

Изменение уровня магнитного коллоида на основе керосина в приэлектродной области в импульсном электрическом поле

К. В. Ерин

*Институт математики и естественных наук Северо-Кавказского федерального университета,
ул. Пушкина, 1, г. Ставрополь, 355009, Россия, e-mail: exiton@inbox.ru*

Исследовано изменение уровня магнитного коллоида на основе керосина в электрическом поле плоского конденсатора. Экспериментально обнаружено, что при включении электрического поля происходит значительное кратковременное изменение уровня в тонком приэлектродном слое. Определены толщина таких приэлектродных слоев и характерное время их образования. Обсуждены возможные механизмы возникновения эффекта.

Ключевые слова: магнитный коллоид, приэлектродный слой, пондеромоторная сила, объемный заряд, распределение электрического поля.

УДК 544.77.03:537.36

ВВЕДЕНИЕ

Процессы проводимости и зарядообразования в жидких диэлектриках вызывают значительный интерес у исследователей [1, 2]. Это связано не только с бурным развитием электрогидродинамики и созданием различного рода технических устройств, использующих в работе ее принципы [3], но и с изучением многообразных электрофизических процессов, протекающих в жидких диэлектриках при воздействии поля. В частности, таких как поведение заряженных проводящих капель и струй в жидком диэлектрике [4], распределение электрического поля в системах электродов различных конфигураций [5], формирование объемных зарядов различной структуры [6–8], влияние электрического поля на капиллярные эффекты [9] и др. Интересным представителем семейства слабопроводящих жидких диэлектриков являются сильно разбавленные магнитные жидкости (с концентрацией твердой фазы порядка 10^{-4} – 10^{-2} об. %). Наличие магнитных наночастиц, взвешенных в жидкой основе (керосине, трансформаторном или вакуумном масле), и их участие в процессах переноса и накопления заряда позволяет наблюдать ряд весьма интересных физических эффектов, связанных с самоорганизацией частиц, образованием кластеров и сложных пространственных структур [10, 11], изменением оптических свойств коллоида при воздействии электрического поля, формированием приэлектродного объемного заряда и со значительным усилением локального поля в приэлектродной области [12], искажением формы свободной поверхности жидкости в поле [13, 14] и др. Исследование приэлектродных эффектов в таких системах дает возможность понять особенности инжекции и переноса заряда, роль магнитных наночастиц и их агрегатов в процессах

зарядообразования и проводимости, а также установить механизмы влияния этих процессов на структурную организацию в коллоиде.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования изменения уровня магнитного коллоида на основе керосина в плоском конденсаторе при воздействии импульсного электрического поля.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Подъем уровня образцов слабопроводящего жидкого диэлектрика с магнитными коллоидными частицами исследовался в плоскопараллельной ячейке, электроды которой представляли собой стеклянные пластинки с проводящим напылением оксида индия-олова. Расстояние между электродами задавалось полимерными и текстолитовыми прокладками и составляло от 0,3 до 3 мм. Ячейка помещалась в емкость с образцом, объем которой более чем на порядок превышал объем ячейки. Электрическое напряжение на электроды последней подавалось от формирователя импульсов высокого напряжения (амплитуда составляла от 100 В до 8 кВ, длительность импульса – 5 с). Время включения электрического поля – менее 0,01 с. Наблюдение за процессом поднятия уровня в ячейке осуществлялось при помощи микроскопа МБС-9 с окулярной микрометрической шкалой. Регистрация сравнительно быстрых процессов установления уровня при включении электрического поля производилась при помощи скоростной фото- и видеосъемки. Образцами для исследований являлись чистый керосин и магнитные коллоиды на его основе с объемными концентрациями твердой фазы (магнетита) 0,01 и 0,001%. Они были приготовлены разбавлением концентрированной

магнитной жидкости на основе керосина (исходная концентрация 22%) чистым керосином в необходимой пропорции. В исходной жидкости диапазон размеров наночастиц магнетита равнялся 8–20 нм, стабилизатор – олеиновая кислота. В таблице представлены характеристики исследованных образцов. Для изучения кинетики подъема уровня вблизи поверхности электрода использовалась простая оптическая схема, в которой луч гелий-неонового лазера пропусклся над поверхностью жидкости, и регистрировалось изменение его интенсивности.

