

УДК 536.248.2; 537.84

**ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ
В КИПАЮЩЕЙ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ****¹Яновский А.А., ¹Симоновский А.Я., ²Холопов В.Л.**¹ФГБОУ ВПО «Ставропольский государственный аграрный университет»,
Ставрополь, e-mail: aa.yanovskiy@yandex.ru;²ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
Институт механики, Москва, e-mail: llll@imec.msu.ru

Экспериментально и теоретически моделировался процесс роста и отрыва пузырьков пара при кипении магнитной жидкости в однородном магнитном поле. В статье представлены экспериментальные результаты исследования влияния магнитного поля на объем и частоту отрыва капель магнитной жидкости в немагнитной среде. Объяснен механизм влияния однородного магнитного поля на объем и частоту отрыва капель магнитной жидкости. Теоретически рассчитана форма и объем капли магнитной жидкости, находящейся в немагнитной жидкой среде при различных значениях действующего на нее магнитного поля. Показано, что полученные результаты могут быть использованы при описании воздействия однородного магнитного поля на форму, объем и частоту отрыва пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на горизонтальной поверхности с одиночным центром парообразования.

Ключевые слова: магнитная жидкость, кипение, теплообмен, магнитное поле, пузырек пара**MAGNETIC FIELD INFLUENCE ON VAPORIZATION
IN THE BOILING MAGNETIC FLUID****¹Yanovskiy A.A., ¹Simonovskii A.Y., ²Kholopov V.L.**¹Stavropol State Agrarian University, Stavropol, e-mail: aa.yanovskiy@yandex.ru;²Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: llll@imec.msu.ru

Processes of growth and separation of the vapor bubbles in the boiling magnetic liquid in homogeneous constant magnetic field was experimentally and theoretically modeled. Experimental results of influence of homogeneous constant magnetic field upon the volume and departure frequency of magnetic fluid drops from horizontal surface in the transparent non-magnetic liquid (glycerin) are presented. The mechanism of influence of magnetic field upon volume and departure frequency of magnetic fluid drops is explained. The shape and volume of magnetic liquid drop, placed in the non-magnetic environment, are theoretically calculated for various values of magnetic field intensity. Received results can be used at the description of homogeneous magnetic field influence on the form, volume and separation frequency of vapour bubbles at magnetic liquid boiling on a horizontal surface with the single centre of bubble formation.

Keywords: magnetic fluid, boiling, heat exchange, magnetic field, vapor bubble

Интерес к исследованию процессов теплообмена в кипящих магнитных жидкостях [3, 4, 7] связан с перспективой применения их в качестве управляемой при помощи магнитного поля закалочной среды [6], а также с возможным применением в качестве теплоносителя в теплообменных аппаратах и тепловых устройствах [1]. Особого внимания при изучении теплообмена в кипящих жидкостях заслуживает процесс образования, роста и отрыва пузырьков пара.

Существуют несколько методов, позволяющих наблюдать пузырьки пара при кипении жидкостей. Фотографический метод пригоден для наблюдения за пузырьками в прозрачных жидкостях и не может быть использован при изучении кипения магнитных жидкостей. Магнитные жидкости (МЖ) непрозрачны даже в тонких слоях. Индукционный метод, основанный на возбуждении в витках катушки ЭДС индукции при изменении магнитного потока, возникающего при прохождении пузырьков пара через объем катушки, позволяет измерять

частоту отрыва пузырьков пара при кипении непрозрачных жидкостей [2]. Однако данный метод не дает информации о форме и размерах пузырьков пара при воздействии внешних магнитных полей.

В настоящей работе, основываясь на аналогии между поведением пузырька пара в жидкости и капли жидкости, взвешенной в газе или другой несмешивающейся жидкости [5], изучали процесс возникновения, роста и отрыва новой паровой фазы в жидкости, а также влияние магнитного поля на форму, размеры и частоту образования новой фазы.

