

## Форма поверхности магнитной жидкости над намагничивающимся шаром в однородном магнитном поле

© В.Г. Баштовой,<sup>1</sup> А.А. Моцар,<sup>1</sup> В.А. Налетова,<sup>2</sup> А.Г. Рекс<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет,  
220013 Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,  
119192 Москва, Россия  
e-mail: alexfx20@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 26 июня 2014 г.)

Выполнено экспериментальное исследование формы свободной поверхности магнитной жидкости над погруженным в нее сферическим ферромагнитным телом в однородном магнитном поле. Установлено влияние направления и величины магнитного поля на характеристики деформации свободной поверхности магнитной жидкости с различными магнитными свойствами и геометрическими параметрами.

### Введение

Интерес к изучению формы поверхности магнитной жидкости вызван в первую очередь возможностью практического применения ее в ряде технических приложений, обусловленной свойством магнитной жидкости изменять форму своей свободной поверхности под действием магнитного поля. В частности, это свойство дает возможность реализовать управление процессами тепло- и массопереноса при закалке твердых тел в магнитной жидкости [1], а также использовать магнитную жидкость в различного рода выключателях и клапанах.

Внесение намагничивающегося тела в однородное магнитное поле приводит к его искажению и появлению локальных неоднородностей. Если тело находится в магнитной жидкости, то обусловленные искажениями неоднородности поля могут привести к изменению формы ее свободной поверхности. В [2] установлено, что ограниченный объем магнитной жидкости располагается неравномерно на стальном сферическом теле в однородном магнитном поле.

Задача о форме поверхности магнитной жидкости с погруженными телами различной формы рассмотрена в ряде работ. Теоретическое и экспериментальное исследование деформирования формы поверхности магнитной жидкости с помещенным внутрь намагничивающимся цилиндром под действием внешнего однородного магнитного поля выполнены в [3,4]. В работах [5–7] рассмотрены вопросы деформирования поверхности магнитной жидкости намагничивающимся шаром в однородном магнитном поле, причем в [7] установлено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных.

В настоящей работе представлены исследования, описывающие некоторые особенности формирования свободной поверхности магнитных жидкостей различной намагниченности вокруг сферического ферромагнитного тела, которые явились результатом продолжения начатых в [6] исследований.

### Экспериментальная установка

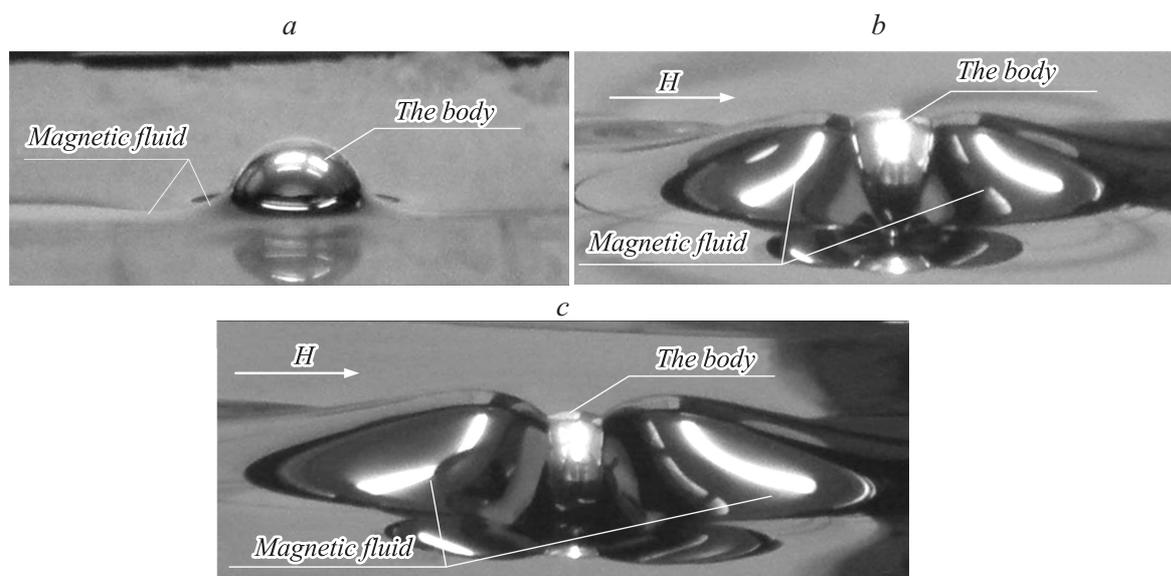
В эксперименте кювета с магнитной жидкостью и расположенным в ней стальным шаром помещалась в однородное магнитное поле катушек Гельмгольца. Форма кюветы — параллелепипед размером  $81 \times 82$  мм. Диаметр стального шара — 6 мм. Измерение амплитуды деформации  $\Delta h$  свободной поверхности над телом производилось микрометром с тонкой немагнитной иглой, а также фоторегистрацией. За начало координат принята точка поверхности жидкости в отсутствие магнитного поля, когда вся ее поверхность является плоской. Наблюдение за формой поверхности магнитной жидкости производилось при различных значениях напряженности однородного магнитного поля  $H$ , изменение которого можно считать квазистатическим. Исходная толщина слоя магнитной жидкости  $h$  над телом определялась при напряженности магнитного поля  $H = 0$  кА/м и изменялась за счет заполнения кюветы различными объемами магнитной жидкости.

