

УДК 532.529.6

## ДЕФОРМАЦИЯ МИКРОКАПЕЛЬ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭМУЛЬСИЙ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И ВРАЩАЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Ткачева Е.С., Закинян А.Р., Диканский Ю.И.

ФГБОУ ВПО «Ставропольский государственный университет»,  
Ставрополь, e-mail: tkacheva\_es@mail.ru

Экспериментально исследовано поведение микрокапель магнитной жидкости, взвешенных в немагнитной жидкой среде, а также диэлектрических микрокапель, помещенных в магнитную жидкость, при воздействии магнитных и электрических полей. Показано, что воздействие однородного переменного электрического поля низкой частоты приводит к сплющиванию капель магнитной жидкости вдоль направления поля, высокочастотное же электрическое поле их вытягивает. Немагнитные капли жидкого диэлектрика, помещенные в магнитную жидкость, напротив всегда вытягиваются в электрическом поле. Воздействие низкочастотного вращающегося магнитного поля приводит к вытяжению исследовавшихся микрокапель вдоль поля и вращению их формы вслед за направлением поля. При воздействии высокочастотного вращающегося магнитного поля происходит сплющивание микрокапель в плоскости вращения поля. Одновременное воздействие переменного электрического и вращающегося магнитного полей приводит к появлению более сложных конфигураций капель, так наблюдаются трехосные формы капель с различной ориентацией осей в зависимости от частот полей, а также имеют место колебания их формы. Выполнены измерения формы капель и исследованы закономерности их движения.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, микрокапля, электрическое поле, магнитное поле, динамика формы

## DEFORMATION OF THE MAGNETODIELECTRIC EMULSIONS MICRODROPS IN THE ALTERNATING ELECTRIC AND ROTATING MAGNETIC FIELDS

Tkacheva E.S., Zakinyan A.R., Dikansky Y.I.

Stavropol State University, Stavropol, e-mail: tkacheva\_es@mail.ru

The behavior of the magnetic fluid microdrops suspended in a nonmagnetic liquid and the dielectric microdrops immersed in a magnetic fluid under the action of electric and magnetic fields is studied experimentally. It was shown that the action of a uniform low frequency alternating electric field leads to the oblateness of the magnetic fluid droplets along the field direction, on the contrary, the high frequency electric field leads to the stretching of the droplets. The nonmagnetic liquid dielectric droplets are always stretching under the action of the electric field. The action of the low frequency rotating magnetic field leads to the stretching of the studied droplets along the field and to the rotation of their shape after the field direction. At a high frequency of the rotating magnetic field the flattening of the microdrops in the field rotation plane is taking place. Under the simultaneous action of the alternating electric and rotating magnetic fields more complicated droplets configurations appears, thus the triaxial shapes of the droplets with variable axes orientations depending on the fields frequencies have been observed. The vibration of the droplets shapes is also takes place in this case. The droplets shapes have been measured and the mechanisms of their motion have been studied.

**Keywords:** magnetic fluid, microdrop, electric field, magnetic field, shape dynamics

Интерес к исследованию поведения капель жидкости в силовых полях связан с широким применением эмульсий и аэрозолей в технике и быту, так и с чисто научной проблемой изучения движения жидких масс, нередко ведущих себя в условиях невесомости подобно каплям [6, 9, 12]. Новые возможности в таких исследованиях открываются благодаря применению магнитных жидкостей, способных эффективно взаимодействовать как с магнитными, так и с электрическими полями. Магнитные жидкости представляют собой взвесь однодоменных наночастиц ферро- или ферримагнетиков в жидкой среде. В ряде существующих работ подробно изучено поведение капель магнитной жидкости во внешних стационарных и переменных магнитных полях [2–4, 10, 11, 14]. Значительно меньше внимания уделено исследованию поведения капель магнитной жидкости при одновременном

