

УДК 537.84:621.03

ДЕФОРМАЦИЯ ПОЛУОГРАНИЧЕННОЙ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МАГНИТНОМ И ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЯХ

Докт. физ.-мат. наук, проф. БАШТОВОЙ В. Г., докт. физ.-мат. наук РЕКС А. Г.,
асп. МАЛИК МАНСУР АЛЬ-ДЖАИШ ТАХА

Белорусский национальный технический университет

E-mail: bashv@rambler.ru

DEFORMATION OF SEMI BOUNDED DROP OF MAGNETIC FLUID IN MAGNETIC AND GRAVITATIONAL FIELDS

BASHTOVOI V. G., REKS A. G., MALIK MANSOOR AL-JHAISH TAHA

Belarusian National Technical University

Теоретически и экспериментально установлены закономерности деформации полуограниченной капли магнитной жидкости при одновременном воздействии магнитного и гравитационного полей. Определена роль каждого из этих факторов в формообразовании и деформации капли и получены наглядные соотношения для расчетов ее геометрических параметров.

Ключевые слова: магнитная жидкость, свободная поверхность, деформация, магнитное поле, гравитационное поле.

Ил. 7. Табл. 1. Библиогр.: 3 назв.

The regularities of semi bounded magnetic fluid drop deformation at simultaneous influence of magnetic and gravitational fields have been established theoretically and experimentally in the paper. The role of each factor in formation and deformation of the drop has been determined and direct proportions for calculation of its geometrical parameters have been obtained in the paper.

Keywords: magnetic fluid, free surface, deformation, magnetic field, gravitational field.

Fig. 7. Tab. 1. Ref.: 3 titles.

Введение. Объемы магнитной жидкости со свободной поверхностью (капли) являются объектами постоянного внимания исследователей, привлекая их новыми физическими эффектами, а также возможным практическим применением в различного рода технических устройствах [1, 2]. Как известно, свободная поверхность жидкости очень чувствительна к разного рода внешним силовым проявлениям. В обычной жидкости под действием сил поверхностного натяжения она стремится принять сферическую форму, под действием гравитационных сил – плоскую горизонтальную. В магнитной жидкости в однородном магнитном поле свободная поверхность стремится приобрести такую форму, при которой минимизируются возможные возмущения магнитного поля, возникающие при переходе через нее [1]. Поэтому свободная поверхность магнитной жидкости располагается как можно более параллельно вектору напряженности однородного магнитного поля. Это приводит,

в частности, к вытягиванию капель магнитной жидкости вдоль направления этого поля [1, 2].

Основная часть. Целью настоящей работы является определение роли каждого из перечисленных выше факторов в формообразовании и деформации полуограниченной капли магнитной жидкости, лежащей на горизонтальной твердой поверхности (рис. 1), а также получение наглядных теоретических соотношений и экспериментальных зависимостей для расчетов геометрических параметров капли.

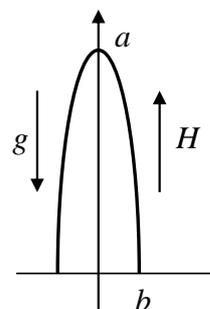


Рис. 1. Геометрия задачи

Внешнее однородное магнитное поле H приложено перпендикулярно поверхности, на которой расположена капля, и вызывает ее удлинение вдоль своего направления. В противовес ему поле силы тяжести вызывает сплющивание капли.

Теория. В основу теоретического исследования положен подход, развитый ранее в [3]. Как показывает анализ экспериментальных форм капель магнитной жидкости в магнитном поле, эта форма во многих случаях соответствует вытянутому вдоль вектора напряженности поля H эллипсоиду вращения (рис. 1), поэтому принимали, что капля имеет форму эллипсоида с большой полуосью a и малой полуосью b . Угол смачивания капли с твердой поверхностью предполагался равным 90° . При этом магнитное поле внутри капли будет так же, как и внешнее поле, однородным и определяться размагничивающим фактором эллипсоида.

