

01;03;12

## Динамика немагнитной капли, взвешенной в магнитной жидкости, во вращающемся магнитном поле

© Ю.И. Диканский, А.Р. Закинян

Ставропольский государственный университет,  
355009 Ставрополь, Россия  
e-mail: zakinyan.a.r@mail.ru

(Поступило в Редакцию 14 июля 2009 г. В окончательной редакции 8 декабря 2009 г.)

Экспериментально изучено поведение взвешенной в магнитной жидкости немагнитной капли при воздействии на нее вращающегося магнитного поля. Исследованы конфигурации капли в виде вытянутого и сплюснутого эллипсоидов вращения, обнаружено явление распада капли во вращающемся поле и развитие гребенчатой неустойчивости ее поверхности при определенных условиях.

### Введение

Динамика вращения масс жидкости традиционно привлекает внимание исследователей, вместе с тем изучение равновесных форм вращающихся жидких тел и их неравновесных состояний остается актуальным и в настоящее время. Весьма интересным представляется изучение особенностей характера вращения капель жидких сред, способных намагничиваться (ультрадисперсных коллоидов ферро- или ферримагнетиков, известных под названием „магнитные жидкости“). В этом случае открываются новые аспекты подобных исследований в связи с возможностью управления каплей внешними магнитными полями, включая приведение ее во вращение и создание различных конфигураций ее формы. Помимо самостоятельного интереса результаты таких исследований также могут быть полезны при изучении жидкостей, содержащих деформируемые частицы (растворов полимеров, эмульсий и др.).

Ранее задача о равновесной конфигурации капли магнитной жидкости в постоянном однородном магнитном поле изучались в ряде работ, анализ которых и библиография по этому вопросу приведены в [1]. Особенности поведения капли магнитной жидкости под действием вращающегося магнитного поля экспериментально и теоретически изучались в работах [2–7].

На фоне достаточно подробной изученности поведения капли магнитной жидкости под действием магнитных полей прослеживается весьма заметный недостаток данных, касающихся поведения немагнитной капли, помещенной в магнитную жидкость. Некоторые результаты исследований в этой области приведены в [1], где теоретически рассмотрена деформация немагнитной капли, находящейся в магнитной жидкости, под действием однородного постоянного магнитного поля. Та же задача решалась в работах [8,9] методами численного моделирования. Экспериментально деформация немагнитной капли под действием однородного постоянного магнитного поля изучалась, по-видимому, лишь в работе [10]. Поведение немагнитной капли, взвешенной в

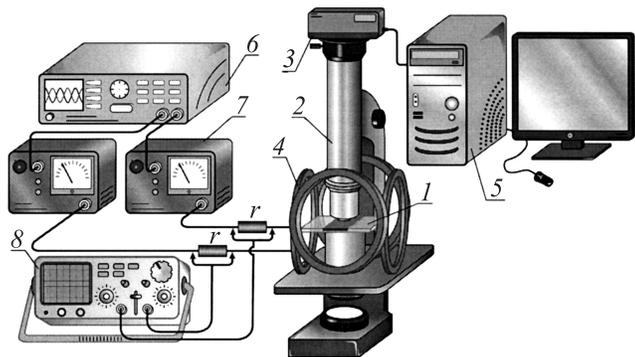
магнитной жидкости, во вращающемся магнитном поле ранее не изучалось.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование особенностей деформации немагнитной капли, находящейся в магнитной жидкости, при воздействии постоянного магнитного поля, кроме того, изучены особенности поведения и динамика формы такой капли во вращающемся магнитном поле.

### Объект и методика экспериментальных исследований

При изучении поведения тел, помещенных в магнитную жидкость, обычно сталкиваются с трудностями, обусловленными тем, что магнитная жидкость является непрозрачной средой, что затрудняет проведение наблюдений. Однако относительно тонкие слои магнитной жидкости являются достаточно прозрачными, что делает возможным проведение исследований поведения помещенных в них капель. В связи с этим в исследованиях нами использовались слои магнитной жидкости толщиной  $\sim 100 \mu\text{m}$ , внутрь которых помещались капли немагнитной жидкости радиусом от 2 до  $25 \mu\text{m}$ . Плоский горизонтальный слой магнитной жидкости с расположенными в нем немагнитными каплями ограничивался сверху и снизу двумя стеклянными поверхностями. Вследствие того что размеры исследуемых капель существенно меньше толщины слоя, представляется возможным пренебречь влиянием ограничивающих поверхностей на поведение капель и считать их поведение идентичным тому, которое наблюдалось бы в неограниченном объеме магнитной жидкости.

