

Особенности деформации капель магнитных эмульсий в переменном электрическом поле

Е. С. Бекетова, О. А. Нечаева, Ю. И. Диканский*

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, 355017, Россия
*e-mail: dikansky@mail.ru

Поступила в редакцию 23.06.2022

После доработки 11.11.2022

Принята к публикации 17.11.2022

Экспериментально исследованы особенности деформации микрокапель магнитных эмульсий в переменном электрическом поле. Показано, что характер деформации может изменяться в зависимости от частоты электрического поля; в случае низких частот электрического поля капли сплюсываются вдоль его направления, при более высоких частотах принимают вытянутую форму. Установлено, что значение частоты, соответствующей переходу формы микрокапли от сплюснутого состояния в вытянутое, зависит от электропроводности капли, значения напряженности электрического поля и температуры. Показана возможность компенсации деформации капли, вызванной воздействием электрического поля, с помощью дополнительно приложенного магнитного поля. Анализ полученных результатов проведен с учетом движения жидких фаз, обусловленного накоплением свободного заряда на межфазных границах капель и электродах, создающих поле.

Ключевые слова: микрокапли, магнитные эмульсии, деформации капель во внешних полях, компенсация деформации, электропроводность капли магнитной жидкости

УДК 537.9

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.6.42>

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию особенностей взаимодействия микрокапель магнитных жидкостей с внешними полями посвящен ряд работ (см., например, [1–14]). При этом, в большинстве из них рассматриваются особенности деформации и развитие неустойчивости микрокапель при воздействии магнитных полей [1–4, 9 – 13]. Вместе с тем, несомненный интерес представляет также изучение таких процессов, обусловленных воздействием электрических полей. Ранее исследования деформации микрокапель магнитных жидкостей в электрическом поле, а также при совместном воздействии магнитного и электрического полей проводились в работах [5–8, 14]. В большинстве работ, объектом этих исследований являлись микрокапельные агрегаты, образующиеся под влиянием различных факторов в первоначально однородных магнитных коллоидах. Следует заметить, что использование в качестве объектов исследования микрокапельных агрегатов приводит к затруднениям при анализе результатов из-за сложности определения их электрических и магнитных параметров. В связи с этим, в настоящей работе в качестве объекта исследования использовались микрокапли магнитных эмульсий, полученные диспергированием однородной магнитной жидкости в

масляной среде [15]. Для таких микрокапель характерно малое межфазное натяжение на границе капля – среда, что делает возможным их деформацию даже в достаточно слабых магнитном и электрическом полях. Их физические параметры определяются параметрами диспергируемой магнитной жидкости, предварительное измерение которых не представляет большой сложности. Исследование особенностей деформации микрокапель проведено в переменном электрическом поле, при этом, в отличие от предыдущих работ, кроме частоты и напряженности поля, варьировалась также и температура. Отметим, что дополнительный интерес к исследованию использованных нами магнитных эмульсий обусловлен обнаруженными в последнее время оптическими и электрогидродинамическими эффектами, проявляющимися в таких средах при воздействии на них магнитного и электрического полей [16–18].

ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения исследований были приготовлены три образца магнитной эмульсии, представляющие собой взвесь микрокапель магнитной жидкости в масляной среде. Они были получены путем диспергирования в масле

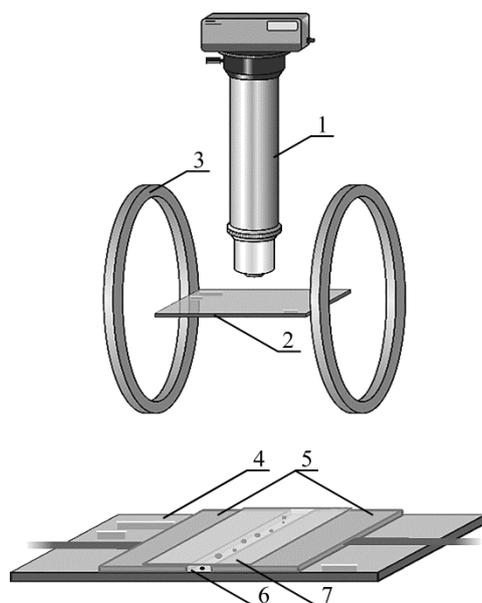


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования деформации микрокапель при совместном действии электрического и магнитного полей: 1 – оптический микроскоп; 2 – ячейка с образцом, вид которой показан в нижней части рисунка; 3 – катушки Гельмгольца; 4 – предметное стекло; 5 – медные пластины; 6 – исследуемый образец взвеси микрокапель; 7 – покрывное стекло.

Таблица. Физические параметры магнитных эмульсий

Дисперсная фаза образца 1	
Плотность, кг/м ³	$1,036 \times 10^{-3}$
Электропроводность, См/м	$1,3 \times 10^{-6}$
Диэлектрическая проницаемость	$2,35 \times 10^{-6}$
Межфазное натяжение на границе капля/среда, Н/м	$8,15 \times 10^{-8}$
Дисперсная фаза образца 2	
Плотность, кг/м ³	$1,036 \times 10^{-3}$
Электропроводность, См/м	$1,4 \times 10^{-6}$
Диэлектрическая проницаемость	2,36
Межфазное натяжение на границе капля/среда, Н/м	$8,15 \times 10^{-8}$
Дисперсная фаза образца 3	
Плотность, кг/м ³	$1,036 \times 10^{-3}$
Электропроводность, См/м	$1,7 \times 10^{-6}$
Диэлектрическая проницаемость	2,67
Межфазное натяжение на границе капля/среда, Н/м	$8,15 \times 10^{-8}$
Дисперсионная среда образцов (масло АМГ-10)	
Плотность, кг/м ³	776
Электропроводность, См/м	10^{-14}
Диэлектрическая проницаемость	2,2
Динамическая вязкость, мПа·с	14,5

