

УДК 532.6:537.84

В. Г. Баштовой, В. П. Михалев, А. Г. Рекс, Е. М. Тайц

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЪЕМОВ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛАХ

Имеющиеся литературные данные свидетельствуют о значительном интересе к исследованию поведения капель магнитной жидкости в магнитном поле [1—5]. Это обусловлено большим количеством новых качественных эффектов, выявляемых при подобного рода исследованиях, а также тем практическим значением, которое могут иметь управляемые капельные течения магнитных жидкостей, в частности, в тепло- и массообменной аппаратуре.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование формы и устойчивости капли магнитной жидкости в не рассматривавшихся ранее условиях, а именно, при заполнении каплей каналов различного сечения. В качестве каналов использовались стеклянные цилиндрические капилляры с внутренними диаметрами от 1,28 до 8,2 мм, а также стеклянные прямоугольные каналы с поперечным сечением $3,08 \times 3,59$ мм². Размеры капилляров измерялись микроскопом МИ-1.

Для проведения экспериментов использовалась магнитная жидкость ММТ-52 на основе трансформаторного масла с магнетитовым наполнением. Намагниченность насыщения жидкости $M_s = 52$ кА/м, плотность $\rho = 1549$ кг/м³. Чтобы предотвратить смачивание магнитной жидкостью стенок каналов, последние предварительно заполнялись водным раствором хлористого кальция с плотностью, равной 1300 кг/м³. Магнитная жидкость на основе масла и раствор хлористого кальция — несмешивающиеся жидкости. Прозрачность раствора хлористого кальция позволила наблюдать поведение капли магнитной жидкости непосредственно (визуально). Коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела магнитная жидкость—раствор CaCl_2 составил $\sigma = 0,0068$ Н/м.

Однородное магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца, максимальная неоднородность поля в рабочей области не превышала 0,5%. В экспериментах поле изменялось квазистатически — небольшими ступенями с выдержкой каждого значения по несколько минут.

Визуальные наблюдения формы поверхности капли магнитной жидкости велись в контрольном свете, регистрация форм осуществлялась с помощью как фотосъемки, так и телевизионной установки МТУ-1, включающей телекамеру «Электроника Л-50» и телевизионный приемник «Электроника».

В вертикальное однородное магнитное поле помещался горизонтальный круглый капилляр с закрытыми торцами длиной L и внутренним диаметром d . Внутри капилляра находилась капля магнитной жидкости с объемом V и длиной $l_0 < L$. В отсутствие магнитного поля капля имела форму расположенного вдоль капилляра цилиндрического столбика, торцы которого представляли собой межфазную границу раздела магнитная жидкость—немагнитная среда. Форма цилиндрического столбика магнитной жидкости при наложении поперечного к нему однородного магнитного поля изменялась.

Проследим эволюцию формы капли магнитной жидкости на конкретном примере (рис. 1). Без поля равновесной формой капли является цилиндрическая (а). При небольших значениях поля форма менисков капли начинает изменяться — их кривизна уменьшается (б). При достижении магнитным полем некоторой критической величины $H^*_ц$

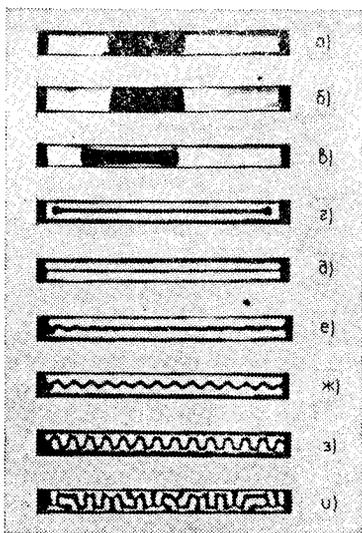


Рис. 1. Форма капли магнитной жидкости в цилиндрическом капилляре при различных значениях напряженности поля H : а — 0; б — 5,4; в — 7,0; г — 12,5; д — 15,0; е, ж — 20,4; з — 25,0; и — 29,5 кА/м (а, в...и — вид сверху, б — вид сбоку).