На поверхности капли в каждой точке имеют место капиллярный скачок давления, а также магнитный, определяемый квадратом нормальной к поверхности компоненты намагниченности жидкости M_n . Таким образом, давление внутри капли в вершинах полуэллипсоида определится следующим образом:

$$p^a = p_b + \sigma \left(\frac{1}{R_1^a} + \frac{1}{R_2^a} \right) - \frac{1}{2} \mu_0 M^2; \quad (1)$$

$$p^b = p_b + \sigma \left(\frac{1}{R_1^b} + \frac{1}{R_2^b} \right),$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения магнитной жидкости; R_1, R_2 – главные радиусы кривизны капли в соответствующих точках; $M = M(H)$ – намагниченность жидкости; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; p_b – давление в окружающей каплю среде.

В вершине a магнитное поле перпендикулярно поверхности капли и соответственно $M_n = M$, а в вершине b поле касательно, и $M_n = 0$. Пренебрегая неоднородностью магнитного поля внутри капли и принимая во внимание действие силы тяжести, давление в капле на уровне ее основания p_0 , с одной стороны будет равно $p_0 = p^a + \rho g a$, с другой оно составит $p_0 = p^b$, т. е. $p^a + \rho g a = p^b$.

Из этого с учетом соотношений (1) получается следующее условие равновесия капли:

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1^a} + \frac{1}{R_2^a} \right) - \sigma \left(\frac{1}{R_1^b} + \frac{1}{R_2^b} \right) + \rho g a - \frac{1}{2} \mu_0 M^2 = 0. \quad (2)$$

Как известно, для полуэллипсоида объемом V имеют место следующие соотношения:

$$R_1^a = R_2^a = b^2/a; \quad R_1^b = a^2/b; \quad R_2^b = b; \quad V = (2/3)\pi a b^2.$$

Тогда условие (2) приобретает вид, определяющий соотношение между геометрическими параметрами капли в магнитном и гравитационном полях:

$$\sigma \left(\frac{2a}{b^2} - \frac{b}{a^2} - \frac{1}{b} \right) + \rho g a - \frac{1}{2} \mu_0 M^2 = 0. \quad (3)$$

При достаточно большом удлинении капли, когда $(a/b) \gg 1$, соотношение (3) можно записать

$$\sigma \frac{2a}{b^2} + \rho g a - \frac{1}{2} \mu_0 M^2 = 0. \quad (4)$$

Учитывая, что в процессе деформации капли ее объем V остается постоянным, в качестве характерного размера удобно принять радиус R_0 полусферической капли того же объема. Тогда $V = (2/3)\pi R_0^3$, $ab^2 = R_0^3$, и из (4) получается следующее квадратное уравнение для большой полуоси капли:

$$a^2 + \frac{\rho g R_0^3}{2\sigma} a - \frac{\mu_0 M^2 R_0^3}{4\sigma} = 0,$$

решение которого

$$\frac{a}{R_0} = -\frac{\rho g R_0^2}{4\sigma} + \sqrt{\left(\frac{\rho g R_0^2}{4\sigma} \right)^2 + \frac{\mu_0 M^2 R_0}{4\sigma}}.$$

Это выражение можно записать с использованием известных безразмерных критериев [1]: магнитного критерия $S = \mu_0 M^2 R_0 / \sigma$ и числа Бонда $Bo = \rho g R_0^2 / \sigma$

$$\frac{a}{R_0} = -\frac{Bo}{4} + \sqrt{\frac{Bo^2}{16} + \frac{S}{4}}. \quad (5)$$

Прежде всего, полученное соотношение наглядно демонстрирует тот факт, что гравитаци-

онное поле, описываемое числом Бонда Bo , препятствует удлинению капли.

