

НЕКОТОРЫЕ ФОРМЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Баштовой В.Г.¹, Рекс А.Г.^{1*}, Мороз В.С.¹, Моцар А.А.¹, Ряполов П.А.²

¹Белорусский национальный технический университет,
220013, г. Минск, просп. Независимости 65, Республика Беларусь

²Юго-западный государственный университет,
05040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, Россия

E-mail: agreks@tut.by*

Аннотация. В работе исследованы форма и устойчивость полуограниченных капель магнитной жидкости на горизонтальной пластине в наклонном магнитном поле, а также форма пузыря воздуха в горизонтальном плоском канале, заполненном магнитной жидкостью.

Ключевые слова: магнитная жидкость, форма капли магнитной жидкости, устойчивость капли, форма пузыря в магнитной жидкости.

SOME SHAPES AND STABILITY OF MAGNETIC FLUID SURFACE IN THE UNIFORM MAGNETIC FIELD

Bashtovoi V.G.¹, Reks A.G.^{1*}, Moroz V.S.¹, Motsar A.A.¹, Riapolov P.A.²

¹Belarusian National Technical University,

65 Nezavisimosty ave., Minsk, 220013, Republic of Belarus

²South-West State University, 94 50 Let Oktiabria str., 305040, Kursk, Russia

E-mail: agreks@tut.by*

Abstract. The study describes the shape and stability of the semi-bounded magnetic fluid drops on a horizontal plate in an inclined magnetic field. The results of studying the shape of air bubble in the horizontal flat channel filled with a magnetic fluid are presented too.

Keywords: magnetic fluid, shape of the magnetic fluid drop, stability of the magnetic fluid drop, shape of air bubble in a magnetic fluid



БАШТОВОЙ Виктор Григорьевич окончил Белорусский государственный университет в 1968 г. Защитил диссертации на соискание степени д.ф.-м.н. по теме "Термомеханика поверхностно-конвективных и волновых явлений в намагничивающихся жидкостях" в 1986 г. С 1968 г. работал в Институте тепло- и массообмена АН Беларуси. С 1980 года работает в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ), в настоящее время в должности заведующего кафедрой. Имеет более 400 публикаций.



РЕКС Александр Георгиевич окончил Белорусский государственный университет в 1974 г. С 1981 г. работает в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ). В 2007 г. защитил диссертацию на соискание степени д.ф.-м.н. по теме «Механика магнитоуправляемых магнитожидкостных систем со свободной поверхностью». В настоящее время является профессором кафедры БНТУ, заведующим НИЛ «Термомеханика магнитных жидкостей». Имеет более 250 научных публикаций.



МОРОЗ Виктория Сергеевна окончила Белорусский национальный технический университет в 2013 году. В 2014 г. окончила магистратуру БНТУ по специальности «Энергетические системы и комплексы». В настоящее время работает в должности ассистента на кафедре ЮНЕСКО БНТУ, является аспирантом БНТУ по специальности «Теплофизика и теоретическая теплотехника». Имеет 12 научных публикаций.



МОЦАР Александр Александрович окончил Белорусский национальный технический университет (БНТУ) в 2010 г., а в 2011 г. – магистратуру БНТУ. В настоящее время является ассистентом кафедры ЮНЕСКО БНТУ, младшим научным сотрудником НИЛ «Термомеханика магнитных жидкостей». В 2018 г. защитил диссертацию на соискание степени к.т.н. по теме «Упруго-диссипативные процессы в ограниченных объемах магнитной жидкости при воздействии магнитных полей применительно к магнитожидкостным виброзащитным устройствам». Имеет более 40 научных публикаций.

РЯПОЛОВ Петр Алексеевич окончил горный факультет Губкинского института (филиала) Московского государственного открытого университета. В 2010 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В настоящее время является деканом Юго-Западного государственного университета. Имеет более 120 научных публикаций.

Форма и устойчивость капель магнитной жидкости, а также пузырей в магнитной жидкости привлекает внимание многих исследователей, несмотря на достаточно большое число публикаций в этой области. Обусловлено это возможностью постановки и решения интересных задач и многочисленными практическими приложениями.