АМГ-10 однородной магнитной жидкости с магнетитовыми частицами, дисперсионной средой в которой являлся керосин, при этом соотношение объемов АМГ-10 и исходного образца магнитной жидкости составляло 9:1. Смесь перемешивали с помощью электромеханической мешалки, в результате чего получали магнитную эмульсию, содержащую микрокапли магнитной жидкости диаметром 10–16 мкм. Для получения микрокапель с различной электрической проводимостью в исходную

магнитную жидкость перед ее диспергированием добавлялись кристаллы йода, что, как известно [19, 20], приводит к изменению проводимости несущей среды. Таким образом, были получены три образца с различной проводимостью микрокапель.

Основные данные приведены в [таблице](#). Измерения диэлектрической проницаемости ϵ и проводимости γ компонентов эмульсий проводили мостовым методом. Для определения диэлектрической проницаемости исследуемый

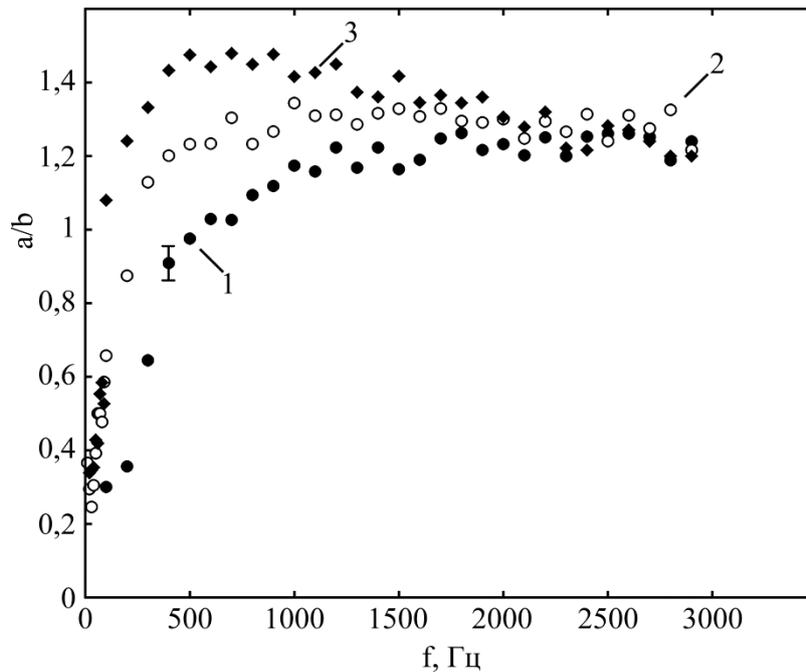


Рис. 2. Зависимость деформации микрокапли от частоты электрического поля при разной электропроводности магнитной жидкости, использованной для получения микрокапель: 1 – $1,3 \times 10^{-6}$ См/м; 2 – $1,4 \times 10^{-6}$ См/м; 3 – $1,7 \times 10^{-6}$ См/м, напряженность электрического поля 140 кВ/м, температура $t = 25$ °С.

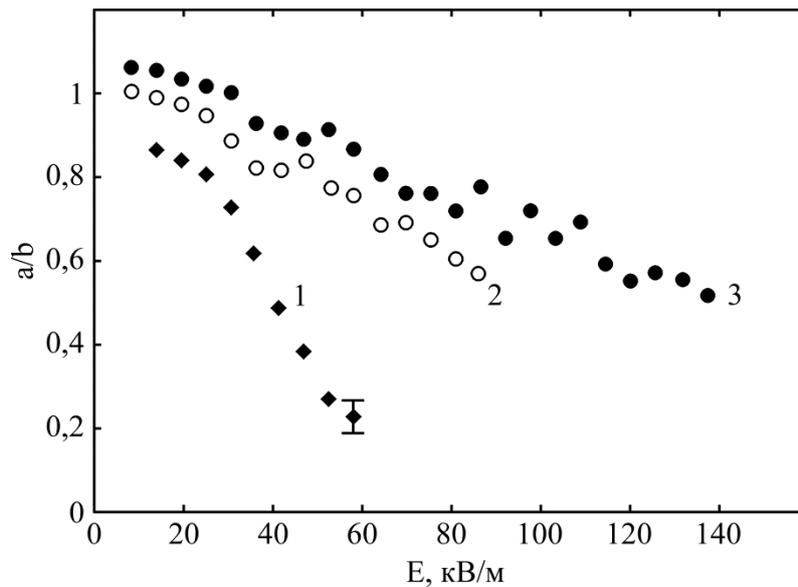


Рис. 3. Зависимость параметра деформации микрокапли от напряженности электрического поля ($t = 25$ °С, $f = 40$ Гц) при разных электропроводностях магнитной жидкости, из которой получены микрокапли: образец 1 – $1,3 \times 10^{-6}$ См/м, образец 2 – $1,4 \times 10^{-6}$ См/м, образец 3 – $1,7 \times 10^{-6}$ См/м.

