

В.М. Полунин, Г.В. Карпова, В.В. Коварда

ОБ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЯЗКОСТИ И ПОНДЕРОМОТОРНОЙ УПРУГОСТИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

*Курский государственный технический университет,
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 95, e-mail: polunin_vm1@yandex.ru*

В большинстве устройств магнитный коллоид служит наполнителем межполюсных зазоров или оболочек, размещенных в межполюсной области частично заполненных воздухом. Удерживаемая неоднородным магнитным полем капля МЖ, подпружиненная изолированной газовой полостью, способна совершать резонансные колебания, которые в свою очередь могут существенно повлиять на технические характеристики устройств. Упруго-диссипативные свойства такой колебательной системы определяются прежде всего неньютоновским характером сдвиговой вязкости реальных магнитных коллоидов, а также особенностями протекания процессов межфазного теплообмена.

Между тем особенности реологии МЖ являются следствием структурных перестроек частиц дисперсной фазы: образование квазисферических агрегатов, цепей, капель с высокой концентрацией феррофазы.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями, проведенными Mc J.P. Taque, W.F. Hall, Е.Е. Бибином, М.М. Майоровым, А.Ф. Пшеничниковым, В.А. Налетовой, Ю.Д. Варламовым, А.Б. Каплуном, М.И. Шлиомисом, С.И. Мартыновым, показано, что магнитные коллоиды характеризуются дополнительной структурной вязкостью. Однако традиционные методы исследования реологических свойств неньютоновских жидкостей, основанные на использовании капиллярных и ротационных вискозиметров, измерении времени падения тел различной формы в жидкости, характеризуются разбросом экспериментальных данных, обусловленным существованием «масштабного эффекта» (зависимостью результатов от соотношения линейных размеров агрегатов и диаметра капилляра (ширина щели)).

С целью вычленения вкладов в диссипацию колебательной энергии механизмов вязкого трения и межфазного теплообмена была создана экспериментальная установка и поставлен эксперимент. Схематичное изображение экспериментальной установки приведено на рис. 1.

