

## ОТРЫВ КАПЕЛЬ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ОТ СМОЧЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. Г. Рекс

*Белорусская государственная политехническая академия  
Минск, Беларусь*

### 1. Введение

Условия отрыва висячих капель обычной жидкости от твердых поверхностей изучены к настоящему времени достаточно полно. Капля магнитной жидкости очень чувствительна к внешним магнитным полям, что может явиться дополнительным фактором, влияющим на отрыв капель. Во-первых, хорошо известен факт деформирования капель вдоль направления магнитного поля, обусловленный действием магнитного скачка давления на поверхности капли [1]. Во-вторых, в неоднородных магнитных полях форма капли магнитной жидкости определяется конкурирующим действием гравитационной, капиллярной и магнитной сил.

Численное моделирование устойчивости висячих на плоской поверхности капли магнитной жидкости показало влияние вертикального однородного магнитного поля на объем отрывающихся капель [2].

В настоящей работе представлены результаты исследований условий отрыва капель магнитной жидкости от горизонтальных плоских поверхностей и конца вертикального капилляра под действием силы тяжести при условии полного смачивания ( $\theta = 0$ ) в однородных и неоднородных магнитных полях.

Каплю, висячую на твердой поверхности, удерживает сила поверхностного натяжения. Эта сила действует вдоль периметра основания капли. Для висячих капель существует максимальный объем  $v_{кр}$ , называемый критическим: при его достижении происходит отрыв капли от

поверхности под действием силы тяжести. Критический объем  $v_{cr}$  определяется плотностью жидкости  $\rho$ , коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma$ , углом смачивания твердой поверхности  $\theta$ . Критический объем может быть обезразмерен по кубу капиллярного радиуса  $r_c = (\sigma/\rho g)^{1/2}$ :

$$V_{cr} = v_{cr} \left( \frac{\rho g}{\sigma} \right)^{3/2}.$$

Для обычных жидкостей при каждом заданном угле смачивания этот безразмерный критический объем имеет свое постоянное значение, равное, например,  $V_{cr} = 18,96$  при  $\theta = 0$  [3]. Для магнитожидкостных капель в магнитном поле безразмерный критический объем не является постоянным. Его величина и характер зависимости от поля определяется конфигурацией магнитного поля.

## 2. Методика исследования

Экспериментальные исследования отрыва капель выполнены в однородном и неоднородном магнитных полях. Источником однородного магнитного поля вертикального и горизонтального направлений являются катушки Гельмгольца. В области расположения капель магнитной жидкости максимальная неоднородность поля не превышает 0,05%. Вертикально неоднородное магнитное поле создается электромагнитом, расположенным над горизонтальной пластиной.

Отрыв капель производится от плоской поверхности стеклянной пластины и от заточенного среза цилиндрического стеклянного капилляра. Поверхности отрыва перед экспериментом тщательно очищаются и обезжириваются.

В экспериментах использованы магнитные жидкости на основе керосина с намагниченностью насыщения  $M_s$ . Основные физические свойства магнитных жидкостей приведены в таблице 1.

Отрыв капель магнитных жидкостей от плоских поверхностей и от конца цилиндрического капилляра производится при условии полного смачивания поверхности магнитной жидкостью ( $\theta = 0$ ).

Таблица 1

Тип жидкости	Жидкость-носитель	$M_s,$ кА/м	$\rho,$ кг/м <sup>3</sup>	$\sigma,$ Н/м
МК-20	керосин	20	1073	0,02
МК-26	керосин	26	1250	0,02
МК-35	керосин	35	1375	0,019
МК-50	керосин	50	1516	0,027

В неоднородном поле капля формируется на нижней поверхности пластины при максимальном значении градиента поля, обеспечивающим устойчивое состояние капли. Затем градиент медленно небольшими ступенями уменьшается до величины, при которой происходит отрыв капли.

В экспериментах с однородным полем исходная капля магнитной жидкости формируется в отсутствие поля, а затем магнитное поле увеличивается небольшими ступенями.

