

03;12

Динамика развития процессов самоорганизации в тонком слое магнитной жидкости при воздействии постоянного электрического поля

© В.М. Кожевников, И.Ю. Чуенкова, М.И. Данилов, С.С. Ястребов

Северо-Кавказский государственный технический университет,
355029 Ставрополь, Россия
e-mail: kvm@stv.runnet.ru

(Поступило в Редакцию 21 ноября 2005 г.)

Экспериментально исследован процесс образования структур в виде вращающихся колец, ранее не наблюдавшихся в магнитной жидкости, определены их параметры. Также в слое магнитной жидкости зарегистрировано образование вихрей, определена последовательность их развития. Исследованы электрические свойства слоя магнитной жидкости при изменении величины и времени воздействия постоянного электрического поля.

PACS: 05.65.+b, 75.50.Mm

Исследованию структурных образований в слое магнитной жидкости посвящено большое количество работ [1–7]. Так, в [1] были обнаружены приэлектродные структурные образования под действием постоянного электрического поля, принципиальную роль в возникновении которых играет неоднородный биполярный заряд, формирующийся в процессе прохождения тока через слой магнитной жидкости. В работе [2] исследованы особенности формирования структурных решеток лабиринтного и полосчатого типа в тонких слоях магнитных жидкостей при воздействии постоянного электрического поля. Проведенные исследования позволили предположить, что действие электрического поля приводит к появлению в тонком слое магнитной жидкости новой, более концентрированной фазы. В работе [3] образование структур связывалось с повышением концентрации дисперсной фазы вблизи электродов и последующим агрегированием. Процесс агрегирования интерпретировался на основе термодинамических представлений о фазовых переходах. В [4] приведены результаты экспериментального исследования возникновения структурных решеток в движущейся магнитной жидкости при воздействии электрического и магнитного полей. Показано, что обнаруженные структурные образования такой среды приводят к изменению ее электрофизических свойств. Во всех этих работах средний размер структурных образований не превышал единиц микрон. В работе [5] было получено уравнение, описывающее концентрационные автоволны, наблюдаемые в приповерхностном слое магнитной жидкости на границе с электродом под действием постоянного электрического поля.

В работах [6,7] в слое магнитной жидкости было зарегистрировано образование, развитие и самоорганизация агрегатов размером порядка единиц миллиметров, которые влияют на его электрофизические свойства. Установлено, что при изменении толщины слоя магнитной жидкости изменяется характер процессов самоор-

ганизации под действием постоянного электрического поля.

Целью настоящей работы является продолжение экспериментальных исследований процессов самоорганизации в слое магнитной жидкости (МЖ) под действием постоянного электрического поля. В работе рассматриваются особенности проявления процессов самоорганизации в тонких слоях магнитной жидкости при воздействии электрического поля.

В работе исследовался плоскопараллельный конденсатор с оптически прозрачными электродами, заполненный слоем магнитной жидкости. Использовалась магнитная жидкость на основе керосина с магнетитовыми частицами, стабилизированными олеиновой кислотой, с объемной концентрацией твердой фазы $\varphi = 2\%$. Расстояние между электродами задавалось с помощью прокладки и составляло порядка 20–25 μm . Исследуемый конденсатор включался в последовательный колебательный контур [7], служащий для определения его электрических свойств. Синусоидальное напряжение на конденсаторе с резонансной частотой контура 6.8 kHz использовалось для исследования электрических свойств слоя магнитной жидкости при наличии в нем процессов самоорганизации. Наблюдения за процессами самоорганизации при воздействии этого напряжения и без него не выявили отличий. Это позволило сделать вывод, что измерительное напряжение не оказывает влияния на данные процессы.

В ходе экспериментов на конденсатор подавалось поляризующее напряжение, которое изменялось в пределах 0–60 V. Таким образом, напряженность постоянного электрического поля внутри ячейки достигала значений 2.5 MV/m.