Характеристики образцов

Образец	ρ , кг/м ³	η , мПа·с	ε (на частоте 30 Гц)	σ , пСм/м
Керосин (ГОСТ 10227-86)	880	0,89	2	0,3
Магнитный коллоид 0,001%	880	0,9	2,20	7,5
Магнитный коллоид 0,01%	880	0,91	2,25	25,9

На рис. 1 представлены последовательные фотографии ячейки с магнитным коллоидом, сделанные после включения электрического поля с интервалом 0,35 с. Из рисунка видно, что при воздействии импульса электрического поля, помимо известного для жидких диэлектриков подъема уровня от начального h_0 на высоту h_1 , вблизи поверхности электрода наблюдается кратковременное поднятие уровня на существенно большую высоту h_2 . При этом эффект наиболее выражен при относительно большом расстоянии между электродами (более 1 мм). Более высокая прозрачность приэлектродной жидкой пленки позволяет предположить её малую толщину по сравнению с межэлектродным расстоянием.

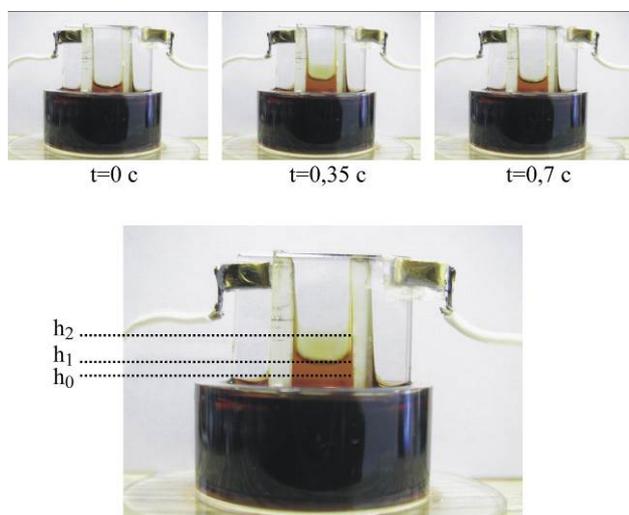


Рис. 1. Фотография ячейки с магнитным коллоидом после включения поля.

Исследование чистого керосина показало, что в нем при включении электрического поля происходит подъем уровня на одинаковую высоту во всем межэлектродном промежутке. Зависимость высоты подъема является квадратичной функцией напряженности поля (рис. 2), а численные значения находятся в хорошем согласии с классической формулой высоты подъема диэлектрика в электрическом поле плоского конденсатора [15]:

$$h_E = h_1 = \frac{(\varepsilon - 1)\varepsilon_0 E^2}{2\rho g}. \quad (1)$$

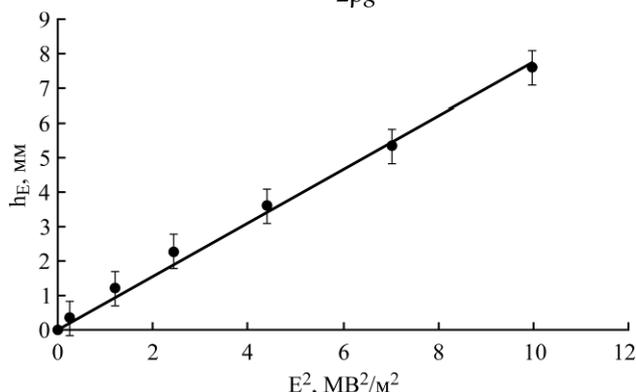


Рис. 2. Зависимость высоты подъема уровня чистого керосина в плоском конденсаторе от квадрата напряженности поля.

В магнитных коллоидах при включении электрического поля имеет место неожиданный для жидких диэлектриков эффект кратковременного поднятия уровня жидкости в приэлектродной области на высоту, существенно превышающую средний уровень подъема в межэлектродном промежутке. На рис. 3 представлены графики зависимостей высоты подъема от квадрата напряженностей полей для различных образцов магнитного коллоида. Из рис. 4 видно, что эффект оказывается существенно выраженным при относительно большом расстоянии между электродами (свыше 0,5 мм).