Такая методика исследований позволяет обеспечить одинаковые условия смачивания жидкостью твердой поверхности во всех экспериментах. Это обусловлено тем, что при изменении поля диаметр основания капли уменьшается. В результате капля постоянно находится на смоченной поверхности, и угол смачивания равен нулю.

Эволюция формы капли в поле регистрируется видеокамерой с последующей обработкой с помощью компьютера. Масса оторвавшихся капель измеряется на торсионных весах.

### 3. Отрыв капель в однородном магнитном поле

В однородном магнитном поле объемная магнитная сила отсутствует и не вызывает перемещения массы капли. Форма капли магнитной жидкости с намагнитченностью  $M$  определяется конкурирующим действием магнитного и капиллярного скачков давления на поверхности капли. В результате она в несколько раз увеличивает свою длину вдоль направления поля. Исследования формы капли на плоской поверхности [4] показали, что чем больше величина магнитного поля, тем сильнее капля увеличивает длину. Поперечный диаметр капли при этом уменьшается. Деформация капли приводит к изменению площа-

лях отрывается не вся капля, а лишь ее часть. При этом объем оторвавшихся капель начинает уменьшаться (рис. 2).

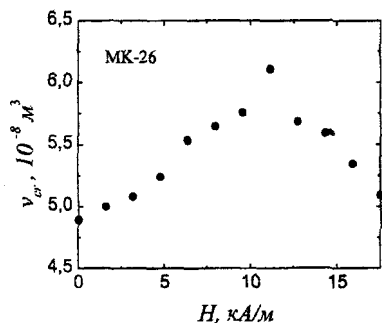


Рис. 2. Влияние напряженности горизонтального магнитного поля на объем оторвавшихся капель от горизонтальной пластины

Отрыв каплей от среза капилляра имеет свои особенности. Если отрыв происходит непосредственно от среза капилляра (диаметр капилляра мал), то магнитное поле практически не влияет на критический объем. Если же диаметр капилляра сравним с диаметром капли, то отрыв происходит не от конца капилляра, а от шейки капли. Диаметр шейки капли меньше диаметра капилляра. В магнитном поле диаметр основания капли может изменяться в пределах диаметра капилляра. В результате вертикальное поле немного уменьшает критический объем капли, горизонтальное — незначительно его увеличивает при небольших величинах поля и затем практически не оказывает действия (рис. 3).

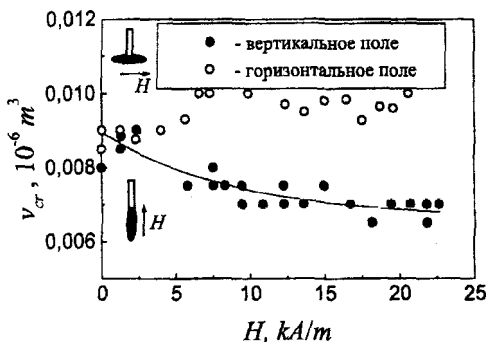


Рис. 3. Влияние величины и направления однородного магнитного поля на критический объем капли при отрыве от капилляра диаметром 1,5 мм

#### 4. Отрыв капль в неоднородном магнитном поле

В неоднородном магнитном поле на каплю помимо силы тяжести дополнительно действует объемная магнитная сила  $\mu_0 M \text{grad}H$ , где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума,  $\text{grad}H$  — градиент напряженности магнитного поля. В рамках гравитационной аналогии величина результирующей силы на единицу объема капли магнитной жидкости зависит от направления градиента поля и определяется выражением  $\vec{f} = (\rho \vec{g} + \mu_0 M \text{grad}H)$ . Если градиент поля направлен вверх противоположно силе тяжести, то магнитная сила нейтрализует силу тяжести, прижимает висющую каплю к твердой поверхности и препятствует ее отрыву. В результате критический объем капли увеличивается. В случае одинакового направления силы тяжести и градиента поля результирующая сила растет и критический объем уменьшается. Безразмерный критический объем капли определяется соотношением магнитной и гравитационных сил

$$V_{cr} = v_{cr} \left( \frac{\rho g}{\sigma} \right)^{3/2} \left( 1 \pm \frac{\mu_0 M |\text{grad}H|}{\rho g} \right)^{3/2}.$$

