

Краткие сообщения

02;12

Искривление поверхности магнитной жидкости в электрическом поле плоского конденсатора

© В.В. Падалка, Н.И. Ходус

Ставропольский государственный университет,
355009 Ставрополь, Россия
e-mail: Khodus_Natali@mail.ru

(Поступило в Редакцию 31 января 2006 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования процессов, происходящих в жидком диэлектрике с наночастицами магнетита, помещенного в электрическое поле. Показано, что положение поверхности жидкости в межэлектродном пространстве изменяется, что связано с образованием объемного заряда в приэлектродном слое.

PACS: 75.50.Mm

Введение

Задачей электрофизики является устранение электрического пробоя в изоляционных системах, который связан прежде всего с неоднородностью электрического поля в изоляционном материале. При изучении распределения электрического поля в жидких диэлектриках наиболее часто используется электрооптический метод. В [1–5] представлены результаты экспериментального исследования распределения направления и величины электрического поля в различных диэлектрических жидкостях (очищенном керосине, трансформаторном масле, пропиленкарбонате), при различных конфигурациях электродов („плоскость–плоскость“, „лезвие–плоскость“, „точка–плоскость“), помещенных в экспериментальную кювету. Явления, происходящие в чистых жидкостях, подчиняющиеся сравнительно простым законам, усложняются, если в жидкостях имеются какие-либо примеси. Так, в работе [6] был предложен метод, заключающийся в определении направления и величины напряженности электрического поля в магнитной жидкости по напряженности магнитного поля, также было показано, что механизм возникновения объемного заряда в гетерогенных системах отличается от механизма образования объемного заряда в чистых диэлектрических жидкостях. Несмотря на ряд существующих методов, определение направления и величины напряженности электрического поля, локализации и значения объемного заряда в жидких диэлектриках является сложной задачей.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процессов, происходящих в жидком диэлектрике, содержащем наночастицы магнетита и подверженном влиянию внешнего электрического поля.

Экспериментальная установка и результаты

Для изучения жидких диэлектриков, содержащих наночастицы магнетита, была создана экспериментальная установка, изображенная на рис. 1. Пучок света, источником которого являлась лампа накаливания 1, прошедший через поляризатор 2, кювету 3 ($40 \times 40 \times 50$ mm) с жидким диэлектриком, вращающийся анализатор 4, фиксировался визуально через микроскоп МБС-2 или с помощью цифрового фотоаппарата 5. В экспериментальную кювету были погружены алюминиевые плоские электроды размером 30×35 mm, расстояние между которыми $d = 5$ mm. В качестве источника напряжения, подаваемого на электроды использовался источник высокого напряжения 6 ($0–30$ kV/ 0.2 mA/ 200 mJ), имеющий цифровую индикацию и плавную регулировку выходного напряжения (напряжение пульсаций на выходе не более 0.1%). Ток, проходящий через кювету, измерялся микроамперметром Ф195 7.

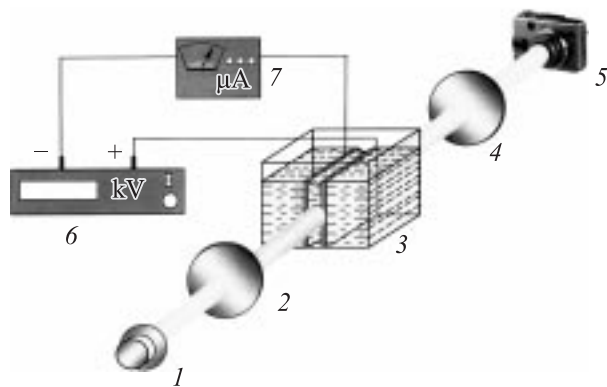


Рис. 1.

