

03

## **Особенности взаимодействия капель магнитной жидкости, содержащих намагниченные агрегаты, с переменным магнитным полем**

© Ю.И. Диканский, О.В. Борисенко, М.А. Беджанян, М.И. Коробов

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь  
E-mail: dikansky@mail.ru

Поступило в Редакцию 10 ноября 2014 г.

Исследовано поведение плоских капель магнитной жидкости со спонтанно намагниченными агрегатами в переменном магнитном поле. Обнаружено, что в определенном диапазоне частот внешнего магнитного поля капля приходит во вращательное движение. Сделано предположение, что обнаруженный эффект связан с возникающей синхронизацией вращений содержащихся в магнитной жидкости намагниченных агрегатов.

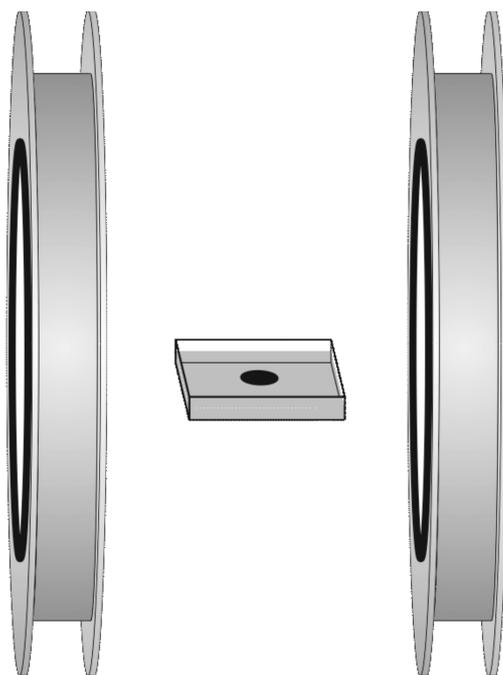
Магнитные жидкости [2], синтезированные более полувека назад, до сих пор представляют интерес для исследователей как в научном, так и в прикладном аспекте. Одной из фундаментальных проблем физики таких сред является возможность магнитного упорядочения в системе образующих их магнитодипольных частиц. Ранее в ряде теоретических работ [3,4] утверждалось о невозможности дальнего магнитного порядка в ансамбле дипольных частиц, однако в последующем появились работы [5,6], в которых с помощью математического моделирования были получены результаты, указывающие, напротив, на возможность такого упорядочения за счет дипольного взаимодействия. В работах [7–9] нами в результате экспериментального исследования процессов агрегирования в магнитных жидкостях на основе керосина было обнаружено возникновение при определенных условиях в таких средах хорошо развитой системы намагниченных агрегатов, установлены особенности намагничивания магнитных жидкостей с такими агрегатами. В представленной работе рассмотрены особенности взаимодействия ограниченных объемов (плоских капель) магнитной жидкости с переменным магнит-



**Рис. 1.** Микрофотография спонтанно намагниченных агрегатов, полученная с помощью оптического микроскопа методом просвета тонкого слоя магнитной жидкости, нанесенного на предметное стекло.

ным полем, обусловленные внутренними вращениями содержащихся в ней намагниченных агрегатов.

В данной работе исследовалось поведение капель дискообразной формы магнитной жидкости (МЖ), расположенных на поверхности воды при воздействии однородных переменных магнитных полей. Для получения капель использовалась магнитная жидкость на основе керосина с магнетитовыми частицами со средним размером частиц около 13,4 нм, стабилизированная олеиновой кислотой, содержащая хорошо развитую систему намагниченных агрегатов. На рис. 1 представлена микрофотография таких агрегатов, полученная с помощью оптического микроскопа методом просвета тонкого слоя магнитной жидкости. Процесс образования намагниченных агрегатов предварительно инициировался разбавлением сильноконцентрированной МЖ 2%-м раствором олеиновой кислоты в керосине. Для сравнения проводились также



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки.

исследования каплей, полученных из однородной (неагрегированной) МЖ на той же основе, обладающей такой же намагниченностью в исследованном диапазоне полей ( $H = 0.3\text{--}0.7\text{ kA/m}$ ).

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки. Для проведения экспериментов использовались катушки Гельмгольца, в области однородности поля которых располагалась стеклянная, наполненная водой кювета. На поверхность воды с помощью медицинского шприца вводилась капля МЖ, плотность которой меньше плотности воды. Для придания капле МЖ дискообразной формы в воду добавлялось небольшое количество поверхностно-активного вещества. По обмоткам катушек пропускался переменный ток регулируемой частоты в диапазоне  $0.5\text{--}5\text{ Hz}$  от генератора 4 AFG-73051 с использованием усилителя мощности 5 LV103. В результате этого вдоль поверхности

воды создавалось переменное магнитное поле с амплитудной напряженностью до 6–7 кА/м.