В данной работе представлены результаты исследований формы и устойчивости полуограниченных капель магнитной жидкости на горизонтальной пластине в наклонном магнитном поле, а также формы пузыря воздуха в горизонтальном плоском канале, заполненном магнитной жидкостью.

1. Полуограниченная капля магнитной жидкости на горизонтальной пластине в наклонном однородном магнитном поле.

Ранее выполненные исследования показали, что капля магнитной жидкости вытягивается вдоль направления магнитного поля благодаря различию магнитного скачка давления в различных точках ее поверхно-

сти [1-3]. Особенность формирования капли магнитной жидкости на поверхности горизонтальной пластины в магнитном поле, имеющем вертикальную и горизонтальную компоненту, состоит в том, что направления силы тяжести и магнитного поля не совпадают.

Рассматривается полуограниченная капля магнитной жидкости 1 на плоской горизонтальной поверхности 2 при воздействии наклонного под углом α к горизонту однородного магнитного поля H (рис. 1).

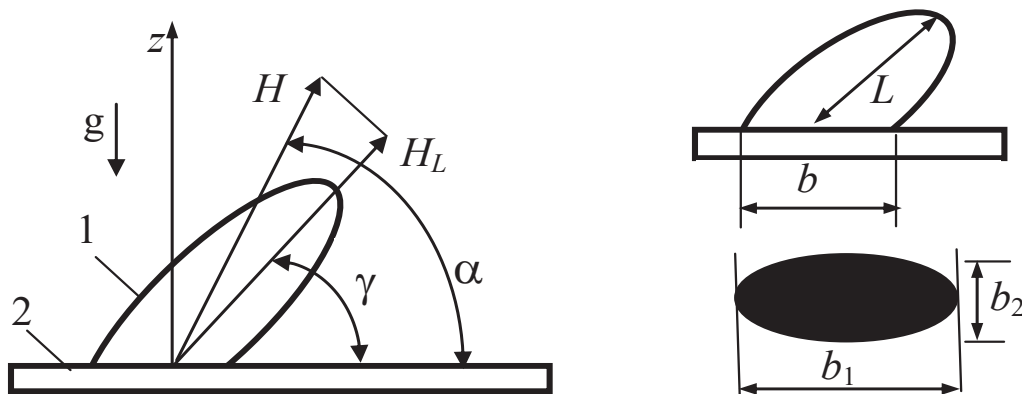


Рис. 1. Капля магнитной жидкости на пластине в наклонном магнитном поле (геометрия задачи)

В экспериментах использовалась магнитная жидкость на основе керосина МК-52, с намагниченностью насыщения $M_s = 52,1$ кА/м. Форма капли была изучена при различных углах наклона α магнитного поля по отношению к горизонтальному направлению ($\alpha = 90^\circ, 80^\circ, 75^\circ, 70^\circ, 45^\circ$). Магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца.

В однородном наклонном магнитном поле капля вытягивается вдоль его направления. В отличие от вертикального поля она не имеет осевой симметрии. Наличие горизонтальной компоненты магнитного поля приводит к тому, что в горизонтальном сечении капля также вытягивается вдоль направления поля, и ее основание приобретает эллипсоидальную форму.

Результаты исследования показали, что при уменьшении угла наклона α магнитного поля, сила тяжести начинает оказывать большее влияние на ее форму. Проявляется это в том, что угол наклона оси капли γ к горизонту становится меньше, чем угол наклона α напряженности магнитного поля. Разница между этими углами уменьшается с увеличением напряженности поля, а также при уменьшении объема капли.

Влияние поля на длину капли L существенно усиливается при уменьшении угла α , что иллюстрируется рис. 2 для капли объемом 70 мм³.

Капля как единое целое существует лишь в некотором диапазоне магнитных полей. При достижении напряженности поля некоторого критического значения происходит топологический распад на две примерно одинаковые капли. Распад наблюдается как при увеличении, так и при уменьшении поля при определенных объемах капли. Кривые топологической неустойчивости, представляющие собой зависимости критической напряженности наклонного поля от объема капли, представлены на рис. 3. Область слева от кривых соответствует устойчивости капель, справа – неустойчивости. Наклон поля понижает устойчивость капли, неустойчивость развивается у капель меньшего размера.