цилиндрическая форма капли магнитной жидкости оказывается неустойчивой. Цилиндрический столбик жидкости начинает удлиняться, и его горизонтальное поперечное сечение принимает гантелеобразный вид (в). Дальнейшее увеличение напряженности поля ведет к перестройке гантелеобразной формы объема жидкости в плоскую пленку, утолщенную на концах и расположенную вдоль оси капилляра и вдоль направления поля (г). Пленка удлиняется вдоль оси капилляра за счет умень-

шения ее толщины. Постепенно утолщения на концах пленки исчезают, а толщина ее становится меньше 0,1 мм. Длина пленки магнитной жидкости l монотонно увеличивается с ростом поля до тех пор, пока не станет равной длине капилляра ($l=L$). При этом пленка фиксируется между его закрытыми торцами (д). До некоторого критического значения напряженности магнитного поля $H_{п}^*$ сформировавшаяся пленка остается устойчивой. При превышении значения поля $H_{п}^*$ наступает своеобразная неустойчивость, выражающаяся в том, что плоская пленка становится волнистой (как будто синусоидальной). Эта неустойчивость начинает развиваться на концах пленки (е); она перемещается вдоль поверхности пленки жидкости к центру. Через некоторое время с начала развития неустойчивости пленка магнитной жидкости по всей длине в горизонтальном сечении имеет форму «синусоиды» (ж). Длина волны неустойчивости не изменяется с ростом напряженности магнитного поля и всегда равна диаметру круглого капилляра. С увеличением напряженности поля амплитуда волны растет до тех пор, пока боковые поверхности пленки не достигнут стенок капилляра. Дальнейшее увеличение длины пленки происходит за счет изменения ее конфигурации: вначале она приобретает П-образный вид на участке, равном длине волны (з), а затем П-образная конфигурация поверхности сменяется лирообразной. Таким образом, капля магнитной жидкости, помещенная в круглый капилляр, в поперечном однородном магнитном поле претерпевает ряд видоизменений формы поверхности от цилиндрической (при отсутствии поля) до развитой сложной конфигурации (и). Характерно, что пленка магнитной жидкости, имея сложную извилистую форму, нигде не соприкасается с соседними участками, так как этому препятствует дипольное взаимодействие.

Если закрытые торцы капилляра предварительно смочены магнитной жидкостью, то магнитожидкостная плоская пленка в поле не достигает торцов капилляра из-за дипольного отталкивания одноименно намагниченных пленки и объема жидкости на торцах. При $H > H_{п}^*$ волнообразование начинается с загибов плоской пленки на концах (отталкивание краев пленки от торцов капилляра); остальные же стадии перестройки формы капли магнитной жидкости сохраняются прежними.

Цилиндрическая форма капли магнитной жидкости в поперечном однородном магнитном поле устойчива только при H , меньших критического значения $H_{п}^*$. При $H > H_{п}^*$ капля перестраивается в плоскую пленку. Эксперименты показали, что длина цилиндрического столбика жидкости l_0 практически не оказывает влияния на значение поля $H_{п}^*$ (рис. 2а). Лишь если длина столбика близка по величине его диаметру,

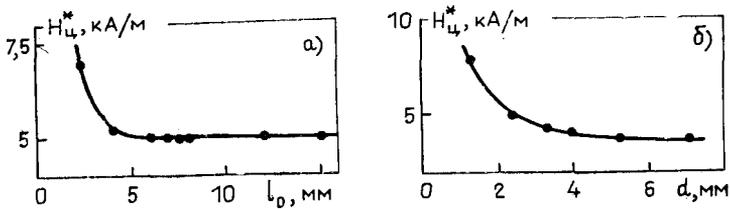


Рис. 2. Влияние длины l_0 (а) и диаметра d (б) цилиндрического столбика магнитной жидкости на порог его неустойчивости в поперечном магнитном поле.