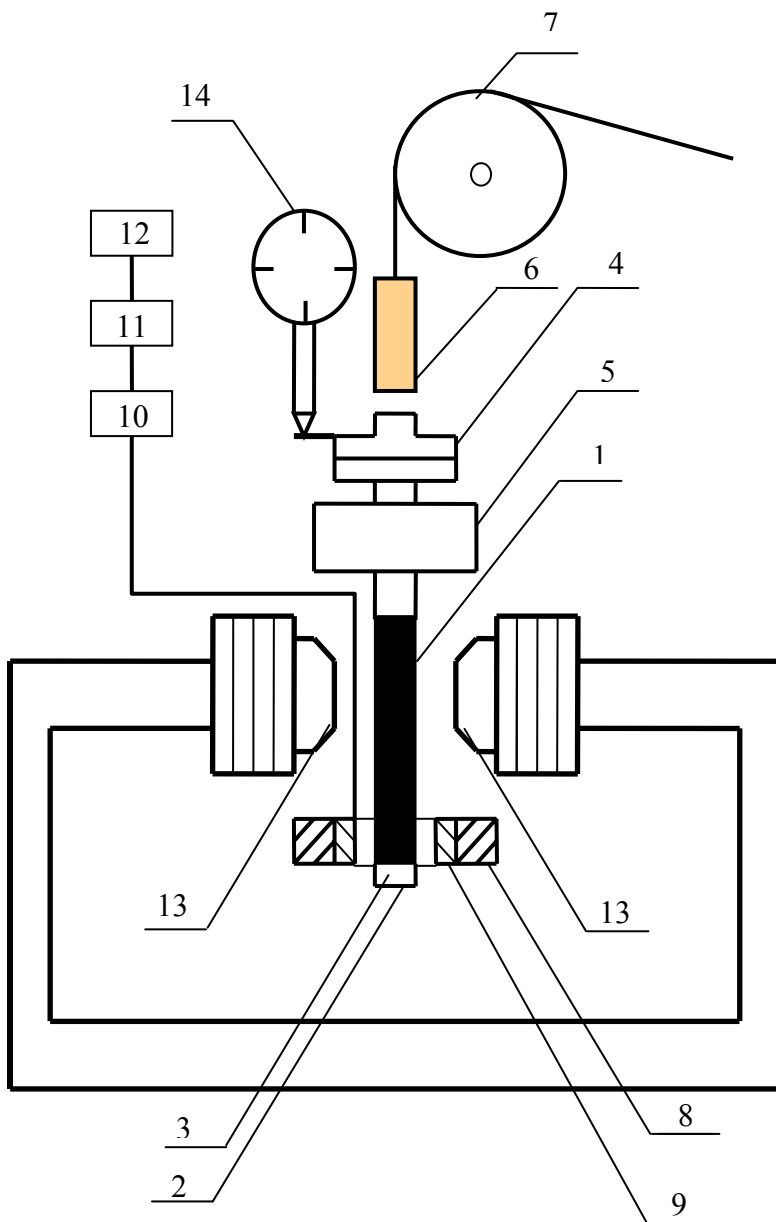


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

для последующей обработки и анализа. Поперечное к гидродинамическому потоку магнитное поле создается между полюсами 13 электромагнита. Перед ударом держатель трубки 4 поднят на высоту Δ , фиксируемую с помощью индикатора 14.

Измерения времени и амплитуды колебания выполняются непосредственно с осциллограммы на экране монитора при помощи программы Corel DRAW. Опытным тестированием показано, что погрешность измерения частоты колебаний не превышает 5% и, что при вероятности 0,95 доверительный интервал измерения коэффициента затухания колебаний в составляет 9–10 %.

В части опытов МЖ-столбик удерживается поперечным магнитным полем, которое создается полюсами электромагнита. В данном случае ин-

МЖ 1 частично заполняет стеклянную трубку 2 диаметром $d = 13,6$ мм и при этом перекрывает газовую полость у основания трубки 3. Трубка 1 зафиксирована в держателе 4 и опирается на латунную опорную платформу 5. Ударный механизм, состоящий из грузика 6, подвешенного на леске перекинутой через блок 7, выводит столбик МЖ из положения равновесия. Кольцевой магнит 8 стабилизирует нижнюю поверхность столбика жидкости. Внутри кольцевого магнита вмонтирована катушка индуктивности 9. С катушки индуктивности электромагнитный импульс поступает на вход осциллографа 10. Изображение осциллограммы снимается цифровой видеокамерой 11 и поступает в компьютер 12

дикация сигнала производится с помощью катушки индуктивности прямоугольного сечения.

На рис. 2 приведена блок-схема экспериментальной установки, в которой индукционный контур размещен коллинеарно гидродинамическому потоку. МЖ 1 частично заполняет стеклянную трубку с запаянным дном 2 и при этом перекрывает газовую полость у основания трубки 3. Стабилизация нижней и верхней поверхностей МЖ-столбика производится посредством магнитного поля, создаваемого полюсами электромагнита 4. При колебаниях МЖ на катушку индуктивности 5 наводится переменная ЭДС. Расстояние между полюсами – 36 мм. Минимальное поле, при котором МЖ удерживается 34 кА/м.