Рассмотрены несколько случаев направления магнитного поля. В первом случае горизонтальное направление поля параллельно поверхности жидкости. Во втором — вектор напряженности магнитного поля наклонен к горизонту под углом  $30^\circ$ . В третьем случае направление поля было вертикальным, перпендикулярным к первоначально плоской равновесной поверхности магнитной жидкости.

В экспериментах использовались магнитные жидкости на основе трансформаторного масла ММТр-10, ММТр-44 и керосина МК-27 и МК-51, свойства которых представлены в таблице.

### Горизонтальное магнитное поле

Во внешнем однородном магнитном поле форма поверхности жидкости определяется наличием зон локальной неоднородности поля вокруг шара. В случае



**Рис. 1.** Форма свободной поверхности магнитной жидкости при частичном погружении шара в жидкость.  $H$ , кА/м:  $a$  — 0,  $b$  — 9.7,  $c$  — 23.9.

горизонтального направления искажение поля происходит таким образом, что у торцевых относительно поля поверхностей шара образуются зоны с максимальным значением поля, а у боковых поверхностей образуются зоны его минимума.

Если намагничивающийся шар частично погружен в магнитную жидкость, то из-за искажения им поля магнитная жидкость перетекает в области с максимальным значением напряженности поля (торцевые области шара). При этом уровень жидкости падает в области боковых поверхностей шара, где поле меньше. Этот факт иллюстрируется серией фотографий на рис. 1.

На рисунке направление горизонтального поля указано стрелкой. В отсутствие поля жидкость осесимметрично располагается вокруг тела (рис. 1,  $a$ ), и ее поверхность незначительно деформируется за счет смачивания поверхности шара. В магнитном поле поверхность жид-

кости деформируется так, что жидкость натекает на торцевые области шара и образует криволинейную поверхность сложной формы (рис. 1,  $b$ ). На боковой поверхности шара образуется центральный кольцевой сегмент, непокрытый жидкостью, а на поверхности жидкости в этой области образуются углубления. С увеличением напряженности поля амплитуда деформации жидкости на торцевых поверхностях увеличивается, также растет и размер углублений у боковых поверхностей (рис. 1,  $c$ ).