Материалы и методы исследования

Экспериментальная установка, служащая для наблюдения за процессом образования, роста и отрыва новой фазы, в жидкости с магнитной проницаемостью, существенно отличающейся магнитной проницаемостью от несущей среды, представлена на рис. 1. Контейнер с МЖ 1 подсоединялся к каналу 2 капиллярного размера (1 мм), выполненному в центральной части немагнитной горизонтальной пластины 3 (пластина была изготовлена из немагнитной стали). Указанная пластина являлась дном стеклянного ци-

линдрического контейнера 4, в который наливался технический глицерин. Система сообщающихся сосудов 5, служащая для создания регулируемого давления, соединялась с контейнером 1 и осуществляла подачу магнитной жидкости в канал 2 горизонтальной стальной пластины.

Магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца 7 ориентированными так, чтобы силовые линии магнитного поля были либо параллельны направлению действия силы тяжести (вертикальное магнитное поле), либо перпендикулярны ему (горизонтальное магнитное поле).

Под постоянным давлением магнитная жидкость через капиллярный канал поступала в объем

глицерина. Когда объем магнитной жидкости достигал некоторого критического значения и выталкивающая сила Архимеда становилась больше силы, удерживающей ее на поверхности пластины, капля МЖ отрывалась и всплывала в прозрачном глицерине. В процессе наблюдений проводилось измерение объема отрывающейся части каплей МЖ и частоты их отрыва.

Объем отрывающихся каплей МЖ 6 при действии однородного постоянного магнитного поля различной напряженности вычислялся по их форме и линейным размерам на кадрах высокоскоростной съемки, которая велась на видеокамеру 8 с частотой 600 кадров в секунду.

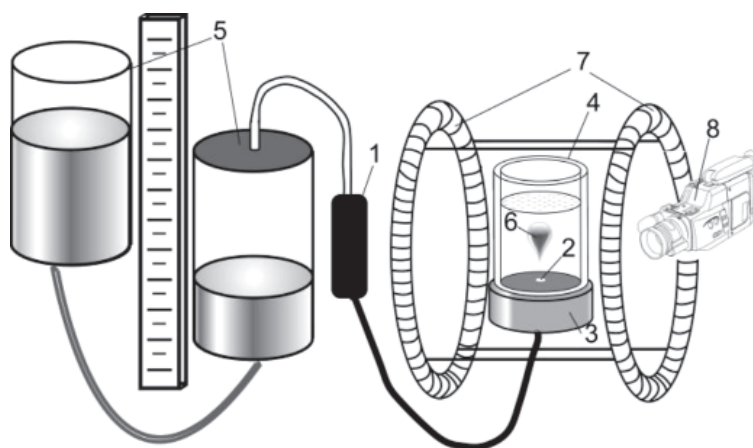


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – контейнер с магнитной жидкостью; 2 – капиллярный канал; 3 – горизонтальная стальная немагнитная пластина; 4 – стеклянный цилиндрический контейнер с техническим глицерином; 5 – система сообщающихся сосудов с водой; 6 – всплывающая капля магнитной жидкости; 7 – катушки Гельмгольца; 8 – скоростная видеокамера

Частота отрыва каплей МЖ от пластины измерялась при 5 различных значениях давления в диапазоне от 1,7 до 3,1 кПа. Под частотой отрыва каплей понималось количество каплей МЖ, оторвавшихся от поверхности в единицу времени. В экспериментах применялась МЖ «магнетит в керосине». Плотность МЖ составляла 1183 кг/м³. Коэффициент межфазного натяжения на границе магнитная жидкость-глицерин измерялся методом сидящей капли, его значение $\sigma = 15,1 \cdot 10^{-3}$ Н/м. В качестве прозрачной немагнитной жидкости использовался технический глицерин с плотностью 1227 кг/м³.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлен график изменения объема каплей МЖ, отрывающихся от горизонтальной пластины, с увеличением напряженности внешнего магнитного поля. Из графика видно, что с увеличением напряженности вертикального магнитного поля (кривая 1) объем отрывающейся капли монотонно убывает. Так, при напряженности магнитного поля 6 кА/м объем капли становится на 50% меньше объема капли без внешнего магнитного поля. В горизонтальном магнитном поле (кривая 2) увеличение напряженности от 0 до 6 кА/м,

напротив, приводит к увеличению объема отрывающейся капли МЖ. В указанном интервале напряженности магнитного поля объем отрывающейся капли магнитной жидкости возрастает на 16%.