Форма висячей капли магнитной жидкости на плоской поверхности в полях с различным градиентом ( $\text{grad}H \uparrow \downarrow \vec{g}$ ) представлена на рис. 4. При уменьшении градиента поля капля вытягивается вниз, поскольку ослабевают действие направленной вертикально вверх магнитной силы. Площадь основания капли уменьшается, что приводит к ее отрыву. Приведенная на рисунке эволюция формы капли характерна, если объем капль превышает критическое значение в отсутствие поля. Капли меньшего размера при уменьшении градиента поля не увеличивают свою высоту  $z$ , а наоборот, прижимаются к поверхности пластины, и отрыв не происходит.

Максимальная величина поля и градиента поля ограничивалась наступлением топологической неустойчивости висячей капли [1]. Капля теряла осевую симметрию и распадалась на несколько капль в направлении, перпендикулярном оси симметрии.

Критический объем оторвавшейся капли растет с увеличением градиента магнитного поля, направленного противоположно силе тя-

жести. Обобщенная зависимость представлена на рис. 5 для магнитных жидкостей с намагниченностями насыщения 35 и 26 кА/м. Наблюдается качественное соответствие экспериментальных результатов с теоретическими. Некоторое расслоение данных объясняется различным влиянием величины поля на форму капли, т.к. жидкости имеют различные магнитные характеристики.

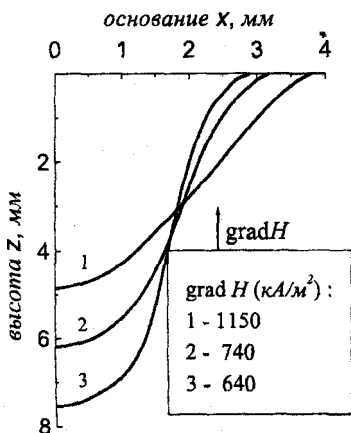


Рис. 4. Влияние градиента поля на форму висячей капли на пластине (с фотографии)

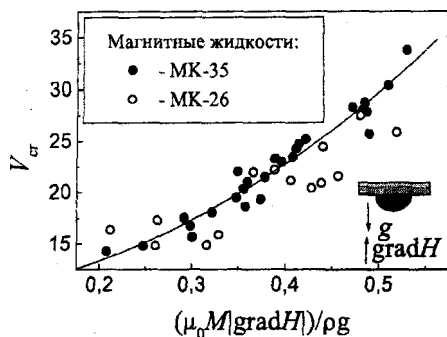


Рис. 5. Влияние градиента поля на безразмерный критический объем капли на пластине

Исследования показали, что в неоднородном поле два механизма влияния поля на критический объем капли имеют противоположное действие. С одной стороны, в неоднородном поле объемная магнитная сила стремится увеличить критический объем. С другой стороны,

магнитный скачок давления, связанный с постоянной составляющей магнитного поля и намагниченностью жидкости, уменьшает критический объем. В слабонеоднородных магнитных полях наблюдается не увеличение критического объема, а даже его уменьшение, обусловленное постоянной составляющей поля.

### **Заключение**

Полученные результаты показали, что магнитное поле может оказывать значительное влияние на условия отрыва капель магнитной жидкости от поверхностей различной конфигурации. Критический объем капель определяется геометрией твердых поверхностей, величиной и направлением магнитного поля.

*Работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь.*

### **Литература**

1. Magnetic fluids and Applications Handbook, /Editor-in-chief: V. Berkovski, Editor: V. Bashtovoi / Begell House Inc. Publishers, New York, USA, 1996.— 851 p.
2. Берковский Б. М., Полевиков В. К. Магнитная гидродинамика 4 (1983).— С. 60–66.
3. Shoukry E., Hafez M., Hartland S., J. Coll. Inter. Sci. 53 № 5 (1975).— P.— 261–270.
4. Баштовой В. Г., Погирницкая С. Г., Рекс А. Г., Магнитная гидродинамика 2 (1990).— С. 20–26.