Если глубина слоя жидкости равна диаметру шара и толщина слоя магнитной жидкости над телом  $h = 0$  мм, то даже в небольших полях порядка 1 кА/м над шаром образуется углубление, форма которого несимметрична относительно центральных осей шара (рис. 2,  $a$ ). В направлении поля жидкость натекает на торцевые края шара, оставляя при этом центр его вершины открытым. В поперечном направлении в области боковых поверхностей шара образуются зоны с пониженным уровнем жидкости. При дальнейшем увеличении поля деформация поверхности усиливается, и углубление принимает более сложную форму (рис. 2,  $b$ ). Как и в случае с шаром, наполовину покрытым жидкостью, вокруг центрального поперечного сегмента образуется зона без жидкости.

В случае погружения шара с образованием слоя магнитной жидкости над ним толщиной  $h > 0$  в горизонтальном магнитном поле над шаром образуется несимметричное углубление, как и в предыдущем случае. Увеличение напряженности поля приводит к росту амплитуды деформации  $\Delta h$  свободной поверхности жидкости над телом.

Характер деформирования поверхности и темп изменения амплитуды ее деформации  $\Delta h$  при изменении

Свойства магнитных жидкостей

Свойства жидкостей	ММТр-44	ММТр-10
Жидкая основа	Трансформаторное масло	
Намагниченность насыщения, $M_s$ , кА/м	43.8	9.6
Начальная магнитная восприимчивость, $\chi_0$	2.7	0.1
Плотность $\rho_f$ , кг/м <sup>3</sup>	1400	1115
Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma$ , мН/м	28	30
Угол смачивания кюветы $\theta_w$ , deg	46	31
Угол смачивания тела $\theta_c$ , deg	46	31

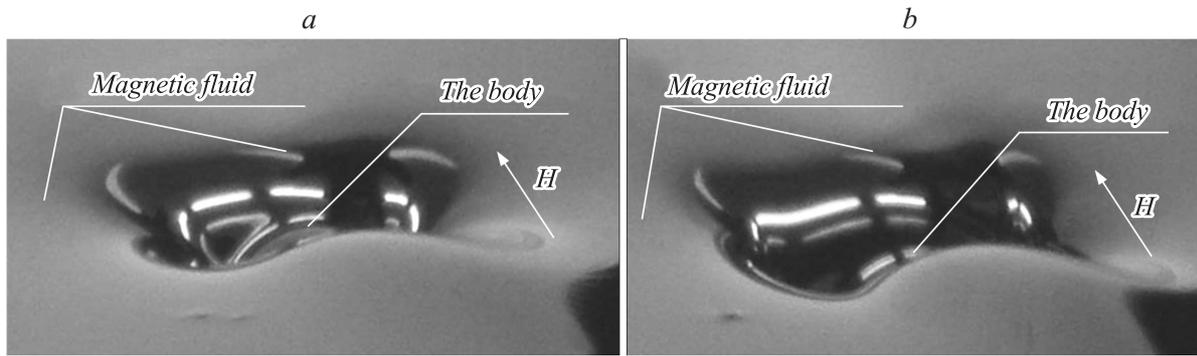


Рис. 2. Форма свободной поверхности магнитной жидкости при полном погружении шара: *a* —  $H = 10.2 \text{ kA/m}$ , *b* —  $H = 23.9 \text{ kA/m}$ .

напряженности поля зависит от магнитных свойств жидкости и исходной толщины  $h$  слоя жидкости над шаром.

При малых толщинах слоя наблюдается плавный характер деформирования поверхности: амплитуда углубления монотонно растет с увеличением поля до тех пор, пока не станет равной толщине слоя жидкости, вершина шара при этом оказывается открытой. При увеличении толщины слоя жидкости над шаром темп изменения амплитуды деформации с ростом поля снижается (рис. 3, кривые для жидкости ММТр-44, толщины слоя 2.1 и 3 mm). Обусловлено это тем, что при большей толщине поверхность жидкости оказывается в более удаленной области от шара, где искажения магнитного поля ослабевают.