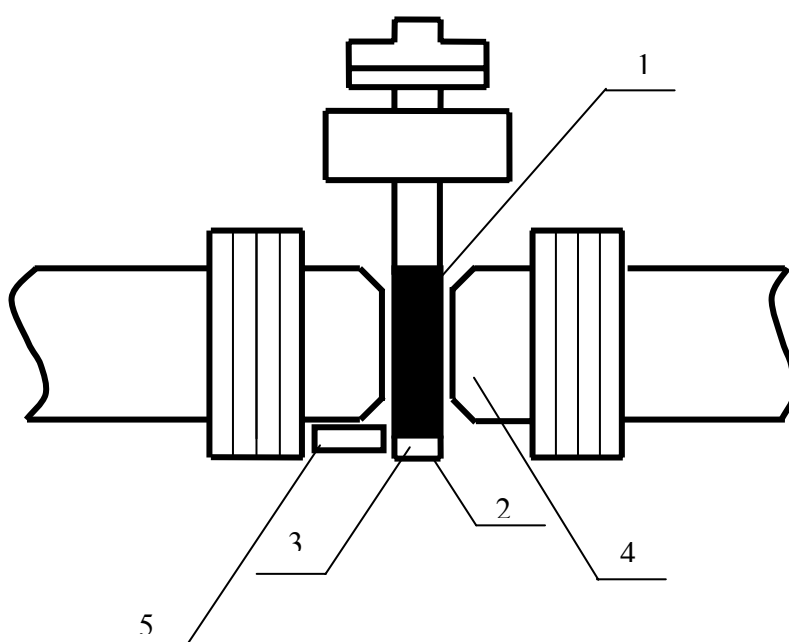


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки, в которой используется прямоугольная катушка индуктивности

Основные характеристики исследованных образцов магнетитовых магнитных жидкостей на основе керосина, измеренные по традиционным методикам при температуре 20°C, приведены в табл. 1.

Таблица 1

образец	ρ , кг/м ³	M_s , кА/м	χ	ε , %	η_s , Па·с
МЖ-1	1345	-	-	8,8	$3,1 \cdot 10^{-3}$
МЖ-2	1294	52	6,3	7,3	$3,9 \cdot 10^{-3}$
МЖ-3	1294	52	6,3	7,3	$3,5 \cdot 10^{-3}$
МЖ-4	1499	60	7,5	10,2	$8,1 \cdot 10^{-3}$
МЖ-5	1500	60	-	10,2	$12 \cdot 10^{-3}$

В табл. 1 ρ – плотность магнитного коллоида, M_s – намагниченность насыщения, χ – начальная магнитная восприимчивость, η_s – статическая вязкость, ε – объемная концентрация твердой фазы.

Результаты измерений коэффициента затухания, полученные при стабилизации положения равновесия различными способами и при двух различных способах размещения индукционного контура в пределах погрешности измерений 7-10 % совпадают между собой (см. табл. 2).

Таблица 2

Размещение индукционного контура	H , кА/м	$\nu_{\text{эксп}}$, Гц	$\beta_{\text{эксп}}$, с ⁻¹
Нормально гидродинамическому потоку	97	31,9	9,2
Коллинеарно гидродинамическому потоку	95,5	33	9

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента затухания колебаний β от напряженности магнитного поля H , при подвеске столбика МЖ между полюсами электромагнита. Зависимость $\beta(H)$ для менее концентрированных коллоидов характеризуется положительной производной.

На рис. 4 представлена аппроксимированная прямая экспериментальной зависимости $\beta(\nu)$ для МЖ-3, полученной при стабилизации положения равновесия столбика МЖ кольцевым магнитом.

Результаты измерения на частоте 32 Гц, полученные для МЖ-3 двумя разными способами стабилизации (рис. 3 и 4), в пределах погрешности измерений совпадают, что подтверждает достоверность результатов измерений.

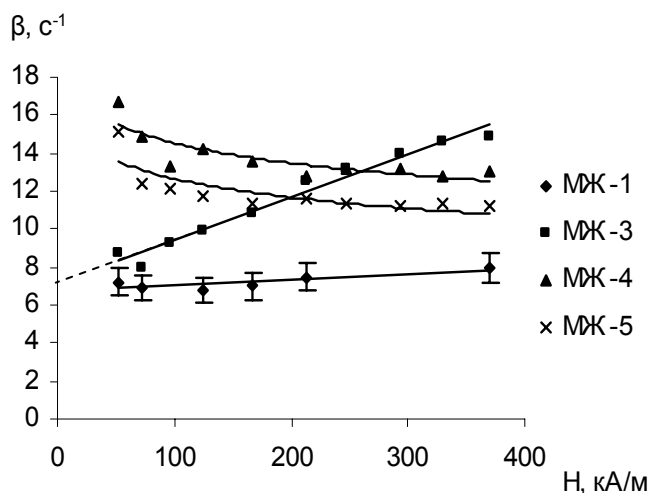


Рис. 3. Зависимость β (H).

