

УДК 532.6:537.84

Б. М. Берковский, В. Г. Баштовой, А. Г. Рекс

## О НЕКОТОРЫХ НОВЫХ РАВНОВЕСНЫХ ФОРМАХ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЪЕМОВ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Имеющимися к настоящему времени исследованиями установлены многие интересные особенности поведения капель магнитной жидкости в магнитных полях [1]. Свободная невесомая капля испытывает удлинение в направлении внешнего однородного магнитного поля [2, 3]. Ограниченность капли твердой поверхностью приводит к тому, что при определенных условиях она становится неустойчивой. Так, например, была предсказана [4], экспериментально обнаружена [5] и исследована [5, 6] неустойчивость объема капли магнитной жидкости, лежащей на горизонтальной плоской поверхности: при некотором критическом значении напряженности магнитного поля нарушается осесимметричность формы и происходит распад капли на две части (топологическая неустойчивость). Капля, сжатая двумя плоскостями, в магнитном поле, перпендикулярном плоскостям, неустойчива к неосесимметричным возмущениям (эллиптическая и змеевидная неустойчивости) [7, 8].

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию устойчивости в однородном магнитном поле капли магнитной жидкости, ограниченной плоскими твердыми поверхностями. Новые результаты связаны с тем, что рассмотрены подложки с большой магнитной проницаемостью, а также ситуации, когда продольный (вдоль поля) размер капли не является малым.

**1. Топологическая неустойчивость капли магнитной жидкости на ферромагнитной подложке.** В соответствии с известными результатами [5] уединенная капля магнитной жидкости, лежащая на горизонтальной твердой немагнитной поверхности, при превышении некоторого критического значения напряженности однородного вертикального магнитного поля делится на две в направлении, перпендикулярном оси симметрии. Пороговое значение напряженности поля зависит существенным образом от объема капли и условий смачивания жидкостью поверхности подложки. Учитывая факт влияния магнитных свойств подложки на критический параметр неустойчивости плоских слоев магнитной жидкости [9], оказалось интересным изучить устойчивость отдельной ее капли, лежащей на подложке из ферромагнитного материала.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве источника однородного магнитного поля использовались катушки Гельмгольца. В области размером  $0,2 \times 0,2 \times 0,2$  м максимальная неоднородность поля составляла 0,5%, в области же формирования капли неоднородность поля не превышала 0,05% (объем капли — около  $450 \text{ мм}^3$ ). Формы поверхности капли регистрировались как с помощью фотосъемки с последующей обработкой фотопленок на микроскопе МИ-1, так и с помощью телевизионной установки МТУ-1, что позволило вести обработку данных непосредственно в ходе эксперимента.

Немагнитная подложка была выполнена из алюминия, в качестве ферромагнитной подложки использовались как диски из железа диаметром 0,25 м (толщина 5 мм), так и непосредственно центральная часть торца магнитопровода электромагнита (бесконечная толщина

подложки). Благодаря большому диаметру дисков однородность поля в центре не нарушалась.

Чтобы устранить влияние условий смачивания, на полированную поверхность подложек предварительно наносился тонкий слой немагнитной фольги толщиной 0,06 мм, при этом реализовывались условия хорошего смачивания. Горизонтальность поверхности подложки обеспечивалась микрометрическими винтами.

В экспериментах использовались жидкости на основе керосина с магнетитовым наполнением МК-50 и МК-32 со следующими свойствами соответственно: намагниченность насыщения  $M_s=50$  и 32 кА/м, плотность  $\rho=1516$  и 1310 кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  на границе раздела жидкость МК-50—воздух составлял 0,027 Н/м, жидкость МК-32—водный раствор CaCl<sub>2</sub> 0,0034 Н/м.

В основу методики наблюдения за эволюцией формы капли была положена работа [5]. Капля медленно (чтобы свести к минимуму пульсации) формировалась на горизонтальной подложке с помощью микробюретки при некотором начальном значении напряженности вертикального однородного магнитного поля. Измерялся объем капли, погрешность его определения составила 1%. Затем квазистатически изменялась напряженность магнитного поля: ступеньками по 80 А/м с выдержкой каждого значения напряженности по 10 минут. Одновременно велось наблюдение за эволюцией формы капли, определялось критическое поле  $H^*$ , при котором происходил распад объема жидкости  $V$  на две части.