Установлено, что существует такая толщина слоя жидкости над шаром, при превышении которой может происходить скачкообразный разрыв слоя жидкости вплоть до поверхности шара. Для этих толщин слоя существует критическое значение напряженности магнитного поля  $H_{crit1}$ , при котором амплитуда углубления поверхности жидкости скачком становится равной толщине

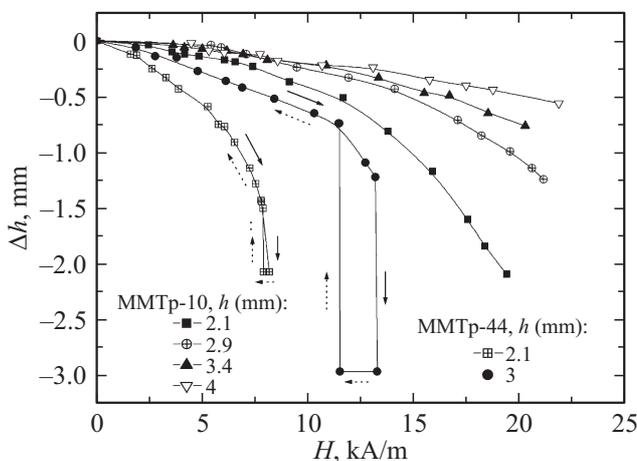


Рис. 3. Зависимость амплитуды деформации поверхности магнитной жидкости от напряженности внешнего магнитного поля.

слоя (рис. 3, кривая для жидкости ММТр-44, толщина слоя 3 mm). Над шаром образуется вертикальный канал сложной формы, видоизменяющийся с ростом поля.

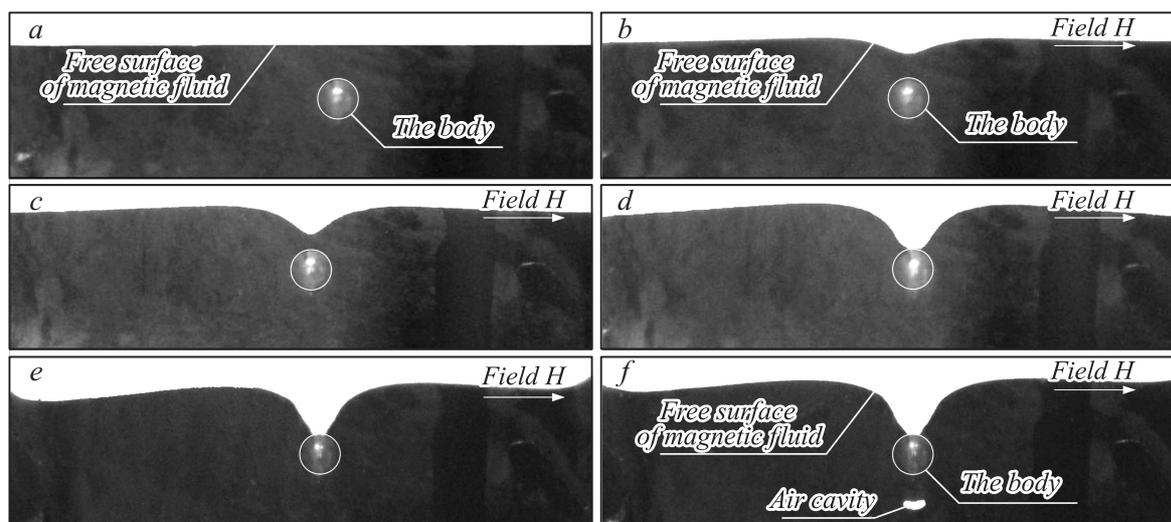
При обратном направлении изменения поля канал над шаром исчезает также скачкообразно в полях  $H_{crit2}$ , меньших  $H_{crit1}$ . На рис. 3 для жидкости ММТр-44 сплошной стрелкой указано изменение амплитуды деформации  $\Delta h$  при увеличении поля, а прерывистой стрелкой — при уменьшении поля. В области полей, меньших  $H_{crit2}$ , зависимости амплитуды деформации при прямом и обратном ходе изменения поля совпадают, т.е. гистерезис формы отсутствует. Гистерезис формы также отсутствует для малых толщин слоя жидкости над шаром.

