

03
Экспериментальное наблюдение изменения коэффициента отражения света от поверхности раздела сред „вода—магнитная жидкость“ в электрическом поле, волновое движение и неустойчивость поверхности

© В.В. Чеканов, Н.В. Кандаурова, В.С. Чеканов

Северо-Кавказский федеральный университет, Институт информационных систем и телекоммуникаций, 355029 Ставрополь, Россия
e-mail: candaur18@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 12 июля 2013 г. В окончательной редакции 7 февраля 2014 г.)

Экспериментально исследовано изменение коэффициента отражения от границы раздела двух жидкостей „вода—магнитная жидкость“ в электрическом поле. Обнаружено увеличение коэффициента отражения от межфазной поверхности. Наблюдалась неустойчивость поверхности раздела сред „вода—магнитная жидкость“, волновое движение на границе раздела сред и интерференция волн.

Введение

Магнитные жидкости (МЖ) — это коллоидный раствор ферро-, ферримагнетиков в различных дисперсионных средах [1]. Наиболее распространены жидкости типа „магнетит в керосине“, где дисперсной фазой являются частицы магнетита средним размером ~ 10 nm, покрытые оболочкой поверхностно-активного вещества (олеиновой кислотой), а дисперсионной средой — керосин. Объемную концентрацию твердой фазы легко изменять от 0 до $\sim 30\%$. Такие жидкости хранятся годами, не теряя свойств.

Если магнитную жидкость поместить в плоскопараллельный конденсатор, один из электродов которого — стекло с проводящей прозрачной пленкой ИТО ($\sim 1 \mu\text{m}$), то в отраженном свете наблюдается интерференция в этой пленке. В электрическом поле частицы магнетита мигрируют к электродам, концентрация частиц вблизи электродов увеличивается — образуются высококонцентрированные слои, состоящие из частиц дисперсной фазы жидкости (магнетита), имеющие резкую границу с жидкостью в объеме ячейки. Они отличаются от жидкости в объеме электрическими свойствами — диэлектрической проницаемостью ε и проводимостью σ . Комплексное изучение толщины, электрических и оптических свойства слоя частиц было проведено в работах [2–5].

В образовавшемся на границе с электродом концентрированном слое частиц изменяются условия интерференции, максимум спектра отраженного света смещается.

Впервые изменения спектра отражения описаны в [6], подробно — в [7,8], где показано, что при определенном напряжении (6–20 V) при толщине слоя магнитной жидкости $\sim 300 \mu\text{m}$ возникают легко наблюдаемые автоволны с характерными ревербераторами, пейсмекерами, дифракцией и т.д. [8]. В работе [9] показано, что при отражении от поверхности МЖ изменяется эллипс поляризации монохроматического света, что позволило

оценить толщину концентрированного слоя МЖ вблизи электродов, а по электрическим измерениям — ее проводимость, которая оказалась на 3–4 порядка меньше проводимости жидкости в объеме.

Исследования поверхности пленки ИТО на стекле (твердый электрод) показали, что она представляет сложную структуру с игольчатыми неоднородностями, характерный размер которых 10–100 μm . Это сравнимо с толщиной наноупаковки, состоящей из плотноупакованных частиц магнетита, покрытых молекулами поверхностно-активного вещества, образующейся в поле на границе с электродом. Использование вместо твердого электрода гомогенной жидкости, не смешивающейся с МЖ, позволяет исследовать оптические и электрические свойства границы раздела без учета шероховатости поверхности твердого электрода. Поэтому в работе [10] представлены результаты исследования изменения коэффициента отражения от межфазной поверхности „глицерин—магнитная жидкость“. Удалось подобрать магнитную жидкость с коэффициентами преломления и поглощения, близкими к коэффициентам преломления и поглощения глицерина ($n = 1.47$ и $k = 0.03$), коэффициент отражения такой жидкости очень мал ($\sim 10^{-2} - 10^{-3}$). В электрическом поле за счет появления высококонцентрированного слоя на межфазной поверхности и изменения условий интерференции коэффициент отражения увеличился до 50–100 раз [9].