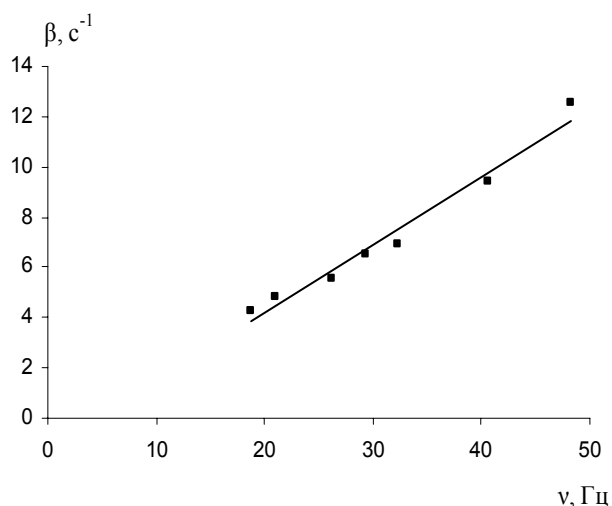


Рис. 4. Зависимость $\beta(\nu)$ для МЖ-3.

Приближенная оценка вклада в коэффициент затухания механизма межфазного теплообмена выполнена по формуле И.А. Чабан для безразмерного коэффициента затухания колебаний δ сферической газовой полости в жидкости [1]:

$$\delta = \frac{3(\gamma_1 - 1)\sqrt{2\psi_1}}{4\sqrt{\omega R_0}}, \quad (1)$$

где $\gamma_1 = C_{p1}/C_{v1}$ – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме газа, ψ_1 – коэффициент температуропроводности газа, ω – круговая частота, R_0 – радиус пузырька газа в жидкости.

Расчетное значение коэффициента затухания β_T составляет $0,38 \text{ с}^{-1}$, что оказывается на порядок меньше экспериментального значения и лежит в пределах погрешности измерений.

Для более надежной оценки вклада в диссипацию упругой энергии механизма межфазного теплообмена был поставлен специальный эксперимент, в котором используются методики наращивания площади межфазной поверхности и полного исключения данного механизма. В таблице 3 представлены экспериментальные данные, полученные из опытов с МЖ-3 при различной площади межфазного теплообмена.

В случае трубки, открытой с обеих сторон, формула для приближенной теоретической оценки частоты колебаний имеет вид:

$$\nu_{\delta} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0 M_z G}{\rho b}}, \quad (2)$$

Таблица 3

	Площадь межфазной поверхности, мм ²	ν , Гц	$\bar{\beta}$, с ⁻¹	Д В	
				с ⁻¹	%
Свободная поверхность доньшка	750	26,2	5,5	-	-
стеклянный порошок на поверхности доньшка	1550	21,3	6,0	0,5	9
кварцевый песок на поверхности доньшка	1550	22,9	5,8	0,3	5,5

где c – плотность МЖ, M_z - локальная намагниченность, G – градиент напряженности магнитного поля у верхней (нижней) свободной поверхности МЖ-столбика, b – высота столбика МЖ.

В таблице 4 представлены экспериментальные и расчетные значения исследуемых параметров, коэффициенты k_g и k_p рассчитаны по формулам (3) и (4) [2, 3] (случай стабилизации осевым магнитным полем):

$$k_g = \rho_g c^2 \cdot \frac{S^2}{V_0}, \quad (3)$$

$$k_p = \mu_0 \cdot S(1 + \chi) \cdot M_z \cdot \frac{\partial H_z}{\partial Z}, \quad (4)$$

где c_g – плотность газа, c – скорость звука в вакууме, S – площадь поперечного сечения трубки, V_0 – объем газовой полости, μ_0 – магнитная постоянная, H_z и M_z – осевые составляющие напряженности магнитного поля и намагниченности жидкости на открытой поверхности капли МЖ, χ - локальная магнитная восприимчивость. Ось Z совпадает с осью кольцевого магнита.

Экспериментальный коэффициент упругости определялся по формуле:

$$k_{\text{эсп}} = 4\pi^2 \nu^2 m,$$

где m – масса магнитожидкостного инертного элемента.