имеет место увеличение критического поля с уменьшением длины l_0 . Этот факт говорит о том, что определяющую роль в неустойчивости цилиндрической формы капли магнитной жидкости играют участки свободной поверхности капли — торцы столбика.

Капиллярное давление, которое придает торцам капли сферичность, обратно пропорционально радиусу капилляра. Так как это давление возрастает с уменьшением диаметра капилляра, то для нарушения равновесности цилиндрической формы капли необходимо большее магнитное давление. Следовательно, критическое магнитное поле $H_{ц}^*$ приближенно обратно пропорционально диаметру цилиндрического столбика магнитной жидкости (рис. 2б).

При $H > H_{ц}^*$ образуется новая равновесная форма — вертикальная пленка магнитной жидкости, которая с увеличением напряженности магнитного поля удлиняется вдоль оси капилляра. Кривизна внутренних стенок цилиндрического капилляра для удлиняющейся пленки играет роль направляющей. Это связано со стремлением пленки магнитной жидкости иметь максимальную высоту вдоль поля, и поэтому она занимает не произвольное положение в капилляре, а располагается вдоль его оси: высота пленки равна внутреннему диаметру капилляра d .

В относительно слабых полях зависимость удлинения от намагниченности жидкости линейна; когда же магнитная жидкость близка к насыщению, эта зависимость становится нелинейной (рис. 3). Капли жидкости большего объема V (т. е. и большей длины l_0) удлиняются в большей степени, чем малые капли.

Зависимость изменения длины пленки магнитной жидкости от напряженности магнитного поля можно определить теоретически. Пусть некоторый объем жидкости $V = \text{const}$ имеет форму плоской пленки длиной l , высотой d и толщиной h ; высота пленки d фиксирована и равна внутреннему диаметру капилляра. Длина пленки l определяется из условия минимума энергии системы $E = E_m + E_\sigma$, где E_m — магнитная, а E_σ — поверхностная энергия. Очевидно, что $E_\sigma = \sigma S = 2\sigma ld$.

Часть магнитной энергии объема жидкости E'_m , зависящая от длины пленки l , определяется выражением $E'_m(l) = \mu_0 M^2 N V / 2$, где N — размагничивающий фактор объема магнитной жидкости. Данное выражение получено при условии $N \ll 1$, что справедливо при $h \ll d \ll l$. Поскольку размагничивающий фактор N стремится к нулю при удлинении пленки, функцию

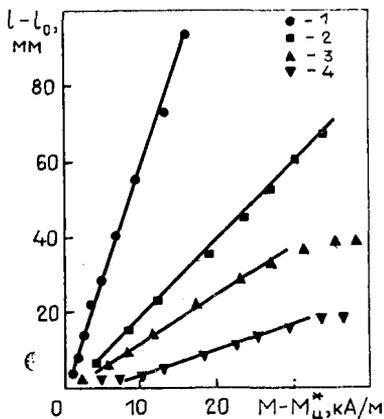


Рис. 3. Удлинение плоской пленки магнитной жидкости вдоль оси капилляра ($d=2,3$ мм) в вертикальном однородном магнитном поле при V : 1 — 65; 2 — 21; 3 — 13; 4 — 7 мм³. Сплошные линии — теоретический расчет по формуле (3).

$N(h/d)$ можно разложить (в окрестности нуля) в ряд Тейлора и ограничиться линейным членом, $N=ah/d$, где a — некоторая постоянная, не зависящая от характеристик системы. Тогда

$$E'_m(l) = \frac{\mu_0 M^2 a h V}{2d} = \frac{\mu_0 M^2 a V^2}{2a^2 l}.$$

Из условия $dE/dl=0$ следует, что $0,5(\mu_0 a l / (\sigma d^3))^{1/2} MV$. При этом условие минимальности энергии $d^2E/dl^2 > 0$ выполняется. Выражение (1) справедливо для длинных плоских пленок, где $l \gg d$. Если произвести замену переменных $l \rightarrow (l-l_0)$ и $M \rightarrow (M-M_{\text{п}}^*)$, то (1) примет вид

