

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ НА ПОДЛОЖКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

М. А. Голяткина¹, А. А. Кришталь¹

¹ *Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
Физико-технический институт*

Аннотация

Исследовано явление расщепления капли магнитной жидкости (далее – МЖ) на подложке в магнитном поле (далее – МП) постоянного магнита. Рассмотрено несколько МЖ различного состава. Проведён анализ полученных экспериментальных зависимостей.

Авторы ставили перед собой задачу экспериментального определения типа зависимости изменения высоты капли МЖ от МП.

Основная цель работы – изучение свойств магнитных жидкостей и исследование поведения капель на твёрдых подложках в магнитном поле постоянного магнита. Расширение спектра экспериментальных данных по вопросу расщепления капель МЖ в МП.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитное поле, полуограниченная капля

Введение

Важной особенностью МЖ, представляющих собой устойчивую коллоидную дисперсию однодоменных наночастиц ферро- и ферритмагнитных материалов в несущей жидкости, является сочетание текучести и высокой намагниченности. Каждая частица представляет собой мини-магнит, покрытый тонкой оболочкой и хаотически вращающийся вследствие теплового броуновского движения. Броуновское движение обеспечивает большую устойчивость такого раствора к расслоению. Внешнее магнитное поле ориентирует магнитные моменты частиц, что приводит к изменению магнитных, оптических и реологических свойств раствора.

Различные МЖ обладают различными характеристиками, которые существенно влияют на их поведение в МП. Исследованию статистических и динамических свойств МЖ посвящено немало научных трудов.

В Украине изучением магнитных жидкостей занимается ряд научных организаций: Институт ядерных исследований, Институт общей и неорганической химии им. В. И. Вернадского НАН Украины, КНУ им. Шевченко, (исследования по структуре магнитной жидкости) и др. В Харькове под руководством И.Е. Тарапова проводился ряд исследований: по стабилизации свободной поверхности жидкости при помощи электромагнитного поля [1]; возможности использования электромагнитных полей для управления поведением жидкости в специальных условиях [2].

Об актуальности выбранной темы говорит то, что магнитные жидкости используют в высокотехнологичных устройствах и приборах: в системах герметизации, магнитных сепараторах, датчиках накло-

на и высокочувствительных измерителях ускорений, микронометрах и исполнительных механизмах роботов. Также перспективно применение МЖ в медицине [3].

Ещё одной важной особенностью МЖ является топологическая неустойчивость в МП их объёмов, имеющих свободную поверхность (капли, струи). Это явление потери их целостности при определённых условиях. Явление такого расщепления капли МЖ представляет научный, а также практический интерес. Понимание механизма этого явления позволит устранять либо контролировать данные эффекты. Например, это важно для таких чувствительных приборов, как микроманометры, магнитных сепараторов. Существующие результаты экспериментов лежат в достаточно узком диапазоне изменений магнитных свойств жидкости и МП, а теоретические данные не достаточно наглядны и просты. Поэтому авторы также ставили перед собой цель расширить спектр экспериментальных данных по этому явлению. Исследования, результаты которых представлены в данной работе, направлены на решение задачи описания явления расщепления капли МЖ, лежащей на горизонтальной твёрдой частично смачиваемой резиновой подложке в МП постоянного магнита.

1. Описание физики процесса

Задача о топологической неустойчивости полуограниченной капли магнитной жидкости решалась Баштовым В. Г., Рексом А. Г., Аль-Джаиш Таха Малик Мансуром в Беларуском национальном техническом университете [4]. В их работах ключевыми моментами являются рассмотрение полуограниченной капли

как полуэллипсоида вращения, т.е. имеющую осесимметричную форму, применение энергетического подхода к решению задачи. Энергетически, существование двух одинаковых полуэллипсоидных капель более выгодно, чем одной капли при сохранении их суммарного объёма.

При этом стоит отметить, что подобное явление неустойчивости не наблюдается в условиях гидроневесомости [5]. Вытяжение вдоль действия силы тяжести приводит к тому, что положение центра тяжести капли становится выше. Т.е. становится больше её потенциальная гравитационная энергия. В итоге, капля распадается на две меньшей высоты, имеющие меньшую потенциальную энергию.