В экспериментах использовалась магнитная жидкость на основе керосина с диспергированными в нем наночастицами магнетита, стабилизированными олеиновой кислотой. Поскольку размеры наночастиц (диаметр  $\sim 10 \text{ nm}$ ) гораздо меньше размеров помещаемых в магнитную жидкость немагнитных капель, то ее в данном случае можно рассматривать как сплошную жидкую намагничивающуюся среду. Плотность применявшейся



**Рис. 1.** Экспериментальная установка: 1 — микроювета с исследуемым образцом; 2 — оптический микроскоп; 3 — цифровая видеокамера; 4 — катушки Гельмгольца; 5 — компьютер; 6 — генератор сигналов произвольной формы; 7 — усилители мощности; 8 — осциллограф.

магнитной жидкости составляла  $\rho_e = 1620 \text{ kg/m}^3$ , ее динамическая вязкость  $\eta_e = 30 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , начальная магнитная проницаемость  $\mu = 6.3$ .

В качестве жидкости для получения немагнитных капель было использовано масло АМГ-10 плотностью  $\rho_i = 776 \text{ kg/m}^3$ , динамическая вязкость которого составляла  $\eta_e = 14.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ . Выбор этого масла обусловлен тем, что оно не растворяется в магнитной жидкости и при этом межфазное натяжение на границе масла и магнитной жидкости оказывается относительно малым (для применявшейся в экспериментах магнитной жидкости оно составляло  $\sigma = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}$ ). Межфазное натяжение было определено по релаксации формы капли, согласно методике, предложенной в [11]. Благодаря малости межфазного натяжения значительную деформацию исследованных капель удастся наблюдать при воздействии относительно слабых магнитных полей (напряженностью порядка нескольких  $\text{kA/m}$ ), что упрощает проведение экспериментальных исследований и их анализ.

Образец для исследования приготавливался путем механического смешивания малого объема масла с магнитной жидкостью с помощью электромеханической мешалки. Приготовленный образец помещался в микроювету, представляющую собой две параллельно расположенные стеклянные пластинки, зазор между которыми фиксировался с помощью узких полосок фольги или пленки необходимой толщины. Схема применявшейся в исследованиях экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Микроювета располагалась на столике оптического микроскопа, снабженного цифровой видеокамерой, позволяющей выводить изображение на монитор компьютера для последующей обработки. При изучении динамики формы немагнитных капель, находящихся в магнитной жидкости, образец подвергался воздействию внешнего однородного магнитного поля, направленного всегда вдоль слоя образца. Для создания постоянного магнит-

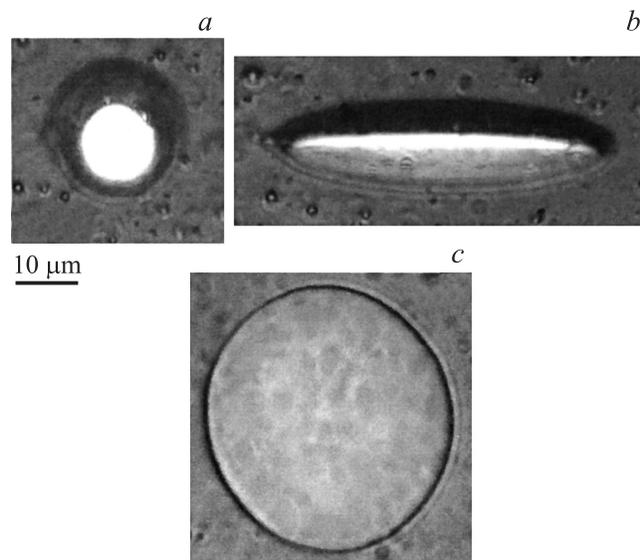
ного поля использовались катушки Гельмгольца, через которые пропускался постоянный ток. Вращающееся магнитное поле создавалось двумя парами перпендикулярно установленных катушек Гельмгольца, на которые подавалось синусоидальное напряжение от двухканального генератора со сдвигом фаз  $\pi/2$ . Амплитуда напряжения на каждой паре катушек Гельмгольца регулировалась при помощи двух усилителей мощности. Величина напряженности магнитного поля, создаваемого катушками, определялась по силе протекающего по ним тока. Напряженность магнитного поля в опытах изменялась в диапазоне от 0 до  $6 \text{ kA/m}$ , частота вращения поля — от 0.5 до  $10 \text{ Hz}$ .