В больших магнитных полях, обеспечивающих значительное удлинение капли, когда $S \gg Bo^2$, получается простое соотношение, определяющее удлинение капли с учетом действия как магнитного, так и гравитационного полей

$$\frac{a}{R_0} = \sqrt{\frac{S}{4}} - \frac{Bo}{4}.$$

Рассчитанные по формуле (5) зависимости относительной длины капли a/R_0 от описывающих задачу параметров представлены на рис. 2.

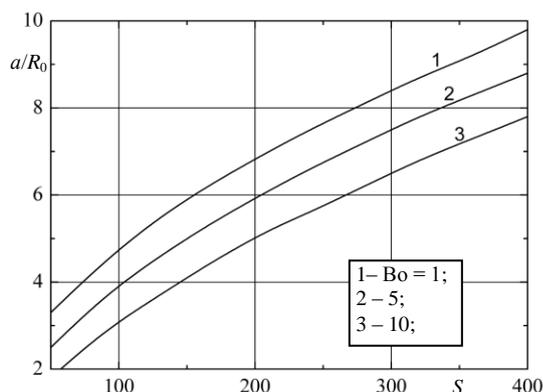


Рис. 2. Теоретическая зависимость относительной длины капли a/R_0 от магнитного критерия S при различных значениях числа Бонда Bo

Как видно из рис. 2, наиболее быстрое удлинение капли происходит при малых значениях магнитного критерия S , а с его увеличением скорость удлинения капли уменьшается. При этом чем больше значения магнитного числа Бонда, тем ниже лежат кривые зависимости относительной длины капли от S .

Эксперимент. Экспериментальные исследования формы капли магнитной жидкости выполнены в однородном магнитном поле, создаваемом катушками Гельмгольца, с диапазоном изменения напряженности поля 0–30 кА/м. Это соответствовало диапазону изменения намагниченности жидкости от нуля до практически намагниченности насыщения. Индукцию магнитного поля измеряли датчиком Холла и милитесламетром. Регистрацию формы капель осуществляли цифровой фотокамерой с последующей компьютерной обработкой материалов.

В экспериментах использовали магнитные жидкости, приготовленные в лаборатории термомеханики магнитных жидкостей Белорусского национального технического университета на основе керосина и магнетита с физическими характеристиками, представленными в табл. 1. Объемы капель варьировали в пределах $V = (150–300) \text{ мм}^3$, что соответствовало характерному радиусу каплей $R_0 = \sqrt[3]{3V/2\pi} = (4,15–5,20) \text{ мм}$. При этом диапазоны изменения безразмерных критериев составляли: $Bo = 1–15$; $S = 100–400$. Результаты эксперимента представлены на рис. 3–7.

Таблица 1

Физические свойства магнитных жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/м ³	Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	Намагниченность насыщения, кА/м
МК-72	1650	0,0241	72,5
МК-52	1476	0,0280	52,1
МК-34	1335	0,0254	34,2
МК-23	1131	0,0288	23,7

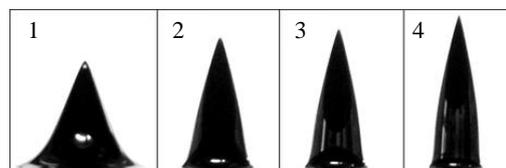


Рис. 3. Фотографии капли магнитной жидкости МК-52 объемом $V = 210 \text{ мм}^3$ при различных напряженностях магнитного поля H (кА/м): 1 – 8,60; 2 – 13,77; 3 – 16,48; 4 – 22,77

Фотографии одной и той же капли магнитной жидкости при разных значениях напряженности внешнего однородного магнитного поля, кроме очевидного ее удлинения с ростом поля, представленные на рис. 3, демонстрируют также существенные изменения формы капли. Если в малых полях, вследствие смачивания поверхности, на которой лежит капля, и значительного влияния силы ее тяжести, поверхность имеет вогнутую форму, то с увеличением поля поверхность капли становится выпуклой, а ее вершина все более острой. Аналогичная закономерность наблюдается и с увеличением намагниченности насыщения жидкости при одном и том же значении напряженности магнитного поля, что иллюстрируется фотографиями на рис. 4.

