

ДЕФОРМАЦИЯ КАПЕЛЬ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. С. Минина^а, К. А. Бушуева^б

^аПермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

^бИнститут механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Пермь, Королева, 1

Введение. Исследование формы капель магнитной жидкости (МЖ) вызывает активный интерес многочисленных исследователей по той причине, что она оказывается очень чувствительной к внешнему магнитному полю и легко управляется с его помощью. Основными факторами, определяющими форму капли МЖ, являются магнитная и гравитационная силы, а также силы поверхностного натяжения [1].

В работе [2] была получена и экспериментально изучена упорядоченная система капель, возникавшая при разрыве изначально сплошного слоя магнитной жидкости, расположенного на жидкой подложке в вертикальном однородном магнитном поле. Капли имели вид конусов, частично погруженных в жидкость подложки, и при дальнейшем увеличении напряженности поля вытягивались в область воздушной фазы. В ходе исследования было обнаружено, что возникающие при разрыве слоя капли имели различные диаметры (от 2 до 15 мм), также от опыта к опыту отличалось количество получаемых капель. Отмечалось, что формирование неустойчивости поверхности капель на границе с воздухом происходило при различных значениях напряженности приложенного магнитного поля. Кроме того, высказывалось предположение, что на количество капель, их размер и критические параметры неустойчивости их свободной и межфазной поверхностей влияет толщина жидкой подложки. Для проверки этих предположений мы исследовали единичный элемент капельной структуры, возникающий при распаде слоя феррожидкости под действием однородного вертикального магнитного поля.

Методика эксперимента. В эксперименте была использована феррожидкость на основе керосина ($\rho_1 = 1.37 \text{ г/см}^3$, $\sigma_1 = 24.3 \text{ дин/см}$, $\chi_{01} = 7.0$), капля которой располагалась на жидкой подложке из перфтороктана C_8F_{18} ($\rho_0 = 1.76 \text{ г/см}^3$, $\sigma_0 = 13.6 \text{ дин/см}$).

В качестве рабочей полости использовалась кювета квадратного сечения со стороной $D = 59 \text{ мм}$ (рис. 1). Поверхность кюветы тщательно очищалась и обезжиривалась. Кювета заполнялась перфтороктаном (3) до некоторой высоты, которая определялась как $B = m/(\rho_2 S)$, где m – масса жидкости, $S = \pi D^2/4$ – площадь основания кюветы. Измерение массы жидкости и, соответственно, толщины слоя проводилось путем взвешивания на электронных весах AnD EK 610i шприца с жидкостью до и после ее заливки в кювету.

В ходе опытов кювета (2) помещалась на горизонтальную площадку между двумя катушками Гельмгольца диаметром 180 мм (1). Ось кюветы совпа-

дала с осью катушек. Капля феррожидкости (4) помещалась в центр рабочей полости, на поверхность жидкой подложки. Напряженность H магнитного поля, создаваемого катушками, регулировалась с помощью стабилизированного источника питания GPR-7550 D. Сила тока, протекавшего по катушкам, медленно увеличивалась – небольшими ступенями с выдержкой каждого значения поля в течение некоторого промежутка времени, тем самым выполнялось условие равновесия формы капли. Изображение кюветы регистрировалось видеокамерами, установленными сверху над кюветой и сбоку (5, 6).

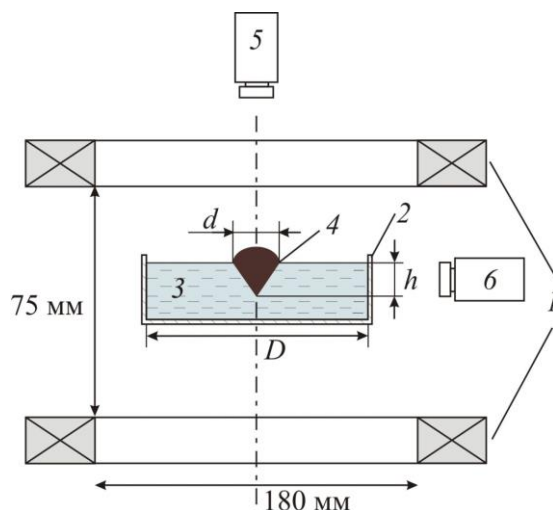


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – катушки Гельмгольца; 2 – кювета; 3 – жидкая подложка (перфтороктан), 4 – капля феррожидкости; 5, 6 – видеокамеры