На основании данных таблицы 4 можно сделать вывод о пригодности приближенной модельной теории пондеромоторной упругости. В условиях эксперимента на величину коэффициента затухания в не оказывает влияние процесс межфазного теплообмена, преобладающую роль в диссипации упругой энергии играет механизм вязкого трения.

Таблица 4

Объем газовой полости	H, кА/м	H, Гц	H _г , Гц	$\bar{\beta}$, с ⁻¹	B _з , с ⁻¹	k _p , Н/м	k _g , Н/м	k _{эксн.} , Н/м
Удлиненный в 6,5 раз столбик газовой полости (по сравнению с начальной высотой 15 мм)	52	14,8	15	5,7	1,7	16	196	211
Открытая с обоих концов трубка	214	7,7	8,6	4,1	1,2	72	-	57
	247	8,9	9,5	4,7	1,3	87	-	76,3
	457	12,1		6,4	1,5		-	141

Если длина окружности, охватывающей боковую поверхность жидкого столбика, существенно больше длины вязкой волны λ ($\lambda = \sqrt{4\pi\eta/\rho\nu}$), то [4]:

$$R' \approx db\sqrt{\pi^3\rho\eta\nu} + i\frac{\pi^2 d^2 \rho\nu}{2} \left(1 + \frac{2}{d} \sqrt{\frac{\eta}{\pi\nu\rho}}\right), \quad (5)$$

где R' – акустический импеданс трубы, d – внутренний диаметр трубы, ν – вязкость МЖ. Величина активного сопротивления:

$$r' = db\sqrt{\pi^3\rho\eta\nu}, \quad (6)$$

возрастает с увеличением ν . Выражение (6) для коэффициента сопротивления впервые было получено Гельмгольцем. Коэффициент затухания в данном случае находится из выражения:

$$\beta_\eta = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{\pi\eta\nu}{\rho}}. \quad (7)$$

Исходя из полученных экспериментальных данных рассчитывается «эффективная вязкость» по формуле:

$$\eta_{эфф} = \frac{\rho d^2}{4\pi\nu} \beta^2. \quad (8)$$

При малых d и ν (инфразвуковой диапазон), когда выполняется условие $\rho d < 2\lambda$, импеданс трубки R'' рассчитывается по формуле:

$$R'' \approx 8\pi\eta b + i\frac{2}{3}\pi^2\rho b d^2\nu. \quad (9)$$

Выражение $R'' = 8\pi\eta b$ соответствует закону Пуазейля для коэффициента сопротивления при ламинарном течении вязкой жидкости. В этой теоретической модели коэффициент затухания колебаний рассчитывается по формуле:

$$\beta_{II} = \frac{16\eta}{\rho d^2}. \quad (10)$$

На рис. 5. представлены результаты измерений коэффициента затухания β для ряда значений частоты колебаний, а также теоретические зависимости $\beta(\nu)$, полученные по формуле (7) (сплошная линия) и по формуле (10) для инфразвукового диапазона (пунктирная линия).