В настоящей работе была поставлена задача экспериментально исследовать изменение коэффициента отражения на границе „магнитная жидкость—вода“ в электрическом поле и неустойчивость, волновое движение на границе раздела фаз при достижении электрическим полем некоторого критического значения.

Описание экспериментальной установки

Для изучения изменения коэффициента отражения от межфазной границы „вода—магнитная жидкость“ в элек-

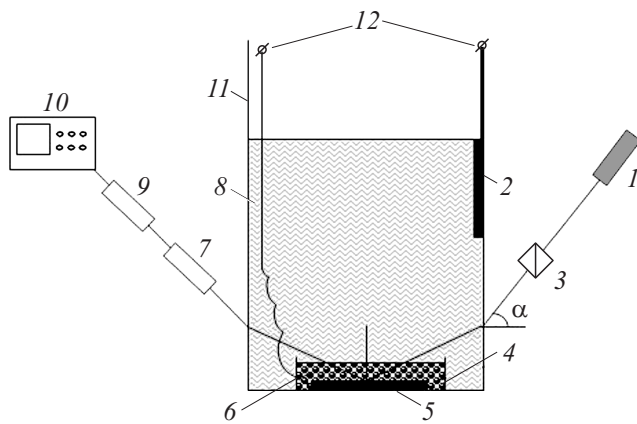


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — лазерная указка, 2, 5 — электроды, 3 — поляриод, 4 — чашка Петри, 6 — магнитная жидкость, 7 — кассета со светофильтрами, 8 — вода, 9 — фотодиод, 10 — осциллограф, 11 — стеклянный сосуд в форме прямоугольной призмы, 12 — выводы электродов.

трическом поле — электроотражения — была собрана экспериментальная установка, изображенная на рис. 1.

В стеклянный сосуд 11 (прямоугольная призма) помещена чашка Петри 4 диаметром 10 см, на дне которой находится медная пластина 5 (электрод) толщиной 0.5 мм, диаметром 8 см, соединенная с источником постоянного и переменного напряжения. В чашку Петри налита магнитная жидкость 6 („магнетит в керосине“). Плотность жидкости равнялась $1.1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. В сосуд налита вода 8, как показано на рис. 1. В качестве источника света использовалась лазерная указка с длиннофокусной и короткофокусной линзами, позволяющая сузить лазерный пучок до 0.2 мм. Длина волны падающего света $\lambda = 650 \text{ nm}$. Луч лазерной указки 1, поляризованный перпендикулярно плоскости падения (ТЕ-волна), попадает в стеклянный сосуд 1 под углом Θ . Величина угла падения на межфазную поверхность рассчитана по углу α и коэффициенту преломления воды.

Лазер 1 и поляриод 3 могут вращаться вокруг оси и относительно друг друга так, что световой поток и плоскость поляризации можно регулировать в широких пределах.

При $\alpha = 42^\circ$ угол падения Θ на межфазную поверхность „вода–магнитная жидкость“ составил $\Theta = 60^\circ$. Световой поток проходит через слой воды, отражается от межфазной поверхности „вода–магнитная жидкость“. Отраженный свет через светофильтр 7 попадает на фотодиод 9. Электрический сигнал от фотодиода, который работает в гальваническом режиме, регистрируется с помощью цифрового осциллографа GDS-71022, который выводит осциллограмму на экран и записывает файлы (4000 точек) на CD-носитель. Нейтральный светофильтр 7 (Kenko NDX) вводится в световой поток для контролируемого ослабления света, чтобы фотодиод 9 работал в линейном режиме.

Оптические свойства используемой в эксперименте магнитной жидкости были измерены спектральным эл-

липсометрическим комплексом „Эллипс-1891“: коэффициент преломления $n = 1.47$ и коэффициент поглощения $k = 0.007$.