образец помещали в ячейку с медными электродами, представляющую собой конденсатор в форме прямоугольного параллелепипеда, имеющего размеры $30 \times 40 \times 2,5$ мм. Далее измеряли емкость ячейки по параллельной схеме замещения. Для измерений применяли цифровой мост переменного тока GW Instek LCR-78110G с частотой измерительного сигнала 1 кГц. Деформацию микрокапель эмульсий в электрическом поле изучали с помощью оптического микроскопа типа Биолам, не содержащего намагничивающихся деталей. Микроскоп был снабжен видеокамерой, сопряженной с

компьютером. При проведении исследования использовали ячейку, представляющую собой предметное стекло, на поверхность которого наклеены две прямоугольные металлические пластины (медная фольга, толщиной 0,4 мм), расстояние между торцами которых составляло 1,5 мм. Пространство между пластинами заполнялось магнитной эмульсией и накрывалось покровным стеклом. Для создания между электродами переменного электрического поля на них подавали напряжение от генератора, эффективное значение напряженности поля E оценивалось по значению напряжения U и

расстоянию между электродами ($E = U/l$). Кювету с исследуемой жидкостью прижимали с помощью механического зажима к термостатирующей системе, которая представляла собой массивный медный параллелепипед, через пазы в толще которого прокачивалась вода с заданной температурой с помощью термостата типа TERMEX M12M-X232B. Температуру контролировали медь-константановой термопарой, расположенной под прижатой к термостатирующей системе стенкой кюветы с эмульсией. Для осуществления дополнительного воздействия магнитным полем, ячейка была снабжена намагничивающей системой (катушками Гельмгольца), создающей однородное поле в объеме, в несколько раз превышающем габариты кюветы. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Оценка величины межфазного натяжения на границе микрокапля–среда проведена по результатам измерения зависимости деформации капли магнитной жидкости в масле АМГ от величины напряженности однородного стационарного магнитного поля, согласно методике, подробно изложенной в [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что воздействие на первоначально сферическую микрокаплю эмульсии переменного электрического поля приводит к ее деформации, характер которой зависит от частоты электрического поля. Так, при достаточно низких частотах капля сплющивается вдоль направления напряженности поля, при этом дальнейшее повышение частоты приводит к уменьшению ее деформации и, при некоторой критической частоте, к восстановлению ее сферической формы. При дальнейшем повышении частоты капля вновь деформируется, однако в этом случае она вытягивается вдоль поля. Отметим, что ранее [4, 5] подобный результат был получен для микрокапельных агрегатов, образующихся в магнитной жидкости.

Оказалось, что частота, соответствующая переходу формы микрокапли от сплюснутого состояния в вытянутое, зависит от электрической проводимости капли. В качестве подтверждения этого на рис. 2 приведены зависимости отношения полуосей деформированной микрокапли от частоты электрического поля при различных значениях ее электропроводности (при комнатной температуре), где a и b – оси микрокапли, причем ось a – параллельна направлению электрического поля, ось b перпендикулярна ему. Как можно видеть из рис. 2, повышение электропроводности микрокапли приводит к уменьшению частоты, соответствующей ее сферической форме (отношению a/b , равному единице). Следует также отметить, что при достаточно большой электропроводности капли на кривой зависимости отношения полуосей капли от частоты поля наблюдается максимум при некотором значении частоты. Величина деформации как сплюснутых, так и вытянутых микрокапель зависит также от напряженности электрического поля. На рис. 3

представлена экспериментальная зависимость параметра деформации капли от напряженности электрического поля ($t = 25$ °С, $f = 40$ Гц) при различных значениях электропроводности магнитной жидкости.

Как видно из рис. 3, при напряженности электрического поля около 20 кВ/м капли с самой большой электропроводностью (образец 3) при данной частоте поля имеют вытянутую вдоль поля форму ($a/b > 1$). Форма капель образца 2 в этой ситуации близка к сферической ($a/b = 1$), а капли образца 1 сплюснуты вдоль направления поля ($a/b < 1$). При дальнейшем увеличении напряженности поля удлинение капли образца 3 уменьшается вплоть до перехода формы капли в сферическую при напряженности поля около 40 кВ/м, а степень деформации (сплющивания) капель образцов 1 и 2, напротив – увеличивается. При напряженности поля свыше 40 кВ/м капли образца 3, как и образцов 1 и 2, сплющиваются вдоль направления напряженности поля. При этом наиболее сильная зависимость деформации микрокапель в этом случае наблюдается для микрокапель с меньшей электрической проводимостью (образец 1). В качестве иллюстрации особенности деформации капли с наиболее высокой электропроводностью ($\gamma = 1,7 \times 10^{-6}$ См/м) при увеличении напряженности электрического поля на рис. 4 приведены фотографии деформированной капли образца 3 при различных значениях напряженности поля.

При достаточно высоких частотах электрического поля характер деформации капель всех образцов в исследованном интервале напряженностей электрического поля одинаковый – все они вытягиваются вдоль направления поля. На рис. 5 приведены зависимости параметра деформации от напряженности электрического поля при его частоте 2 кГц для микрокапель всех исследованных образцов.