Графики зависимости частоты отрыва каплей МЖ от давления в капилляре, полученные в различных по напряженности горизонтальных магнитных полях, представлены на рис. 3. Из графика видно, что частота отрыва каплей МЖ возрастает с увеличением давления в канале. При этом с увеличением напряженности магнитного поля частота отрыва каплей возрастает на 40%.

Можно дать следующее объяснение результатам эксперимента. Условие механического равновесия капли МЖ, сидящей на твердой поверхности в глицерине, будет определяться равенством капиллярной силы, удерживающей ее на поверхности, и силы Архимеда, выталкивающей ее из объема глицерина:

$$\sigma l = \Delta \rho V; \quad (1)$$

здесь σ – коэффициент межфазного натяжения, l – периметр основания капли, $\Delta \rho$ – разность плотностей глицерина и магнитной

жидкости, g – ускорение свободного падения, V – объем капли МЖ. Из (1) следует, что объем капли V зависит от периметра основания капли l на поверхности пластины, который меняется, в свою очередь, с изменением величины приложенного магнитного поля. Это подтверждают визуальные наблюдения за формой основания капли, представленные на рис. 4. На этом рисунке изображены капли МЖ (вид сверху), расположенные на горизонтальной пластине. Верхний ряд

снимков получен в вертикальном магнитном поле. Силовые линии магнитного поля перпендикулярны плоскости рисунка. Нижний ряд рисунков получен в горизонтальном магнитном поле. Силовые линии магнитного поля лежат в плоскости рисунка и направлены слева направо. На фотоснимках *a* показаны капли МЖ без внешнего магнитного поля. Фотоснимки *b* и *c* показывают капли МЖ в магнитных полях напряженностью 3 и 6 кА/м соответственно.

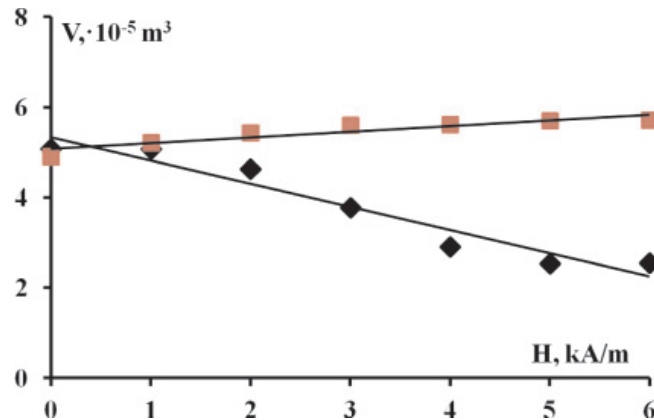


Рис. 2. Изменение объема капель магнитной жидкости в момент их отрыва от горизонтальной поверхности: 1 – вертикальное магнитное поле; 2 – горизонтальное магнитное поле

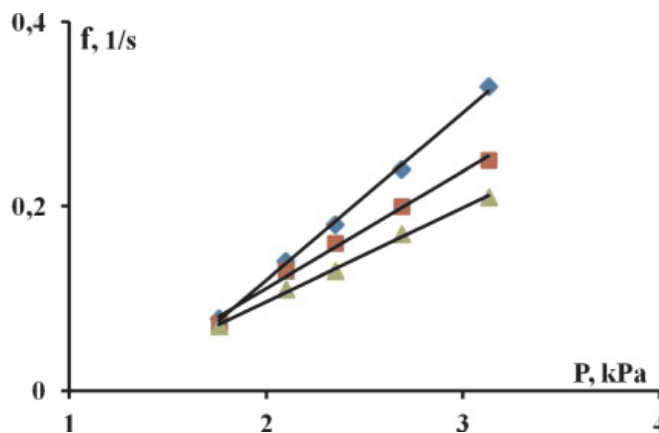


Рис. 3. Графики зависимости частоты отрыва капли магнитной жидкости от величины давления в капиллярном канале, полученные в различных по величине горизонтальных магнитных полях, H : 1 – 0 кА/м; 2 – 1,4 кА/м; 3 – 2,8 кА/м

Видно, что в вертикальном магнитном поле периметр основания капли уменьшается с увеличением магнитного поля. В горизонтальном магнитном поле периметр основания капли увеличивается за счет удлинения пятна контакта капли с поверхностью в направлении приложенного магнитного поля.