Для определения толщины жидких пленок на поверхности электрода, кратковременно возникающих при включении электрического поля, был произведен оптический эксперимент, схема которого приведена на рис. 5. Эксперимент показал, что при прохождении через приэлектродную пленку лазерный луч отклоняется от первоначального направления распространения, а его след на экране размывается в вертикальную полосу. Очевидно, это связано с тем, что пленка на поверхности электрода представляет собой клин с криволинейной свободной поверхностью. По среднему углу отклонения луча была определена средняя по высоте толщина клина на основе известного из геометрической оптики соотношения:

$$\alpha = 2\delta(n - 1), \quad (2)$$

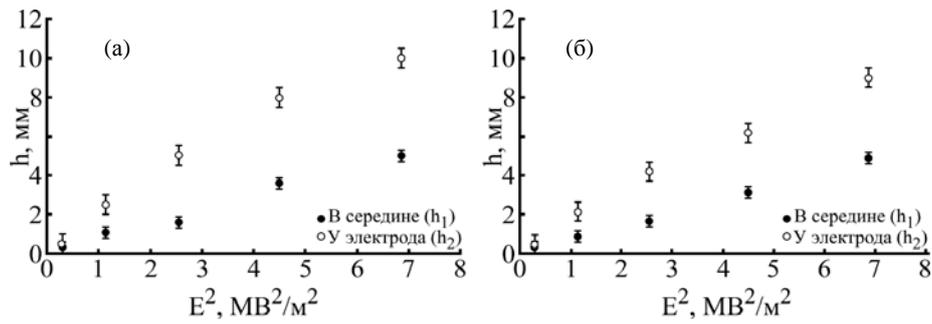


Рис. 3. Высота подъема уровня магнитных коллоидов в зависимости от квадрата напряженности поля у поверхности электрода и в центре ячейки для различных образцов магнитного коллоида %: (а) – 0,01; (б) – 0,001; межэлектродное расстояние $d = 2$ мм.

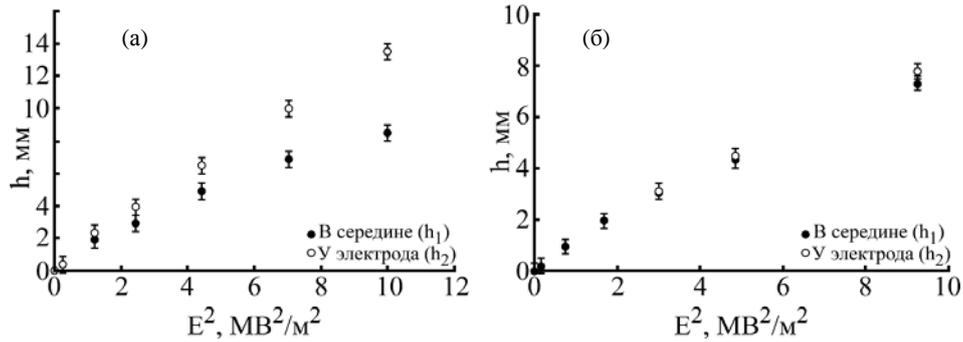


Рис. 4. Высота подъема уровня магнитного коллоида с концентрацией 0,01% в зависимости от квадрата напряженности поля у поверхности электрода и в центре ячейки при различных расстояниях d (мм) между электродами: (а) – 1; (б) – 0,5.

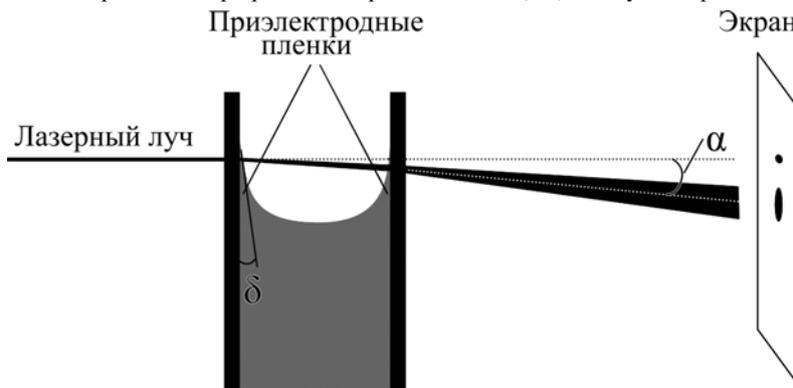


Рис. 5. Схема оптического эксперимента по определению толщины приэлектродной пленки.