Распад капли происходит только в случае, если уменьшение гравитационной энергии больше, чем увеличение поверхностной. Ведь после распада суммарная площадь поверхности двух образовавшихся капель больше, чем первоначальной.

Следует определить стратегию решения задачи отведя на следующий вопрос: каким образом можно представить деформацию капли?

Для этого рассматривается следующая модель: разбиение процесса разрыва капли МЖ в неоднородном МП неодимового магнита на 4 стадии:

- 1) стационарное состояние капли в отсутствии МП.
- 2) Вытягивание капли вдоль МП.
- 3) Расщепление капли (при определённом значении МП).
- 4) Две образовавшиеся капли.

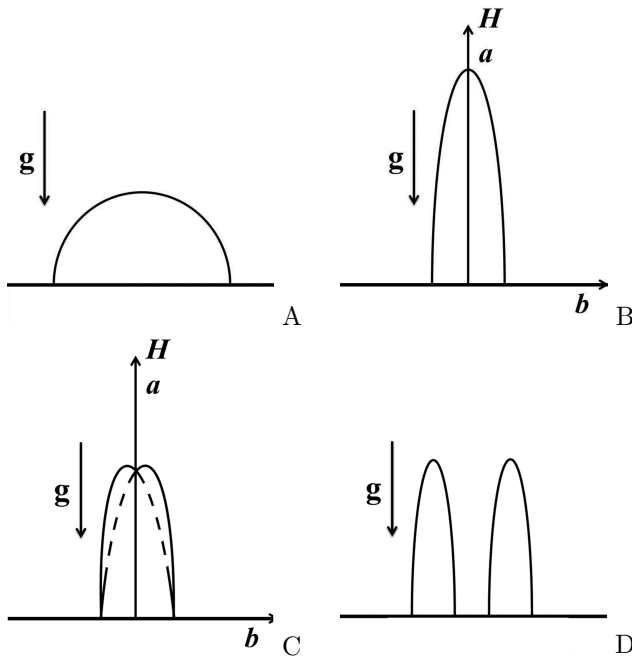


Рис. 1. Форма капли МЖ: А – капля в отсутствии МП, В – вытянувшаяся вдоль поля капля, С – расщепление капли, D – две вытянувшиеся капли.

В обычной жидкости под действием сил поверхностного натяжения капля стремится принять сферическую форму, под действием гравитационных сил – плоскую горизонтальную. У МЖ в поле по-

стоянного магнита свободная поверхность стремится приобрести такую форму, при которой минимизируются возможные возмущения МП. Поэтому свободная поверхность МЖ располагается как можно более параллельно вектору напряженности. До расщепления капли имеет форму $f(r)$ (в Декартовых координатах: $z = f(r)$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$), определяющуюся уравнением изменения давления на границе свободной поверхности:

$$p_2^1 = 2\sigma K + \frac{1}{8\pi} [B_n H_n - \vec{B}_\tau \vec{H}_\tau]_2^1 \quad (1)$$

Здесь σ – коэффициент поверхностного натяжения; K – средняя кривизна поверхности: $K = \frac{f'' + \frac{f'^3}{r} + \frac{f'}{r}}{2(1+f'^2)^{\frac{3}{2}}}$; B_n, B_τ, H_n, H_τ – нормальные и тангенциальные составляющие векторов магнитной индукции и напряжённости МП соответственно относительно свободной поверхности.

Основной причиной вытяжения является переориентация магнитных доменов внутри капли, т.е. перераспределение частиц дисперсной фазы в дисперсионной при приложении МП. При этом намагниченность жидкости начинает нарастать, т.к. $\vec{M} = \sum_{i=0}^n \vec{m}_i$, где m_i – магнитный момент одной частицы, n – количество ориентированных вдоль поля. При этом существует момент, когда намагниченность прекращает расти, достигая насыщения $\vec{M}_s = \sum_{i=0}^N \vec{m}_i$ (N – полное количество частиц в исследуемом объёме МЖ). Это создаёт в капле разность давлений вдоль осей, что и заставляет каплю вытягиваться, а затем расщепляться. Поскольку поле ориентировано практически перпендикулярно к поверхности подложки, капля вытягивается именно вдоль оси a полуэллипсоида. Давления, возникающие вдоль осей полуэллипсоида можно описать уравнениями:

$$\begin{cases} p_a = p_0 + \sigma(\frac{1}{R_1^a} + \frac{1}{R_2^a}) - \frac{1}{2}\mu_0 M^2, \\ p_b = p_0 + \sigma(\frac{1}{R_1^b} + \frac{1}{R_2^b}), \end{cases} \quad (2)$$

