

# К вопросу о влиянии магнитного поля на гидрогазодинамические процессы в кипящей магнитной жидкости

А. А. Яновский, А. Я. Симоновский, Е. М. Клименко

Северо-Кавказский федеральный университет,  
ул. Пушкина, 1, г. Ставрополь, 355009, Россия, e-mail: [aa.yanovskiy@yandex.ru](mailto:aa.yanovskiy@yandex.ru)

Экспериментально и теоретически моделировался процесс роста и отрыва пузырьков пара при кипении магнитной жидкости. 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 рассчитаны форма и объем капли магнитной жидкости, находящейся в немагнитной жидкой среде, при различных значениях действующего на нее магнитного поля.

*Ключевые слова:* магнитная жидкость, кипение, теплообмен, магнитное поле, пузырек пара.

УДК 537.84; 536.248.2

## ВВЕДЕНИЕ

Жидкие намагничивающиеся среды, представляющие собой устойчивую высокодисперсную гетерогенную систему, были синтезированы в 60-х годах прошлого века, и в настоящее время широко известны как магнитные жидкости. Дисперсионной средой в последних, как правило, являются керосин, толуол, кремнийорганические масла или вода. Дисперсионной фазой могут служить железо, кобальт, никель, магнетит, переходные металлы. Магнитные жидкости отличает их уникальная способность сочетать высокую намагниченность в магнитных полях при сохранении текучести. Большой интерес ученых и инженеров из разных стран к исследованию процессов теплообмена в кипящих магнитных жидкостях связан с перспективой применения их в качестве управляемой при помощи магнитного поля закалочной среды, а также с возможным использованием как теплоносителя в теплообменных аппаратах и тепловых устройствах [1–4]. Особого внимания с точки зрения анализа теплообмена в кипящих жидкостях, в том числе и магнитных, заслуживает исследование гидрогазодинамических процессов роста и отрыва пузырьков пара.

Существует несколько способов измерения частоты отрыва и объема пузырьков пара при кипении жидкостей [5]. Фотографический метод пригоден для исследования этого процесса с помощью высокоскоростных фото- и видеокамер для съемки процесса кипения жидкостей, находящихся в прозрачных емкостях, и последующего анализа отснятого материала. Индукционный метод, основанный на возбуждении в витках катушки ЭДС индукции при изменении магнитного

потока, возникающего при прохождении пузырьков пара через объем катушки [6], позволяет измерять частоту отрыва пузырьков пара при кипении в том числе и непрозрачных жидкостей. Использование фотографического метода для исследования гидрогазодинамических процессов кипения магнитных жидкостей возможно только при очень низкой концентрации дисперсионной фазы, когда магнитная жидкость становится прозрачной, а ее магнитные свойства практически исчезают. Индукционный метод пригоден для подсчета частоты отрыва пузырьков пара при кипении магнитных жидкостей, но не позволяет оценить изменение формы и объема пузырьков пара при воздействии внешних магнитных полей.

В настоящей работе, с учетом аналогии между поведением пузырька пара в жидкости и капли жидкости, взвешенной в газе или другой несмешивающейся жидкости [7], изучались процесс возникновения, роста и отрыва паровой фазы в магнитной жидкости, а также влияние магнитного поля на форму, размеры и частоту образования новой фазы.

Данный подход позволил сделать выводы о качественных закономерностях влияния магнитного поля на частоту отрыва, форму и объем пузырьков пара при кипении магнитной жидкости. Объектом исследования служила капля магнитной жидкости, находящаяся в немагнитной среде. В результате модельных экспериментов с этой каплей были получены зависимости частоты отрыва и объема последней от величины напряженности однородного магнитного поля. Также теоретически была найдена равновесная форма и рассчитан объем капли магнитной жидкости, находящейся на горизонтальной пластине