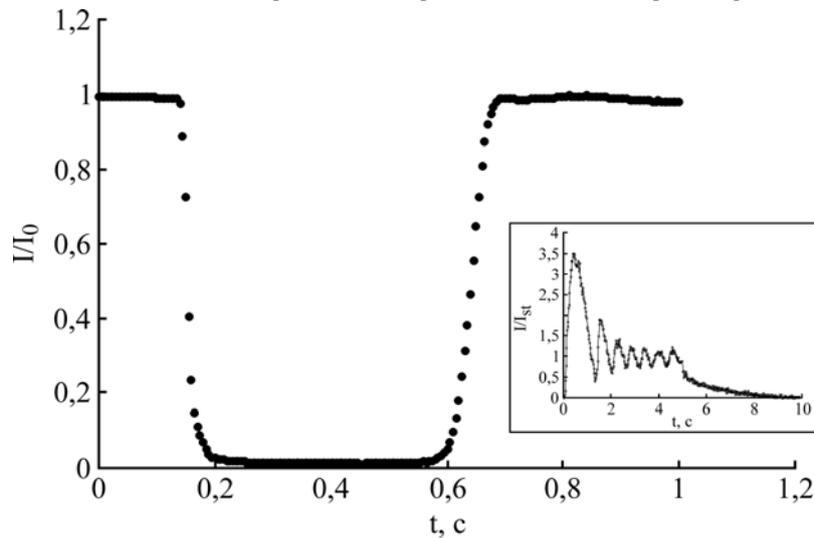


Рис. 6. Зависимость относительной интенсивности света, прошедшего над поверхностью магнитного коллоида, от времени после включения поля; I_0 – интенсивность падающего света (на вставке – электрооптический эффект Керра в приэлектродной области в импульсном электрическом поле по данным [21]; I_{st} – интенсивность света при длительном воздействии поля).

где α – угол отклонения луча; δ – угол с вертикалью касательной к свободной поверхности клина в месте прохождения луча; n – показатель преломления жидкости. Оценка с использованием формулы (2) дает значение средней толщины клина $\bar{l} = 0,12 \pm 0,05$ мм. Этот результат объясняет слабую выраженность эффекта для небольшого межэлектродного расстояния (рис. 4б). Для расстояния между электродами 0,5 мм и менее суммарная толщина приэлектродных жидких пленок оказывается сравнима с толщиной жидкости в ячейке.

Кинетика отклонения луча при прохождении приэлектродной жидкой пленки позволяет определить характерное время возникновения эффекта. На рис. 6 показана зависимость интенсивности прошедшего света от времени, на которой виден характерный минимум, соответствующий отклонившемуся и не попавшему в фотоприемник лучу света. Согласно эксперименту, эффект возникновения тонкой жидкой пленки на поверхности электрода проявляется спустя 0,1–0,2 секунды после включения поля и исчезает через 0,6–0,7 секунды в зависимости от напряженности поля. По времени исчезновения оптического сигнала после включения поля оценена скорость движения жидкой пленки по поверхности электрода, которая составила 5–15 мм/с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возможно выделить несколько подходов к интерпретации наблюдаемого эффекта кратковременного ($\sim 0,5$ с) возникновения на поверхности электрода тонкой жидкой пленки при подаче на электроды импульса высокого напряжения.

