

В. Г. БАШТОВОЙ, А. Г. РЕКС

### УСТОЙЧИВОСТЬ ВИСЯЩЕЙ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Тепло- и массообменные процессы, используемые в различного рода технологической аппаратуре, происходят на межфазной поверхности раздела двух контактирующих сред. В технике широко распространены устройства, основанные на диспергировании жидкости на отдельные капли. Представляет интерес исследование возможности управления формой капли, которое позволит регулировать эффективность обменных процессов. В этом отношении весьма перспективно применение магнитных жидкостей, в которых под действием внешнего магнитного поля возникают объемные силы, ведущие к изменению формы свободной поверхности.

Условия отрыва капель обычной жидкости от плоской горизонтальной поверхности к настоящему времени описаны достаточно полно. Для них существует некоторый максимальный объем  $v_{кр}$ , называемый критическим; при достижении его наступает неустойчивость формы капли, ведущая к отрыву ее от плоскости. Критическая масса  $m_{кр}$  либо объем  $v_{кр}$  определяются плотностью жидкости  $\rho$ , коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma$ , углом смачивания  $\gamma$ . Для заданного угла смачивания безразмерный критический объем  $V_{кр} = v_{кр}(\rho g/\sigma)^{3/2} = \text{Bo}_{кр}^{3/2}$  (обезразмеренный по кубу капиллярного радиуса  $r_{к} = (\sigma/\rho g)^{1/2}$ ) имеет вполне определенное значение, равное, например,  $V_{кр} = 18,96$  при  $\gamma = 0$  [6, 8].

Проведенные к настоящему времени исследования устойчивости капли магнитной жидкости в магнитном поле показали, что поле является дополнительным фактором, влияющим на критические параметры капли. Известен, например, факт вытягивания капли магнитной жидкости вдоль силовых линий однородного магнитного поля [1, 3], что приводит к уменьшению критического объема отрывающейся капли с увеличением напряженности поля [7]. С другой стороны, неоднородное магнитное поле может способствовать повышению устойчивости подвешенной к плоскости капли [4].

Численное моделирование устойчивости капли магнитной

жидкости, подвешенной к горизонтальной плоскости в однородном магнитном поле, позволило определить области существования равновесных состояний магнитной жидкости для различных углов смачивания [5]. В узком интервале значений намагниченности жидкости отмечено повышение устойчивости капли к разрушению формы — при малых углах смачивания ( $\gamma < 90^\circ$ ) наблюдается превышение критического объема капли магнитной жидкости над критическим объемом немагнитной. Большой интерес к вопросу устойчивости капли магнитной жидкости в магнитном поле, а также отсутствие достаточно подробных экспериментальных данных по отрыву капли [4, 7] побудили провести экспериментальное изучение устойчивости формы свободной поверхности капли магнитной жидкости, висющей на горизонтальной плоской поверхности в вертикальном магнитном поле.

В неоднородном магнитном поле на каплю магнитной жидкости действует объемная магнитная сила  $\mu_0 M \nabla H$  ( $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума;  $M$  — намагниченность жидкости;  $\nabla H$  — градиент напряженности поля). Условия отрыва в таком случае определяются направлением градиента напряженности магнитного поля. Если  $\nabla H$  направлен вниз, параллельно силе тяжести, то он способствует отрыву массы от плоскости, т. е. критический объем  $v_{кр}$  уменьшится. В другом случае, если градиент поля направлен противоположно силе тяжести, то магнитная сила уменьшает действие гравитационной, приводя к увеличению критического объема капли.