В слое магнитной жидкости наблюдались структурные образования, форма и размеры которых изменялись в зависимости от величины и времени воздействия поляризующего напряжения. При первом воздействии

постоянного электрического поля на конденсатор структурные образования отличаются от наблюдаемых при последующих воздействиях, структура состоит из ячеек, которые наблюдаются в диапазоне поляризующих напряжений ($U_p = 2-8$ V). В дальнейшем структура становится менее выраженной и начиная с напряжения 12–14 V возникает хаотическое движение жидкости в межэлектродном пространстве, интенсивность которого возрастает при увеличении поляризующего напряжения. Перед первым воздействием электрического поля слой магнитной жидкости был однороден и неподвижен. Последующие воздействия осуществлялись, после того как восстанавливались электрические свойства конденсатора на резонансной частоте и слой магнитной жидкости становился однородным и неподвижным.

Повторные воздействия поляризующего напряжения в диапазоне 2–8 V, создавали аналогичные ячейчатые структуры, описанные выше. Начиная с напряжения 11–12 V в слое магнитной жидкости образуются структуры в виде колец, размер которых увеличивается в течение определенного времени после установления поляризующего напряжения (30 min, далее наблюдения не производились ввиду незначительности изменения структур). Характерным является механизм образования данных структур, который можно описать следующим образом. В слое жидкости на фоне ячейчатой структуры образуются более концентрированные области в виде капель размером порядка 50–100 μm (рис. 1, *a*), которые затем объединяются в цепочки (рис. 1, *b*), а цепочки, в свою очередь, превращаются в кольца, которые находятся во вращательном движении (рис. 1, *c* и *d*). Внешний диаметр колец составляет 150–400 μm . Вращение колец происходит как по часовой стрелке, так и против. Частота вращения составляет порядка 1 rot/min. Данные структуры также перемещаются в горизонтальной плоскости межэлектродного пространства со скоростью порядка 100–200 $\mu\text{m}/\text{min}$, направление движения имеет случайный характер, при сближении с другими структурами происходит их объединение. Характерное время образования колец составляет порядка 5 min. По прошествии этого времени в слое магнитной жидкости могут существовать структурные образования в виде колец и капель. Структуры, имеющие диаметр менее 150 μm имеют форму капли, при больших диаметрах структуры имеют форму колец. С течением времени происходит увеличение концентрации твердой фазы в кольцах и каплях за счет „подсоса“ частиц из окружающего их пространства.

Дальнейшее увеличение напряженности постоянного электрического поля приводит к разрушению структурных образований в виде колец и капель за счет увеличения скорости движения жидкости. При поляризующем напряжении 24–25 V в слое МЖ наблюдается образование вихрей (рис. 2, *a*).

Образование и развитие вихрей происходит в определенной последовательности. Сначала образуются разнонаправленные упорядоченные потоки агрегированных

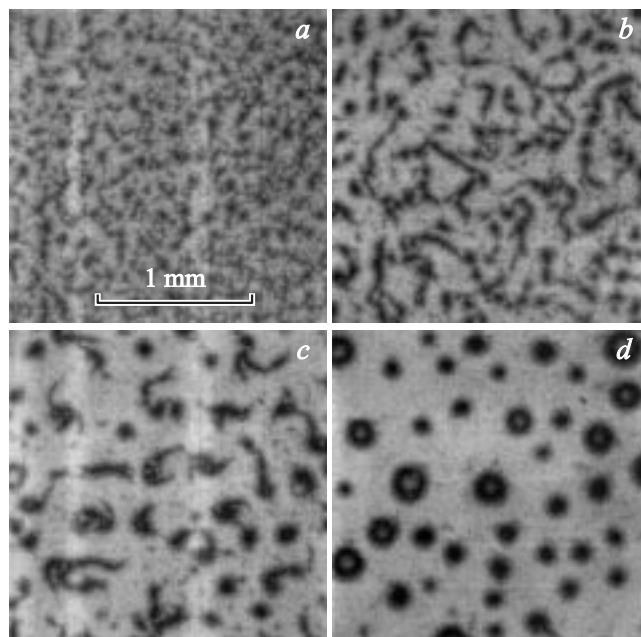


Рис. 1. Процесс образования вращающихся колец в слое магнитной жидкости толщиной $d = 20-25$ μm при поляризующем напряжении $U_p = 11-12$ V. *a* — 1, *b* — 2, *c* — 3, *d* — 5 min.