Таким образом, видно, что в диапазоне полей от  $H_{crit2}$  до  $H_{crit1}$  имеет место гистерезис формы свободной поверхности, и ее вид зависит от направления изменения поля.

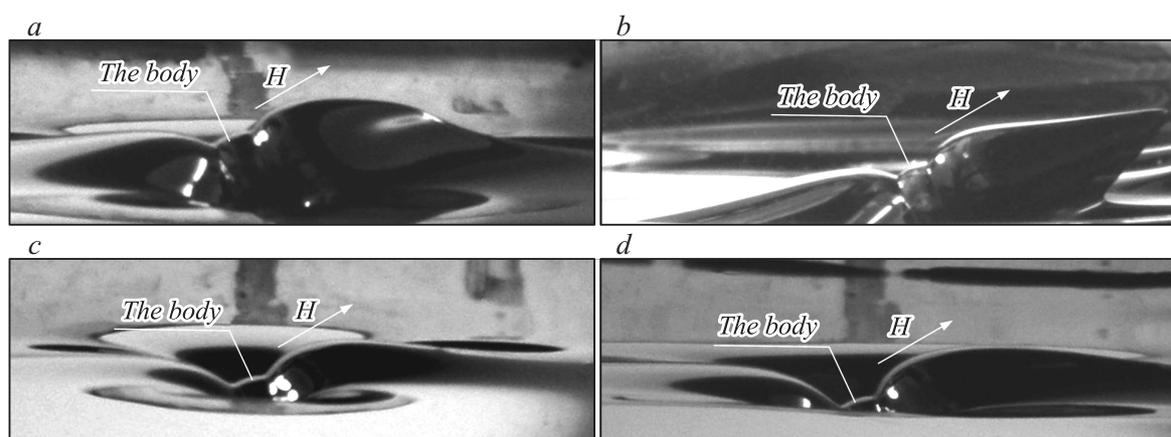
С увеличением толщины  $h$  увеличивается критическое поле  $H_{crit1}$ , растет также и разность критических полей  $H_{crit1}$  и  $H_{crit2}$  [7].

На рис. 3 для сравнения приведены характеристики деформирования для жидкостей с различной намагниченностью ММТр-44 ( $M_s = 43.8 \text{ kA/m}$ ) и ММТр-10 ( $M_s = 9.6 \text{ kA/m}$ ). Деформация поверхности происходит под действием объемной магнитной силы  $\mu_0 M \text{ grad} H$ , которая пропорциональна намагниченности жидкости  $M$ . Поэтому при одной и той же напряженности магнитного поля амплитуда деформации поверхности меньше у жидкости, обладающей меньшей намагниченностью.

Для жидкости ММТр-10 с малой величиной намагниченности в отличие от ММТр-44, обладающей более сильными магнитными свойствами, в диапазоне исследуемых магнитных полей до 30 kA/m скачкообразный разрыв слоя жидкости не наблюдается, гистерезис формы поверхности отсутствует. Амплитуда деформации свободной поверхности жидкости монотонно изменяется с изменением поля. При этом с увеличением толщины слоя жидкости темп изменения амплитуды деформации падает.



**Рис. 4.** Форма поверхности магнитной жидкости в горизонтальном магнитном поле для магнитной жидкости МК-27.  $H$ , кА/м:  $a — 0$ ,  $b — 5.7$ ,  $c — 8.41$ ,  $d — 19.9$ ; для магнитной жидкости МК-51:  $e — 16$ ,  $f — 21.8$ .



**Рис. 5.** Форма поверхности магнитной жидкости в наклонном магнитном поле.  $H$ , кА/м:  $a — 16.7$ ,  $b — 23$ ,  $c — 13.3$ ,  $d — 21.7$ .