В общем случае при пренебрежении искажениями поля, связанными с внесением в него капли, в неоднородном магнитном поле на единицу объема магнитной жидкости действует объемная магнитная сила 
$$F_m = \frac{1}{V} \int_V \mu_0 M \nabla H dV.$$

Если  $M = \text{const}$  и  $\nabla H = \text{const}$ , то  $F_m = \mu_0 M \nabla H$ . В рамках гравитационной аналогии капля находится под действием результирующей объемной силы вида  $(\rho g - \mu_0 M \nabla H)$  и капиллярный радиус имеет значение  $r_k = \sqrt{\sigma / (\rho g - \mu_0 M |\nabla H|)}$ . Очевидно, что безразмерный критический объем  $V_{кр}$  определяется отношением магнитной и гравитационной сил, т. е. отношением  $\mu_0 M |\nabla H| / \rho g$ :

$$V_{кр} = v_{кр} (\rho g / \sigma)^{3/2} (1 - (\mu_0 M |\nabla H|) / \rho g)^{3/2}. \quad (1)$$

Экспериментальные исследования устойчивости равновесия подвешенной капли в системе жидкость — воздух проведены на установке, представляющей собой стеклянную пластинку, над которой укреплен электромагнит. Электромагнитом создавалось магнитное поле с градиентом напряженности, направленным вертикально вверх, т. е.  $\nabla H \uparrow \downarrow g$ .

Методика эксперимента состояла в следующем. Нижнюю поверхность стеклянной пластинки тщательно очищали и обезжи-

ривали. Капля магнитной жидкости формировалась на нижней плоскости пластинки в магнитном поле с градиентом напряженности, обеспечивающим заведомо устойчивое равновесие подвешенной капли. Затем за счет медленного изменения силы тока градиент поля уменьшался, следовательно, уменьшалась и сила  $\mu_0 M |\nabla H|$ , нейтрализующая силу тяжести. При некотором значении тока капля теряла устойчивость и отрывалась. Массу оторвавшейся капли, называемую критической, определяли на торсионных весах типа ВТ. Эволюцию формы капли регистрировали на кинолентку и затем обрабатывали с помощью микроскопа МИ-1.

В эксперименте использовали магнитные жидкости (феррофаза — магнетит, жидкость-носитель — керосин) со следующими свойствами:

	МК-18	МК-26	МК-35	МК-50
$M_s$ , кА/м .	18	26	35	50
$\rho$ , кг/см <sup>3</sup> .	1073	1250	1375	1516
$\sigma$ , Н/м . .	0,020	0,020	0,019	0,027

Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  определен на границе раздела жидкость — воздух,  $M_s$  обозначает намагниченность насыщения магнитной жидкости. Кривые намагничивания жидкостей представлены на рис. 1.

Типичная эволюция формы подвешенной капли магнитной жидкости в вертикально неоднородном магнитном поле приведена на рис. 2, который иллюстрирует зависимость от градиента напряженности магнитного поля на вершине капли ее основных геометрических параметров — высоты  $Z$  и полуширины  $X$  у основания.

Висящая капля в устойчивом состоянии принимает форму тела вращения с вертикальной осью симметрии, совпадающей с осью соленоида. Устойчивость ее определяется балансом трех сил — гравитационной, магнитной и силами поверхностного натяжения. Уменьшение магнитной составляющей силы  $\mu_0 M |\nabla H|$ , направленной вертикально вверх, вследствие изменения градиента поля ведет к вытягиванию капли вниз (высота  $Z$  увеличивается). При этом радиус ее основания  $X$  уменьшается. Характерно, что скорости изменения  $Z$  и  $X$  резко увеличиваются с приближением к некоторому значению градиента напряженности поля, критического для каждой критической массы. В результате уменьшения радиуса основания капли возникает неустойчивость формы — капля отрывается от пластинки.

Нужно отметить, что, вытягиваясь вниз, капля уменьшает радиус основания, т. е. перемещается по собственной пленке, образованной на поверхности пластинки, и поэтому отрыв можно рассматривать от смоченной поверхности, т. е. угол смачивания  $\gamma$  близок к нулю. Если масса капли магнитной жидкости

меньше критического значения, то отрыв не происходит и капля силами поверхностного натяжения прижимается к нижней поверхности пластинки (см. рис. 2, кривые 1). В проведенных экспериментах напряженность поля достигала 20 кА/м. При таких значениях поля в формировании свободной поверхности висячей капли вносил свой вклад и скачок на границе раздела сред, обусловленный нормальной к поверхности компонентой намагниченности  $M_n$  [1, 3]. Разность давлений в боковых, в верхней и нижней точках капли приводит к вытягиванию капли, что является дополнительным дестабилизирующим фактором.