Как следует из рис. 5, в этом случае большей деформации при одной и той же напряженности поля подвержены микрокапли с большей электропроводностью. Как известно (например, из [9–11]), микрокапли магнитной жидкости могут претерпевать существенную деформацию также при воздействии магнитного поля, которое

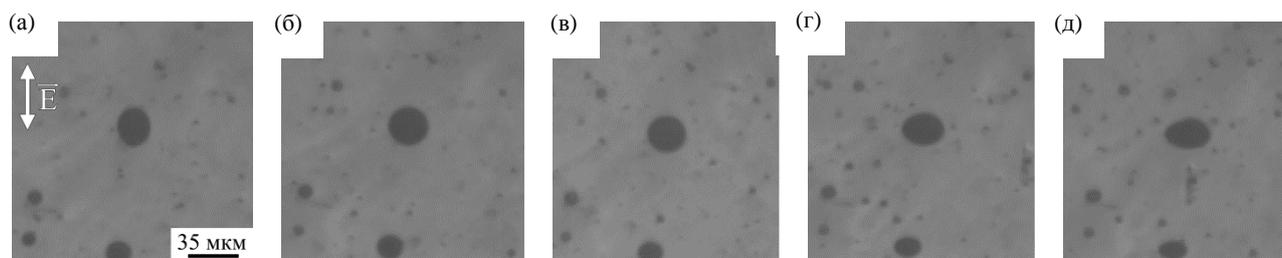


Рис. 4. Изменение деформация капли образца 3 в электрическом поле частотой 40 Гц при увеличении его напряженности: (а) – 14 кВ/м; (б) – 25 кВ/м; (в) – 58 кВ/м; (г) – 109 кВ/м; (д) – 132 кВ/м.

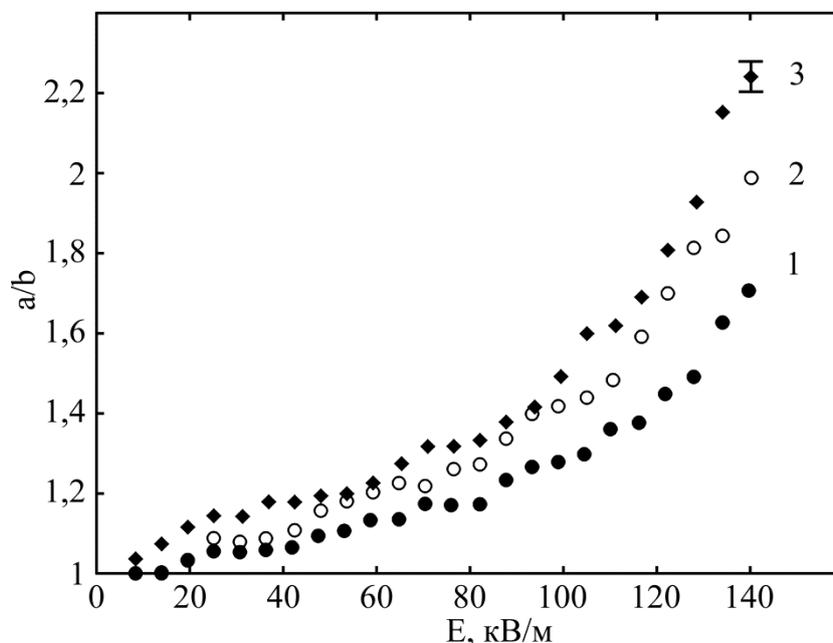


Рис. 5. Зависимость параметра деформации от напряженности электрического поля ($t = 25\text{ }^\circ\text{C}$, $f = 2\text{ кГц}$) для капель с разной электрической проводимостью: 1 – $1,3 \times 10^{-6}\text{ См/м}$; 2 – $1,4 \times 10^{-6}\text{ См/м}$; 3 – $1,7 \times 10^{-6}\text{ См/м}$.

всегда приводит к вытягиванию каплей вдоль его направления. При этом, деформация капли, возникшая в результате воздействия электрическим полем, может быть компенсирована с помощью дополнительно приложенного магнитного поля. Такая компенсация была осуществлена при дополнительном воздействии на вытянутую в электрическом поле частотой 2 кГц каплю постоянным магнитным полем, направленным перпендикулярно электрическому. На [рис. 6](#) представлены компенсационные кривые деформации в координатах $E^2 - H^2$ для микрокапель с различной электропроводностью.

Из анализа графиков можно заключить, что увеличение электропроводности микрокапли позволяет компенсировать ее деформацию в электрическом поле с помощью магнитного поля меньшей напряженности. Была предпринята также попытка подобной компенсации деформации капли в случае ее сплющивания в электрическом поле. Ранее такого рода компенсация осуществлялась для сплюснутых микрокапельных агрегатов [4] при дополнительном воздействии магнитного поля, сонаправленного с электрическим. Однако, для исследованных

микрокапель эмульсии этого добиться не удалось, так как дополнительное воздействие постоянного поля на сплюснутую в электрическом поле микрокаплю приводило не к восстановлению ее сферической формы, а ее повороту, соответствующему уменьшению размагничивающего фактора.

Обнаружено, что характер деформации микрокапель эмульсии зависит и от температуры. При этом характер этой зависимости может быть различным при различных частотах электрического поля. Иллюстрацией этого могут быть приведенные на [рис. 7](#) зависимости фактора деформации микрокапли образца 1 от температуры при различных частотах электрического поля.

Так, первоначально вытянутая вдоль направления электрического поля микрокапля при его частоте 1,1 кГц и 2,4 кГц продолжает удлиняться при первоначальном увеличении температуры. Однако, при достижении температуры $25\text{ }^\circ\text{C}$ деформация капли начинает уменьшаться. При этом, при частоте электрического поля 1,1 кГц капля принимает сферическую форму при температуре $45\text{ }^\circ\text{C}$ и при дальнейшем