Результаты. На рис. 2 показано поведение капли феррожидкости в вертикальном однородном магнитном поле. Основной характеристикой капли является начальный диаметр d_0 , определяемый при наблюдении за каплей сверху (рис. 1, камера 5). В отсутствие магнитного поля капля имеет вид двух вертикальных осесимметричных полуэллипсоидов разной высоты, состыкованных в плоскости раздела жидкости подложки и воздуха, так что более выпуклый эллипсоид погружен в жидкость подложки, второй контактирует с воздухом (рис. 2, а).

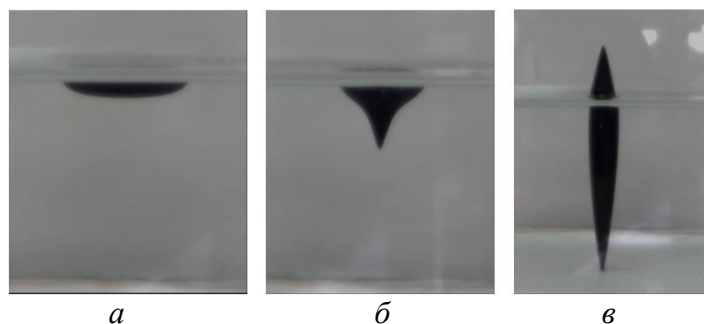


Рис. 2. Изменение формы капли с ростом напряженности магнитного поля H , кА/м: 0.0 (а); 3.2 (б); 10.0 (в), $d_0 = 7.3$ мм

При постепенном наращивании напряженности магнитного поля нижняя часть капли увеличивается до тех пор, пока поле не достигнет критического значения $H_{\text{м}}^*$, когда на межфазной поверхности капли появляется пик

(рис. 2, б). При дальнейшем увеличении напряженности размер этого пика увеличивается, и погруженная часть капли постепенно принимает форму конуса, который вытягивается вдоль направления поля. Одновременно с этим при следующем критическом значении напряженности H_c^* свободная поверхность капли также испытывает неустойчивость, выраженную в формировании пика феррожидкости, обращенного вверх (рис. 2, в). При снижении напряженности изменение формы происходит в обратном порядке, причем исчезновение пиков происходит при меньших значениях напряженности.

На рис. 3 представлена зависимость критической напряженности поля пиковой неустойчивости межфазной H_m^* и свободной H_c^* поверхностей от начального диаметра капель d_0 .

Из графика видно, что критическая напряженность неустойчивости межфазной поверхности капли не зависит от ее начального размера. В то же время свободная поверхность малых капель диаметром до 5 мм испытывает неустойчивость при больших величинах напряженности поля, нежели более крупных капель, где зависимость отсутствует. Это можно объяснить увеличением вклада капиллярной силы по сравнению с гравитационной. Следует отметить, что в работе [2], в которой исследовалась динамика формирования системы капель в магнитном поле, пики на свободной поверхности капель возникали также не одновременно.