воздействии на них магнитных и электрических полей. Некоторые результаты подобных исследований представлены в работах [7, 8, 15], где изучается поведение капель магнитной жидкости при одновременном воздействии на них постоянных магнитного и электрического полей, а также постоянного магнитного и переменного электрического поля. Интерес к подобного рода исследованиям обусловлен возможностью обнаружения в таких условиях новых закономерностей динамики ограниченных объемов жидкости, а также предпринимаемыми в последнее время попытками создания магнитных эмульсий, макроскопические свойства которых определяются микрогеометрией их дисперсной фазы и которыми можно управлять посредством электрических и магнитных полей [1, 5, 13]. Целью настоящей работы является дальнейшее развитие исследований и выявление новых

закономерностей динамики формы капель магнитной жидкости, взвешенных в немагнитной жидкой среде, а также диэлектрических микрокапель, помещенных в магнитную жидкость, при воздействии переменных магнитных и электрических полей.

### Материалы и методы исследования

В экспериментах использовалась магнитная жидкость на основе керосина с диспергированными в нем наночастицами магнетита, стабилизированными олеиновой кислотой. Поскольку размеры наночастиц (диаметр  $\sim 10$  нм) гораздо меньше размеров исследуемых капель магнитной жидкости, а также помещаемых в магнитную жидкость немагнитных капель, то ее, в данном случае, можно рассматривать как сплошную жидкую намагничивающуюся среду. Плотность применявшейся магнитной жидкости составляла  $1620 \text{ кг/м}^3$ , ее динамическая вязкость  $30 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ , магнитная проницаемость 8, диэлектрическая проницаемость 6,2, удельная электрическая проводимость  $10^{-6} \text{ См/м}$ . В качестве немагнитной диэлектрической жидкости было использовано масло АМГ-10 плотностью  $776 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость которого составляла  $14,5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ , диэлектрическая проницаемость 2,2 удельная электрическая проводимость  $10^{-12} \text{ См/м}$ . 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 применявшихся в экспериментах магнитной жидкости и масла оно составляло величину  $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}$ . Благодаря этому, значительную деформацию исследованных капель удается наблюдать при воздействии относительно слабых магнитных и электрических полей, что упрощает проведение экспериментальных исследований.

Образец для исследования приготавливался путем механического смешивания малого объема одной жидкости в другой с помощью электромеханической мешалки. В результате получалась либо эмульсия масла в магнитной жидкости, либо магнитной жидкости в масле. Приготовленный образец помещался в ячейку, представлявшую собой предметное стекло, на поверхность которого наклеены две прямоугольные металлические пластины, в зазоре между торцами которых создавалось переменное электрическое поле. Для этого на пластины подавалось электрическое напряжение. Зазор между пластинами заполнялся взвесью капель магнитной жидкости в немагнитной среде или немагнитных капель в магнитной жидкости, после чего ячейка закреплялась на столике микроскопа. Из-за возможной поляризации электродов и электрофоретической миграции наблюдаемых капель в постоянном электрическом поле, исследования были проведены в переменном электрическом поле в частотном диапазоне  $10 \text{ Гц} - 200 \text{ кГц}$  и при действующем значении напряженности от 0 до  $270 \text{ кВ/м}$ . Электрическое поле в области расположения отдельной исследуемой капли можно было считать однородным. Вращающееся магнитное поле создавалось двумя парами перпендикулярно установленных катушек Гельмгольца, на которые подавалось синусоидальное напряжение от двухканального генератора со сдвигом фаз  $\pi/2$ . Ячейка с образцом располагалась в области однородного магнитного поля. Напряженность магнитного поля изменялась в диапазоне от 0 до  $6 \text{ кА/м}$ , частота вращения поля – от  $0,5$  до  $1 \text{ Гц}$ .

### Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Вначале было исследовано поведение магнитной капли, взвешенной в немагнитной жидкости. При воздействии вращающегося магнитного поля частотой  $9 \text{ Гц}$  на первоначально сферическую магнитную каплю она начинала сплющиваться, приобретая форму сплюснутого эллипсоида вращения ( $a = b > c$ , здесь полуоси  $a$  и  $b$  лежат в плоскости поля,  $c$  – перпендикулярна ей). Если капля была довольно крупными размерами ( $\sim 20 \text{ мкм}$ ), то наблюдалась также гребенчатая неустойчивость на границе с окружающей средой. Такое поведение капли связано с тем, что при быстром вращении поля форма капли не успевает следовать за его изменением, вследствие чего и происходит сплющивание капли в плоскости поля и превращение капли. Это возможно, когда период вращения поля меньше характерного времени релаксации формы капли. При воздействии низкочастотного ( $12 \text{ Гц}$ ) электрического поля на первоначально сферическую каплю магнитной жидкости наблюдалось ее сплющивание в направлении поля, и капля принимала форму сплюснутого эллипсоида вращения, сечение которого, имеющее максимальную площадь перпендикулярно электрическому полю ( $a < b = c$ , здесь ось  $a$  параллельна электрическому полю). При воздействии же высокочастотного переменного электрического поля ( $210 \text{ Гц}$ ) магнитная капля вытягивалась вдоль направления поля.

Наибольший интерес представляет изучение динамики капли при одновременном воздействии переменного электрического и вращающегося магнитного полей. Было обнаружено, что в этом случае капля магнитной жидкости принимает форму трехосного эллипсоида. На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости отношения полуосей деформированной капли магнитной жидкости от напряженности электрического поля. Измерения проводились путем фотографирования капель и последующей компьютерной обработки полученных изображений. Также были проведены измерения отношения полуосей этой же капли магнитной жидкости во вращающемся магнитном и высокочастотном ( $210 \text{ Гц}$ ) электрическом поле. Полученные зависимости отношения полуосей капли от напряженности электрического поля представлены на рис. 2.

Далее проводились исследования динамики диэлектрической капли, помещенной в магнитную жидкость, при воздействии электрического и магнитного полей. В переменном электрическом поле немагнитная капля вытягивалась вдоль силовых линий поля в независимости от частоты электри-

ческого поля, что отличает ее поведение от поведения капли в магнитной жидкости. Во вращающемся высокочастотном ( $> 9$  Гц) магнитном поле наблюдалось сплющивание диэлектрических капель в плоскости

вращения поля. При этом в низкочастотном (0,9 Гц) вращающемся магнитном поле диэлектрическая капля вытягивалась вдоль поля, после чего наблюдалось вращение ее формы вслед за направлением поля.

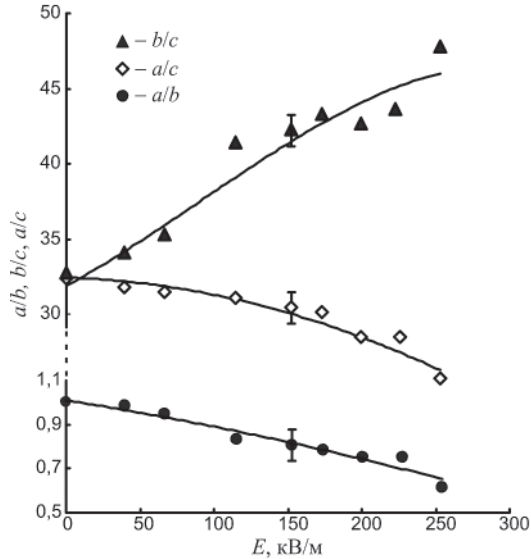


Рис. 1. Зависимость отношения полуосей деформированной капли от напряженности электрического поля ( $f = 12$  Гц), полученная для капли радиусом 10,5 мкм при  $H = 5$  кА/м

