2\pi f$, f – частота генерируемых колебаний). При $\omega\tau < 1$, $\omega\tau_v \ll 1$, $\Gamma\omega\tau \sim \omega\tau_v$ формулы для V и δ с точностью до слагаемых, пропорциональных Γ , $(\omega\tau)^{1/2}$, $\omega\tau$, $(\omega\tau)^{3/2}$ и $\omega\tau_v$, записываются следующим образом:

$$V^2 = V_0^2 \left(1 + m\omega\tau \frac{Q-1}{Q^2+W} \right); \quad (2)$$

$$\delta = \frac{1}{2} m\omega\tau \frac{Q}{Q^2+W} + \frac{1}{2} m\omega\tau \frac{Sb\omega\tau_v}{Q^2+W} + \frac{1}{2} \omega\tau_v;$$

$$m = \Gamma \frac{(\rho_a - \rho_f)^2}{\rho_a \rho_f}; \quad S = \frac{3}{2} \sqrt{\omega\tau L} + \frac{1}{2} (L+2)\omega\tau;$$

$$Q = 1 + \frac{3}{2} \sqrt{\omega\tau L}; \quad W = \frac{9}{4} \omega\tau L + \frac{3}{2} (L+2)\omega\tau \sqrt{\omega\tau L};$$

$$L = \frac{\rho}{(1-\Gamma)\rho_a}; \quad b = \frac{\rho_a^2}{(1-\Gamma)(\rho_a - \rho_f)^2};$$

$$\tau = \frac{2}{9} \frac{R^2}{\eta_f} \rho_{eff};$$

$$\rho_{eff} = (1-\Gamma) \frac{\rho_a \rho_f}{\rho} ; \tau_v = \left(\frac{4}{3} \eta_f + \zeta_f \right) \frac{1}{\rho V^2} .$$

Здесь τ – характерное время обмена импульсами между фазами; R – радиус агрегатов; ρ и ρ_f – плотность МЖ и дисперсионной жидкости; η_f и ζ_f – первый и второй коэффициенты вязкости дисперсионной среды; V_f – скорость ультразвука в дисперсионной жидкости; V_0 – равновесная скорость ультразвука в МЖ, когда параметр $\omega\tau \rightarrow 0$.

Отметим, что уравнения (2) для скорости и декремента затухания ультразвука в МЖ отличаются от соответствующих уравнений, приведенных в работе [7], так как они получены в более точном приближении.

Рассмотрим МЖ, в которой содержится k сортов агрегатов сферической формы с радиусами

$$R_1 \leq R_2 \leq \dots R_i \dots \leq R_k .$$

Объем, занимаемый i -м сортом агрегатов в единице объема смеси, обозначим через Γ_i :

$$\sum_{i=1}^k \Gamma_i = \Gamma .$$

Объемная концентрация дисперсионной фазы равна $1 - \Gamma$. Предположим, что средняя плотность ρ_a агрегатов не зависит от их размеров и определяется по соотношениям (1). Если $\Gamma \ll 1$ и агрегаты не взаимодействуют друг с другом, тогда вклад в коэффициент поглощения ультразвука каждой дисперсной фазы пропорционален ее объемному содержанию Γ_i в смеси и параметру $\omega\tau_i$, зависящему от размера агрегата.

Уравнения для скорости и коэффициента поглощения (величины α / f^2) ультразвука в полидисперсной МЖ могут быть записаны в следующем виде:

$$V^2 = V_0^2 \left(1 + K f \sum_{i=1}^k \Gamma_i R_i^2 \frac{Q_i - 1}{Q_i^2 + W_i} \right) ; \quad (3)$$

$$\frac{\alpha}{f^2} = \frac{\pi}{V} K \sum_{i=1}^k \Gamma_i R_i^2 \frac{Q_i + S_i q_3 \tau_v f}{Q_i^2 + W_i} + \frac{2\pi}{V} \tau_v ;$$

$$K = \frac{4\pi(1-\Gamma)(\rho_a - \rho_f)^2}{9\rho\eta_f} ; Q_i = 1 + \sqrt{q_1 R_i^2 f} ;$$

$$S_i = \sqrt{q_1 R_i^2 f + \frac{2}{9} q_1 R_i^2 f + q_2 R_i^2 f} ;$$

$$W_i = q_1 R_i^2 f + \frac{4}{9} \sqrt{(q_1 R_i^2 f)^3 + 2q_2 R_i^2 f \sqrt{q_1 R_i^2 f}} ;$$

$$q_1 = \frac{\pi\rho_f}{\eta_f} ; q_2 = \frac{4\pi(1-\Gamma)\rho_a \rho_f}{9\rho\eta_f} ;$$

$$q_3 = \frac{4\pi\rho_a^2}{(1-\Gamma)(\rho_a - \rho_f)^2} .$$

Пусть распределение объемной концентрации агрегатов по размерам в МЖ от R_{\min} до R_{\max} описывается функцией $\gamma(R)$. Тогда объем агрегатов в единице объема смеси Γ равен

$$\Gamma = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \gamma(R) dR .$$

Функция $p(R) = \gamma(R) / \Gamma$ – плотность распределения объемной концентрации агрегатов по размерам.