Для визуализации изменения формы свободной поверхности в горизонтальном поле была выполнена серия экспериментов с намагничивающимся шаром, помещенным в узкую щель размером  $6 \times 54$  мм. Шар равноудален от граней щели, поэтому в отличие от случая, исследованного в [6], жидкость находилась не только над шаром, но и под ним. Фотографии для жидкостей на основе керосина МК-27 и МК-51 с намагниченностью насыщения соответственно 27 и 51 кА/м представлены на рис. 4. Для приведенных на рисунке ситуаций магнитное поле направлено вдоль щели.

Рис. 4,  $a-d$  иллюстрирует форму свободной поверхности жидкости МК-27, а  $e, f$  — для жидкости МК-51, обладающей более сильными магнитными свойствами. На  $a-c$  изображен случай для диапазона полей  $H < H_{cr1}$  до разрыва поверхности жидкости над шаром. Фотографии  $d-f$  иллюстрируют разрыв поверхности маг-

нитной жидкости в полях, превышающих критическое значение  $H > H_{cr1}$ .

Установлено, что в полях, больших  $H_{cr1}$ , после образования воздушного канала над шаром дальнейшее деформирование поверхности происходит с образованием вертикальной кольцевой воздушной полости вокруг шара. Эта полость хорошо видна на рис. 4,  $f$ .

### Наклонное магнитное поле

В наклонном магнитном поле рассмотрены случаи частичного и полного погружения намагничивающегося шара в магнитную жидкость. В экспериментах угол наклона вектора напряженности к горизонту составлял  $30^\circ$ .

Формы поверхности жидкости в наклонном магнитном поле показаны на рис. 5. На рис. 5,  $a, b$  представлен

случай при частичном погружении шара в жидкость. Как и в случае с горизонтальным полем, жидкость натекает на шар на торцевых участках его поверхности в областях более сильного магнитного поля. Причем с одной стороны шара уровень жидкости выше и напоминает форму гребня волны.

С увеличением напряженности поля  $H$  этот участок поверхности трансформируется в наклонный пик конусообразной формы (рис. 5, *b*). Из-за действия силы тяжести угол наклона пика к горизонту незначительно меньше угла наклона напряженности поля  $H$ . В области боковых поверхностей шара образуются углубления поверхности жидкости сложной формы.

Для случая, когда тело полностью покрыто жидкостью, при включении поля поверхность над шаром деформируется и при некотором значении напряженности  $H$  вершина шара становится открытой, а жидкость натекает на шар вдоль поля так же, как в предыдущем случае (рис. 5, *c, d*). С ростом величины поля деформация поверхности увеличивалась в направлении поля. В исследуемом диапазоне полей до 30 кА/м образование конусообразного пика вдоль поля не наблюдалось.

## Вертикальное магнитное поле

В вертикальном однородном поле в зависимости от глубины погружения шара в магнитную жидкость изменение формы ее поверхности имеет различный характер.

Если шар наполовину погружен в магнитную жидкость, то при включении внешнего однородного магнитного поля вокруг шара образуется кольцевая воронка, глубина которой увеличивается с ростом поля, при этом изменяется высота смачивания шара жидкостью.

В случае, когда слой жидкости полностью покрывает шар, вертикальное поле приводит к появлению возвышения жидкости над шаром, причем амплитуда деформации  $\Delta h$  и форма возвышения зависят от величины поля  $H$ . Так, в [6] установлено существование  $H_{cr1}$ , при достижении которого происходит скачкообразно трансформация формы возвышения от гладкой сферической к вертикальному пику, имеющему конусообразную форму. При этом скорость изменения амплитуды деформации с ростом поля резко возрастает. Величина критического поля  $H_{cr1}$  растет с увеличением толщины слоя жидкости  $h$ . Характеристики деформирования поверхности жидкости в вертикальном поле описаны в [6,7].