Были проведены исследования особенностей динамики формы немагнитных капель в зависимости от величины напряженности внешнего магнитного поля, частоты его вращения, а также размера капель.

## Результаты экспериментальных исследований

Вначале было исследовано поведение немагнитной капли, взвешенной в магнитной жидкости, при воздействии однородного постоянного магнитного поля. Установлено, что в этих условиях первоначально сферическая капля вытягивается вдоль силовых линий поля, принимая стационарную форму, весьма близкую к вытянутому эллипсоиду вращения с полуосями, удовлетворяющими условию  $a > b = c$  ( $a$  — полуось, параллельная полю).

На рис. 2, *a* представлено изображение капли при отсутствии воздействия на нее внешнего поля, на рис. 2, *b* — эта же капля, деформированная в постоянном

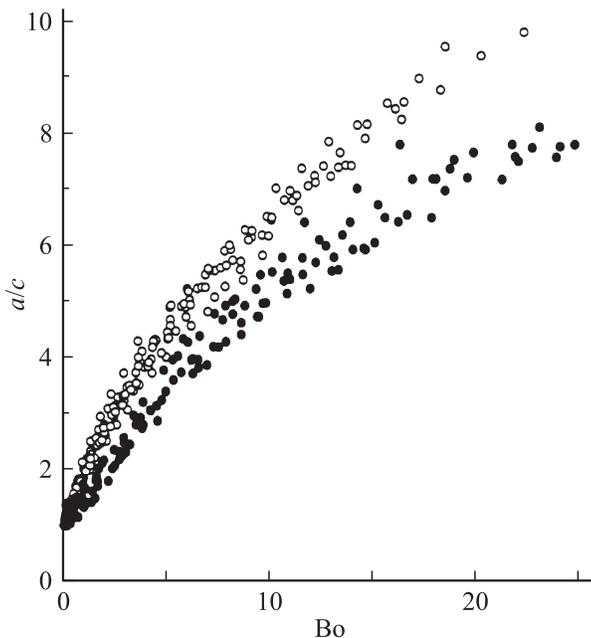


**Рис. 2.** Немагнитная капля в магнитной жидкости: *a* — в отсутствие магнитного поля, *b* — под действием постоянного магнитного поля, *c* — под действием магнитного поля, вращающегося с частотой  $f = 10 \text{ Hz}$ .

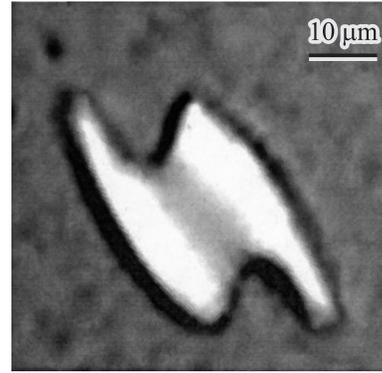
магнитном поле, направленном горизонтально вдоль плоскости рисунка.

Были проведены измерения отношения полуосей  $a/c$  деформированной капли в зависимости от величины магнитного числа Бонда, определяемого выражением  $B_0 = \mu H^2 R / \sigma$ , где  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $H$  — напряженность магнитного поля,  $R$  — радиус капли в отсутствие поля. Полученные результаты представлены на рис. 3, где светлыми точками показаны соответствующие экспериментальные данные.