$$l-l_0 = 0,5(\mu_0 a / (\sigma d^3))^{1/2} (M-M_{\text{п}}^*) V. \quad (2)$$

Постоянная a определяется из экспериментальных данных с допущением, что она не должна зависеть от условий эксперимента. По нашим данным, $a=1,99$. Тогда удлинение пленки магнитной жидкости в магнитном поле определяется выражением

$$l-l_0 = 0,7\mu_0 / (\sigma d^3) (M-M_{\text{п}}^*) V. \quad (3)$$

На рис. 3 представлено несколько теоретических зависимостей (3) для капель магнитной жидкости различного объема V . Теоретические и экспериментальные данные в линейной области экспериментальных зависимостей отличаются не более чем на 10%. Такое соответствие можно признать хорошим.

Удлинение новой равновесной формы — плоской пленки магнитной жидкости — вдоль оси капилляра с увеличением напряженности поля происходит до момента соприкосновения ее концов с закрытыми торцами капилляра. Дальнейшее увеличение длины пленки возможно только за счет ее изгиба. Поскольку капилляр цилиндрический, то это должно повлечь за собой уменьшение высоты пленки в местах отклонения от оси капилляра, а это связано с дополнительными затратами энергии. Поэтому пленка магнитной жидкости, зафиксированная между торцами капилляра, устойчива и не изменяет своей длины вплоть до полей критической величины $H_{\text{п}}^*$. При $H > H_{\text{п}}^*$ развивается волнообразная неустойчивость пленки — она становится неплоской вдоль оси капилляра. Критические поля $H_{\text{п}}^*$ определяются как диаметром капилляра d и его длиной L , так и начальной длиной цилиндрического столбика магнитной жидкости l_0 , т. е. толщиной пленки. Уменьшение диаметра капилляра при фиксированных l_0 и L ведет к увеличению критических полей $H_{\text{п}}^*$. На рис. 4а приведена зависимость $M_{\text{п}}^*(d)$ для столбика магнитной жидкости (начальная длина $l_0=15$ мм), помещенного в цилиндрический капилляр длиной $L=45$ мм. Здесь $M_{\text{п}}^*$ соответствует намагниченности жидкости в магнитном поле напряженностью $H_{\text{п}}^*$; намагничивающий фактор принимался равным нулю. Кривые, изображенные на рис. 4б, иллюстрируют влияние длины капилляра L на пороговые значения намагниченности пленки жидкости $M_{\text{п}}^*$ ($l_0=15$ мм).

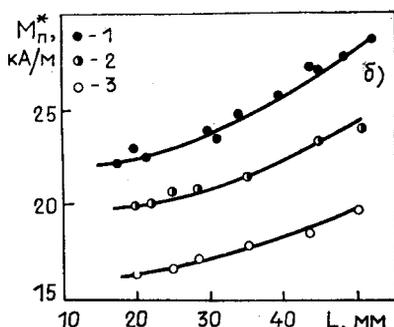
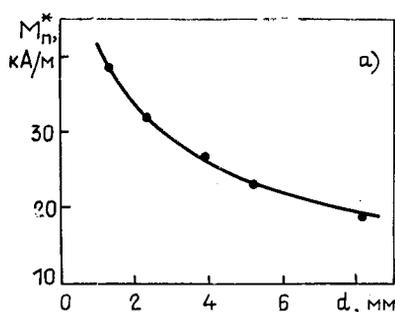


Рис. 4. Зависимость критической намагниченности пленки магнитной жидкости $M_{\text{п}}^*$ от диаметра капилляра d (а) и его длины L (б). d : 1 — 3,9; 2 — 5,2; 3 — 8,2 мм.