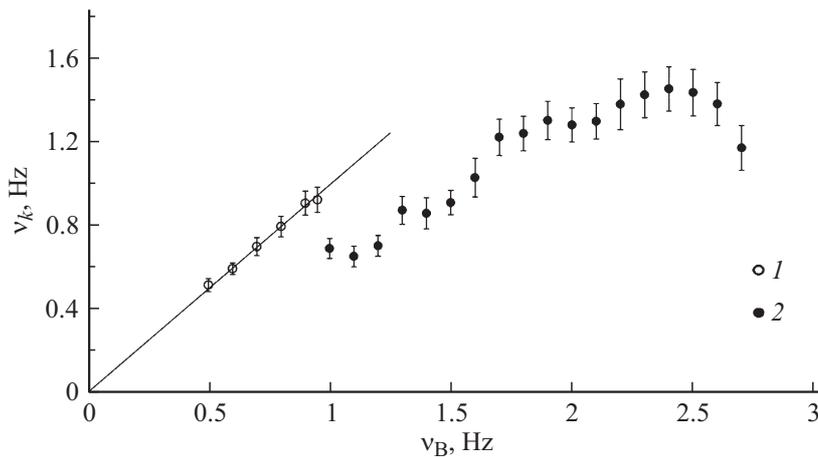
Измерение амплитудных значений напряженности магнитного поля осуществлялось путем измерения амплитудных значений напряжения на резисторе сопротивлением 1  $\Omega$  и мощностью 10 W при помощи цифрового осциллографа, что позволяло определять амплитуду силы тока в обмотках катушек, после чего на основании аппроксимационного уравнения  $H = f(I)$ , полученного в ходе градуировки катушек, определять результирующую величину напряженности магнитного поля.

Наблюдение за поведением капли осуществлялось с помощью цифровой видеокамеры при частоте съемки 300 fps, в последующем полученные видеозаписи воспроизводились на мониторе компьютера в замедленном режиме с целью анализа поведения капли.

Анализ полученных видеозаписей показал, что при воздействии переменного поля на плоскую каплю однородной МЖ, не содержащей намагниченных агрегатов, происходит периодическое изменение ее формы от круглой к эллиптической с большей полуосью, направленной вдоль внешнего поля. Такие пульсации происходят с частотой, в 2 раза превышающей частоту внешнего магнитного поля, т.е. синхронно с периодическим изменением абсолютного значения напряженности поля.

При увеличении частоты до 1.5–2 Hz наблюдается уменьшение амплитуды колебаний формы капли, которые при достижении частоты поля 5 Hz полностью прекращались, и капля покоилась, сохраняя эллиптическую форму, характеризующуюся некоторым значением эксцентриситета.

Напротив, форма капли со спонтанно намагниченными агрегатами в тех же полях лишь незначительно отличалась от круглой, но при этом наблюдались колебания поворота капли вокруг оси, перпендикулярной плоскости капли, амплитуда которых возрастала с ростом частоты поля. Вблизи некоторой критической частоты (для исследованных капель около 1 Hz) капля начинала вращаться в горизонтальной плоскости, при этом скорость вращения первоначально увеличивалась пропорционально росту частоты поля. При достижении некоторого значения частоты поля ( $\sim 2.4$  Hz) частота вращения капли начинала уменьшаться, а при частотах выше 2.8 Hz происходил переход от вращения к слабо выраженному колебательному движению, которое прекращалось при дальнейшем увеличении частоты поля.



**Рис. 3.** Зависимость частоты движения капли МЖ со спонтанно намагниченными агрегатами от частоты внешнего поля: 1 — частота колебаний капли в колебательном режиме, 2 — частота вращения капли во вращательном режиме.

В качестве примера на рис. 3 представлен один из экспериментально полученных графиков зависимости частоты вращения капли МЖ с намагниченными агрегатами от частоты внешнего магнитного поля. Отметим, что для разных капель переход от колебательно-вращательного к вращательному движению может происходить при различных значениях частоты поля при сохранении общего характера зависимости частоты вращения капли от частоты переменного поля.

Можно предположить, что возникновение процесса вращения капли обусловлено внутренними вращениями содержащихся в МЖ агрегатов, обладающих собственными магнитными моментами. Действительно, ориентация магнитного диполя в переменном магнитном поле определяется выражением

$$\ddot{\varphi} = -\gamma\dot{\varphi} - \xi \sin \varphi \sin(\omega_B T - \varphi_0), \quad (1)$$

где  $\varphi$  — угол между диполем и направлением внешнего поля,  $\gamma = \alpha/J$  — коэффициент диссипации, связанный с вязким трением о несущую среду,  $\xi = mB/J$  — коэффициент взаимодействия с внешним полем,  $\omega_B$  — частота внешнего поля,  $\varphi_0$  — начальная фаза поля,

$\alpha$  — коэффициент вязкого трения вращения агрегата,  $m$  — магнитный момент агрегата,  $B$  — амплитуда внешнего поля,  $J$  — момент инерции агрегата.