где p_0 – давление окружающей среды, σ – коэффициент поверхностного натяжения МЖ, R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны поверхности (для идеального полуэллипсоида справедливо $R_1^a = R_2^a = a$, $R_1^b = b, R_2^b = a$), M – намагниченность МЖ, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, p_0 – давление окружающей среды.

2. Эксперимент

Эксперимент проводился с несколькими МЖ разных составов: синтезированные авторами МЖ на основе растительного масла (далее – МЖ №1), полученная химическим путём МЖ на основе аммиачной воды (далее – МЖ №2), и МЖ на основе керосина (далее – МЖ №3) производства НПВП «Феррогидродинамика» с начальной намагниченностью 60 кА/м.

Для МЖ №1 и МЖ №2 процесс расщепления при условиях проведения эксперимента не наблюдается.

Состав МЖ №3 был неизвестен авторам заранее по причине производственной тайны. Поэтому для неё была снята рентгенограмма и прове-

дён качественный фазовый анализ. Рентгенофазовый анализ проводился методом порошковой дифрактометрии на автоматизированном дифрактометре Ultima IV (Rigaku) с геометрией съёмки по Бреггу-Брентано в излучении $Cu K\alpha$ линии анода ($\lambda = 1.541874 \text{ \AA}$) с Fe-фильтром в отражённом пучке.

На рисунке 2 приведена рентгенограмма МЖ №3, а также дифракционные пики рентгенограммы вещества $Fe_{2.18}O_4Ti_{0.42}$, которые наилучшим образом совпадают с пиками для МЖ №3. На рентгенограмме наиболее интенсивные линии (пики) соответствуют дисперсной фазе МЖ.

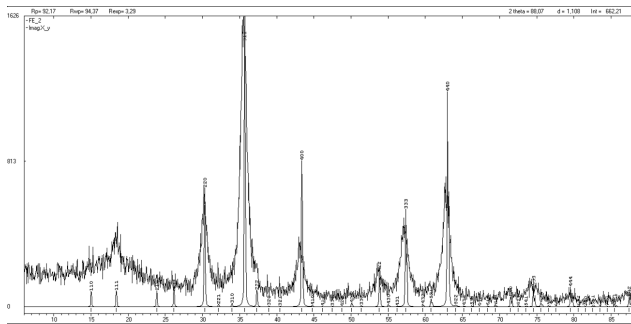


Рис. 2. Рентгенограмма МЖ №3

Значения среднего эффективного размера областей когерентного рассеяния или кристаллитов $Fe_{2.18}O_4Ti_{0.42}$ были рассчитаны согласно уравнению Шеррера в предположении, что все зёрна являются сферическими: $D = \frac{0.94\lambda}{b(2\theta)\cos\theta}$, где $b(2\theta)$ – эффективная ширина на полувысоте (FWHM) для наиболее интенсивных линий. Получены частицы наиболее вероятного размера от $5,8 \pm 1,0 \text{ нм}$ до $8,7 \pm 1,0 \text{ нм}$.

Методика проведения эксперимента по определению зависимости геометрических параметров капли МЖ от МП состояла в следующем. В отсутствие МП на лежащую на пластине подложку помещалась капля МЖ. При возникновении начального МП капля деформировалась и принимала вертикальный пикообразный вид. Затем, за счёт изменения расстояния между пластиной и магнитом под ней, МП изменялось с шагом $0,1 \text{ мТл}$ (в приближении – квазистатически), измерялись величина поля и высота капли. Эксперимент проводился до достижения максимального значения поля для данной установки.

Используемая подложка сделана из водоотталкивающей резины, поэтому для керосина (основа МЖ №3) имеет место только частичная несмачиваемость. Поэтому одновременно с вытянувшейся каплей существовала «лужа» МЖ, что можно наблюдать на рисунке 3.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 4.

В эксперименте использован неодимовый магнит, характеристики которого приведены в таблице 1.