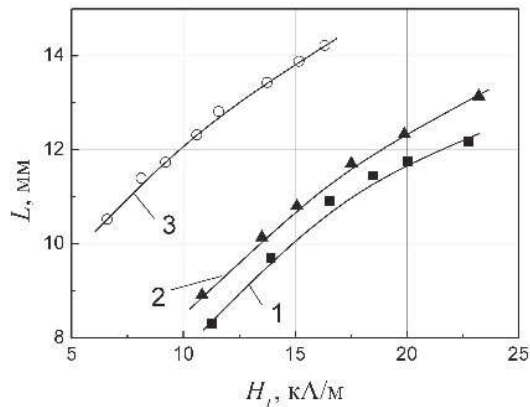


Рис. 2. Зависимость длины капли от напряженности магнитного поля H_L при углах наклона $\alpha = 90^\circ$ (1), 75° (2), 45° (3).

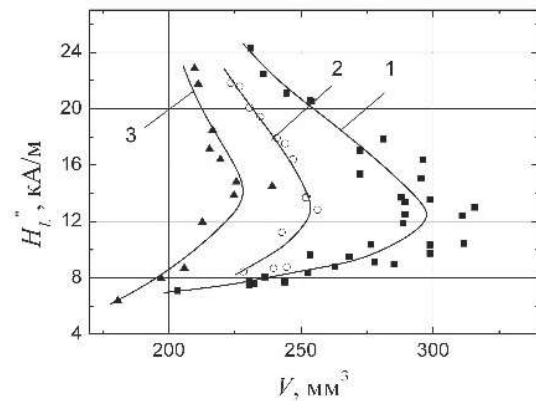


Рис. 3. Кривые неустойчивости капли магнитной жидкости при углах наклона $\alpha = 90^\circ$ (1), 75° (2), 70° (3).

2. Пузырь в магнитной жидкости в плоском горизонтальном щелевом канале в горизонтальном однородном магнитном поле.

У пузыря воздуха в тонком слое магнитной жидкости, заполняющей плоский щелевой канал, в поперечном к слою магнитном поле наблюдается магнитостатическая неустойчивость, проявляющаяся в трансформации пузыря в лабиринтную структуру [4]. Исследования [5] показали, что в поле, направленном вдоль щелевого канала немагнитные капли в магнитной жидкости, так же как и капли магнитной жидкости, сохраняют устойчивость формы и монотонно увеличивают свою длину вдоль направления поля.

Рассматривается пузырь воздуха, помещенный в заполненный магнитной жидкостью горизонтальный плоский щелевой канал. Канал с жидкостью помещен во внешнее однородное магнитное поле, направленное горизонтально, вдоль граней канала. Под действием пузырь с изначально круглым сечением диаметром D вытягивается вдоль поля, принимая эллипсоидную форму с большой осью a и малой осью b .

В экспериментах использованы магнитные жидкости на основе трансформаторного масла ММТ-23, ММТ-43 и ММТ-55 с намагниченностями насыщения соответственно 22.9, 43.3 и 55.4 кА/м. Толщина слоя магнитной жидкости в канале была равна $h = 1,1$ мм.

В эксперименте изменение магнитного поля в диапазоне до 25 кА/м осуществлялось небольшими ступенями с выдержкой каждого значения в течение 5 минут.

Изменение формы воздушного пузыря в плоском слое магнитной жидкости магнитном поле иллюстрируется рисунком 4.