В реальных условиях диполи, обладающие инертными свойствами, могут вовлекаться во вращательное движение, при этом направление вращения для разных диполей может быть случайным. Наблюдения в оптический микроскоп показали, что воздействие на тонкий слой используемого образца переменного магнитного поля, направленного вдоль плоскости слоя, приводит к колебательному и вращательному движению содержащихся в нем намагниченных агрегатов. При этом часть агрегатов может вращаться по часовой стрелке, другая часть — против нее. По-видимому, по мере приближения частоты поля к критической наблюдается эффект синхронизации колебательно-вращательного процесса, в результате чего большинство агрегатов, содержащихся в капле, приходят в состояние стабильного вращения в одну и ту же сторону, что и приводит к вращению таких капель как единого целого в переменном магнитном поле. Подобные эффекты синхронизации были описаны в работе [10], где исследовалась синхронизация фаз вращений и колебаний жестких магнитных диполей, плавающих на поверхности жидкости в переменном магнитном поле.

Предполагая, что в диапазоне частот, близких к критической, все диполи в установившемся режиме вращаются с частотой внешнего поля, они за счет вязкого трения о несущую среду за время  $dt$  сообщают ей момент импульса  $dL_1 = N\alpha(\omega_B - \omega_d)dt$ , где  $\alpha$  — коэффициент вязкого трения вращения агрегата,  $N$  — количество агрегатов в капле, а  $\omega_d$  — частота вращения капли. За это же время капля за счет трения о внешнюю среду теряет момент импульса  $dL_2 = \alpha_d\omega_d dt$ , где  $\alpha_d$  — коэффициент вязкого трения вращения капли о внешнюю среду. Режим установившегося вращения капли будет определяться условием постоянства момента импульса  $dL = dL_1 - dL_2$ , откуда получаем угловую скорость вращения капли

$$\omega_d = \frac{N\alpha}{N\alpha + \alpha_d} \omega_B. \quad (2)$$

Анализ экспериментально полученных результатов, представленных на рис. 3, показал, что в диапазоне частот внешнего поля 1.0–2.5 Hz наблюдается линейная зависимость частоты вращения капли от частоты поля, при этом частота капли ниже частоты внешнего поля, что

показывает качественное соответствие с зависимостью (2), полученной аналитически.

Таким образом, полученные результаты указывают на существенные различия во взаимодействии с переменным полем плоских капель однородной (неагрегированной) МЖ и содержащей хорошо развитую систему намагниченных агрегатов. Так, форма капель однородной МЖ при воздействии переменного магнитного поля периодически изменяется между круглой и эллиптической, тогда как капли, содержащие намагниченные агрегаты, приходят во вращательное движение практически без изменения их формы. Последнее можно связать с возникающей синхронизацией вращений отдельных агрегатов, содержащихся в капле, приводящей к вращению капли как целого. Возможность проявления обнаруженного эффекта необходимо учитывать при проектировании устройств и измерительных приборов, в которых магнитная жидкость используется в качестве рабочего тела.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-03-00312\_а), а также Министерства образования и науки РФ в рамках задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания (№ 2479).

## Список литературы

- [1] *Фертман Е.Е.* Магнитные жидкости. Минск: Высшая школа, 1988. 184 с.
- [2] *Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О.* Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1986. 386 с.
- [3] *Белобров П.И., Гехт Р.С., Игнатченко В.А.* // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. № 3. С. 1097–1108.
- [4] *Pshenichnikov A.F., Mekhonoshin V.V., Lebedev A.V.* // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 161. P. 94.
- [5] *Wei D., Patey G.N.* // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. P. 2043.
- [6] *Levesque D., Weis J.J.* // Phys. Rev. E. 1994. V. 49. P. 5131.
- [7] *Диканский Ю.И., Балабанов К.А., Борисенко О.В., Киселев В.В.* // Магнитная гидродинамика. 1997. Т. 33. № 2. С. 243–245.
- [8] *Диканский Ю.И., Вегера Ж.Г., Закинян Р.Г., Нечаева О.А., Гладких Д.В.* // Коллоидный журнал. 2005. Т. 67. № 2. С. 161–166.
- [9] *Dikansky Yu.I., Gladkikh D.V., Kunikin S.A., Zolotukhin A.A.* // Magneto-hydrodynamics. 2012. V. 48. N 3. P. 493–502.
- [10] *Belovs M., Cebers A.* // J. Phys. A: Math. Theor. 2011. V. 44. N 29. P. 295 101.