Изменение поверхностного натяжения под действием поля

Как известно [16], высота поднятия жидкости у вертикальной стенки за счет капиллярных сил определяется выражением

$$\Delta h_0 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho g} (1 - \sin \theta)}, \quad (3)$$

где γ – поверхностное натяжение; θ – краевой угол. Керосин обладает высочайшими смачивающими свойствами по большинству поверхностей, поэтому для наших образцов $\sin \theta$ можно полагать близким к нулю. Изменение поверхностного натяжения должно приводить к существенному повышению высоты поднятия жидкости у электрода. Однако значительное влияние внешнего электрического поля на коэффициент поверхностного натяжения жидких диэлектриков

является дискуссионным вопросом. Так, в [3] показано, что изменение поверхностного натяжения жидкого диэлектрика вследствие инъекции с электродов можно описать соотношением

$$\gamma_E = \gamma_0 - \alpha^* F(\eta), \quad (4)$$

где $\alpha^* = 2kTr_D n_0$, r_D – дебаевский радиус; n_0 – равновесная концентрация ионов; $F(\eta)$ – функция, характеризующая интенсивность инъекции зарядов на электроде.

Действительно, внешнее электрическое поле уменьшает поверхностное натяжение, однако численные оценки, приведенные в [3] для типичных неполярных жидких углеводородов, показывают, что даже в случае сильной инъекции (в поле с $E \approx 100$ МВ/м, что в 30 раз превосходит напряженность в наших экспериментах) относительное изменение поверхностного натяжения составляет не более 20%. Таким образом, объяснить двух- и трехкратное изменение уровня у поверхности электрода уменьшением поверхностного натяжения при включении электрического поля не представляется возможным (согласно (3) для керосина при отсутствии поля $\Delta h_0 \approx 2$ мм).

Эффект электросмачивания

Под эффектом электросмачивания («electrowetting») [17] понимают совокупность физических процессов на поверхностях жидкостей при воздействии электрического поля. Последнее, вызвавшее накопление зарядов поверхности раздела между проводящим и непроводящим материалами, может вызывать деформацию поверхности жидкости. Для построения теории эффекта электросмачивания возможно применение термодинамического, электрохимического подходов, метода минимизации энергии, а также электромеханического подхода, заключающегося в вычислении компонент максвелловского тензора натяжений. Обычно эффект электросмачивания на диэлектрике (EWOD) иллюстрируют растеканием по диэлектрической гидрофобной поверхности проводящей капли под действием электрического поля. Вместе с тем в ряде экспериментов [17] наблюдается эффект электросмачивания в поле плоскопараллельных электродов с тонким диэлектрическим покрытием. В этом случае высота подъема жидкости в электрическом поле определяется выражением

$$h_{EWOD} = \frac{2\gamma(\cos \theta_E - \cos \theta_0)}{\rho g d} = \frac{C}{4\rho g d} U^2. \quad (5)$$

Как видно из (5), причиной эффекта является изменение краевого угла смачивания в поле, то есть существенно необходимо, чтобы при отсутствии поля жидкость плохо смачивала поверх-

ность электрода. Для образцов магнитного коллоида на основе керосина это условие, очевидно, малореализуемо.

Действие пондеромоторных сил в электрическом поле приэлектродного объемного заряда

Наиболее простым объяснением наблюдаемого эффекта представляется действие на жидкий диэлектрик пондеромоторных сил со стороны электрического поля [15]. Особенностью таких слабопроводящих жидких диэлектриков, как разбавленные магнитные жидкости, является наличие в приэлектродном слое объемного заряда примесных ионов и заряженных коллоидных частиц, который существенно увеличивает локальную напряженность поля в приэлектродной области [18].

Согласно [19], уровень жидкости вблизи вертикальной стенки в неоднородном электрическом поле определяется соотношением

$$h_2 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho g - f_E}} (1 - \sin \theta). \quad (6)$$

Здесь объемная плотность сил электрического поля

$$f_E = \rho_e E + \frac{\epsilon_0}{2} \nabla \left(\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} E^2 \right) - \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \nabla \epsilon. \quad (7)$$

В непосредственной близости к поверхности электрода напряженность электрического поля может превышать напряженность в объеме (согласно [20], на 30% и более). Можно ввести коэффициент β , определяющий усиление поля в этой области: $E_{\max} = \beta E_0$. Электрооптические эксперименты показывают, что этот коэффициент имеет величину порядка 1,25–1,5 на расстоянии 0,05–0,1 мм от поверхности электрода. Оценим значение этого коэффициента по данным электроповерхностного эффекта. Поскольку высота подъема жидкости в приэлектродной области пропорциональна квадрату напряженности поля (см. рис. 3), то соотношение высот подъема у электрода и вдали от него позволяет оценить увеличение напряженности в приэлектродной области:

$$\frac{E_{\max}}{E_0} \sim \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \Rightarrow \beta \approx 1,5 - 1,7. \quad (8)$$