Обычно под частотой отрыва новой паровой фазы при кипении жидкостей понимают величину $f = 1/(\tau_{\text{ожид}} + \tau_{\text{роста}})$. Здесь

$\tau_{\text{ожид}}$ – время между моментом отрыва новой фазы от поверхности и последующим ее зарождением, $\tau_{\text{роста}}$ – время роста новой фазы до момента ее отрыва. В нашем случае $\tau_{\text{ожид}} = \text{const}$, так как МЖ поступает в капилляр при постоянном давлении, а $\tau_{\text{роста}}$ зависит от периметра основания капли.

Внешнее магнитное поле, изменяя периметр l основания капли, изменяет и значение объема капли, при котором она отрывается от поверхности пластины. Так

как при постоянном давлении в капилляре будет изменяться время роста капли $\tau_{\text{роста}}$ до достижения ею отрывного объема V , это будет приводить в свою очередь к изменению частоты отрыва капель МЖ. Таким образом, увеличение периметра основания капли l в горизонтальном магнитном поле

приводит к возрастанию удерживающей силы и, как следствие, увеличению отрывного объема капли и уменьшению частоты отрыва капель. Напротив, уменьшение l в вертикальном магнитном поле уменьшает величину удерживающей силы, увеличивая частоту отрыва капель.

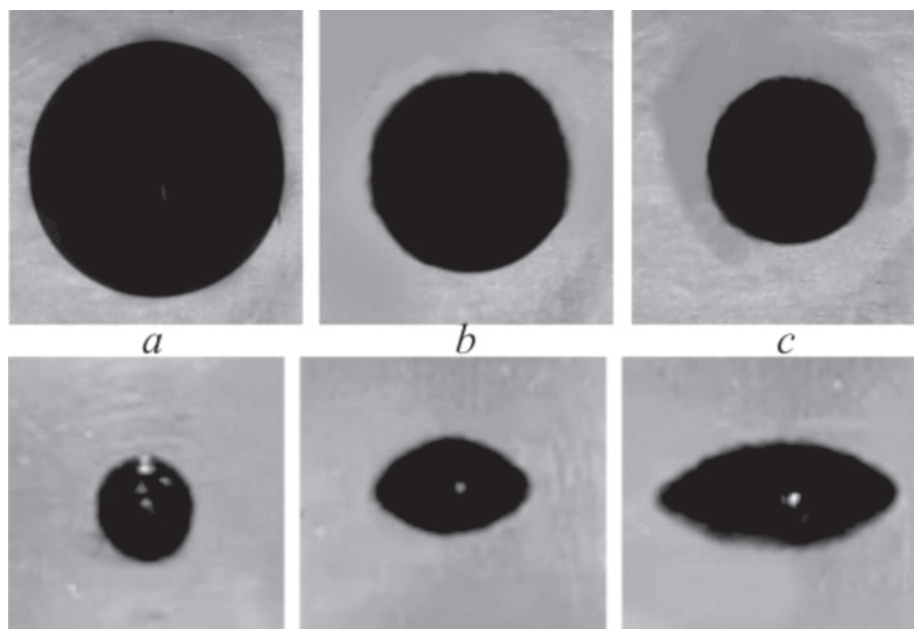


Рис. 4. Изменение формы и размеров капли магнитной жидкости в магнитном поле: $a - 0 \text{ кА/м}$; $b - 3 \text{ кА/м}$; $c - 6 \text{ кА/м}$

Теоретический анализ влияния магнитного поля на форму и объем капли магнитной жидкости

Рассчитаем равновесную форму капли магнитной жидкости, находящейся на горизонтальной пластине, в объеме не-