В случае немагнитной подложки наблюдается соответствие с известными результатами [5]: топологическая неустойчивость капли наступает при превышении полем  $H$  критического значения  $H^*$ . В малых полях лежащая на подложке капля имеет вид конусообразного пика с осью симметрии, перпендикулярной плоскости подложки. С увеличением магнитного поля высота капли возрастает. В критической ситуации ( $H=H^*$ ) осесимметричность объема жидкости нарушается и форма поверхности претерпевает следующие изменения. Основание капли вначале принимает эллиптическую форму, а затем становится гантелеобразным — два утолщения, связанные пленкой жидкости (перетяжкой). Подобный вид имеет любое ее сечение, параллельное плоскости подложки. Через некоторый промежуток времени перетяжка разрывается и капля расщепляется на две части, располагающиеся на определенном расстоянии друг от друга. Так как капля магнитной жидкости, вытянутая вдоль силовых линий поля, обладает свойствами диполя, то расстояние между двумя вновь образовавшимися каплями определяется силами междипольного отталкивания.

На рис. 1 зависимость критической напряженности внешнего магнитного поля  $H^*$  от объема капли  $V$  иллюстрируется кривой 1. Область, соответствующая устойчивой капле, лежит слева от этой кривой ( $H < H^*$ ), справа ( $H > H^*$ ) — область неустойчивости (распад капли). С уменьшением  $V$   $H^*$  возрастает. Существует определенный объем капли, для которого топологическая неустойчивость не развивается даже в полях большой напряженности. В нашем случае капля жидкости МК-50 объемом 180 мм<sup>3</sup> и ниже не разрушалась в полях до 250 кА/м.

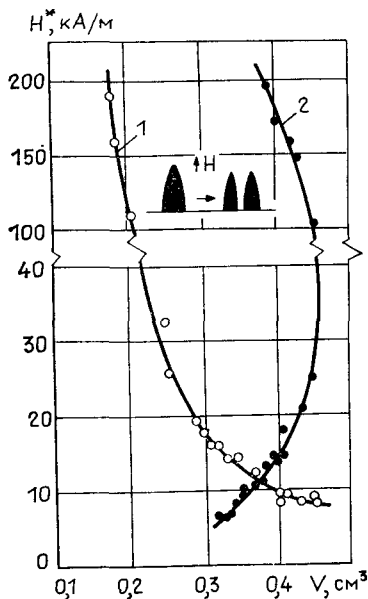


Рис. 1. Кривые топологической неустойчивости. Подложка: 1 — немагнитная, 2 — из ферромагнитного материала.

Существенно иной характер носит топологическая неустойчивость капли магнитной жидкости, лежащей на подложке из ферромагнитного материала. Эксперименты показали, что если магнитная проницаемость подложки намного больше проницаемости жидкости, то капля имеет два порога неустойчивости — нижний  $H^*_н$  и верхний  $H^*_в$ . В этом случае зависимость пороговых значений поля  $H^*$  от объема капли  $V$  описывается кривой 2 на рис. 1. Устойчивой капле соответствует область слева от этой кривой, топологическому распаду — справа. Капля на ферромагнитной подложке может быть устойчивой только в определенном диапазоне магнитных полей  $H^*_н < H < H^*_в$ . Формирование капли на плоской поверхности осуществлялось при  $H = 25$  кА/м, а затем наблюдение велось либо при уменьшении, либо при увеличении поля.

Аналогично предыдущему случаю капля распадается при увеличении поля до критического значения  $H^*_в$ . Принципиальное отличие заключается в ее распаде и при уменьшении напряженности поля до значения  $H^*_н$ , причем стадии развития неустойчивости те же, что и в первой ситуации.

С увеличением объема капли верхний и нижний пороги неустойчивости сближаются и становятся равными при некотором предельном значении объема  $V^*_в$ . При  $V > V^*_в$  капля магнитной жидкости, лежащая на плоской горизонтальной ферромагнитной подложке, не может существовать ни при каких напряженностях вертикального однородного магнитного поля.

**2. Устойчивость невесомой капли магнитной жидкости, ограниченной параллельными плоскостями.** Если свободная капля ограничена сверху и снизу двумя параллельными плоскими поверхностями, то в вертикальном однородном поле она принимает форму цилиндрического столба конечной длины, расположенного между поверхностями. Ось симметрии его параллельна полю, длина равна расстоянию  $h$  между пластинами. В условиях гидроневесомости, при полной нейтрализации силы тяжести, столб имеет постоянный по всей длине радиус  $R$  (если магнитная жидкость не смачивает ограничивающие пластины). В случае же смачивания  $4/5$  длины столба можно считать практически правильным цилиндром.