в немагнитной среде при различных значениях напряженности однородного постоянного магнитного поля.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная установка для моделирования процесса роста парового пузырька (рис. 1) состояла из контейнера с магнитной жидкостью 1, который подсоединялся к каналу 2 капиллярного размера (1 мм) в центральной части немагнитной горизонтальной пластины 3. В экспериментах использовалась магнитная жидкость магнетит в керосине с плотностью  $1183 \text{ кг/м}^3$ . К верхней части пластины был прикреплен стеклянный цилиндрический контейнер 4, куда наливался технический глицерин плотностью  $1227 \text{ кг/м}^3$ . Коэффициент межфазного натяжения на границе магнитная жидкость-глицерин измерялся методом сидящей капли, его значение  $\sigma = 15,1 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ . Система сообщающихся сосудов 5 с водой служила для создания давления и при соединении ее с контейнером 1 подавала магнитную жидкость в канал 2 стальной немагнитной пластины.

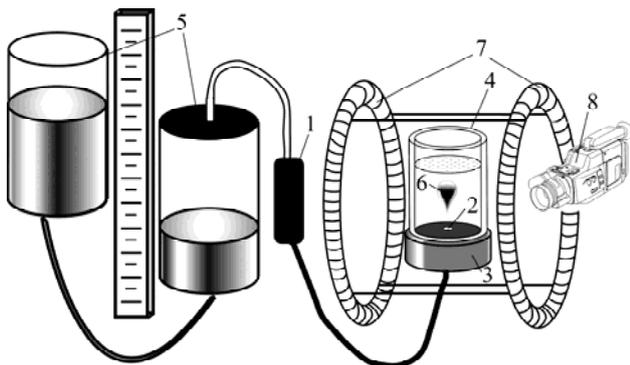


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Под постоянным давлением магнитная жидкость (МЖ) через капиллярный канал поступала в объем глицерина. Когда объем МЖ достигал некоторого критического значения и выталкивающая сила Архимеда становилась больше силы, удерживающей ее на поверхности пластины, капля магнитной жидкости отрывалась и всплывала в прозрачном глицерине. В процессе наблюдений проводилось измерение объема отрывающейся части каплей МЖ и частоты их отрыва. Объем отрывающихся каплей МЖ  $V$  при действии однородного постоянного магнитного поля различной напряженности, создаваемого катушками Гельмгольца 7, вычислялся по их форме и линейным размерам на стоп-кадрах высокоскоростной съемки, которая велась на видеокамеру 8 с частотой 600 кадров в секунду. Катушки Гельмгольца ориентировали так, чтобы силовые линии магнитного поля были либо па-

раллельны направлению действия силы тяжести (вертикальное магнитное поле), либо перпендикулярны (горизонтальное магнитное поле).

Частота отрыва каплей МЖ от пластины измерялась при пяти различных значениях давления в диапазоне от 1,7 до 3,1 кПа. Под частотой отрыва понималось количество каплей магнитной жидкости, оторвавшихся от поверхности за единицу времени.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлен график, описывающий изменение объема каплей магнитной жидкости, отрывающихся от горизонтальной пластины, с увеличением напряженности однородного магнитного поля. Из графика видно, что с увеличением напряженности вертикального магнитного поля (кривая 1) объем отрывающейся капли монотонно убывает. Так, при напряженности 6 кА/м объем капли становится на 50% меньше, нежели при отсутствии 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%.