В условиях данного эксперимента удалось реализовать отрыв от плоскости каплю жидкости МК-35 массой 30—83 мГ. Если масса висячей капли  $m > 83$  мГ, то ее отрыв происходит не от плоскости пластины, а от поверхности остающейся на пластине жидкости.

При исследовании формы капли был отмечен факт возникновения топологической неустойчивости подвешенной капли, выражающейся в распаде равновесной формы объема магнитной жидкости в направлении, перпендикулярном оси симметрии [2]. Топологическая неустойчивость наступала при определенном значении напряженности магнитного поля, характерном для данного объема жидкости.

Для исследования условий отрыва от плоскости каплю магнитной жидкости в вертикальном неоднородном магнитном поле были выбраны жидкости МК-26 и МК-35. В процессе обработки экспериментальных данных оказалось удобным формировать комплекс  $\mu_0 M |\nabla H| / \rho g$  с использованием в качестве характерного значения намагниченности жидкости градиента напряженности магнитного поля на вершине капли  $Z_{\max}$  в момент возникновения неустойчивости. Критический объем  $v_{кр}$  был безразмерен по кубу капиллярного радиуса, т. е.  $Vo_{кр}^{3/2} = v_{кр} (\rho g / \sigma)^{3/2}$ . На рис. 3 представлена зависимость безразмерного критического объема капли магнитной жидкости от безразмерного комплекса  $\mu_0 M |\nabla H| / \rho g$ . Наблюдается качественное соответствие экспериментальных данных с зависимостью (1).

Действительно, в предположении, что новый безразмерный критический объем  $V'_{кр} = v_{кр} / r'_k{}^3$  сохраняет прежнюю зависимость от угла смачивания  $V'_{кр} = \varphi(M, \gamma)$ , получаем

$$Vo_{кр}^{3/2} = \varphi(M, \gamma) / (1 - (\mu_0 M |\nabla H|) / \rho g)^{3/2}. \quad (2)$$

Аппроксимация зависимости (2) при  $\nabla H \rightarrow 0$  дает условие отрыва капли магнитной жидкости от плоской поверхности в однородном магнитном поле. Если напряженность магнитного поля стремится к нулю ( $M \rightarrow 0$ ), то получается условие отрыва капли немагнитной жидкости, т. е.  $Vo^{3/2} = \varphi(0, \gamma)$ . В нашем случае имеем  $Vo_{кр}^{3/2} = 10,6$  для жидкости МК-35 и  $Vo_{кр}^{3/2} = 9,6$  —

Рис. 1. Кривые намагничивания магнитных жидкостей.

1 — МК-18, 2 — МК-26, 3 — МК-35, 4 — МК-50.

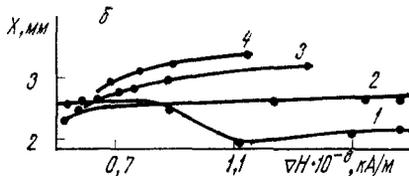
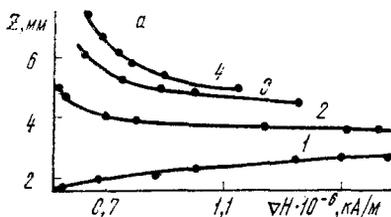
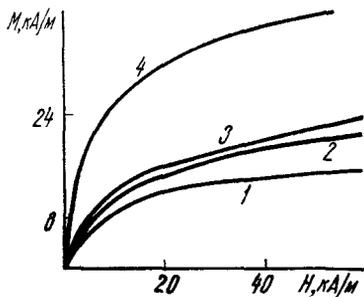


Рис. 2. Зависимость высоты (а) и радиуса основания (б) капли магнитной жидкости МК-35 от градиента напряженности магнитного поля.