Как видно из рис. 3, отношение полуосей капли монотонно возрастает с увеличением числа Бонда. Отметим, что в работе [1] при рассмотрении деформации капли магнитной жидкости в постоянном магнитном поле было указано на ее пороговый характер, проявляющийся в том, что отношение полуосей капли при увеличении числа Бонда вначале растет довольно медленно и резко увеличивается при достижении числом Бонда некоторого критического значения. Как показали проведенные нами исследования, при деформации немагнитной капли в постоянном поле подобного порогового характера деформации не наблюдается, что существенно отличает поведение немагнитных капель, помещенных в магнитную жидкость, от капель магнитной жидкости в постоянных магнитных полях. В работе [1] также отмечен гистерезис деформации капли магнитной жидкости, проявляющийся в том, что отношение полуосей капли, измеренное при увеличении магнитного поля, может отличаться от этого отношения, измеренного



**Рис. 3.** Зависимость отношения полуосей капли от магнитного числа Бонда. ○ — экспериментальные данные, полученные при вытяжении капли в постоянном магнитном поле; ● — данные, полученные при сплющивании капли в магнитном поле, вращающемся с частотой  $f = 10$  Hz.



**Рис. 4.** Начальная стадия распада капли во вращающемся магнитном поле.

при уменьшении поля, чего также не наблюдается при исследовании немагнитных капель.

Далее были проведены исследования динамики немагнитных капель, помещенных в магнитную жидкость, при воздействии однородного вращающегося магнитного поля. При низкой частоте вращения поля ( $f \sim 1$  Hz), капли, сохраняя форму вытянутых вдоль поля эллипсоидов, совершают вращение вслед за полем. Под вращением при этом понимается визуально наблюдаемый поворот большой оси капли, хотя в действительности имеет место вращение направления сферической деформации капли. Как показали измерения, форма капли при таком низкочастотном вращении практически не отличается от ее формы в постоянном поле. Было обнаружено, что с увеличением частоты вращения поля капля, имеющая форму вытянутого эллипсоида вращения, может распадаться на две примерно одинаковые капли меньшего размера. Так, при достижении определенного значения частоты капля разделяется на две половины, соединенные перемычкой (рис. 4), и при небольшом дальнейшем увеличении частоты распадается на две части. Поскольку образовавшиеся таким образом капли расположены близко друг к другу, они могут вновь слиться и, совершив обычно один полуоборот, вновь распадаются; такой процесс может повторяться многократно. При дальнейшем увеличении частоты вращения поля капля окончательно распадается на две части.

Важно отметить, что частота, при которой наблюдается распад капли, зависит от величины напряженности вращающегося магнитного поля, а также от размера капли, т. е. к распаду капли приводит определенное соотношение этих трех параметров. Заметим, что ситуация, подобная изложенной, рассматривалась в работах [3,6], в которых описывается распад капли магнитной жидкости во вращающемся магнитном поле, что может указывать на сходную природу этих явлений. Следует отметить также, что в работах [12,13] при изучении капель магнитной жидкости во вращающемся с низкой частотой магнитном поле было отмечено, что при определенных условиях капли могут принимать S-образную форму.

Подобного явления не наблюдалось в наших опытах при изучении немагнитных капель.

При воздействии на первоначально сферическую немагнитную каплю вращающегося магнитного поля относительно большой частоты капля, в противоположность рассматривавшимся выше случаям, начинает сплющиваться, приобретая форму сплюснутого эллипсоида вращения ( $a = b > c$ ), сечение которого, имеющее максимальную площадь, совпадает с плоскостью вращения поля. На рис. 2, *c* представлено изображение капли, сплюснутой под воздействием магнитного поля, вращающегося в плоскости рисунка. Сплющивание капли происходит, когда частота вращения магнитного поля превышает некоторое критическое значение, которое зависит от размеров капли. Так, например, капля радиусом  $10 \mu\text{m}$  в проделанных опытах сплющивалась начиная с частоты  $f \approx 4 \text{ Hz}$ . При частоте  $10 \text{ Hz}$  практически все исследовавшиеся капли принимали форму сплюснутых эллипсоидов вращения.