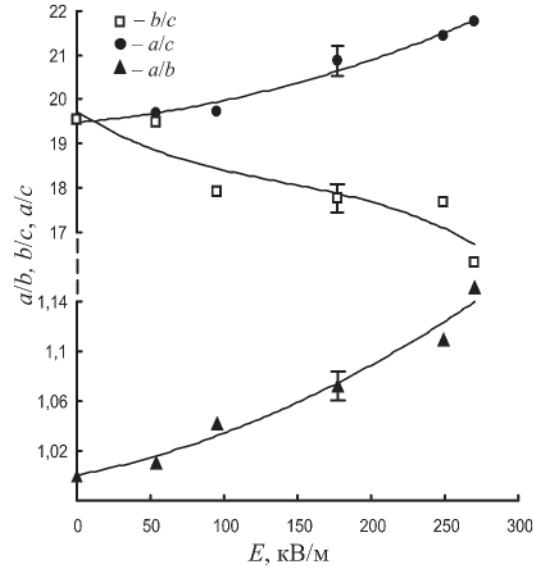


Рис. 2. Зависимость отношения полуосей деформированной капли от напряженности электрического поля ( $f = 210$  Гц), полученная для капли радиусом 10,5 мкм при  $H = 5$  кА/м

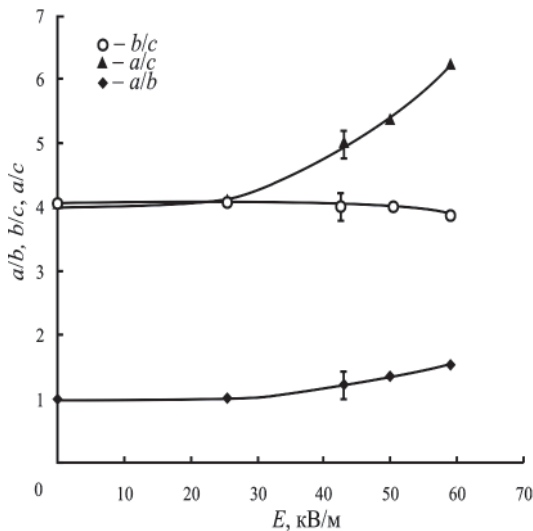


Рис. 3. Зависимость отношения полуосей деформированной немагнитной капли от напряженности электрического поля ( $f = 12$  Гц), полученная для капли радиусом 16,8 мкм при  $H = 4,5$  кА/м

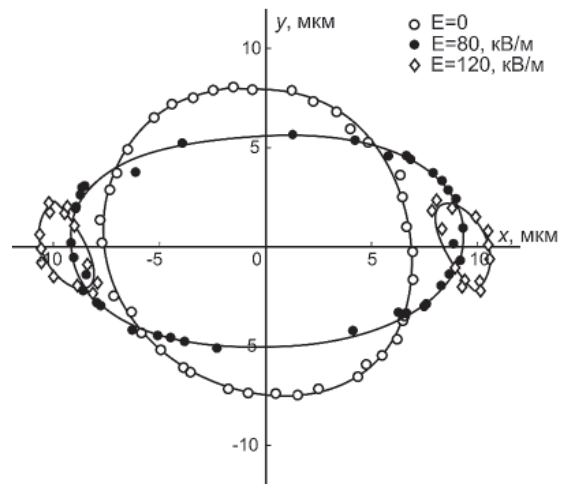


Рис. 4. Траектория движения конца капли во вращающемся магнитном поле при различной напряженности электрического поля

Воздействие дополнительного переменного электрического поля на сплюснутую в высокочастотном (9 Гц) вращающемся магнитном поле диэлектрическую каплю приводит к тому, что она принимает форму трехосного эллипсоида. Были измерены зависимости отношения полуосей дефор-

мированной капли от напряженности электрического поля (рис. 3). Обозначения полуосей аналогичны представленным выше. При одновременном воздействии низкочастотного (0,9 Гц) вращающегося магнитного поля и переменного электрического поля на немагнитную каплю наблюдалось

изменение траектории вращения полюса вытянутой капли. Первоначально круговая траектория при низких значениях напряженности электрического поля переходила в эллиптическую, а затем, с ростом напряженности электрического поля, происходило колебание полюса (конца) капли относительно оси вращения. Для визуализации описанных явлений была построена траектория движения конца капли в низкочастотном вращающемся магнитном поле при различных напряженностях электрического поля, которая представлена на рис. 4.