Объемная концентрация твердой фазы C в магнитной жидкости рассчитывалась по известной плотности МЖ — ρ , плотности дисперсионной среды (керосина совместно со стабилизатором) — ρ_1 и плотности дисперсионной фазы (магнетита) — ρ_2 .

$$C = \frac{\rho - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1}.$$

Для магнетита плотность принята равной $\rho_2 = 5.0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, плотность керосина $\rho_k = 7.9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Отметим, что абсолютное значение C определялось с точностью $\sim 10\%$, так как плотность дисперсного магнетита могла отличаться от плотности массивного магнетита. Но относительное значение C в различных образцах жидкости, приготовленной по одной технологии, рассчитано с точностью не менее 1%. Для контроля измеренной „весовой“ концентрации проводились также измерения намагниченности насыщения жидкости и рассчитывалась концентрация по намагниченности $C_m = M_{sML} / M_{sMagnetite}$ (M_{sML} — намагниченность насыщения магнитной жидкости, $M_{sMagnetite}$ — намагниченность насыщения магнетита). Оказалось, что рассчитанная по плотности и намагниченности насыщения концентрация отличается в том числе и потому, что плотность и намагниченность насыщения отличаются от соответствующих значений для наночастиц и массивных образцов. В описываемых в настоящей работе экспериментах использовалась жидкость намагниченностью насыщения 14.8 кА/м, что соответствует концентрации 3.1 об.%.

Электрофизические свойства используемой магнитной жидкости — проводимость σ и диэлектрическая проницаемость ϵ измерялись измерителем иммитанса LCR-821 и составили на частоте 100 Hz $\epsilon = 2.85$, $\sigma = 6.23 \cdot 10^{-7} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$.

Экспериментальные результаты и их интерпретация

С помощью установки, показанной на рис. 1, была измерена отражательная способность \mathfrak{R} поверхности магнитной жидкости — отношение интенсивности отраженного сигнала к падающему.

В начале эксперимента в отсутствие поля для определения отражательной способности \mathfrak{R} измерялось значение напряжения на фотодиоде при отражении от верхней поверхности стекла толщиной 4 мм, положенного на чашку Петри — \mathfrak{R}_{glass} . Так как коэффициент отражения от границы „стекло–вода“ легко рассчитывается по известному углу падения и отношению показателей преломления стекла (4.91) и воды (1.33), то напряжение на фотодиоде U_{glass} в этом случае соответствует $\mathfrak{R}_{glass} = 0.044$. Отражательная способность от