При одних и тех же значениях напряженности магнитного поля и радиуса капли критическая частота, начиная с которой наблюдается сплющивание капли, была, как правило, больше частоты, при которой происходил распад капли. Поэтому сплющивание капли можно наблюдать при подаче магнитного поля изначально высокой частоты, большей критической частоты сплющивания, в случае постепенного увеличения частоты от малых значений распад капли наступает раньше и сплющивания не происходит. Отметим также, что при частотах, соответствующих сплющиванию капли, ни при каких значениях поля распад капли не наблюдался.

Были проведены измерения отношения полуосей сплюсненной капли  $a/c$  в зависимости от магнитного числа Бонда при частоте вращения поля, равной  $10 \text{ Hz}$ . Полученные результаты представлены на рис. 3, где темными точками показаны соответствующие экспериментальные данные. Как видно из рис. 3, отношение полуосей сплюсненной капли монотонно возрастает с увеличением числа Бонда. Таким образом, по мере роста напряженности магнитного поля капля постепенно превращается из сферы в сплюснутый эллипсоид вращения ( $a = b > c$ ) и далее, при больших значениях напряженности, в диск, т.е. сильно сплюснутый эллипсоид ( $a = b \gg c$ ). Следует отметить, что ранее в работах [5,7] изучалось сплющивание капли магнитной жидкости в высокочастотном вращающемся магнитном поле и было показано, что начиная с определенного значения магнитной проницаемости магнитной жидкости наблюдаются бифуркации формы капли, проявляющиеся в превращении капли из сплюснутого эллипсоида вращения в трехосный эллипсоид и обратно, при некоторых значениях напряженности внешнего поля. В условиях описанных выше опытов подобного явления не наблюдалось.

При воздействии вращающегося магнитного поля на капли относительно крупных размеров ( $R > 20 \mu\text{m}$ ) может наблюдаться развитие гребенчатой неустойчивости

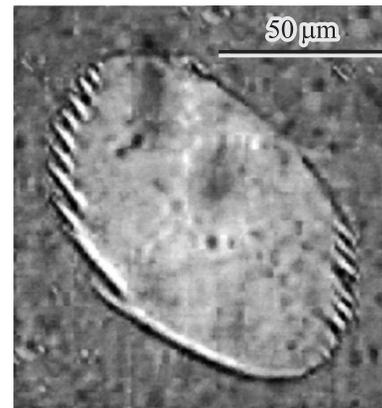


Рис. 5. Неустойчивость границы капли с внешней средой во вращающемся магнитном поле.

границы капли с внешней средой (рис. 5). Такая неустойчивость возникает при достижении напряженностью магнитного поля некоторого критического значения  $H_c$ , зависящего от частоты вращения поля (при возрастании частоты вращения поля  $H_c$  увеличивается). Экспериментально полученная зависимость величины  $H_c$  от частоты вращения поля представлена на рис. 6. Отметим, что получение приведенной зависимости осуществлялось путем нахождения величины магнитного поля, при которой выступы на границе капли становились визуально различимы при различных значениях частоты вращения. В связи с этим значения  $H_c$  на рис. 6, по-видимому, являются несколько завышенными, поскольку размеры неустойчивости границы на начальной стадии развития малы и могут быть визуально незаметны. Следует также

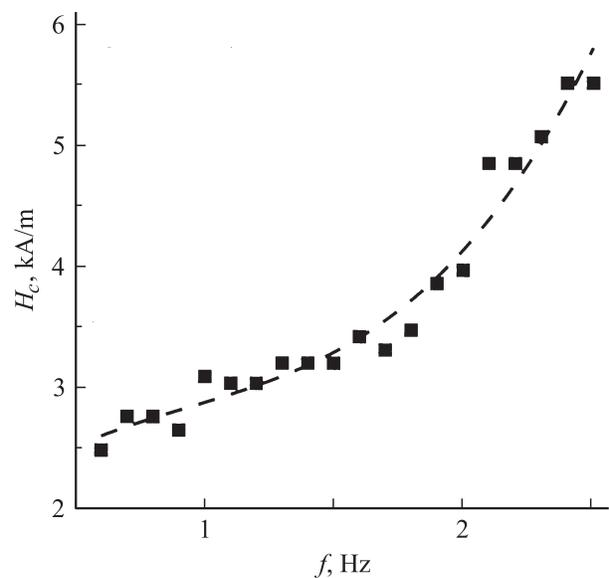


Рис. 6. Зависимость критической напряженности магнитного поля, при которой начинает развиваться неустойчивость границы капли, от частоты вращения поля, полученная для капли радиусом  $R = 22 \mu\text{m}$ .