### Закключение

Таким образом, на основе результатов проведенных исследований можно заключить, что одновременное действие электрических и магнитных полей приводит к новым закономерностям деформации капель жидкости. Это, в свою очередь, может приводить к существенному изменению структурного состояния таких систем, как магнитодиэлектрические эмульсии, что позволяет сделать вывод о возможности регулирования макроскопических электрических свойств таких сред магнитным полем, и наоборот, магнитных свойств посредством воздействия электрическим полем. Это позволяет ожидать проявления интересных закономерностей макроскопических свойств магнитодиэлектрических эмульсий при воздействии на них внешних полей.

### Список литературы

1. Закинян А., Диканский Ю. Магнитные и электрические свойства магнитных эмульсий. Саарбрюккен–Москва, LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 146 с.
2. Диканский Ю.И., Закинян А.Р. Динамика немагнитной капли, взвешенной в магнитной жидкости, во вращающемся магнитном поле // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, Вып. 8. – С. 8–12.
3. Диканский Ю.И., Нечаева О.А., Закинян А.Р. Деформация микрокапель магниточувствительной эмульсии в магнитном и электрическом полях // Коллоидный журнал. – 2006. – Т. 68, № 2. – С. 161–165.
4. Эффекты структурных превращений в магнитных эмульсиях / Ю.И. Диканский, О.А. Нечаева, А.Р. Закинян, Н.Ю. Константинова // Коллоидный журнал. – 2007. – Т. 69, № 6. – С. 737–741.
5. Диканский Ю.И., Цеберс А.О., Шацкий В.П. Свойства магнитных эмульсий в электрическом и магнитном полях // Магнитная гидродинамика. – 1990. – № 1. – С. 32–38.
6. Панченков Г.М., Цабек Л.К. Поведение эмульсий во внешнем электрическом поле. – М.: Химия, 1969. – 191 с.
7. Ткачева Е.С., Закинян А.Р., Динамика формы магнитных и немагнитных капель магнитодиэлектрических эмульсий в магнитном и электрическом полях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2009. – № 4. – С. 76–82.
8. Bacri J.-C., Cebers A., Perzynski R. Behavior of a magnetic fluid microdrop in a rotating magnetic field // Phys. Rev. Lett. – 1994. – Vol. 72, № 17. – P. 2705–2708.
9. Dikansky Y.I., Zakinyan A.R., Tyatyushkin A.N. Anisotropy of magnetic emulsions induced by magnetic and electric fields // Phys. Rev. E – 2011. Vol. 84, 031402.
10. Lebedev A.V., Engel A., Morozov K.I., Bauke H. Ferrofluid drops in rotating magnetic fields // New J. Phys. – 2003. – Vol. 5. – P. 57.1–57.20.
11. Tyatyushkin A.N., Velarde M.G. On the interfacial deformation of a magnetic liquid drop under the simultaneous action of electric and magnetic fields // J. Colloid Interface Sci. – 2001. – Vol. 235. – P. 46–58.
12. Torza S., Cox R.G., Mason S.G. Electrohydrodynamic deformation and burst of liquid drops // Phil. Trans. Roy. Soc. London. – 1971. – A 269. № 1198. – P. 295–319.
13. Zakinyan A., Dikansky Y. Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 380 (2011) 314–318.
14. Zakinyan A., Nechaeva O., Dikansky Yu. Motion of a deformable drop of magnetic fluid on a solid surface in a rotating magnetic field // Experimental Thermal and Fluid Science 39 (2012) 265–268.
15. Zakinyan A., Tkacheva E., Dikansky Y. Dynamics of a dielectric droplet suspended in a magnetic fluid in electric and magnetic fields // Journal of Electrostatics. – Vol. 70, Issue 2. (2012). – P. 225–232.