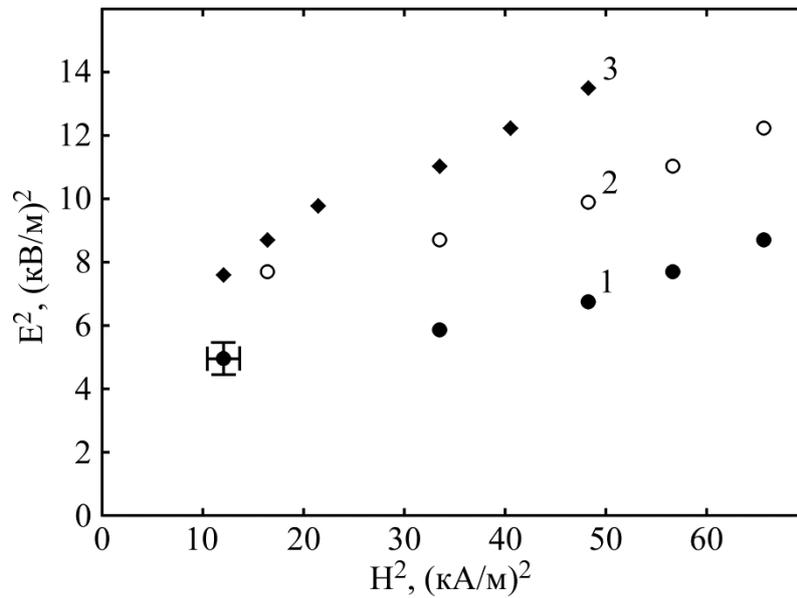


Рис. 6. Компенсационные зависимости деформации каплей с разной электропроводностью при $f = 2$ кГц и $t = 25$ °С: 1 – $1,3 \times 10^{-6}$ См/м; 2 – $1,4 \times 10^{-6}$ См/м; 3 – $1,7 \times 10^{-6}$ См/м.

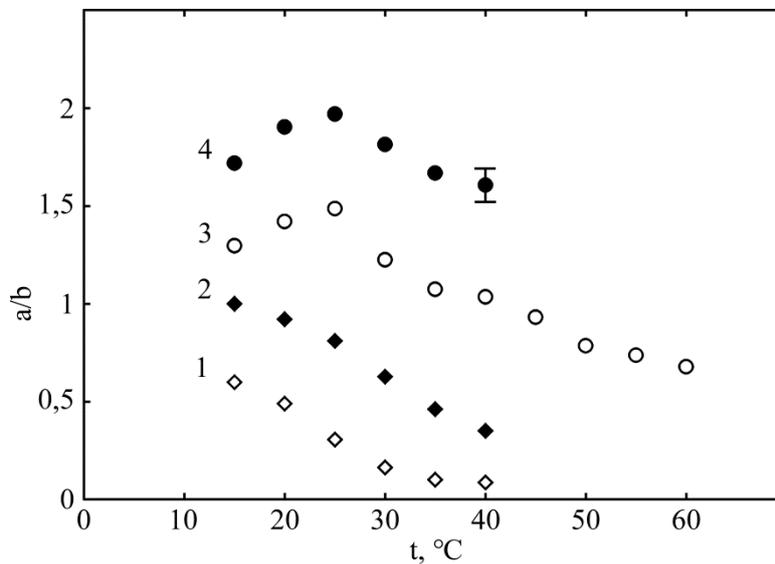


Рис. 7. Зависимость параметра деформации каплей от температуры при разных частотах: 1 – 300 Гц (капля изначально имеет сплюснутую форму); 2 – 400 Гц (капля изначально имеет сферическую форму); 3 – 1,1 кГц и 4 – 2,4 Гц (капля изначально имеет вытянутую форму). Напряженность поля 1,4 кВ/м.

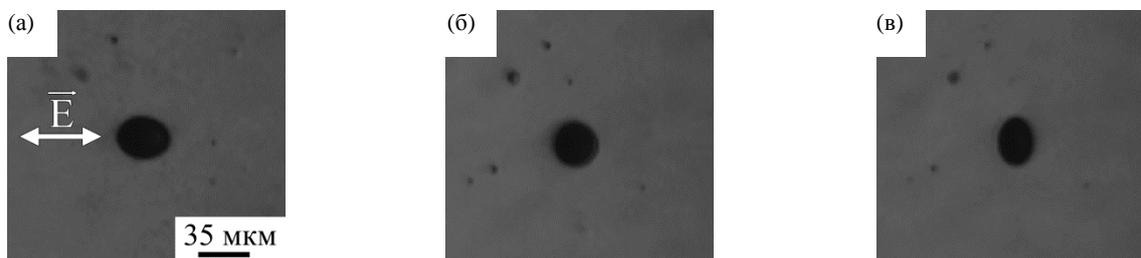


Рис. 8. Изменение деформации капли (образец 1) с увеличением температуры; (а) – 15 °С; (б) – 45 °С; (в) – 60 °С ($E = 140$ кВ/м, $f = 1,1$ кГц).

увеличении температуры сплющивается. На рис. 8 представлены фотографии исследованной капли при этой частоте, соответствующие температуре 15 °С (а), 45 °С (б) и 60 °С (в).