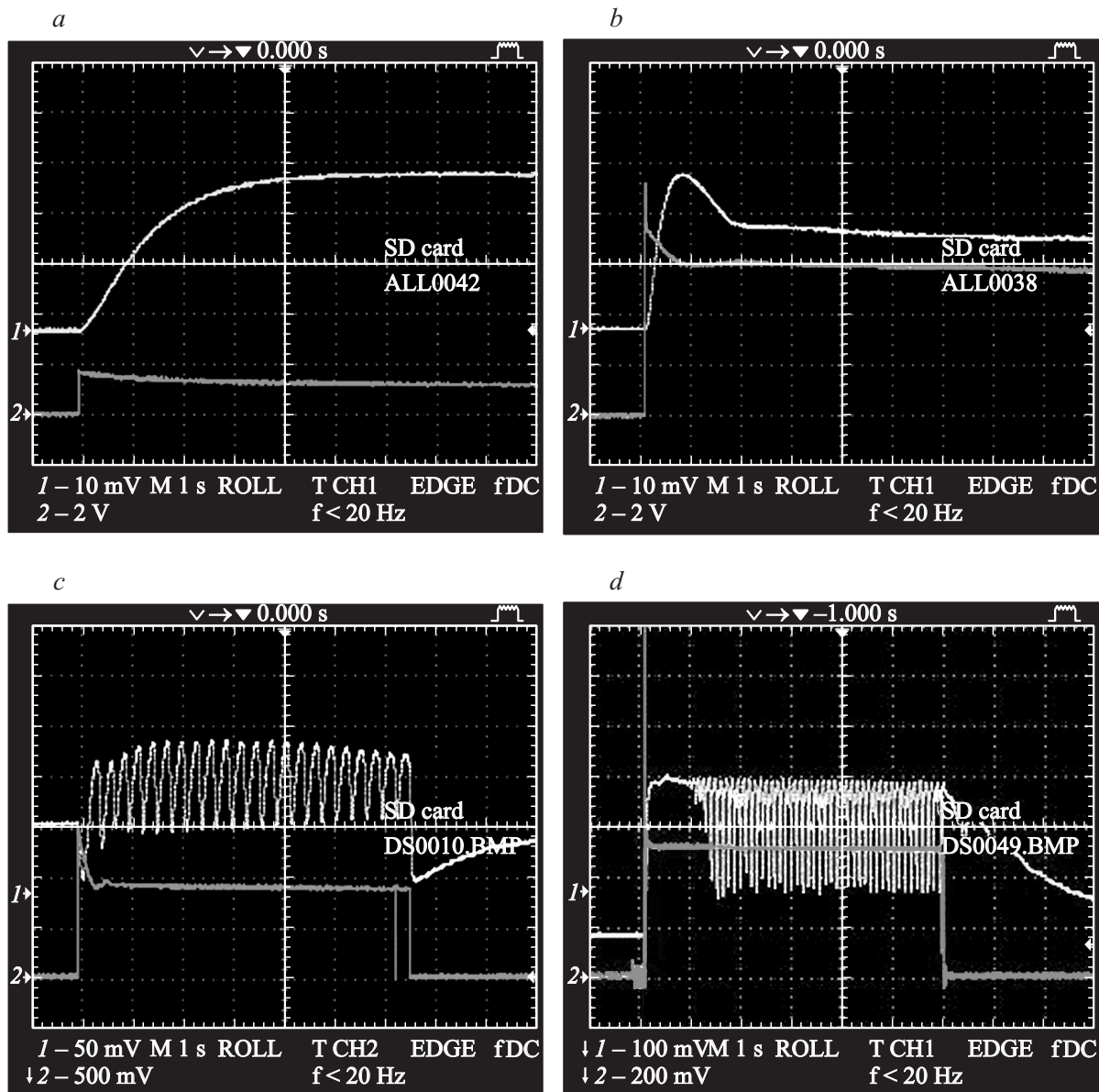


Рис. 2. Осциллограммы, полученные при напряжении на электродах: *a* — 25 В, *b* — 100 В, *c* — 150 В, *d* — 200 В.

поверхности магнитной жидкости без электрического поля равна

$$\mathcal{R}_{0ML} = \mathcal{R}_{glass} \cdot (U_{ML}/U_{glass}),$$

где U_{ML} — напряжение на фотодиоде при отражении от поверхности МЖ, U_{glass} — напряжение на фотодиоде при отражении от стекла.

С включением электрического поля отражательная способность поверхности „вода–магнитная жидкость“ возрастает.

На осциллограммах (рис. 2, *a, b*) показаны графики напряжения на фотодиоде (кривые 1), отображающие зависимость коэффициента отражения межфазной поверхности от времени. На кривых 2 (рис. 2, *a, b*) показаны зависимости напряжения на входном резисторе

осциллографа ($10^6 \Omega$), включенного последовательно со слоем МЖ в чашке Петри, отображающие зависимость тока через ячейку от времени. Для получения осциллограммы в пределах окна осциллографа параллельно входу осциллографа был включен шунт ($130 \text{ k}\Omega$).

На кривой 1 (осциллограмма 2, *b*) виден максимум, характерный для первого максимума при отражении от тонкой интерферирующей пленки.

По кривой 2 (рис. 2, *b*) найдено значение тока в момент включения $I_0 = 7.4 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ и значение установившегося через $\sim 1 \text{ с}$ тока I . Обратим внимание, что уменьшение тока через слой МЖ после включения соответствует принципу Ле Шателье.