Переходя в формулах (3) для V и α / f^2 к пределу при $k \rightarrow \infty$ и заменяя суммирование интегрированием, получим:

$$V^2 = V_0^2 \left(1 + K f \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} R^2 p(R) \frac{Q(R, f) - 1}{Q(R, f)^2 + W(R, f)} dR \right) ; \quad (4)$$

$$\frac{\alpha}{f^2} = \frac{\pi}{V} K \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} R^2 p(R) \frac{Q(R, f) + S(R, f) q_3 \tau_v f}{Q(R, f)^2 + W(R, f)} dR +$$

$$+ \frac{2\pi}{V} \tau_v . \quad (5)$$

Предположим, что распределение объемной концентрации агрегатов по размерам аппроксимируется функцией логарифмически нормального распределения, плотность $p(R)$ которого задается формулой

$$p(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma R}} \exp \left[-\frac{(\ln R - m)^2}{2\sigma^2} \right] , \quad R > 0 . \quad (6)$$

Здесь m и σ – параметры распределения, которые

Основные характеристики магнитной жидкости на основе додекана

$T, ^\circ\text{C}$	$\Gamma, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\rho_a, \text{кг/м}^3$	$\rho_f, \text{кг/м}^3$	$\eta_f, \text{сП}$	$V_0, \text{м/с}$	$-m$	σ	$s_\alpha, \%$	$s_v, \%$	$M \cdot 10^9, \text{м}$	$D \cdot 10^9, \text{м}$	$\mu \cdot 10^9, \text{м}$	$N \cdot 10^{-24}, \text{м}^{-1}$
0	13.3	1137.3	3600	763.3	2.264	1187	18.800	1.027	5.9	0.43	11.60	15.86	2.38	3.90
20	12.6	1118.2	3700	748.8	1.492	1125	19.000	1.000	4.7	0.25	9.24	12.11	2.06	4.31
40	11.8	1099.0	3800	734.2	1.064	1066	19.119	0.982	7.4	0.44	8.06	10.26	1.90	4.78
60	10.9	1079.9	4000	719.4	0.803	1003	19.240	0.959	7.6	0.56	6.98	8.57	1.76	5.18

могут принимать значения $-\infty \leq m \leq \infty$; $\sigma > 0$. Математическое ожидание M , дисперсия D и мода μ величины R равны: $M = \exp(m + 0.5\sigma^2)$; $D = \exp(2m + \sigma^2)(\exp\sigma^2 - 1)$; $\mu = \exp(m - \sigma^2)$.

Функция распределения агрегатов по размерам записывается следующим образом:

$$n(R) = \frac{3\Gamma}{4p} p(R) R^{-3}.$$

Число агрегатов N в единице объема смеси, радиус которых заключен в пределах от R_{\min} до R_{\max} , равно

$$N = \frac{3\Gamma}{4p} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} p(R) R^{-3} dR.$$

Для примера используем полученные в этой работе уравнения (4), (5) и (7) для определения параметров МЖ на основе додекана из акустических спектров [8], измеренных в диапазоне частот 12 - 2000 МГц (эксперимент 2). Основные характеристики этой жидкости, необходимые для обработки акустических спектров, приведены в таблице. Численное интегрирование уравнений (4), (5) и (7) проводилось от $R_{\min} = 5 \cdot 10^{-10}$ м до $R_{\max} = 1 \cdot 10^{-6}$ м. Найденные значения параметров функции распределения m и σ , среднеквадратичные отклонения экспериментальных точек от расчетных для скорости s_α и коэффициента поглощения s_v звука приведены в таблице. В ней приведены также равновесное значение скорости ультразвука V_0 в магнитной жидкости, математическое

ожидание M , дисперсия D и мода μ величины R и число частиц N дисперсной фазы в единице объема смеси. На рис. 1, 2 и 3 представлены соответственно частотные зависимости скорости V и коэффициента поглощения (величины α/f^2) ультразвука и функция плотности распределения объемной концентрации частиц дисперсной фазы $p(R)$ для исследуемой магнитной жидкости. Из таблицы и рис. 3 видно, что с ростом температуры значения M , D и μ уменьшаются, а число агрегатов N увеличивается. Это может свидетельствовать о том, что с ростом температуры происходит разрушение крупных агрегатов на более мелкие.