$\nu, 10^{-8} \text{ м}^3$ : 2 — 1,9; 3 — 3,2; 4 — 4,4; 1 — отрыва нет.

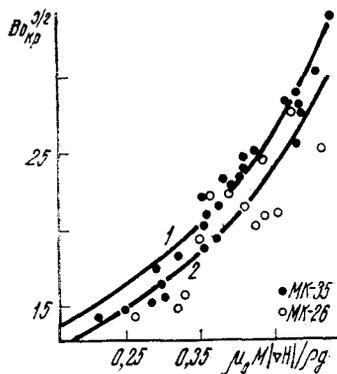


Рис. 3. Влияние градиента магнитного поля на безразмерный критический объем капли.

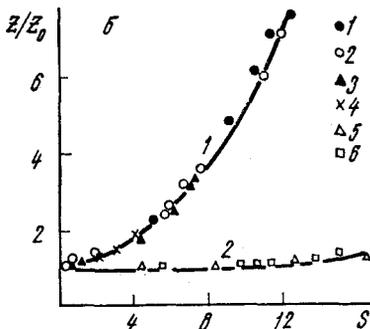
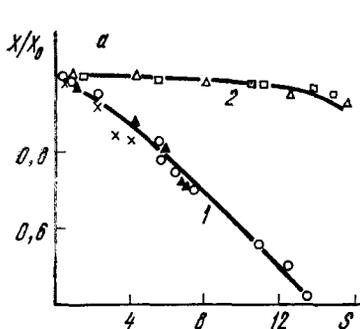


Рис. 4. Влияние однородного магнитного поля на геометрические размеры висящей на плоскости капли магнитной жидкости.

1-4 — МК-18; 5, 6 — МК-50.  $\nu, 10^6 \text{ м}^3$ : 1 — 4,6; 2 — 7,4; 3 — 1,5; 4 — 2,4; 5 — 5,2; 6 — 1,1.

для МК-26. Такое отклонение от известных данных [6, 8] при определенных значениях параметров связано главным образом с влиянием на форму капли, а следовательно, и на ее устойчивость постоянной составляющей магнитного поля.

Для изучения формы и устойчивости висящей на плоскости капли магнитной жидкости в вертикальном однородном магнитном поле использовали катушки Гельмгольца. В области расположения капли неоднородность поля не превышала 0,1%. Горизонтальность плоской пластинки, помещенной в центр зазора электромагнита, обеспечивалась микрометрическими винтами.

Методика эксперимента состояла в медленном формировании равновесной формы путем ввода магнитной жидкости на нижнюю поверхность пластинки через тонкое отверстие в этой пластинке при заданном значении напряженности магнитного поля. Объем висящей капли увеличивается до некоторой величины  $v_{кр}$ , затем теряет устойчивость — капля отрывается от плоскости. Форму капли, как и в предыдущем случае, регистрировали на киноплёнке.

При исследовании формы висящей капли порцию магнитной жидкости помещали на предварительно смоченную поверхность пластинки в отсутствие магнитного поля. В устойчивом состоянии висящая капля имеет конусообразную форму с вертикальной осью симметрии. Затем напряженность поля  $H$  медленно увеличивалась — капля жидкости вследствие магнитного скачка давления вытягивалась вдоль силовых линий, высота  $Z$  увеличивалась, а радиус ее основания уменьшался. Форма капли изучалась вплоть до ее разрушения (отрыва).

На рис. 4 представлены результаты измерений высоты ( $b$ ) и радиуса основания ( $a$ ) в зависимости от безразмерного комплекса  $S = \mu_0 M^2 V^{1/2} / \sigma$ . Высота  $Z$  и радиус основания капли  $X$  обезразмерены по высоте  $Z_0$  и радиусу  $X_0$ , измеренных при отсутствии поля  $H = 0$ . Кривые 1 хорошо описывают эволюцию формы капель различного объема магнитной жидкости МК-18, кривые 2 — жидкости МК-50.