Было проведено экспериментальное исследование устойчивости ограниченного плоскостями невесомого цилиндрического столба магнитной жидкости в вертикальном однородном магнитном поле. Использовалась жидкость МК-32. Условия гидроневесомости создавались помещением капли в водный раствор  $\text{CaCl}_2$  той же плотности. Ограничивающие пластины были изготовлены из стекла и плексигласа. Угол смачивания магнитной жидкостью поверхности пластин из плексигласа оказался равным  $42^\circ$ . Чтобы устранить смачивание поверхностей стеклянных пластин (угол смачивания равен  $180^\circ$ ), в раствор  $\text{CaCl}_2$  добавлялось поверхностно-активное вещество. Цилиндрический столб формировался путем введения с помощью микробюретки в прозрачную кювету с раствором  $\text{CaCl}_2$  известного объема  $V$  магнитной жидкости при некотором начальном поле  $H$ . Увеличение поля осуществлялось квазистатически.

Эксперименты показали, что в случае ограничения плоскими поверхностями невесомой капли магнитной жидкости в однородном магнитном поле топологическая неустойчивость не развивается. Равновесной формой после наступления неустойчивости являются не два цилиндра, а плоская тонкая пленка магнитной жидкости, в которую растягивается между пластинами первоначальный цилиндр. Боковые поверхности тонкой пленки параллельны направлению поля.

Неустойчивость цилиндрической формы объема магнитной жидкости имеет пороговый характер. При некотором значении поля  $H^*$ , являющемся критическим, на цилиндрическом столбе начинают развиваться неосесимметричные возмущения. Если жидкость не смачивает пластины, то в течение нескольких минут происходит перестройка формы поверх-

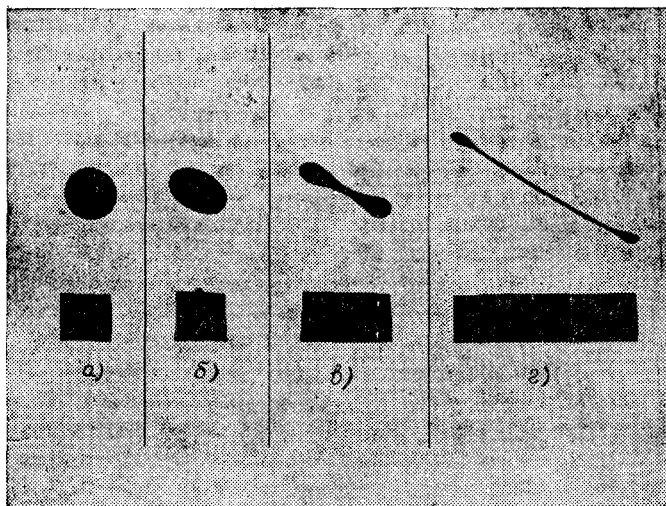


Рис. 2. Эволюция формы цилиндрического столба магнитной жидкости высотой  $h = 15$  мм при критическом значении напряженности магнитного поля: а, б, в —  $H = H^* = 5,5$  кА/м; г —  $H = 10$  кА/м (вверху — вид сверху, внизу — вид сбоку).

ности: первоначально круговой цилиндрический столб, пройдя стадию эллиптического цилиндра (перпендикулярное оси сечение — эллипс), трансформируется сразу в пленку с утолщениями на концах (сечение имеет гантелеобразный вид). Направление такого вытягивания первоначально осесимметричной капли определялось случайными факторами. При дальнейшем увеличении поля жидкая пленка удлинняется в направлении, перпендикулярном полю, утолщения на концах практически исчезают. Описанные стадии перестройки формы цилиндрического столба жидкости показаны на рис. 2. Если же поверхности пластин смачиваются магнитной жидкостью, то результатом развития неустойчивости может быть эллиптический цилиндр, не изменяющий своей формы в течение длительного времени. При увеличении поля в этом случае новой равновесной формой также является плоская пленка.

Интересно отметить, что в докритических полях на торцевых поверхностях жидкого цилиндрического столба наблюдаются конусообразные углубления — результат действия размагничивающего поля, создаваемого цилиндрическим объемом жидкости. Ближе к боковым поверхностям размагничивающее поле меньше, так что результирующее магнитное поле больше, и жидкость стремится в эти области с большей напряженностью поля, образуя в центре цилиндра воронку. В критическом поле, когда объем жидкости меняет свою форму, воронка исчезает.