магнитной жидкости во внешнем однородном магнитном поле. Условие равновесия границы раздела намагничивающаяся жидкость-немагнитная среда во внешнем магнитном поле может быть описано уравнением [8]:

$$\Delta \rho g z - \mu_0 \int_{H_0}^H M dH - \frac{1}{2} \mu_0 (\overline{Mn})^2 + \sigma \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] = C. \tag{2}$$

Здесь $\Delta \rho$ – разность плотностей магнитной и несущей жидкостей; g – ускорение свободного падения; z – вертикальная координата; μ_0 – магнитная постоянная; M – намагниченность МЖ; H – напряженность магнитного поля; \vec{n} – единичный вектор нормали к межфазной поверхности; σ – межфазное натяжение; R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхности раздела намагничивающаяся жидкость-немагнитная среда; C – постоянная величина. Первое слагаемое в выражении (2) – гидростатическое давление, второе – давление, обусловленное магнитным полем, третье – скачок давления на границе раздела магнитная-немагнитная среда.

Рассмотрим случай, когда капля находится во внешнем однородном магнитном

поле, направленном горизонтально. Допустим, что распределение магнитного поля в окрестности капли МЖ в момент ее отрыва удовлетворяет соотношениям, справедливым для бесконечного цилиндра [1]:

$$\begin{aligned} H_\varphi &= H_0 \left(k \frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \sin \varphi; \\ H_r &= H_0 \left(k \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \cos \varphi; \\ k &= \frac{\mu_t - \mu_l}{\mu_t + \mu_l}. \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь H_ϕ и H_r – угловая и радиальная компоненты магнитного поля в цилиндрической системе координат; ϕ – полярный угол, отсчитываемый от направления внешнего магнитного поля H_0 ; R – радиус цилиндра; r – расстояние от оси цилиндра до точки, в которой определяются компоненты магнитного поля; μ_i – магнитная восприимчивость цилиндра; μ_l – магнитная восприимчивость

окружающей цилиндра среды. Это допущение можно считать справедливым для состояния капли перед ее распадом на две части: отрывающуюся часть и часть, остающуюся на поверхности. В этот момент форма капли слабо отличается от цилиндрической. С учетом распределения поля (3) проекция уравнения (2) на плоскость xOz декартовой системы координат примет вид

$$\Delta\rho gz - \mu_0 \chi H_0^2 - \frac{2\mu_0 \chi^2 H_0^2}{(2+\chi)^2} + \sigma \frac{x \frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{dz}{dx} \left(1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right)}{x \left(1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}} = 0, \quad (4)$$

проекция уравнения (2) на плоскость yOz :

$$\Delta\rho gz - \frac{2\mu_0 \chi^2 H_0^2}{(2+\chi)^2} + \sigma \frac{y \frac{d^2 z}{dy^2} + \frac{dz}{dy} \left(1 + \left(\frac{dz}{dy} \right)^2 \right)}{y \left(1 + \left(\frac{dz}{dy} \right)^2 \right)^{3/2}} = 0. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5), описывающие форму капли МЖ во внешнем горизонтальном магнитном поле, решались численно. На

рис. 5 показаны интегральные кривые уравнения (4) в магнитных полях различной напряженности в плоскости xOz .

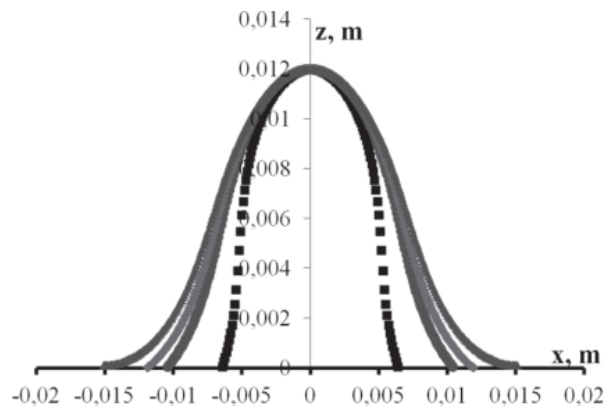


Рис. 5. Изменение формы капли магнитной жидкости высотой $z = 0,012$ м в горизонтальном магнитном поле в проекции на плоскость xOz :
1 – 0 кА/м; 2 – 1 кА/м; 3 – 1,2 кА/м; 4 – 1,3 кА/м

Видно, что длина основания капли возрастает в направлении приложенного магнитного поля с увеличением его напряженности. Интегральные кривые уравнения (5) показывают, что основание капли удлиняется в направлении, перпендикулярном вектору магнитного поля, существенно меньше. Это соответствует изменению формы основания капли, приведенному на рис. 4.