При некотором критическом значении поля  $H_{cr2}$  на участках поверхности жидкости, удаленных от шара, развивается неустойчивость, которая выражается скачкообразным появлением системы пиков на всей поверхности слоя жидкости. Как было установлено ранее [8], критическое поле  $H_{cr2}$  определяется глубиной слоя жидкости. Оно монотонно уменьшается с ростом глубины слоя жидкости. В диапазоне полей  $H > H_{cr2}$  при увеличении поля скорость изменения амплитуды деформации над шаром замедляется.

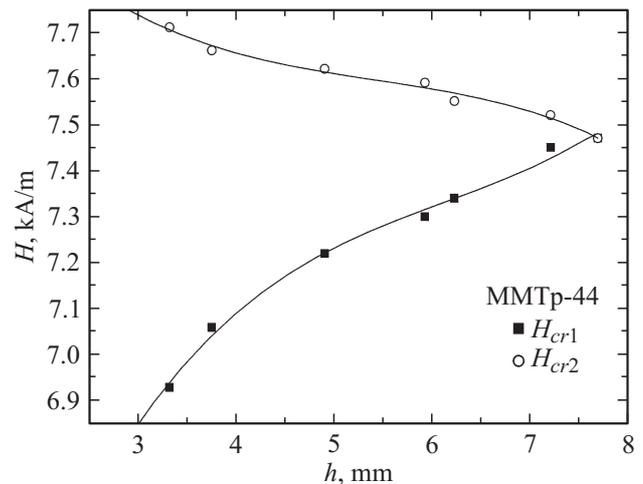


Рис. 6. Зависимость критических полей для ММТр-44 от толщины слоя жидкости над телом.

С ростом глубины слоя жидкости растет и толщина слоя  $h$  над шаром. Поверхность жидкости более удалена от шара, соответственно возникающие неоднородности поля становятся меньше. В результате влияние присутствия шара в жидкости на форму поверхности жидкости ослабевает, критические поля  $H_{cr1}$  и  $H_{cr2}$  сближаются и стремятся к критическому полю для толстого слоя жидкости.

Экспериментальные зависимости критических полей для поверхности магнитной жидкости ММТр-44 над шаром и вдали от него от толщины слоя жидкости  $h$  представлены на рис. 6.

## Выводы

Результаты исследования показывают, что в однородном магнитном поле вокруг сферического намагничивающегося тела в результате перераспределения поля образуются зоны локальной неоднородности. Помещение этого тела в плоский слой магнитной жидкости в однородном магнитном поле приводит к деформированию плоской поверхности жидкости. Характеристики деформирования поверхности определяются величиной и ориентацией магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-01-90003).

## Список литературы

- [1] Gogosov V.V., Kiryushin V.V., Simonovskii A.Ya. // Magneto-hydrodynamics. 1994. Vol. 30, N 2. P. 163–170.
- [2] Гогосов В.В., Налетова В.А., Шапошникова Г.А. // Итоги науки и техники ВИНТИ. Сер. механика жидкости и газа. 1981. Т. 16. С. 76–208.

- [3] Zimmermann K., Naletova V.A., Zeidis I., Turkov V.A., Pelevina D.A., Bohm V., Popp J. // *Magnetohydrodynamics*. 2008. Vol. 44, N 2. P. 175–182.
- [4] Zimmermann K., Zeidis I., Naletova V.A., Turkov V.A., Popp J., Rozin A.V., Pelevina D.A. // *J. Magnetism and Magnetic Materials*. 2012. Vol. 324, N 6. P. 1253–1257.
- [5] Налетова В.А., Пелевина Д.А., Турков В.А. // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2009. N 6. С. 3–10.
- [6] Bashtovoi V., Motsar A., Naletova V., Reks A., Pelevina D. // *Magnetohydrodynamics*. 2013. Vol. 49. N 3–4. P. 592–595.
- [7] Pelevina D., Naletova V., Bashtovoi V., Motsar A., Reks A. // *Magnetohydrodynamics*. 2014. Vol. 50. N 1. P. 83–90.
- [8] Баштовой В.Г., Берковский Б.М., Вислович А.Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. М.: ИВТАН СССР, 1985. 188 с.