3. Результаты эксперимента и обсуждение

После достижения некоторого значения поля, рост капли прекращается за счет критического значения

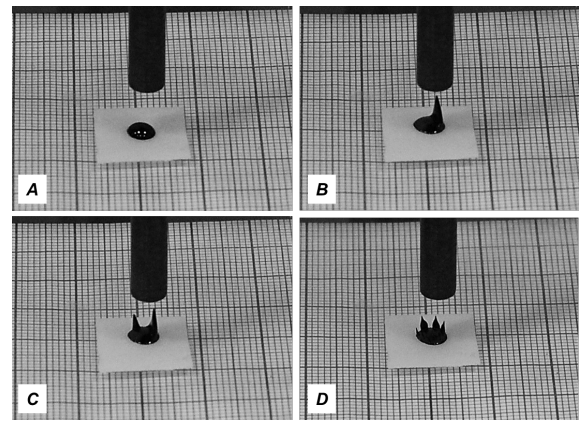


Рис. 3. Вытягивание и разрыв капель МЖ в МП. А – капля в отсутствие МП, В – одна вытянутая вдоль поля капля (МП < 33 мТл), С – две вытянутые капли, D – несколько капель.

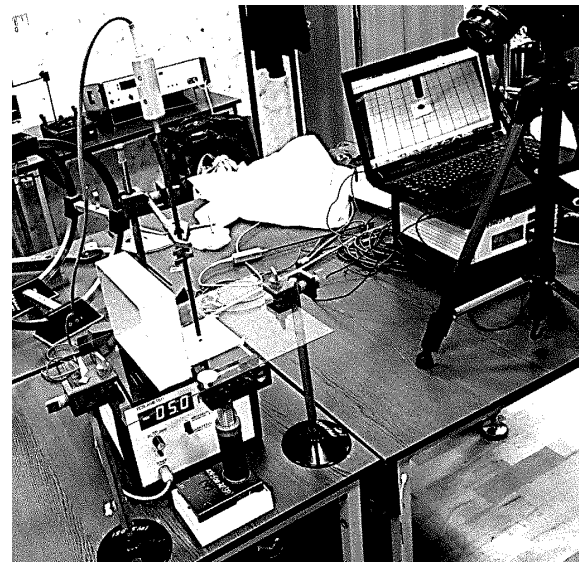


Рис. 4. Экспериментальная установка

Параметр	Значение
Форма	диск
Диаметр	30 мм
Толщина	10 мм
Вес	54 г
Остаточное МП	1.2 Тл
Максимальная магнитная энергия	287 – 303 кДж/м ³

Табл. 1. Характеристики неодимового магнита
поверхностного натяжения (принцип минимума энергии), капля начинает растягиваться по горизонтали и, как следствие, сплющиваться и расщепляться. Образовавшиеся капли имеют меньшую высоту, чем капля до расщепления. Происходит смещение центра масс и увеличения площади свободной поверхности. Достигается уменьшение потенциальной энергии системы. Расщепление капли начинается в верхней точке в следствии неравномерности поверхностного

натяжения. В верхней точке оно преобладает из-за максимальной кривизны поверхности.

В нашем эксперименте расщепление наблюдалось дважды (изначальная и большая из дочерних капель), в результате чего образовывались три отростка. Наличием «лужи» МЖ объясняется появление четвертого отростка, который как бы вырастает из нее. Наступает момент, когда более энергетически выгодно вырастить каплю из остаточного объема, чем дробить уже существующие.

Таким образом, при данных условиях существует два вероятных состояния капли для некоторых значений МП: расщепление и вырастание новой капли из «лужи». Их вероятность определяется более выгодным в энергетическом плане состоянием.

Считая систему замкнутой, отметим, что её полная энергия постоянна. Однако, под воздействием МП происходит её перераспределение внутри капли. Пренебрежём энергией броуновского движения частиц дисперсной фазы внутри капли (составляет порядка 10^{-13} Дж/м³). Тогда полная энергия состоит из гравитационной (потенциальной энергии центра масс капли), энергии поверхностного натяжения, и магнитной энергии.

Для полуэллипсоида центр тяжести расположен на высоте $h_{ц.т.} = \frac{3}{8}h$. Потенциальная энергия капли растёт прямо пропорционально увеличению высоты.