Топологическая неустойчивость висящей на плоскости капли магнитной жидкости не наблюдается, так как для данного объема жидкости неустойчивость на отрыв от плоскости наступает при меньшей напряженности магнитного поля.

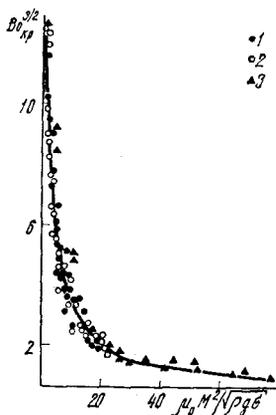


Рис. 5. Зависимость безразмерного критического объема  $V_{кр}$  капли магнитной жидкости от параметра  $\mu_0 M^2 / \sqrt{\rho g \sigma}$ .

1 — МК-18, 2 — МК-35, 3 — МК-50.

Экспериментально определенная область устойчивости висящей капли магнитной жидкости в вертикальном однородном магнитном поле представлена на рис. 5. Условия отрыва магнитных жидкостей с разной намагниченностью хорошо описываются с помощью безразмерных комплексов  $Bo_{кр} = (\rho g / \sigma) v_{кр}^{2/3}$  и  $\mu_0 M^2 / \sqrt{\rho g \sigma}$ . Однородное магнитное поле так же, как и в [7], оказывает дестабилизирующее влияние на устойчивость капли — увеличение напряженности поля ведет к монотонному уменьшению критического объема  $Bo_{кр}^{3/2}$ . Угол смачивания жидкостью поверхности пластинки был равен нулю, поскольку капля помещалась на покрытую той же жидкостью поверхность.

Можно отметить, что в интервале изменения параметра  $\mu_0 M^2 / \sqrt{\rho g \sigma}$  от 5 до 9 разброс значений безразмерного критического объема достигал 30 %, хотя при других значениях  $\mu_0 M^2 / \sqrt{\rho g \sigma}$  этот разброс не превышал 9 %. По данным работы [5], в этой же области изменения параметра  $A = \mu_0 M^2 / 2 \sqrt{\rho g \sigma}$  нарушается монотонность убывания критического объема  $Bo_{кр}^{3/2}$  с увеличением напряженности однородного магнитного поля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Архипенко В. И., Барков Ю. Д., Баштовой В. Г. Исследование формы капли намагничивающейся жидкости в однородном магнитном поле.— *Магнит. гидродинамика*, 1978, № 3, с. 131—133.
2. Барков Ю. Д., Берковский Б. М. Распад капли намагничивающейся жидкости.— *Магнит. гидродинамика*, 1980, № 3, с. 11—14.
3. Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Тайц Е. М. Влияние однородного магнитного поля на форму капли магнитной жидкости.— В кн.: *Прикладная механика и реофизика*. Минск, 1983, с. 40—45.
4. Баштовой В. Г., Чернобай В. А., Рекс А. Г., Волкова О. Ю. Капля магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле.— В кн.: *III Всесоюзная школа-семинар по магнитным жидкостям (Плес, 1983)*. М., 1983, с. 22—23.
5. Берковский Б. М., Полевиков В. К. О численном моделировании разрушения односвязных осесимметричных форм магнитной жидкости.— *Магнит. гидродинамика*, 1983, № 4, с. 60—66.
6. *Гидродинамика невесомости* / В. Г. Бабский, Н. Д. Копачевский, А. Д. Мышкис и др. М.: Наука, 1976. 504 с.
7. Дроздова В. И., Скроботова Т. В., Чеканов В. В. Экспериментальное изучение гидростатики межфазной поверхности феррожидкости.— *Магнит. гидродинамика*, 1979, № 1, с. 16—18.
8. Shoukry E., Hafez M., Hartland S. Separation of drops from wetted surfaces.— *J. Coll. Inter. Sci.*, 1975, v. 53, N2, p. 261—270.