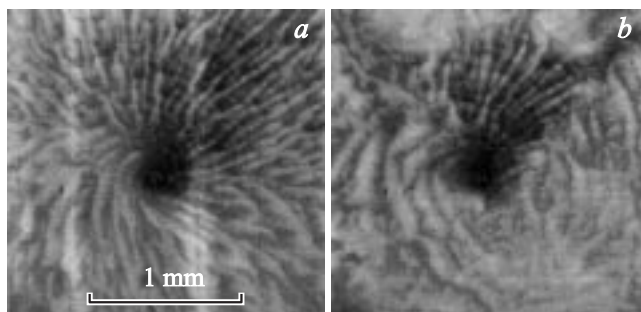


Рис. 2. Вихрь в слое магнитной жидкости толщиной $d = 20-25$ μm при поляризующем напряжении $U_p = 24-25$ V. *a, b* — образование и разрушение вихря.

частиц твердой фазы в горизонтальной плоскости межэлектродного пространства. Затем эти потоки сталкиваются в одной области, где движение приобретает вращательный характер. В этой области образуется центр вихря, который медленно перемещается в горизонтальной плоскости межэлектродного пространства. В слое магнитной жидкости образование центров вихрей происходит случайным образом. Направление вращения вихря может быть как по часовой стрелке, так и против.

На протяжении всего времени существования вихря (порядка 30 s) из его центра распространяется раскручивающаяся спиральная волна с периодом порядка 0.3 s, направление которой противоположно направлению закручивания потоков агрегированных частиц в центре вихря. Также по прошествии порядка 10 s с момента возникновения вихря из его центра начинает распростра-

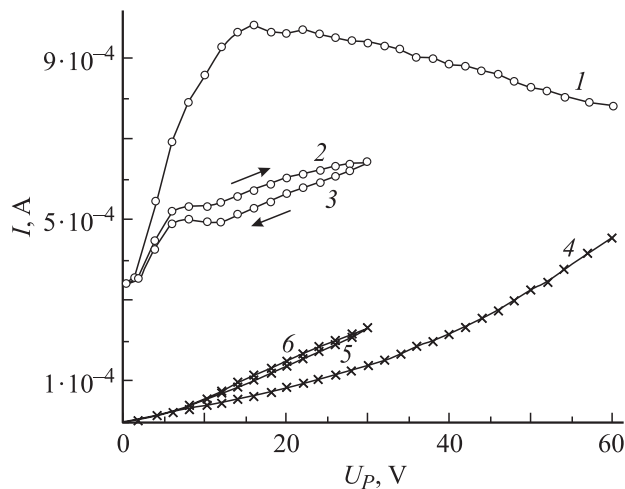


Рис. 3. Изменения тока контура от поляризующего напряжения.

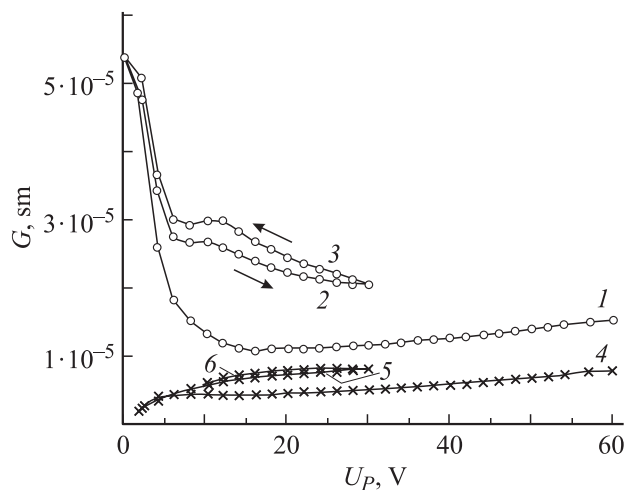


Рис. 4. Изменения проводимости конденсатора от поляризующего напряжения.