На рис. 2, *c, d* представлены осциллограммы напряжения на фотодиоде, снятые в то время, как напряжение электрического поля достигло критического значения

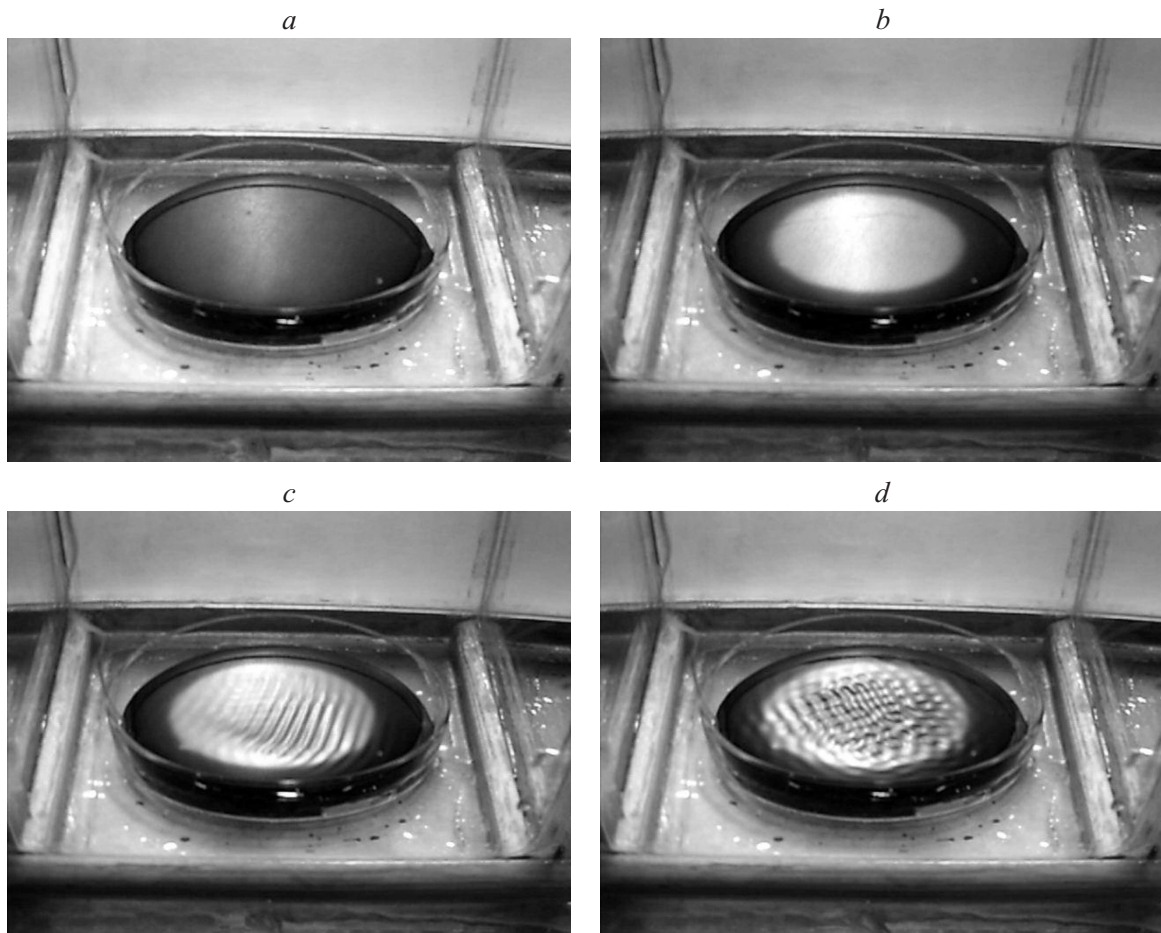


Рис. 3. Демонстрационные эксперименты электроотражения и волнового движения границы межфазной поверхности „вода–магнитная жидкость“: *a* — поверхность без электрического поля, *b* — электрическое поле ($U = 100 \text{ V}$), *c* — волны на поверхности ($U = 150 \text{ V}$), *d* — интерференция волн ($U = 150 \text{ V}$, вместо круглого электрода — квадратный со стороной 4 см).