Устойчивость цилиндрической формы жидкого столба определяется его геометрическими характеристиками. Критическая намагниченность столба линейно увеличивается с ростом его длины  $h$  (рис. 3). Критические значения намагниченности определялись с учетом размагничивающего поля, создаваемого цилиндрической формой объема жидкости. Столб жидкости большего объема оказывается менее устойчивым к несимметричным возмущениям, чем столб меньшего объема, причем эта зависимость усиливается при уменьшении объема. Представленные на рис. 3 зависимости описываются с точностью до 10% следующей эмпирической формулой:

$$M^* = (A + Bh) / \sqrt[3]{V},$$

где  $A = 9,7$  кА,  $B = 3900$  кА/м.

Для цилиндрических столбов одинаковой длины наблюдается монотонное снижение порога неустойчивости при увеличении радиуса столба

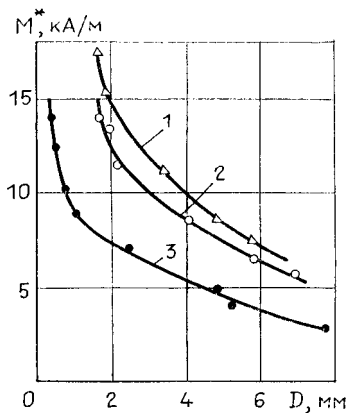
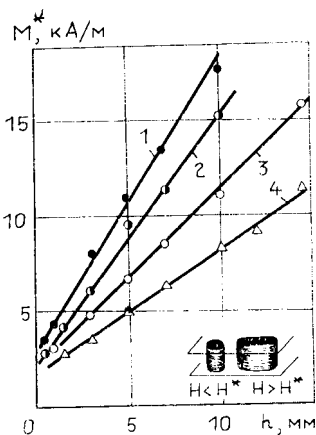


Рис. 3. Зависимость критической намагниченности цилиндрического столба магнитной жидкости от его высоты для объемов  $V$ : 1 — 22, 2 — 27, 3 — 97, 4 — 184 мм<sup>3</sup>.

Рис. 4. Влияние диаметра цилиндрического столба магнитной жидкости на порог его неустойчивости.  $h$ : 1 — 10, 2 — 7, 3 — 0,5 мм.

(рис. 4). Развитие возмущений на поверхности столба магнитной жидкости малой длины ( $h=0,5$  мм) и большого радиуса ( $R/h>5$ ) имеет особенность, заключающуюся в отсутствии промежуточной эллиптической формы объема жидкости. В критической ситуации наблюдается перестройка цилиндрической формы капли в форму с поперечным сечением произвольного вида, которая затем при увеличении поля принимает лабиринтную структуру.

Новая равновесная форма магнитной жидкости во внешнем однородном поле в виде вертикально расположенной плоской пленки оказывается устойчивой к внешним механическим воздействиям. Например, прокалывание иглой не разрушает ее. Если магнитная жидкость не смачивает поверхности ограничивающих пластин, то при поперечных колебаниях кюветы пленка совершает волнообразные движения, не разрушаясь. В случае неполной компенсации силы тяжести ( $\Delta\rho \sim 5$  кг/м<sup>3</sup>) наклон кюветы ведет к перемещению относительно пластин магнитожидкостной пленки как единого целого (связность формы не нарушается). Магнитожидкостная пленка, подобно магнитному диполю, взаимодействует с постоянным магнитом — притягивается либо отталкивается от него, сохраняя неизменными геометрические размеры.

При увеличении поля длина пленки жидкости  $l$  монотонно растет (рис. 5а). При этом ее толщина уменьшается до 0,1 мм, а площадь бо-

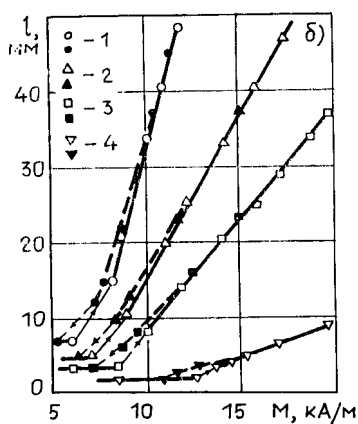
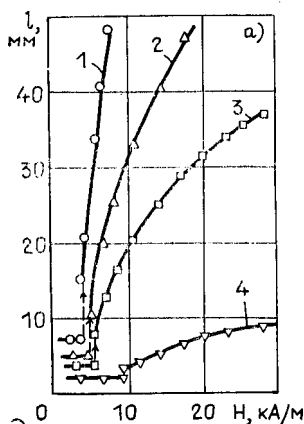


Рис. 5. Зависимость длины плоской пленки от  $H$  (а) и  $M$  (б).  $V$ : 1 — 280, 2 — 150, 3 — 100 и 4 — 30 мм<sup>3</sup> ( $h=7$  мм). Светлые точки — увеличение поля, темные — уменьшение поля.