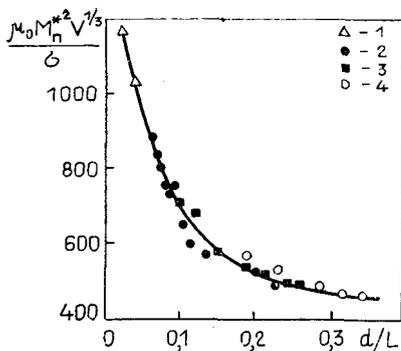


Рис. 5. Зависимость критического безразмерного комплекса $\mu_0 M^*{}^2 \pi V^{1/3} / \sigma$ от относительной длины капилляра. d : 1 — 1,3; 2 — 3,9; 3 — 5,2; 4 — 8,2 мм ($l_0 = 15$ мм).

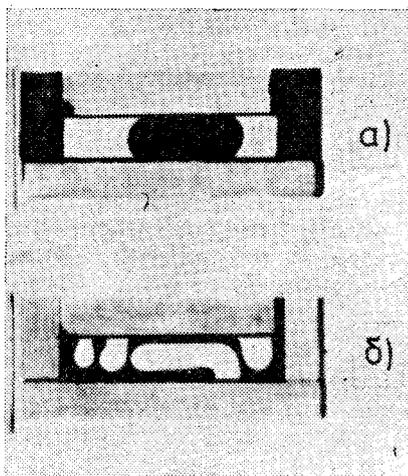


Рис. 6. Форма капли магнитной жидкости в канале прямоугольного сечения $3,0 \times 3,0$ мм. H : а — 0; б — 28 кА/м.

Процесс развития волнообразной неустойчивости вертикальной пленки магнитной жидкости в вертикальном однородном магнитном поле можно описывать с помощью безразмерного комплекса $\mu_0 M^*{}^2 \pi V^{1/3} / \sigma$ и относительной длины капилляра, обезразмеренной по его диаметру, L/d . На рис. 5 показана зависимость $\mu_0 M^*{}^2 \pi V^{1/3} / \sigma$ от $(L/d)^{-1}$ для объема магнитной жидкости, при отсутствии поля имеющего длину $l_0 = 15$ мм.

Изучение поведения капли магнитной жидкости в канале прямоугольного сечения показало, что в этом случае волнообразного искривления пленки жидкости не происходит. Так как верхняя и нижняя стенки капилляра плоские, то образовавшаяся пленка жидкости в вертикальном поле удлиняется в произвольном направлении до соприкосновения с боковыми стенками капилляра. При дальнейшем увеличении напряженности поля пленка удлиняется за счет продвижения вдоль боковых стенок канала сначала по периметру, а затем при сближении частей объема жидкости из-за дипольного отталкивания она начинает загibasья произвольным образом. В конечном итоге пленка имеет вид изогнутой сложным образом ленты (рис. 6). Соприкосновение близлежащих ее участков не имеет места. Таким образом, экспериментально наблюдаемая волнообразная неустойчивость плоской вертикальной пленки магнитной жидкости в капилляре, помещенном в поперечное однородное магнитное поле, обусловлена кривизной стенок капилляра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарапов И. Е. Некоторые вопросы гидростатики намагничивающихся и поляризующихся сред. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1974, № 5, с. 141—144.
2. Баштовой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. М.: Ин-т высоких температур АН СССР, 1985. 188 с.
3. Цеберс А. О., Майоров М. М. Магнитостатические неустойчивости в плоских слоях намагничивающихся жидкостей. — Магнитная гидродинамика, 1980, № 1, с. 27—35.
4. Vacri J. C., Salin D. Study of the deformation of ferrofluid droplets in a magnetic field. — J. Phys. Lett., 1982, vol. 43, N 6, p. L-179—L-184.
5. Берковский Б. М., Баштовой В. Г., Рекс А. Г. О некоторых новых равновесных формах свободной поверхности ограниченных объемов магнитной жидкости. — Магнитная гидродинамика, 1986, № 4, с. 11—16.

Поступила 27 мая 1986 г.