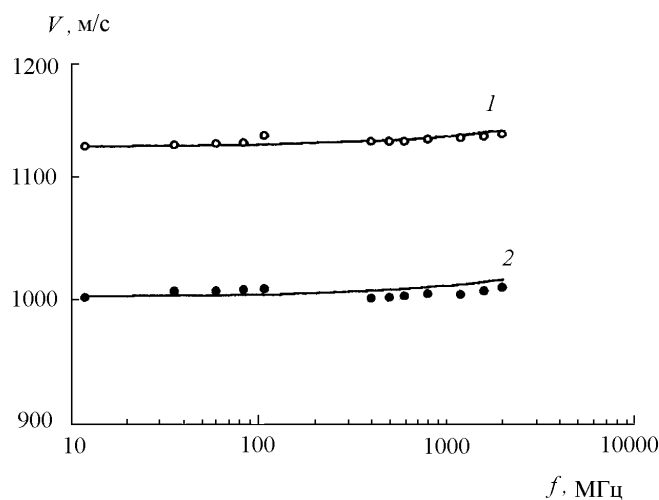


Рис. 1. Зависимость скорости ультразвука V от частоты f для МЖ на основе додекана для $T, ^\circ\text{C}$: 1 – 20, 2 – 60 (сплошные кривые рассчитаны по (4), точки соответствуют экспериментальным данным)

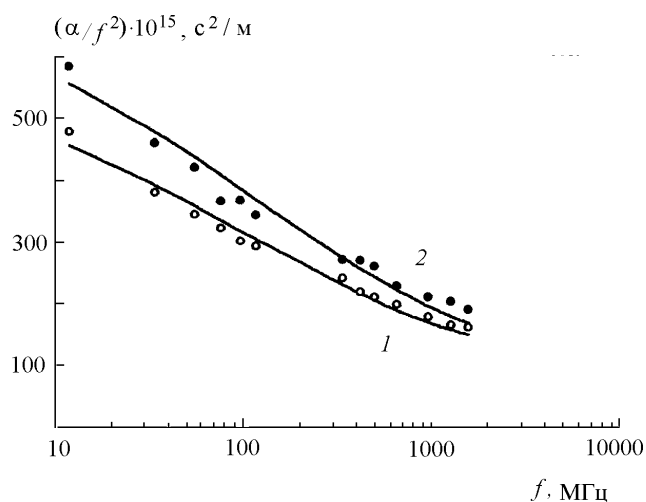


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения ультразвука (α/f^2) от частоты f для МЖ на основе додекана для $T, ^\circ\text{C}$: 1 – 20, 2 – 60 (сплошные кривые рассчитаны по (5), точки соответствуют экспериментальным данным)

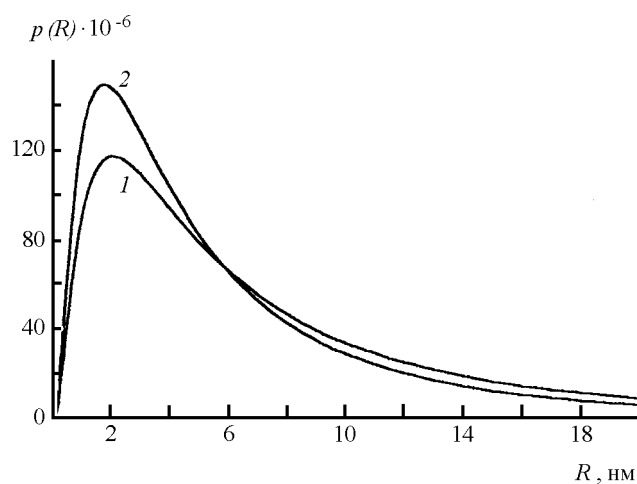


Рис. 3. Плотность распределения $p(R)$ объемной концентрации частиц дисперсной фазы по размерам для МЖ на основе додекана, рассчитанная по (6) для $T, ^\circ\text{C}$: 1 – 20, 2 – 60

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фертман В.Е. Магнитные жидкости. Минск, 1988.
2. Peterson E.A., Krueger D.A. // J. Colloid. Interf. Sci. 1977. **62**. P. 24.
3. Krueger D.A. // IEEE Transaction on Magnetics. 1980. **16**. P. 251.
4. Bacri J.C., Salin D., Massart R. // J. Phys. Lett. 1982. **6**. P. L179.
5. Bacri J.C., Salin D. // J. Phys. Lett. 1982. **43**. P. L649.
6. Гогосов В.В., Мартынов С.И., Цуриков С.Н., Шапошникова Г.А. // Магнит. гидродинамика. 1987. №2. С. 19.
7. Виноградов А.Н., Гогосов В.В., Усанов А.А., Цуриков С.Н., Шапошникова Г.А. // Магнит. гидродинамика. 1989. №4. С. 29.
8. Виноградов А.Н., Гогосов В.В., Никольский Г.С., Усанов А.А., Цуриков С.Н. // Магнит. гидродинамика. 1992. №2. С. 19.

Поступила в редакцию 10.04.97