Площадь боковой поверхности полуэллипсоида выражается формулой $S = \pi R \left(R + \frac{h^2}{\sqrt{h^2 - R^2}} \arcsin \left(\frac{\sqrt{h^2 - R^2}}{h} \right) \right)$, где R – радиус основания капли. Для сильно вытянутого полуэллипсоида можно записать: $S = \frac{\pi^2}{2} Rh$. Полагая изменения линейных размеров капли вдоль оси b малыми, получаем, что энергия поверхностного натяжения также возрастает пропорционально увеличению высоты капли.

Справедливо, что магнитная энергия прямо пропорциональна квадрату МП.

Следуя приведённым рассуждениям, легко видеть, что, исследуя зависимость высоты капли МЖ в МП, можно ожидать квадратичный характер такой функции.

Тенденция роста и дальнейшего сплющивания капли отображена на графике (Рис. 5). Аппроксимирующими функциями были избраны полиномы второго порядка. Коэффициенты полинома вида $a_0 + a_1x^n + a_2x^{n-1} + a_3x^{n-2} + \dots$ записаны в таблице 2.

a_0	12.418
a_1	-0.127
a_2	6.323
σ	2%

Табл. 2. Коэффициенты полинома

Здесь σ есть квадратическое отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующего полинома. По его значению можно судить, что аппроксимация является достаточно точной. Некоторые расхождения могут быть вызваны тем фактом, что при сплющивании изменение геометрических размеров вдоль оси b становится более существенным.

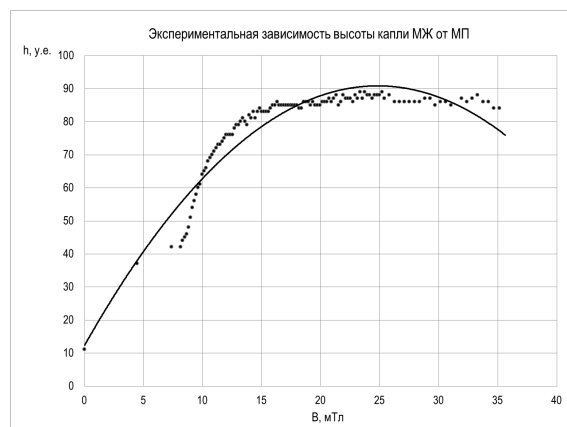


Рис. 5. Вытягивание и разрыв капли (аппроксимация)

В итоге, в рамках выбранного приближения, можно сказать, что предложенная теоретическая модель физики процесса расщепления капли подтверждается экспериментально.

Выводы

Исследованы условия разрыва капли МЖ на твёрдой резиновой частично несмачиваемой подложке в МП. Предложена оптимальная физико-математическая модель процесса. Получены экспериментальные зависимости разрыва полуограниченной капли МЖ от МП, отвечающие взятой модели. В выбранном направлении авторами продолжаются исследования.

Перечень использованных источников

1. Пацегон Н. Ф., Поцелуев С. И. Устойчивость свободной поверхности вязкой намагничивающейся жидкости при многопараметрическом возбуждении // Прикладна гідромеханіка. — 2014. — Т. 16, № 3. — С. 36–51.
2. Теоретическое исследование возможности использования электромагнитных полей для управления поведением жидкости в специальных условиях / И. И. Иевлев, А. Б. Исерс, Н. Ф. Пацегон и др. // Прикладна гідромеханіка. — 1981. — Т. 16, № 3. — С. 36–51.
3. Магнітні рідини на основі магнетиту і доксорубіцину для спрямованої доставки лікарського засобу / А. Л. Петрановська, М. В. Абрамов, С. П. Туранська та ін. // Хімія, фізика та технологія поверхні. — 2015. — Т. 6, № 3. — С. 343–353.
4. Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Мансур Аль-Джаиш Таха Малик. Топологическая неустойчивость полуограниченной капли магнитной жидкости // Весті національної академії наук Беларусі. Серія фізика технічних наук. — 2013. — № 4.
5. Архипенко В. И., Барков Ю. Д., Баштовой В. Г. Магнитная гидродинамика. — Минск, 1978. — С. 131–134.