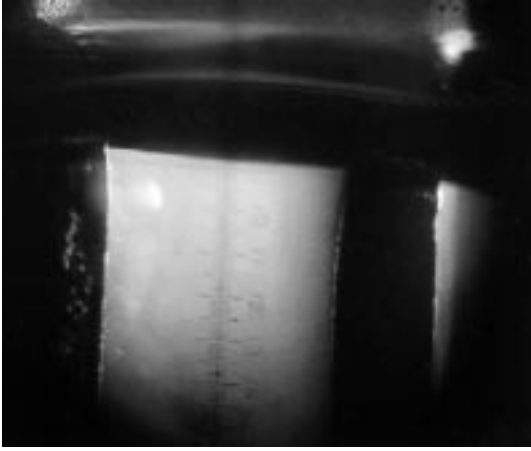


Рис. 2.

В экспериментальную кювету был помещен керосин (ГОСТ 10227-86), уровень которого совпадал с верхней поверхностью электродов. При подаче на электроды напряжения $U = 7 \text{ kV}$, при котором ток, прошедший через конденсатор был равен $I = 0.6 \pm 0.1 \mu\text{A}$, в пространстве между электродами наблюдался подъем жидкости на высоту 1.6 mm от первоначального положения (рис. 2). Затем в этот же керосин было добавлено $V_{ml} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ ml}$ магнитной жидкости (Fe_3O_4 на керосине с концентрацией твердой фазы $0.008 \text{ vol.}\%$), в результате чего количество добавленных частиц магнетика в исследуемом межэлектродном объеме составило $N = 1.5 \cdot 10^{14}$. При подаче на электроды напряжения $U = 7 \text{ kV}$ показания микроамперметра соответствовали значению тока $I = 2.4 \pm 0.1 \mu\text{A}$, наблюдалось втягивание жидкости в межэлектродное пространство, образовывался вогнутый мениск, глубина которого составляла $h = 5 \text{ mm}$ (рис. 3). В течение $t \sim 60\text{--}80 \text{ s}$ после подачи на электроды высокого напряжения происходило постепенное выравнивание поверхности магнитной жидкости. Такой эффект наблюдался при добавлении наночастиц магнетита в петролейный эфир, додекан, трансформаторное масло.

Повторив этот эксперимент со скрещенными поляризаторами вдоль как положительного, так и отрицательного электродов было зафиксировано возникновение темных и светлых полос шириной $\sim 0.35 \text{ mm}$, поочередно сменяющих друг друга через $t \sim 5 \text{ s}$, которые свидетельствуют об увеличении напряженности электрического поля вблизи электродов.

Выталкивание керосина из межэлектродного пространства плоского конденсатора связано с тем, что сила, действующая на границу раздела двух сред (керосин–воздух), определяется разностью давлений по разные стороны границы [7]:

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \frac{1}{2} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \varepsilon_0 E^2,$$

где ε_0 , ε_1 и ε_2 — диэлектрическая проницаемость вакуума, керосина и воздуха соответственно; P_1 и P_0 —

электростатическое давление в жидкости и вне него. Так как $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, то $\Delta P = P_1 - P_0 > 0$, следовательно, давление в жидкости возрастает, и сила направлена в сторону диэлектрика с меньшей диэлектрической проницаемостью.

Из рис. 3 видно, что при добавлении в керосин частиц магнитной жидкости сила, действующая на границу раздела сред (магнитная жидкость–воздух) меняет свой знак на противоположный. Падение давления в жидкости, вероятно, связано с интенсивным движением заряженных частиц к противоположно заряженным электродам, вследствие чего в приэлектродной зоне образуется объемный заряд. Это согласуется с работой [8], где показано, что для жидких диэлектриков характерно возникновение гетерополярного заряда, приводящего к пробое.

В работе [9] представлено экспериментальное подтверждение того, что при воздействии переменного поля на магнитную жидкость, помещенную в плоский конденсатор, образования объемного заряда не происходит и зависимость напряженности электрического поля от расстояния между электродами имеет вид прямой. При воздействии переменного электрического поля $U = 7 \text{ kV}$ с частотой $f = 50 \text{ Hz}$ на исследуемые образцы жидкостей втягивания их поверхности в межэлектродное пространство, наблюдаемое при постоянном электрическом поле, не происходило.