### References

1. Zakinyan A., Dikansky Yu. Magnetic and electrical properties of magnetic emulsion [Magnitnye i elektricheskie svoystva magnitnykh emul'siy]. Saarbrücken–Moscow, LAP Lambert Academic Publishing, 2011, 146 p.
2. Dikansky Yu.I., Zakinyan A.R. Dynamics of nonmagnetic drop suspended in magnetic fluid in a rotating magnetic field [Dinamika nemagnitnoy kapli, vzveshennoy v magnitnoy zhidkosti, vo vrashayushemysya magnitnom pole] // Techn. Phys. [Zhurn. tekhn. fiz.] 2010. Vol. 80, Iss. 8. pp. 8–12.
3. Dikansky Yu.I., Nechaeva O.A., Zakinyan A.R. Deformation of magnetosensitive emulsion microdrops in magnetic and electric fields [Deformatsiya mikrokapel' magnitochuvstvitel'noy emul'sii v magnitnom i elektricheskom polyakh] // Colloid. J. [Kolloid. zhurn.] 2006. Vol. 68, no. 2. pp. 161–165.
4. Dikansky Yu.I., Nechaeva O.A., Zakinyan A.R. Konstantinova N.Yu. Effects of structural transformations in magnetic emulsions [Effekty strukturykh prevrasheniy v magnitnykh emul'siyakh] // Colloid. J. [Kolloid. zhurn.] 2007, Vol. 69, no. 6. pp. 737–741.
5. Dikansky Yu.I., Tsebers A.O., Shatsky V.P. Properties of magnetic emulsions in electric and magnetic fields [Svoystva magnitnykh emul'siy v elektricheskom i magnitnom polyakh] // Magn. gidrodin. 1990. no. 1. pp. 32–38.
6. Panchenkov G.M., Tsabek L.K. Behavior of emulsions in external electric field [Povedenie emul'siy vo vneshnem elektricheskom pole]. Moscow, Khimiya, 1969, 191 p.
7. Tkacheva E.S., Zakinyan A.R. Shape dynamics of the magnetic and nonmagnetic drops of magnetodielectric emulsions in magnetic and electric fields [Dinamika formy magnitnykh i nemagnitnykh kapel' magnitodielektricheskikh emul'siy v magnitnom i elektricheskom polyakh] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki. 2009. no. 4. pp. 76–82.
8. Bacri J.-C., Cebers A., Perzynski R. Behavior of a magnetic fluid microdrop in a rotating magnetic field // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 72. no. 17. pp. 2705–2708.
9. Dikansky Y.I., Zakinyan A.R., Tyatyushkin A.N. Anisotropy of magnetic emulsions induced by magnetic and electric fields // Phys. Rev. E. 2011. Vol. 84, 031402.
10. Lebedev A.V., Engel A., Morozov K.I., Bauke H. Ferrofluid drops in rotating magnetic fields // New J. Phys. 2003. Vol. 5. pp. 57.1–57.20.
11. Tyatyushkin A.N., Velarde M.G. On the interfacial deformation of a magnetic liquid drop under the simultaneous action of electric and magnetic fields // J. Colloid Interface Sci. 2001. Vol. 235. pp. 46–58.
12. Torza S., Cox R.G., Mason S.G. Electrohydrodynamic deformation and burst of liquid drops // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1971. A 269. no. 1198. pp. 295–319.
13. Zakinyan A., Dikansky Y. Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 380 (2011) 314–318.
14. Zakinyan A., Nechaeva O., Dikansky Yu. Motion of a deformable drop of magnetic fluid on a solid surface in a rotating magnetic field // Experimental Thermal and Fluid Science 39 (2012) 265–268.
15. Zakinyan A., Tkacheva E., Dikansky Y. Dynamics of a dielectric droplet suspended in a magnetic fluid in electric and magnetic fields // Journal of Electrostatics. Vol. 70. Issue 2. (2012) pp. 225–232.

### Рецензенты:

Дерябин М.И., д.физ.-мат.н., профессор, профессор кафедры общей физики СГУ, г. Ставрополь;

Ерин К.В., д.физ.-мат.н., доцент, профессор кафедры общей физики СГУ, начальник НИЧ СГУ, г. Ставрополь.

Работа поступила в редакцию 05.06.2012.