Как следует из рис. 7, в случае воздействия на каплю электрического поля более низкой частоты (300 Гц и 400 Гц) капля сплющивается

вдоль поля, при этом, повышение температуры приводит к усилению ее деформации. Ранее в работе [22] исследованы процессы деформации в постоянном электрическом поле слабо проводящих каплей гомогенной жидкости, взвешенных в жидких средах. Согласно ее результатам, изменение формы капли в электрическом поле обусловлено, наряду с поляризаци-

онными эффектами, развитием течений внутри и вне капли, из-за накопления свободного заряда на границах капли. В этом случае, характер деформации капль (сплющивание или удлинение вдоль поля) определяется соотношением электропроводностей и диэлектрических проницаемостей вещества капли и окружающей ее среды. Так, при выполнении условия $Rq > 1$ половина капли, обращенная к положительному электроду, заряжается положительно, а обращенная к отрицательному электроду – отрицательно. При $Rq < 1$ имеет место обратная картина (R и q – отношения удельных сопротивлений и диэлектрических проницаемостей капли и окружающей среды соответственно). В первом случае образуются течения, направленные от полюсов капли к экватору, в результате чего и происходит сплющивание капль. Во втором случае возникают течения, направленные от экватора к полюсам, при $Rq = 1$ течения отсутствуют. Вероятно, этот механизм может иметь место и в рассматриваемом нами случае, то есть для микрокапель магнитного коллоида. Вместе с тем, оказалось, что характер деформации исследованных в настоящей работе микрокапель не соответствует приведенным в [22] условиям. Так, согласно приведенным в таблице данным, для микрокапли магнитной жидкости, взвешенной в масляной среде, $Rq < 1$, что является условием ее вытягивания вдоль направления постоянного электрического поля. Однако, как оказалось, она сплющивается при воздействии, как постоянного, так и переменного низкочастотного электрического поля. Как следует из представленных выше результатов, ее вытяжение вдоль направления электрического поля наблюдается только при достаточно высоких значениях частоты его изменения.

Очевидно, при анализе полученных результатов необходимо учитывать, что они получены при воздействии на микрокапли переменного электрического поля. Характер деформации микрокапель в переменном поле во многом связан с соотношением времен релаксации различных процессов, характерных для таких систем, помещенных в переменное электрическое поле: максвелловского времени релаксации заряда, времени релаксации анизотропии формы капль, времени их поворота в поле и времени развития электрогидродинамических течений. Так, процессы накопления на межфазных границах свободного заряда характеризуются максвелловским временем релаксации заряда

$$\tau_M = \frac{\varepsilon_0 (2\varepsilon_e + \varepsilon_i)}{(2\gamma_e + \gamma_i)}, \quad (1)$$

где ε_i и ε_e – диэлектрические проницаемости, а γ_i и γ_e – проводимости капли и окружающей их дисперсионной среды соответственно.

Время релаксации анизотропии формы определяется выражением (2). Оно зависит от коэффициентов вязкости вещества капли и омывающей среды (η_i , η_e), от радиуса невозмущенной капли r_0 и коэффициента межфазного натяжения σ :

$$\tau_a = \frac{r_0 (16\eta_e + 19\eta_i)(3\eta_e + 2\eta_i)}{40\sigma(\eta_i + \eta_e)}. \quad (2)$$

Для характерного времени поворота капли в электрическом поле справедливо выражение:

$$\tau_n = \delta / (\varepsilon_0 r_0^3 E^2), \quad (3)$$

где δ – коэффициент вращательного трения эллипсоидальной капли. При дополнительном воздействии на деформированные капль магнитным полем, необходимо также учитывать аналогично определяемое время поворота капли в магнитном поле. Ранее, объяснение особенностей деформации микрокапельных агрегатов в переменном электрическом поле на основе учета перечисленных релаксационных процессов было предпринято в [4]. При объяснении результатов, полученных в настоящей работе, также необходим учет этих факторов. Действительно, сплющивание исследованных микрокапель эмульсии в низкочастотном электрическом поле однозначно может быть связано с развитием течений вокруг и внутри капль, вследствие явного отсутствия других причин. Однако, следует заметить, что в настоящей работе исследование деформации микрокапель осуществлялось в достаточно тонких слоях эмульсии (около 70–100 мкм) и при небольшом (1,5 мм) расстоянии между электродами. Очевидно, в этом случае нельзя пренебрегать влиянием процессов, связанных с формированием вблизи электродов объемного заряда. Так, в работе [23] показано, что вследствие этого в слабо проводящих неоднородных жидких средах в межэлектродном пространстве возможно возникновение электрогидродинамических вихревых течений. Развитие межэлектродных электроконвекционных явлений характеризуется временем гидродинамической релаксации жидкости в слое. Выражение для его оценки приведено в [24]:

$$\tau_\Gamma = \frac{2\rho d^2}{\eta}, \quad (4)$$

где ρ и η – плотность и вязкость жидкой среды соответственно, d – толщина слоя.

Можно предположить, что на трансформацию формы капель исследованных эмульсий оказывают влияние также и межэлектродные электрогидродинамические процессы. Очевидно, развитие электрогидродинамических явлений, а, следовательно, и сплющивание капель, возможны в постоянном электрическом поле или при достаточно низкой его частоте, когда максвелловское время релаксации заряда τ_m и гидродинамической релаксации τ_r не превышает периода колебаний поля. Действительно, проведенные расчеты τ_m и τ_r по формулам (1) и (4) подтвердили выполнение этого условия. Сплюснутая вдоль направления поля за счет электрогидродинамических течений капля должна стремиться ориентироваться в направлении, соответствующем минимальному коэффициенту деполяризации. Наблюдающееся сохранение ею сплюснутой формы вдоль направления поля обусловлено превышением времени ее поворота τ_n и времени релаксации ее формы τ_a , рассчитанными с помощью выражений (3) и (2) соответственно. Повышение частоты поля приводит к подавлению течений, в связи с чем, определяющую роль в процессах изменения формы капель начинают играть поляризационные эффекты. В этом случае капли должны принимать форму, соответствующую минимальному коэффициенту деполяризации, то есть вытягиваться вдоль направления поля (что и наблюдается в эксперименте). Вместе с тем, нельзя полностью исключать из процесса формирования электрического момента капли процессов перераспределения свободного заряда даже при частотах, соответствующих началу вытяжения капель. Подтверждением этого может быть то, что степень деформации (вытяжения) капель с большей электропроводностью при одной и той же частоте (например, при $f = 1,1$ кГц) является более высокой по сравнению с деформацией капель меньшей электропроводности (рис. 2). Кроме того, в пользу этого предположения можно отнести уменьшение отношения осей деформированной капли с наибольшей электропроводностью при дальнейшем увеличении частоты (рис. 2, кривая 3).