На рис. 4 представлены течения, наблюдаемые в магнитной жидкости при напряжениях на электродах $U_1 = 400$, $U_2 = 700$, $U_3 = 900 \text{ V}$. Из рисунка видно, что

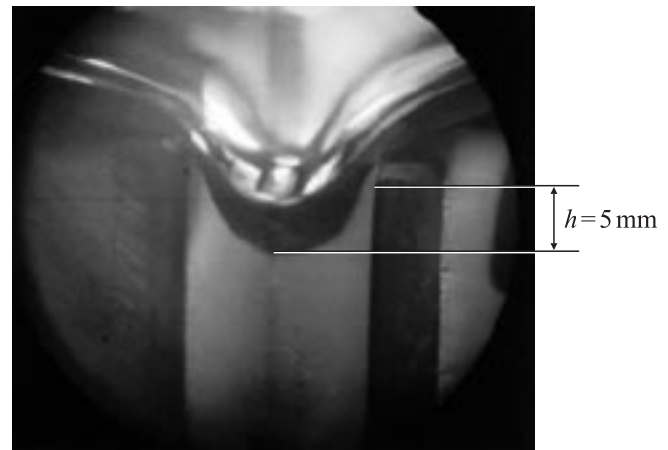


Рис. 3.

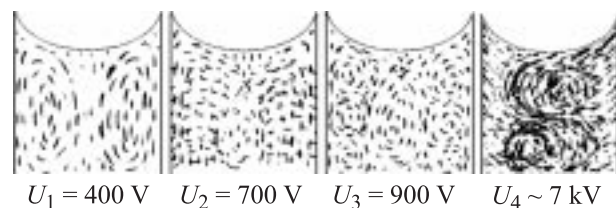


Рис. 4.

с увеличением подаваемого напряжения характер движения усложняется, и при $U > 1$ kV визуально зафиксировать происходящие процессы сложно.

Для визуализации электрогидродинамических течений при более высоких напряжениях использовалась эмульсия магнитной жидкости, приготовленная с помощью ультразвукового метода. При подаче напряжения до $U = 3$ kV на электроды экспериментальной кюветы, в которую была помещена приготовленная эмульсия, наблюдали за движением пузырьков. В результате были выделены два основных вида движения: 1) если пузырек находится в центральной части межэлектродного пространства, то он прямо поднимается вверх; 2) в приэлектродной области движение приобретает колебательный характер — он то приближается к электроду, то отдалится от него. При подаче на электроды напряжения $U_4 \sim 7$ kV хорошо были видны вихреобразные течения (рис. 4).

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований диэлектрических жидкостей с добавлением наночастиц магнетита (или магнитных жидкостей малой объемной концентрации твердой фазы частиц магнетита), подверженных воздействию постоянного и переменного электрических полей, было установлено, что изменение положения поверхности жидкости в межэлектродном пространстве связано с образованием в приэлектродном слое объемного заряда, который существует некоторое время, несмотря на сложный характер электрогидродинамических течений в магнитной жидкости.

Список литературы

- [1] Okubo H., Shimizu R., Kato K. et al. // IEEE Trans. DEI. 1997. Vol. 4. P. 64–70.
- [2] Üstündağ A., Zahn M. // IEEE Trans. DEI. 2001. Vol. 8. P. 15–26.
- [3] Helgeson A., Zahn M. // IEEE Trans. DEI. 2002. Vol. 9. P. 838–844.
- [4] Ithori H., Fujii M., Arii K. // Jpn. J. Appl. Phys. 1999. Vol. 38. P. 6170–6171.
- [5] Ithori H., Fujii M., Arii K. // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. Vol. 41. P. 5478–5479.
- [6] А.с. СССР № 1354140 / Чеканов В.В., Кожевников В.М., Падалка В.В. и др. Опубл. 22.07.1987.
- [7] Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: ЛГУ, 1989. 176 с.
- [8] Zahn M. // IEEE Trans. DEI. 1998. Vol. 5. P. 627–650.
- [9] Падалка В.В. Взаимодействие коллоидных магнитных частиц с электрическими и магнитными полями. Автореф. дисс. Ставрополь: СГУ, 2004. 302 с.