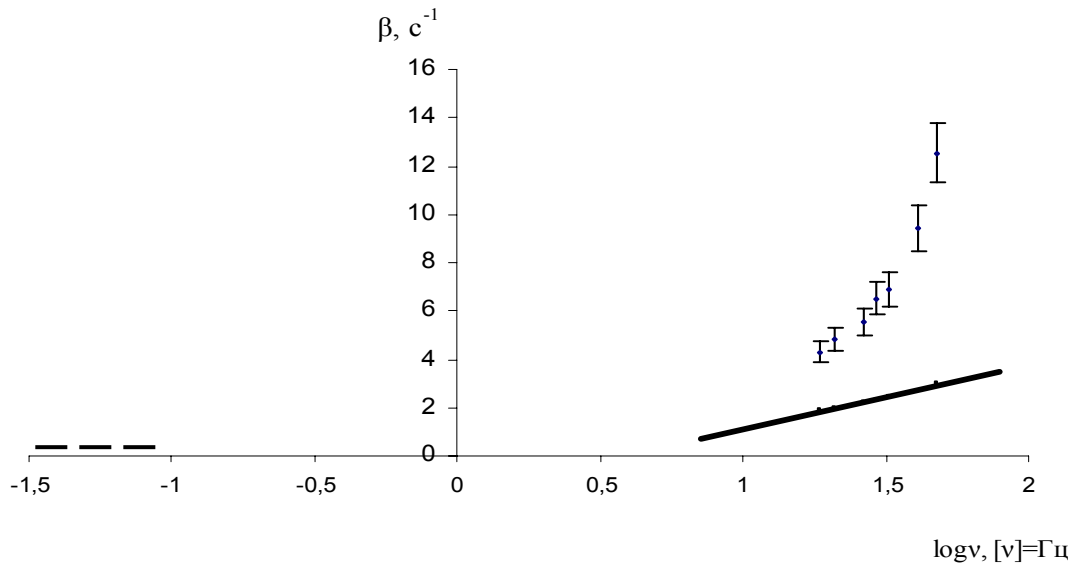


Рис.5. Зависимость $\beta(\nu)$ в полулогарифмическом масштабе для МЖ-3

На рис. 6 представлена зависимость $\ln \beta(\ln \nu)$ для МЖ-3 (пунктир) и МЖ-1 (сплошная линия) по данным эксперимента, в котором столбик жидкости опирается на воздушную полость различной высоты, а стабилизация положения равновесия обеспечивается полем кольцевого магнита. Зависимость коэффициента затухания от частоты близка к пропорциональной, т.е.

$\beta \sim \nu$, в то время как согласно классической теории $\beta \sim \sqrt{\nu}$, что обусловлено возрастанием эффективной вязкости с частотой.

Высказывается предполо-

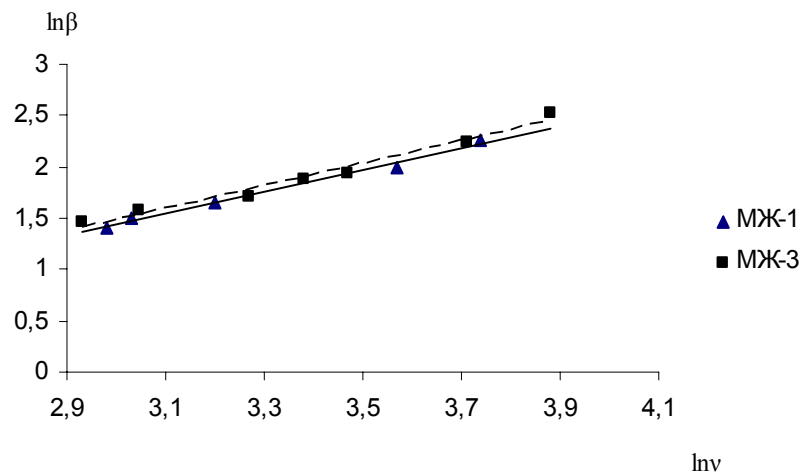


Рис. 6. Зависимость $\ln \nu(\ln \beta)$.

жение, что «сверхклассическое» затухание колебаний в исследуемой системе (рис.5) со специфической зависимостью от частоты колебаний (рис.6) и напряженности магнитного поля (рис.3), связано с запаздывающим относительно вязкой жидкости-носителя движением агрегатов из феррочастиц в пределах глубины проникновения вязкой волны h_z ($h_z = \lambda/2\pi$).

На рис. 7 приведена зависимость эффективной вязкости от частоты колебаний, на рис. 8 - зависимость эффективной вязкости от напряженности магнитного поля.