Интересным является тот факт, что для компенсации деформации дополнительным магнитным полем капель с более высокой электропроводностью необходимо магнитное поле меньшей напряженности (рис. 5). Можно предположить, что это связано с тем, что компенсация деформации капли магнитным полем осуществляется не только за счет пондеромоторных сил, действующих на поверхность магнитной капли, но и изменения направления движения носителей свободного заряда в капле

под воздействием магнитного поля, направленного первоначально перпендикулярно их скорости. Отметим также, что невозможность компенсации деформации сплюснутой вдоль электрического поля капли путем наложения постоянного магнитного поля, сонаправленного с электрическим, очевидно, связана с превышением времени релаксации формы исследованных капель по сравнению с временем их поворота под воздействием магнитного поля. Достаточно сложным является анализ влияния температуры на процессы деформации микрокапель эмульсии. Это связано с тем, что при изменении температуры меняется как электрическая проводимость компонент эмульсии и межфазное натяжение на границах микрокапель, так и коэффициенты вязкости микрокапель и окружающей их среды. Кроме того, также происходит изменение диэлектрической и магнитной проницаемостей вещества микрокапель. Это приводит к изменению соотношений характерных времен релаксации происходящих процессов, рассмотренных выше. Степень изменения диэлектрической проницаемости от температуры может быть оценена с помощью характерной для полярных диэлектриков зависимости диэлектрической проницаемости от температуры: $\epsilon \sim 1/T$. Изменение электропроводности капли магнитной жидкости может быть более существенным. Оно обусловлено как понижением вязкости раствора, так и увеличением степени диссоциации молекул жидкости либо примесей. Для определения связи электропроводности среды с температурой может быть использована формула Френкеля [25]:

$$\gamma = \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right). \quad (5)$$

Множитель $1/T$ изменяется при увеличении температуры гораздо медленней, чем $\exp(-T_0/T)$. Это дает основание заключить, что зависимость электропроводности от температуры является более выраженной, чем температурная зависимость диэлектрической проницаемости. При этом, повышение температуры приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости, тогда как электропроводность в этой ситуации растет. В результате происходит уменьшение максвелловского времени релаксации заряда и, как, следствие, переход формы капли из вытянутой к сплюснутой, что продемонстрировано на рис. 8. Очевидно, это возможно, если при повышении температуры, время релаксации формы остается меньшим времени поворота сплюснутой капли.

В заключение следует отметить, что, несмотря на предпринятые попытки дать

обоснование полученных результатов, многие вопросы остаются неясными из-за сложного характера рассматриваемых явлений. Исследуемые капли сформированы не из гомогенной жидкости, а магнитного коллоида, электропроводность и поляризация которого имеет достаточно сложный характер, во многом определяемый его коллоидной структурой. Подтверждением этого может быть проведенный в работе [26] подробный анализ электропроводности таких сред.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в настоящей работе в результате экспериментальных исследований показано:

– в переменном электрическом поле микрокапли исследованных магнитных эмульсий претерпевают деформацию, характер которой зависит от частоты электрического поля: в случае низких частот электрического поля капли сплюсываются вдоль его направления, при более высоких частотах – принимают вытянутую форму;

– частота, соответствующая переходу формы микрокапли от сплюснутого состояния в вытянутое, зависит от электрической проводимости капли. Для капель с большей электрической проводимостью такой переход происходит при более низких частотах;

– величина деформации капель зависит от напряженности электрического поля как в низкочастотном (где капли сплюснены), так и высокочастотном диапазоне, где капли имеют вытянутую форму. При этом, величина деформации капель при одном и том же значении напряженности в низкочастотном диапазоне больше для капель с большей электропроводностью, в высоко-частотном – для капель с меньшим значением этого параметра;

– деформация капли, возникшая в результате воздействия электрического поля, может быть компенсирована с помощью дополнительно приложенного магнитного поля. Это возможно при частотах, соответствующих вытянутой форме капли при дополнительном воздействии постоянным магнитным полем, перпендикулярным большой оси деформированной капли. Компенсация деформации сплюсненной в электрическом поле капли с помощью дополнительного воздействия магнитного поля оказалась невозможной;

– характер деформации капель в переменном электрическом поле зависит от температуры. Так, вытянутая вдоль направления поля доста-

точно высокой частоты капля при повышении температуры может изменить свою форму на сплюснутую при определенном ее значении;

– особенности деформации капель связаны с возможностью возникновения электрогидродинамических течений при достаточно низких частотах электрического поля и их подавления при увеличении частоты;