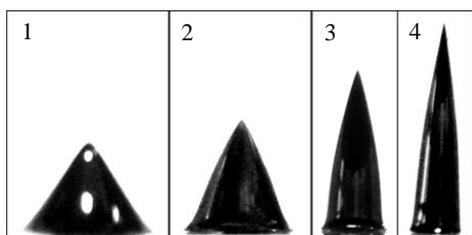


Рис. 4. Фотографии капель объемом $V = 184 \text{ мм}^3$ магнитных жидкостей M_s в магнитном поле с напряженностью $H = 19,8 \text{ кА/м}$ с разной намагниченностью насыщения M_s (кА/м): 1 – 23,7; 2 – 34,2; 3 – 52,1; 4 – 72,5

Экспериментальные зависимости высоты капель разного объема магнитных жидкостей с разными намагниченностями насыщения представлены на рис. 5. Все линии имеют такой же характер, как и теоретические кривые на рис. 2. Нижние четыре линии, соответствующие каплям жидкости МК-52 с намагниченностью насыщения 52,1 кА/м, лежат тем выше, чем больше их объем. Сравнение кривых, соответствующих одинаковому объему капли 252 мм³ и двум жидкостям с намагниченностью насыщения 52,1 и 72,5 кА/м, показывает, что при той же напряженности магнитного поля капля жидкости с большей намагниченностью вытягивается вдоль поля значительно сильнее.

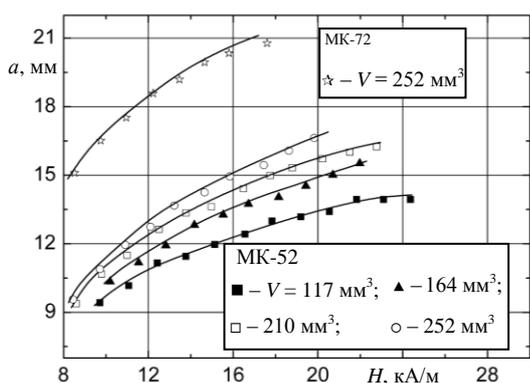


Рис. 5. Экспериментальная зависимость высоты a капель магнитных жидкостей разного объема V от напряженности магнитного поля H

Экспериментальные данные, обработанные в виде безразмерных критериальных зависимостей относительной длины капли a/R_0 от магнитного критерия S , представлены на рис. 6 и демонстрируют такой же характер, как и тео-

ретические зависимости, изображенные на рис. 2. Соответствующие этим зависимостям кривые расположены тем ниже, чем больше значение числа Бонда.

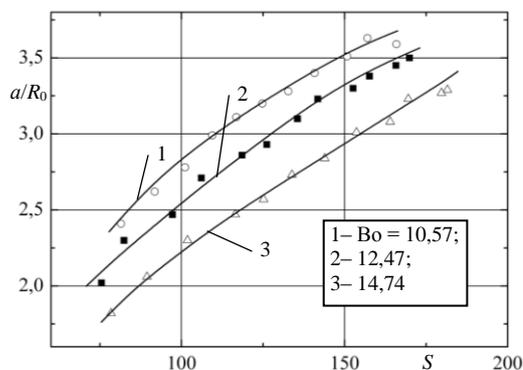


Рис. 6. Экспериментальная зависимость относительной высоты a/R_0 капель магнитной жидкости МК-52 от безразмерного магнитного критерия S при разных значениях числа Бо