для возникновения неустойчивости, межфазная поверхность начала колебаться, а луч лазера не попадает на чувствительный элемент фотодиода ФД-256. Для получения осциллограммы в пределах окна осцилло-

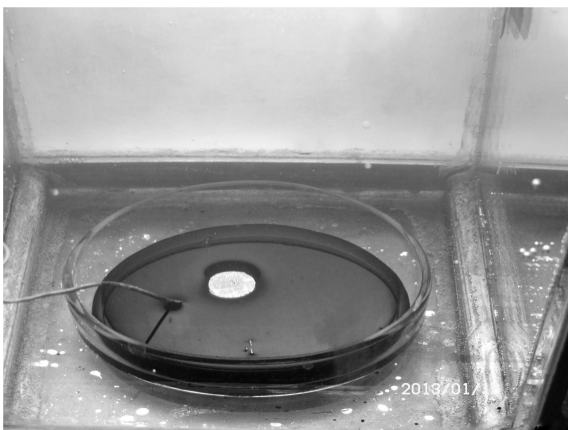


Рис. 4. Неустойчивость поверхности. Разрушение слоя магнитной жидкости, $U = 200 \text{ V}$.

графа параллельно входу осциллографа был включен шунт ($40 \text{ k}\Omega$).

На рис. 3 показаны кадры кинограммы поверхности магнитной жидкости.

При увеличении постоянного напряжения до $\sim 250 \text{ V}$ слой МЖ разрушался, как показано на рис. 4.

В переменном поле начиная с частоты 10 Hz эффект увеличения коэффициента отражения уменьшался примерно в 10 раз, а при частоте 30 Hz не наблюдался, так как при такой частоте межфазный слой не успевал образовываться, и можно предположить, что в переменном поле начиная с 30 Hz свойства межфазной поверхности не изменяются. В переменном синусоидальном поле частотой 50 Hz эффективное значение напряжения, при котором слой разрушается, $\sim 700 \text{ V}$.

Выводы

1. Обнаружено увеличение отражательной способности межфазной поверхности „вода–магнитная жидкость“ в электрическом поле. Оказалось, что при включении электрического поля отражательная способность

от границы „вода–магнитная жидкость“ увеличивалась в несколько раз. Увеличение отражательной способности связано с образованием на межфазной поверхности высококонцентрированного слоя из частиц дисперсной фазы магнитной жидкости.

2. Впервые наблюдалось волновое движение границы раздела фаз „вода–магнитная жидкость“, интерференция волн, неустойчивость, приводящая к разрушению слоя МЖ.

Список литературы

- [1] *Розенцвейг Р.* Феррогидродинамика [Текст] / Под ред. Р. Розенцвейг. М.: Мир, 1989. 357 с.
- [2] *Чеканов В.В., Бондаренко Е.А., Дискаева Е.Н.* // Вестник Ставропольского гос. ун-та. 2005. Вып. 43. С. 85–92.
- [3] *Чеканов В.В., Бондаренко Е.А., Гетманский А.А.* // Нанотехника. 2009. Т. 17. Вып. 1. С. 83–90.
- [4] *Чеканов В.В., Бондаренко Е.А., Гетманский А.А.* // Нанотехника, 2008. Т. 15. Вып. 3. С. 6–11.
- [5] *Чеканов В.В., Рахманина Ю.В.* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. С. 177–182.
- [6] *Чеканов В.В.* // Тез. докл. 5-й Всесоюз. конф. по магнитным жидкостям. Плес, 1988. Т. 2. С. 128–129.
- [7] *Кандаурова Н.В.* Приповерхностные и межфазные явления в магнитной жидкости в электрическом и магнитном полях и их техническое применение: канд. дис. Ставрополь, 2000. 305 с.
- [8] *Chekanov V.V., Pjuch P.M., Kandaurova N.V., Bondarenko E.A.* // J. of Magnetizm and Magnetic Mater. (2005). Vol. 289. P. 155–158.
- [9] *Чеканов В.В., Бондаренко Е.А., Дискаева Е.Н., Косенко И.В.* // Вестник Ставропольского гос. ун-та. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2005. С. 85–92.
- [10] *Чеканов В.В., Кандаурова Н.В., Чеканов В.С., Рахманина Ю.А.* // Научные технологии. М.: Радиотехника, 2012. № 5. С. 106–112.