По полученным решениям был произведен расчет объема капли методом попереч-

ных сечений, который показал соответствие характера изменений объема капли МЖ, наблюдаемых в экспериментах и полученных в результате расчета.

Заключение

Экспериментально найдены частота образования и объем капель магнитной жидкости, растущих в немагнитной прозрачной среде под воздействием однородного постоянного магнитного поля. Эксперимен-

тально определен характер деформации основания капли магнитной жидкости на горизонтальной поверхности и дано объяснение влиянию магнитного поля на процессы образования, роста и отрыва капель магнитной жидкости в объеме немагнитной среды. В результате сделанных допущений решено уравнение равновесия межфазной поверхности магнитной жидкости и теоретически определено влияние магнитного поля на форму основания капли магнитной жидкости, сидящей на горизонтальной поверхности, и на величину ее объема в преддверии отрыва капли от поверхности.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-01-00051-а).

Список литературы

1. Блум Э.Я. Магнитные жидкости / Э.Я. Блум, М.М. Майоров, А.О. Цеберс. – Рига: «Зинатне», 1989. – 386 с.
2. Кобозев М.А., Симоновский А.Я. Метод измерения, экспериментальная установка и результаты измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, № 11. – С. 31–38.
3. Яновский А.А. Тепло- и массоперенос при кипении магнитной жидкости на неограниченной поверхности с точечным подводом тепла // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. – 2011. – № 4-3. – С. 1289–1290.
4. Яновский А.А., Симоновский А.Я. Влияние однородного магнитного поля на теплообмен при кипении магнитной жидкости на неограниченной поверхности // Вестник Ставропольского государственного университета. – 2011. – № 6-1. – С. 272–278.
5. Adamson A.W., Gast A.P. Physical chemistry of surfaces. New-York, A Willey-Interscience publ., 1997, 784 p.
6. Gogosov V.V., Simonovskii A.Y., Smolkin R.D. Quenching and separation in magnetic fluids // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1990. – № 85. – P. 227–232.
7. Liu J., Gu J., Lu M., Liu H., Lian Z. Experimental study of pool boiling heat transfer of water-based magnetic fluid on a horizontal heater // Heat Transfer – Asian Research. – 2005. – Vol. 3, № 34. – P. 135–207.
8. Rosensweig R.E. Ferrohydrodynamics. – Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1985. – 344 p.

References

1. Blum E. Ya. Magnitnye zhidkosti [Magnetic liquids]. Riga, Zinatne, 1989. 386 p.
2. Kobozev M.A., Simonovskii A.Ya. ZHTF–Journal of Applied Physics, 2007, Vol. 77, no11, pp. 31–38.
3. Yanovskiy A.A. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo–Vestnik UNN, 2011, no. 4–3, pp. 1289–1290.
4. Yanovskiy A.A., Simonovskiy A.Ya. Vestnik Stavropolskogo gosudarstvennogo universiteta, 2011, no. 6–1, pp. 272–278.
5. Adamson A.W., Gast A.P. Physical chemistry of surfaces. New-York, A Willey-Interscience publ., 1997. 784 p.
6. Gogosov V.V., Simonovskii A.Y., Smolkin R.D. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1990, no. 85, pp. 227–232.
7. Liu J., Gu J., Lu M., Liu H., Lian Z. Heat Transfer – Asian Research, 2005, Vol. 3 no. 34, pp. 135–207.
8. Rosensweig R. E. Ferrohydrodynamics. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1985. 344 p.

Рецензенты:

Диканский Ю.И., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей физики Северо-Кавказского федерального университета, г. Ставрополь;

Ерин К.В., д.ф.-м.н., доцент, заместитель директора Института естественных наук Северо-Кавказского федерального университета, г. Ставрополь.

Работа поступила в редакцию 21.06.2013.