– обнаруженные особенности деформации капель магнитной эмульсии могут быть объяснены при учете соотношений величин характерных времен релаксации процессов, протекающих в исследованных средах в переменном электрическом поле.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания вузам в сфере научной деятельности (проект № 0795-2020-007).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bacri, J.C., Salin, D. and Massart, R., Study of the deformation of ferrofluid droplets in a magnetic field, *J. Physique Lettres*, 1982, vol. 43, p. L179.
2. Bacri, J.C. and Salin, D., *J. Physique Lettres*, Instability of ferrofluid magnetic drops under magnetic field, 1982, vol. 43, p. 649.
3. Диканский, Ю.И., Цеберс, А.О., *Магнитная гидродинамика*, Концентрационные доменные структуры в тонких слоях магнитной жидкости и дифракция света, 1990, № 2, с. 47.
4. Диканский, Ю.И., Цеберс, А.О., Шацкий, В.П., Свойства магнитных эмульсий в электрическом и магнитном полях, *Магнитная гидродинамика*, 1990, № 1, с. 32.
5. Диканский, Ю.И., Нечаева, О.А., *Коллоид. журн.*, 2003, т. 65, с. 338.
6. Dikansky, Y.I. and Nechaeva, O.A., Electrohydrodynamical instability of microdrops shapes in a magnetic fluid, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2005, vol. 289, p. 90.
7. Tyatyushkin, A.N. and Velarde, M.G., On the interfacial deformation of a magnetic liquid drop under the simultaneous action of electric and magnetic fields, *J. Colloid Interf. Sci.*, 2001, vol. 235, p. 46.
8. Dikansky, Y.I., Zakinyan, A.R. and Tyatyushkin, A.N., Anisotropy of magnetic emulsions induced by magnetic and electric fields, *Phys. Rev. E.*, 2011, vol. 84, 031402.

9. Timonen, J.V.I., Latikka, M., Leibler, L., Ras, R.H.A., et al., Switchable static and dynamic self-assembly of magnetic droplets on superhydrophobic surfaces, *Science*, 2013, vol. 341, p. 253.
10. Bashtovoi, V., Reks, A., Baev, A. and Mansoor, Al-J.T.M., Topological instability of a semi-bounded magnetic fluid drop under influence of magnetic and ultrasound fields, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2017, vol. 431, p. 42.
11. Al-Terke, H.H., Latikka, M.J., Timonen, V.I., Vékás, L., et al., Functional magnetic microdroplets for antibody extraction, *Adv. Mater. Interfaces*, 2022, vol. 9, 2101317.
12. Latikka, M., Backholm, M., Baidya, A., Ballesio, A., et al., Ferrofluid microdroplet splitting for population-based microfluidics and interfacial tensiometry, *Adv. Sci.*, 2020, vol. 7, 2000359.
13. Banis, G., Tyrovolas, K., Angelopoulos, S., Ferraro, A., et al., Pushing of magnetic microdroplet using electromagnetic actuation system, *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 2, p. 371.
14. Kvasov, D., Naletova, V., Beketova, E. and Dikanskii, Yu., Magnetic fluid droplet in a harmonic electric field, *J. Magn. Magn. Mater.*, 2017, vol. 431, p. 161.
15. Zakinyan, A. and Dikansky, Y., Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion, *Colloids Surf. A*, 2011, vol. 380, p. 314.
16. Yerin, C. and Belykh, S., *IEEE Transact. Magn.*, Magnetic emulsions as prospective magneto-optical media, 2022, vol. 58, no. 2, 4600704.
17. Ерин, К.В., Белых, С.С., Дифракция и ослабление света в магнитных эмульсиях с низким межфазным натяжением, *Коллоидн. журн.*, 2022, т. 84, № 3, с. 301.
18. Chekanov, V.S. and Dikansky, Yu.I., Autowave process in a thin layer of magnetodielectric emulsion, *J. Phys.: Conf. Series* 1967, 2021, 012010.
19. Стишков, Ю.К., Электрофизические процессы в жидкостях при воздействии сильных электрических полей. М.: Юстицинформ, 2019. 262 с.
20. Жакин, А.И., Приэлектродные и переходные процессы в жидких диэлектриках, *УФН*, 2006, т. 176, с. 289.
21. Бекетова, Е.С., Нечаева, О.А., Мкртчян, В.Д., Закинян, А.Р., Диканский, Ю.И., Структурные превращения в магнитных эмульсиях при их взаимодействии с переменным электрическим полем, *Коллоидн. журн.*, 2021, т. 83, № 2, с. 157.
22. Торза, С., Кокс, Р., Мейсон, С., *Реология суспензий*. М.: Мир, 1975. 285 с.
23. Болога, М.К., Гросу, Ф.П., Кожухарь, И.А., *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев: Штиинца, 1977.
24. Tóth-Katona, T., Éber, N., Buka, Á. and Krekhov, A., Flexoelectricity and competition of time scales in electroconvection, *Phys. Rev. E.*, 2008, vol. 78, 036306.
25. Остроумов, Г.А., *Взаимодействие электрических и гидродинамических полей*, М.: Наука, 1979.
26. Жакин, А.И., Кузько, А.Е., Кузьменко, А.П., Мью Мин Тан, *Электронная обработка материалов*, 2022, т. 58, № 1, с. 41.

Summary

The features of deformation of microdrops of magnetic emulsions in an alternating electric field are experimentally investigated. It is shown that the nature of deformation can vary depending on the frequency of an electric field. In the case of low frequencies of an electric field, the droplets flatten along its direction, at higher frequencies they take an elongated shape. It was established that the frequency value corresponding to the transition of the microdroplet shape from the flattened to the elongated state depends on the electrical conductivity of the droplet, the value of the electric field strength, and temperature. A possibility of compensating for the deformation of the droplet caused by the action of an electric field using an additionally applied magnetic field was shown. The analysis of the obtained results was carried out taking into account the movement of liquid phases caused by the accumulation of a free charge at the inter-phase boundaries of droplets and electrodes that create a field.

Keywords: microdroplets, magnetic emulsions, droplet deformations in external fields, deformation compensation, electrical conductivity of a drop of a magnetic liquid