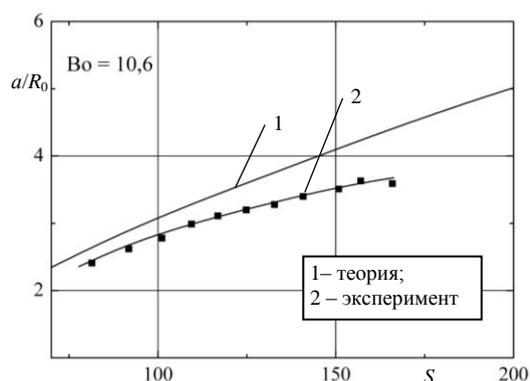


Рис. 7. Сравнение теоретической зависимости (5) относительной высоты a/R_0 капель магнитной жидкости от безразмерного магнитного критерия S при значении числа Бонда $Bo = 10,6$ с экспериментальными данными

Сравнение теоретических и экспериментальных критериальных зависимостей a/R_0 от S для одинаковых значений числа Бонда ($Bo = 10,6$) представлено на рис. 7 и демонстрирует достаточно хорошее (с разницей менее 7 %) количественное согласие между ними практически до значения магнитного критерия S , равного 100. При больших его значениях кривые расходятся, что, как видно из фотографий, представленных на рис. 3 и 4, в первую очередь связано с отличием реальной формы капли от эллипсоидальной. Это отличие главным образом заключается в резком заострении вершины капли. В целом же можно констатировать, что представленная теоретическая модель дает

достаточно адекватное описание реальной ситуации удлинения капли магнитной жидкости в однородном магнитном поле.

ВЫВОДЫ

Полученные теоретические и экспериментальные данные позволяют заключить, что предложенный подход к описанию деформации полуограниченной капли магнитной жидкости в однородном магнитном поле дает адекватную картину протекания этого процесса, а установленные закономерности позволяют определять его количественные характеристики в широком диапазоне изменения свойств жидкости и напряженности магнитного поля. Работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bashtovoy, V. G.** An Introduction to Thermomechanics of Magnetic Fluids / V. G. Bashtovoy, B. M. Berkovsky, A. N. Vislovich // Hemisphere Publ. Corp. – Washington, 1988. – 190 p.
2. **Berkovsky, B.** Magnetic Fluids and Applications Handbook / B. Berkovsky, V. Bashtovoi. – New York: Begell House Inc. Publishers, 1996.
3. **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.

REFERENCES

1. **Bashtovoy, V. G., Berkovsky, B. M., & Vislovich, A. N.** (1988) *An Introduction to Thermomechanics of Magnetic Fluids*. Washington, Hemisphere Publ. Corp.
2. **Berkovsky, B., & Bashtovoy, V.** (1996) *Magnetic Fluids and Applications*. New York: Begell House Inc. Publishers.
3. **Bashtovoy, V. G., Pogirnitskaya, S. G., & Reks, A. G.** (1990) Semirestricted Droplet of Magnetic Fluid in a Uniform Magnetic Field. *Magnitnaia Hidrodinamika [Magnetic Hydrodynamics]*, 2, 20–26.

Поступила 02.05.2014

УДК 621.181

ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ ТЭС: ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Докт. техн. наук, проф. КАРНИЦКИЙ Н. Б.¹⁾, асн. МАТВЕЕВ Е. А.²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾РУП «БелНИПИэнергопром»

E-mail: tes_bntu@tyt.by

COMBINED CYCLE GAS TURBINE FOR THERMAL POWER STATIONS: EXPERIENCE IN DESIGNING AND OPERATION, PROSPECTS IN APPLICATION

KARNITSKY N. B.¹⁾, MATVEEV E. A.²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University,

²⁾RUE “BelNIPIenergoprom”

Произведен обзор основных мировых тенденций энергопотребления и структуры энергосистемы Республики Беларусь. Рассмотрены основные схемы парогазовых установок. Выполнен анализ работы блоков парогазовых установок, работающих в составе Белорусской энергосистемы. Результаты анализа приведены в виде таблиц основных показателей работы энергоблоков.

Ключевые слова: энергосистема, энергетическая программа, утилизационная схема, сбросная схема, парогазовые технологии, котел-утилизатор, газовая турбина, паросиловая установка, АЭС.

Ил. 5. Табл. 4. Библиогр.: 3 назв.