Связь эффекта изменения уровня магнитного коллоида в приэлектродной области с образованием в этой области объемного заряда также подтверждается сравнением характерных времен электрооптического и электроповерхностного эффектов. На вставке рис. 6 показана зависимость от времени электрооптического эффекта

Керра в приэлектродной области по данным [21], на которой явно наблюдается всплеск интенсивности света, связанный с увеличением локальной напряженности поля, в том же временном диапазоне (0,1–0,8 с после включения поля), что и эффект увеличения уровня магнитного коллоида у поверхности электрода.

Помимо объемного заряда, на подъем слабопроводящей жидкости по вертикальной поверхности может оказывать существенное влияние поверхностный заряд. Исследования эффектов, связанных с образованием поверхностного заряда в диэлектриках, и его влияния на течение жидкостей в электрическом поле различных конфигураций проводились в ряде работ [14, 22–25]. В [22, 24] описан эффект подъема диэлектрической жидкости по наклонной (в том числе и вертикальной) поверхности в электрическом поле коронного разряда. Механизм влияния электрического поля на подъем жидкости заключался в следующем: коронный разряд заряжает слой свободной поверхности жидкости, в результате взаимодействия поверхностного заряда с полем возникает тангенциальное электрическое натяжение, приводящее к подъему жидкости. Относительно большое время релаксации заряда в диэлектрике препятствует утечке заряда внутрь объема жидкости, способствует его накоплению непосредственно на границе. Для возникновения устойчивого движения слоя диэлектрической жидкости толщиной l_0 с поверхностным зарядом λ_0 по вертикальной плоскости необходимо выполнение соотношения [22]:

$$\lambda_0 E > \frac{2}{3} \rho g l_0. \quad (9)$$

В нашем случае электризация коронным разрядом маловероятна, что подтверждается отсутствием эффекта аномального подъема у чистого керосина в том же диапазоне напряженностей полей. Вместе с тем накопление поверхностного заряда за счет примесных ионов возможно в области приэлектродного мениска, где напряженность электрического поля имеет значительную нормальную составляющую к поверхности жидкости. Оценка величины поверхностной плотности заряда дает значения $\lambda_0 \geq 2 \cdot 10^{-7}$ Кл/м². То есть на поверхности слоя 10×10 мм, наблюдавшегося в эксперименте в поле около 3 МВ/м, может накапливаться поверхностный заряд до 10^{-11} Кл. Кроме того, накопление поверхностного заряда приводит к нарушению устойчивости свободной поверхности и развитию в том числе и ЭГД-течений [14]. При относительно высоких напряженностях полей (более 3 МВ/м) нами действительно наблюдались достаточно интенсивные вихревые течения в слое жидкости, подни-

мающемся вдоль поверхности электрода, что может свидетельствовать в пользу описанного выше механизма влияния поверхностного заряда на течение жидкости по вертикальной поверхности.