няться раскручивающаяся спиральная волна с большей амплитудой и скоростью. Период распространения этой волны также составляет порядка 0.3 с, время распространения — около 2 секунд. После излучения этой волны вихрь теряет устойчивость и разрушается (рис. 2, б).

Напряжение на ячейке $U_p > 26$ В приводит к возникновению хаотического движения жидкости, интенсивность которого возрастает при увеличении поляризующего напряжения, и прекращению образования вихрей.

Одновременно с наблюдениями процессов самоорганизации производились измерения электрических свойств слоя магнитной жидкости. По результатам измерения были построены зависимости резонансного тока контура от постоянного напряжения на конденсаторе (рис. 3, кривые 1–3). Представленная кривой 1 зависимость соответствует первому воздействию поляризующего напряжения, которое подавалось с шагом 2 В.

Кривые 2 и 3 соответствуют повторному воздействию с повышением и понижением поляризующего напряжения. Поляризующее напряжение изменялось с тем же шагом и выдержкой 1.5 min на каждом шаге. Так же измерялся постоянный ток через контур, вызванный источником поляризующего напряжения, зависимость которого представлена на (рис. 3, кривые 4–6). Кривая 4 соответствует первичной подаче поляризующего напряжения, 5 и 6 соответствует условиям измерения резонансного тока для кривых 2 и 3.

При снятии поляризующего напряжения электрические свойства конденсатора, определяемые на резонансной частоте контура, возвращались к исходным значениям через время порядка 1 min, однородность слоя магнитной жидкости восстанавливалась через 2 h.

По экспериментальным результатам были рассчитаны и построены проводимости конденсатора на резонансной частоте контура (рис. 4, кривые 1–3), а также проводимости на постоянном токе (рис. 4, кривые 4–6) в зависимости от поляризующего напряжения. Методика расчета представлена в работе [6].

Наблюдения за электрическими свойствами конденсатора при образовании в слое магнитной жидкости кольцеобразных структур и вихрей показали, что они изменяются незначительно (в пределах 1%). Хотя увеличение времени воздействия поляризующего напряжения на каждом шаге приводит к изменению хода зависимостей резонансного тока контура и постоянного тока через конденсатор от поляризующего напряжения.

Проведенные в настоящей работе экспериментальные исследования показали, что в тонких слоях магнитной жидкости, кроме ранее известных процессов самоорганизации, при определенных условиях возникают структурные образования в виде вращающихся колец и вихри. Причем возникновение вихрей сопровождается образованием „лучистой“ структуры размером несколько миллиметров, в центре которой располагается вихрь, и распространением спиральной волны.

Список литературы

- [1] Kozhevnikov V.M., Morozova T.F. // Magnetohydrodynamics. 2001. Vol. 37. P. 383.
- [2] Диканский Ю.И., Нечаева О.А. // Коллоидный журнал. 2003. Т. 65. P. 338.
- [3] Kozhevnikov V.M., Larionov J.A., Chuenkova I.J. et al. // Magnetohydrodynamics. 2004. Vol. 40. P. 269.
- [4] Veguera J.G., Dikansky Yu.I., Larionov Yu.A. Magnetohydrodynamics. 2004. Vol. 40. P. 281.
- [5] Чеканов В.В., Кандаурова Н.В., Бондаренко Е.А. // Вестн. Ставроп. гос. ун-та. 2001. Т. 28. С. 37.
- [6] Kozhevnikov V.M., Chuenkova I.J., Danilov M.I. et al. // Magnetohydrodynamics. 2005. Vol. 41. P. 53.
- [7] Кожевников В.М., Чуенкова И.Ю., Данилов М.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 21. С. 64.