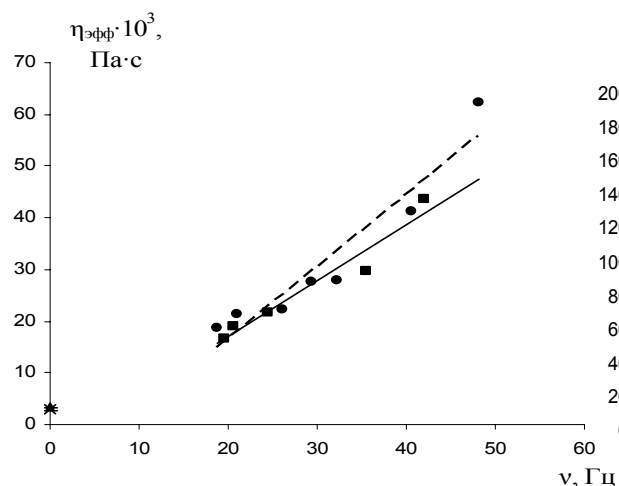


Рис. 7. Зависимость $\eta_{эфф}(\nu)$.

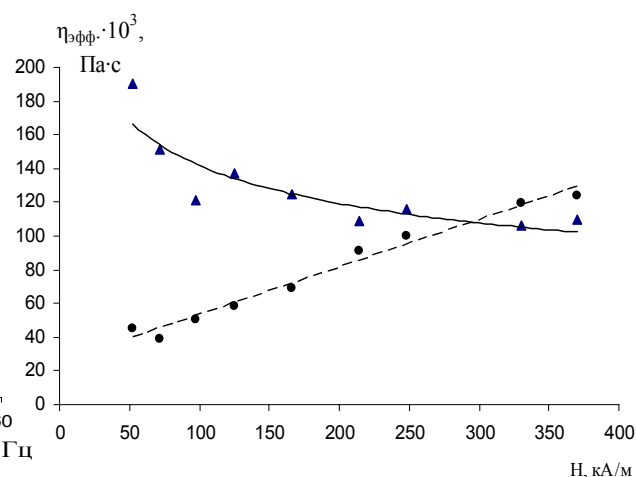


Рис. 8. Зависимость $\eta_{эфф}(H)$.

Представленные значками ■, ● и ▲ значения $\eta_{эфф}$ для коллоидов МЖ-1, МЖ-3 и МЖ-4 характеризуются погрешностью $\sim 20\%$. Пунктирной линией на обоих рисунках обозначены данные для МЖ-3, на рис. 7 сплошной линией – МЖ-1, на рис. 8 – МЖ-4. Звездочкой на рис. 7 показано статическое значение сдвиговой вязкости МЖ-1 и МЖ-3. Результаты измерений, приведенные на рис. 8, получены при частоте 32 Гц.

С ростом частоты и напряженности поля эффективная вязкость для коллоидов с меньшей концентрацией (МЖ-1 и МЖ-3) возрастает.

Аппроксимированная кривая зависимости $\eta_{эфф}(H)$ для более концентрированной МЖ-4 характеризуется пологим спадом, что, по-видимому, объясняется конкуренцией двух возможных механизмов диссипации упругой энергии, влияющих на величину $\eta_{эфф}$: эффект вращательной вязкости и диполь-дипольное взаимодействие феррочастиц, затрудняющее относительное движение жидкой и твердой фаз в пределах глубины проникновения вязкой волны.

На рис. 8 в точке пересечения аппроксимированных кривых данные магнитные жидкости проявляют одинаковые диссипативные свойства.

При экстраполяции пунктирной прямой на рис. 8 к точке $H = 0$, получаемое значение эффективной вязкости в пределах погрешности измерений совпадает с соответствующим значением $\eta_{эфф}(\nu)$ на рис. 7.

Библиографический список

1. Чабан И.А. О затухании колебаний газового пузырька в жидкости связанном с теплообменом // Акустический журнал.– 1989.– Т. 35.– № 1.– С. 182-183.
2. Коварда В.В. О прочностных свойствах магнитожидкостной мембраны // Ультразвук и термодинамические свойства вещества: Сборник научных трудов.– Курск: Изд-во Курск. гос. ун-та, 2004.– С. 90-97.
3. Багликов С.Ю., Карелин А.В., Карпова Г.В., Коварда В.В., Полуниин В.М., Чистяков М.В. Результаты экспериментального исследования магнитоупругих свойств магнитной жидкости // Сб. тр. 13-ой сессии Российского акуст. общества. Т. 1.– М.: ГЕОС, 2003.– С. 193-196.
4. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. М.: МГУ. 1960.– 336 с.