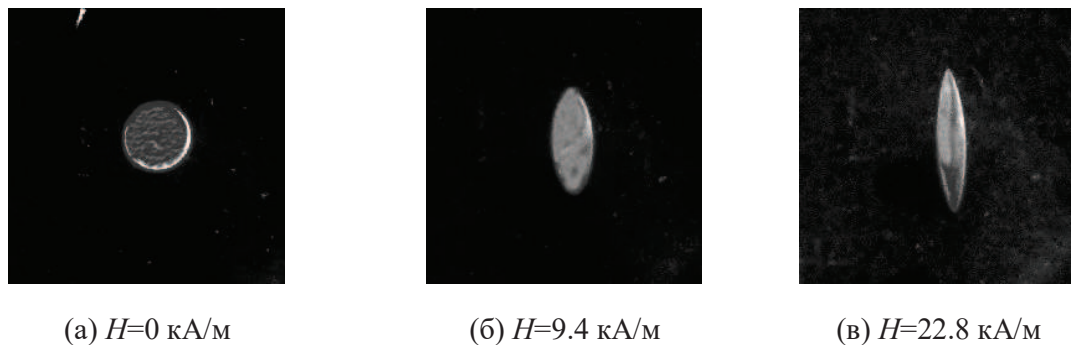


Рис. 4 – Изменение формы пузыря воздуха с начальным диаметром $D = 6.5$ мм в однородном магнитном поле

Установленные зависимости большей оси пузыря a от напряженности внешнего поля были обобщены и аппроксимированы на основе эмпирической зависимости, предложенной в [5], которая получена для магнитных и немагнитных капель:

$$a/D = \left[1 + 0,15S \cdot (h/D)^n \right]^{0,4}.$$

Параметр $S = \mu_0 M^2 D / \sigma$ определяет соотношение между магнитным скачком давления и силой поверхностного натяжения.

Для пузырей воздуха, представленная критериальная зависимость более точно описывает экспериментальные данные при значении коэффициента $n=0.89$. Сравнение обобщенных эксперименталь-

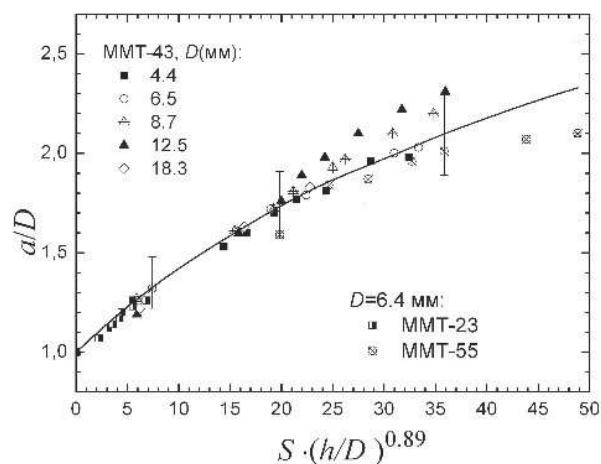


Рис. 5 – Обобщенные экспериментальные зависимости длины пузыря от безразмерного комплекса и их аппроксими-

ных данных (точки) с результатами аппроксимации по приведенному выражению (линия) показано на рис. 5.

Представленная критериальная зависимость позволяет определять размеры большой оси пузыря воздуха с погрешностью не более $\pm 10\%$, для пузырей с соотношением $h/D = 0,06 \div 0,25$ в жидкости с намагниченностью насыщения в диапазоне от 23 до 55 кА/м.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ, а также РФФИ (проект № 17-52-04025\17).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баштовой, В.Г. Введение в термомеханику магнитных жидкостей /В.Г.Баштовой, Б.М. Берковский, А.Н. Вислович. – М.: ИВТАН СССР, 1985. – 188 с.
2. Баштовой, В.Г. Полуограниченная капля магнитной жидкости в однородном магнитном поле / В.Г.Баштовой, С.Г.Погирницкая, А.Г.Рекс //Магнитная гидродинамика. – 1990. – №2. – С. 20-26.
3. Баштовой, В.Г. Влияние ультразвука на деформацию и устойчивость капли магнитной жидкости / В.Г. Баштовой, А.Г.Рекс, Аль-Джаиш Таха Малик Мансур // Изв. Нац. академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук». – 2014. – № 3. –С.63-68.
4. Цеберс, А.О. Структуры границы раздела пузырька в магнитной жидкости в поле /А.О.Цеберс, М.М. Майоров //Магнитная гидродинамика. – 1980. – № 3 – С.15-20.
5. Bashতোই, V. Dynamics of deformation of magnetic fluid flat drops in a longitudinal magnetic field /V.Bashতোই, S.Pogirnitskaya, A.Reks //J.Magnetism and Magnetic Materials. – 1999. – V.201. – P. 300-302.