Таким образом, исследования электроповерхностных эффектов в магнитных коллоидах на основе жидких диэлектриков позволяют существенно расширить арсенал методов изучения приэлектродных процессов в подобных системах и получить важные уточнения известных моделей и теорий электрофизических явлений в дисперсных системах.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-03-00312).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жакин А.И. Ионная электропроводность и комплексообразование в жидких диэлектриках. *УФН*. 2003, **173**(1), 51–68.
2. Гросу Ф.П., Болога М.К., Блощицын В.В., Стишков Ю.К., Кожевников И.В. Зарядообразование в жидких диэлектриках под воздействием электростатического поля. *ЭОМ*. 2007, **43**(5), 16–38.
3. Жакин А.И. Электрогидродинамика. *УФН*. 2012, **182**(5), 495–520.
4. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Критические условия неустойчивости сильно заряженной сферической капли. *ЖТФ*. 1999, **69**(7), 10–14.
5. Жакин А.И. Приэлектродные и переходные процессы в жидких диэлектриках. *УФН*. 2006, **176**(3), 279–310.
6. Гросу Ф.П., Болога М.К. О биполярных структурах объемного заряда в слабопроводящей жидкости во внешнем электростатическом поле. *ЭОМ*. 2007, **43**(1), 47–51.
7. Гросу Ф.П., Болога М.К. Структура объемного заряда в слабопроводящей жидкости в плоском конденсаторе. *ЭОМ*. 2007, **43**(4), 28–33.
8. Гросу Ф.П., Болога М.К. Особенности электризации слабопроводящей диэлектрической жидкости во внешнем электрическом поле. *ЭОМ*. 2006, **42**(4), 37–45.
9. Полищук Н.В. Влияние электрических полей на капиллярные постоянные. *ЭОМ*. 2004, **40**(1), 32–41.
10. Yerin C.V., Padalka V.V. Influence of Electric Field upon the Formation of Particles Cluster in Magnetic Fluid. *J Magn Magn Mater*. 2005, **289**, 105–107.
11. Ерин К.В. Исследование образования приэлектродного объемного заряда в коллоидных растворах магнетита в жидких диэлектриках электрооптическим методом. *ЖТФ*. 2008, **78**(4), 133–136.
12. Кожевников В.М., Чуенкова И.Ю., Данилов М.И., Ястребов С.С. Динамика развития процессов самоорганизации в тонком слое магнитной жидкости при воздействии постоянного электрического поля. *ЖТФ*. 2006, **76**(7), 129–131.
13. Падалка В.В., Ходус Н.И. Искривление поверхности магнитной жидкости в электрическом поле плоского конденсатора. *ЖТФ*. 2006, **76**(8), 130–132.
14. Жакин А.И. Электрогидродинамика заряженных поверхностей. *УФН*. 2013, **183**(2), 153–177.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред*. М.: Наука, 1982. 620 с.
16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Гидродинамика*. М.: Физматлит, 2003. 736 с.
17. Mugele F., Baret J.-C. Electrowetting: from Basics to Applications. *J Phys Condens Matter*. 2005, **17**, R705–R774.
18. Духин С.С., Эстрела-Льопис В.Р., Жолковский Э.К. *Электроповерхностные явления и электрофильтрация*. Киев: Наукова думка, 1985. 288 с.
19. Полищук Н.В., Панченко М.С., Панченко И.М. Влияние радиусов кварцевых капилляров на высоту поднятия воды в электрическом поле. *ЭОМ*. 2008, **44**(4), 45–50.
20. Ерин К.В. Электро- и магнитооптические измерения напряженности электрического поля в магнитных коллоидах на основе жидких диэлектриков. *Оптика и спектроскопия*. 2011, **111**(1), 86–91.
21. Ерин К.В. Электрооптические эффекты в приэлектродных слоях в магнитных коллоидах на основе жидких диэлектриков. *Оптика и спектроскопия*. 2010, **109**(3), 540–545.
22. Шутов А.А. *Формирование и зарядка струй, капель и пленок слабопроводящих жидкостей в электрическом поле*. Автореф. дисс. д-ра физ.-мат. наук. М., 2008. 47 с.
23. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Телегин А.М., Воронов К.Е., Пияков И.В. Электрический заряд и поле в мениске диэлектрической жидкости. *ЖТФ*. 2013, **83**(5), 17–23.
24. Шутов А.А. Течение наклонного поверхностно заряженного слоя в продольном электрическом поле. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2003, (5), 36–42.
25. Белов П.А. *Исследование неустойчивости и диспергирования заряженных менисков и струй диэлектрических жидкостей*. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. Курск, 2013. 18 с.

Поступила 13.05.14

После доработки 09.06.14

Summary

The change of the level of kerosene-based magnetic colloid in the electric field of a plane capacitor was investigated. When the electric field was switched on, A significant short-term changes in the level in the thin near-electrode layer were observed experimentally. The thickness of the near-electrode layers and the characteristic time of their formation are determined from the experimental data. Possible mechanisms of that effect are discussed.

Keywords: magnetic colloid, near-electrode layer, space charge, electric field force, electric field distribution.