ковой поверхности увеличивается в 10 раз. По длине пленка имеет постоянную толщину, и перетяжек на ней не наблюдается. Зависимость длины пленки от намагниченности жидкости  $M$  линейная (рис. 5б). При определении намагниченности размагничивающий фактор учитывался только для цилиндрической формы и принимался равным нулю для тонкой пленки жидкости, расположенной вдоль поля. Сплошные линии на рисунке соответствуют изменению  $l$  при увеличении поля, штриховые — при его уменьшении. Рис. 5 свидетельствует о том, что при неизменном расстоянии  $h$  между ограничивающими пластинами капли большего объема (т. е. и большего диаметра) удлиняются значительно сильнее, чем капли меньшего объема. Так, например, для объема магнитной жидкости  $V=280 \text{ мм}^3$  имеем  $\partial l/\partial M=10^{-5} \text{ м}^2/\text{А}$ , а при  $V=30 \text{ мм}^3$  —  $\partial l/\partial M=0,85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{А}$ .

В областях полей, близких к критическим, наблюдается гистерезис формы объема жидкости. При уменьшении поля пленка принимает форму цилиндрического столба в полях, меньших критического значения. Это и отмечено штриховыми линиями на рис. 5б.

Пленка высотой более 3 мм оказывается устойчивой относительно изгибных возмущений в полях до 250 кА/м. Во всем диапазоне магнитных полей она сохраняет прямолинейный вид. Даже если в случае смачивания магнитной жидкостью поверхностей пластин искусственно были получены изогнутые в виде подковы пленки жидкости, то с течением времени они распрямлялись. Это связано с отталкиванием соседних одноименно намагниченных элементов магнитной жидкости. Равновесие наступает, когда эти элементы максимально удалены друг от друга, т. е. находятся на одной прямой линии.

Если расстояние между пластинами меньше 3 мм, объем магнитной жидкости в магнитном поле принимает подковообразные, S-образные и лабиринтные формы, которые наблюдали авторы работ [7, 8]. Различие ситуаций, по-видимому, можно объяснить разной ролью в образовании новой равновесной поверхности размагничивающего поля объема магнитной жидкости. Если для плоских полосок магнитной жидкости, сжатых плоскостями, весьма существенно действие размагничивающего поля (магнитное поле направлено поперечно полоске и размагничивающий фактор ее близок к единице), то для вертикальных тонких пленок между плоскостями, вытянутых вдоль поля и имеющих высоту, много большую толщины (до 100 раз), размагничивающий фактор практически равен нулю и, следовательно, размагничивающее поле весьма мало. В последнем случае основную роль в образовании конфигурации новой равновесной формы жидкости играет междипольное отталкивание.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баштовой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. М.: Институт высоких температур АН СССР, 1985. 188 с.
2. Тарапов И. Е. Некоторые вопросы гидростатики намагничивающихся и поляризующихся сред. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1974, № 5, с. 141—144.
3. Архипенко В. И., Барков Ю. Д., Баштовой В. Г. Исследование формы капли намагничивающейся жидкости в однородном магнитном поле. — Магнитная гидродинамика, 1978, № 3, с. 131—133.
4. Берковский Б. М. К исследованию устойчивости равновесных форм магнитной жидкости. — В кн.: Численные методы и решения задач переноса. Ч. 1. Минск: ИТМО АН БССР, 1979, с. 149—155.
5. Барков Ю. Д., Берковский Б. М. Распад капли намагничивающейся жидкости. — Магнитная гидродинамика, 1980, № 3, с. 11—14.
6. Berkovsky B. M., Kalikmanov V. I. Topological instability of magnetic fluids. — J. Phys. Lett., 1985, vol. 46, p. L-483—L-491.
7. Romankiw L. T., Stusarczuk M. M. G., Thompson D. A. Liquid magnetic bubbles. — IEEE Transactions on Magnetics, 1975, vol. 11, N 1, p. 25—28.
8. Чеберс А. О., Майоров М. М. Магнитостатические неустойчивости в плоских слоях намагничивающихся жидкостей. — Магнитная гидродинамика, 1980, № 1, с. 27—35.
9. Баштовой В. Г. Неустойчивость неподвижного тонкого слоя намагничивающейся жидкости. — ПМТФ, 1978, № 1, с. 81—87.

Поступила 27 февраля 1986 г.