отметить, что описанная неустойчивость границы капли не влияла на особенности протекания рассматривавшихся выше явлений распада и сплющивания капель, поскольку в этих опытах исследовались либо более мелкие капли, либо частота вращения поля была слишком большой для развития неустойчивости при данных значениях напряженности.

Особенностью обнаруженной гребенчатой неустойчивости границы немагнитной капли во вращающемся магнитном поле является то, что она всегда возникает на двух противоположных сторонах капли вблизи того места, где нормальная составляющая напряженности поля на границе имеет в данный момент наибольшее значение, и перемещается по периметру капли вслед за полем. Похожая картина наблюдалась в работах [2,7] при воздействии вращающегося магнитного поля на каплю магнитной жидкости. Однако в отличие от рассмотренной нами в данной работе неустойчивости немагнитной капли, неустойчивость границы капли магнитной жидкости проявлялась в образовании заостренных выступов, расположенных вдоль всего периметра капли, придавая ей тем самым форму, напоминающую морскую звезду.

## Заключение

Таким образом, в настоящей работе были изучены особенности поведения немагнитной капли, помещенной в жидкую намагничивающуюся среду, подверженной действию внешнего магнитного поля. Было обнаружено, что поведение немагнитной капли во многих случаях существенно отличается от поведения капель магнитной жидкости в аналогичных условиях. Это касается как деформации капель в постоянном однородном магнитном поле, так и их поведения под действием вращающегося поля.

Отметим, что ряд аспектов поведения немагнитных капель в магнитной жидкости не был изучен в данном исследовании. Так, например, при вращении магнитного поля с частотой, близкой к частоте сплющивания капли, может наблюдаться конфигурация капли в виде трехосного эллипсоида, не рассматривавшаяся нами. Это указывает на необходимость дальнейших экспериментальных и теоретических исследований в данной области.

Работа выполнена при поддержке фонда „Научный потенциал“ (договор № 179), а также при поддержке РФФИ (проект 10-02-90019-Бел\_а).

## Список литературы

- [1] Блум Э.Я., Мйоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. Рига: Занатне, 1989. 387 с.
- [2] Bacri J.-C., Cebers A., Perzynski R. // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 72. N 17. P. 2705–2708.
- [3] Лебедев А.В., Морозов К.И. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 65. Вып. 2. С. 150–154.

- [4] Морозов К.И. // ЖЭТФ. 1997. Т. 112. Вып. 4 (10). С. 1340–1350.
- [5] Морозов К.И., Лебедев А.В. // ЖЭТФ. 2000. Т. 118. Вып. 5 (11). С. 1188–1192.
- [6] Dikansky Yu.I., Bedjanian M.A., Chuenkova I.Yu., Suzdalev V.N. // J. Magn. Magn. Mater. 2002. Vol. 252. P. 276–279.
- [7] Lebedev A.V., Engel A., Morozov K.I., Bauke H. // New J. Phys. 2003. Vol. 5. P. 57.1–57.20.
- [8] Sofonea V., Früh W.-G., Cristea A. // J. Magn. Magn. Mater. 2002. Vol. 252. P. 144–146.
- [9] Korlie M.S., Mukherjee A., Nita B.G., Stevens J.G., Trubatch A.D., Yecko P. // J. Phys.: Condens. Matter. 2008. Vol. 20. P. 204 143.
- [10] Дроздова В.И., Скроботова Т.В., Чеканов В.В. // Магнитная гидродинамика. 1979. № 1. С. 16–18.
- [11] Yu W., Bousmina M., Zhou C. // Rheol. Acta. 2004. Vol. 43. P. 342–349.
- [12] Janiaud E., Elias F., Bacri J.-C., Cabuil B., Perzynski R. // Magnetohydrodynamics. 2000. Vol. 36. N 4. P. 300–311.
- [13] Cebers A. // Phys. Rev. E. 2002. Vol. 66. P. 061 402.