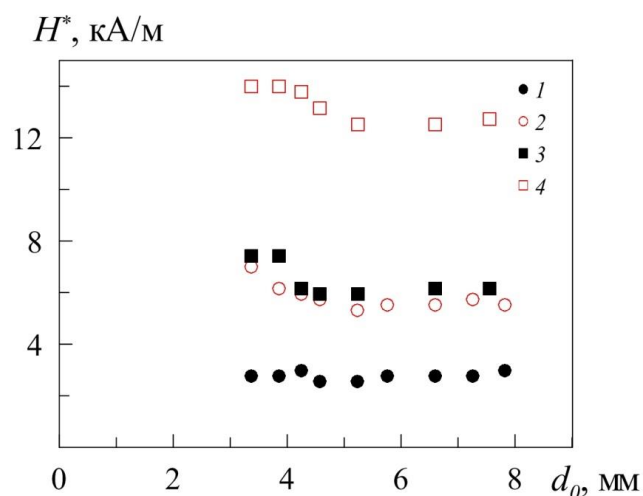


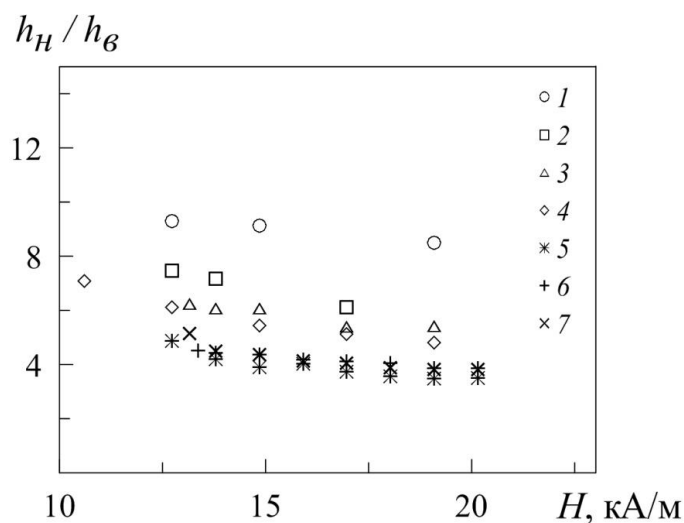
Рис. 3. Критические напряженности поля H_m^* (1, 3) и H_c^* (2, 4) в зависимости от диаметра капли d_0 феррожидкости с $\chi_0=7$ (1, 3) и $\chi_0=2$ (3, 4)

Принимая во внимание зависимость $H^*(d_0)$ для капель диаметром выше 5 мм, можно сделать вывод, что средние значения критических напряженностей неустойчивости свободной и межфазной границ капель МЖ отличаются во столько же раз, во сколько отличаются квадратные корни из поверхностного натяжения свободной и межфазной границ соответственно:

$$\frac{H_c^*}{H_m^*} = \sqrt{\frac{\sigma_c}{\sigma_m}}.$$

После формирования верхнего и нижнего пиков дальнейшее увеличение напряженности поля приводит к деформации капли равномерно в обоих

направлениях.



Отношение высот нижнего и верхнего пика h_n/h_v в зависимости от напряженности поля H для капель ФЖ № 2 разных начальных объемов V_0 , мм³: 20 (1), 40 (2), 50 (3), 60 (4), 75 (5), 150 (6), 226 (7).

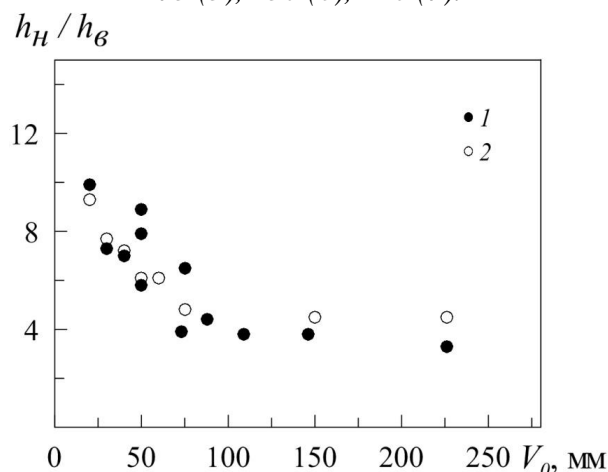


Рис. 4. Отношение высот нижнего и верхнего пика h_n/h_v в зависимости от начального объема V_0 для капель феррожидкости с $\chi_0=7$ (1) и $\chi_0=2$ (2) при напряженности поля $H = 10$ кА/м

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ-Урал № 13-01-96041 и № 13-02-00076 А.

Список литературы

1. Блум Э. Я. Майоров М. М. Цеберс А. О. Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1989. Р. 386.
2. Bushueva С. А. Drop structures formed by ferrofluid in the uniform magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2013. Vol. 49, N. 3–4. Р. 598–602.