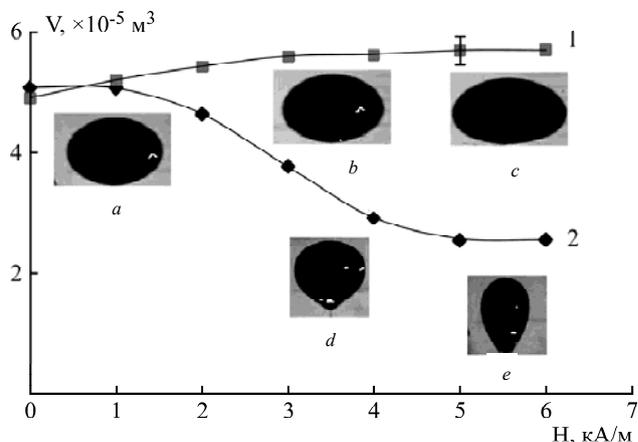


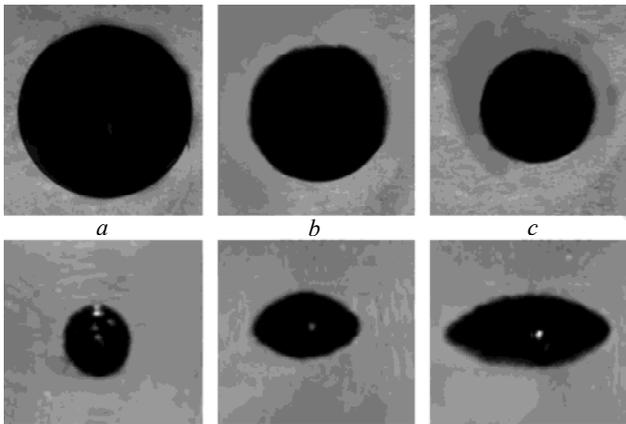
Рис. 2. Изменение объема каплей магнитной жидкости в момент их отрыва от горизонтальной поверхности. Магнитное поле: 1 – вертикальное; 2 – горизонтальное.

Приведенные на рис. 2 фотографии показывают каплю МЖ сразу после ее отрыва от поверхности. Фотоснимок *a* соответствует капле магнитной жидкости в случае, когда внешнее магнитное поле отсутствует. Фотоснимки *b* и *c* отражают изменение формы капли при изменении напряженности горизонтального магнитного поля от 3 до 6 кА/м соответственно. Кадры *d* и *e* показывают форму капли МЖ в вертикальном магнитном поле напряженностью 3 и 6 кА/м. Съемка велась перпендикулярно направлению

всплывания капли, как это показано на схеме экспериментальной установки.

Площадь контакта пузырьков пара с теплообменной поверхностью является параметром, существенно влияющим на теплообмен при кипении жидкостей. При этом периметр области контакта также играет важную роль, так как определяет силу, удерживающую пузырьки на теплообменной поверхности. Для оценки изменения площади области контакта пузырька с теплообменной поверхностью и периметра данной области в магнитном поле был проведен эксперимент с каплей магнитной жидкости, находящейся в состоянии механического равновесия на горизонтальной поверхности. Через капиллярный канал в стальной немагнитной горизонтальной пластине подавался некоторый фиксированный объем МЖ. Форма капли фиксировалась фотокамерой сверху, включалось магнитное поле, напряженность которого медленно увеличивали.

На рис. 3 представлены снимки капли МЖ в различном по напряженности и направлению магнитном поле. Верхний ряд снимков получен в вертикальном магнитном поле (силовые линии поля направлены перпендикулярно снимкам), нижний ряд – в горизонтальном (силовые линии направлены параллельно снимкам). На фотоснимках *a* показана капля магнитной жидкости без внешнего магнитного поля, на фотоснимках *b* – капля в магнитном поле напряженностью 3 кА/м, *c* – 6 кА/м. Верхний и нижний ряды снимков сделаны с разным увеличением.



**Рис. 3.** Изменение формы и размеров капли магнитной жидкости в магнитном поле напряженностью, кА/м: *a* – 0; *b* – 3; *c* – 6.

Согласно измерениям линейных размеров капель МЖ, представленных на снимках, периметр области контакта капли с поверхностью пластины и ее площадь существенно изменяются с увеличением напряженности однородного магнитного поля.

Так, при увеличении напряженности магнитного поля от 0 до 6 кА/м произошли следующие изменения данных величин. В вертикальном магнитном поле периметр области контакта уменьшился в 1,5, а ее площадь – в 2,3 раза. В горизонтальном поле периметр увеличился в 2, а площадь – в 3,5 раза.

Результаты измерения частоты отрыва капель МЖ, полученные в различных магнитных полях при увеличении давления в капилляре, представлены на рис. 4. Кривые 1, 2 и 3 получены в полях 0; 1,4 и 2,8 кА/м соответственно. Видно, что частота отрыва капель МЖ в каждом отдельном эксперименте возрастает с увеличением давления в канале вне зависимости от напряженности магнитного поля. Это объясняется тем, что с увеличением давления увеличивается скорость истечения жидкости из канала. Одновременно с этим уменьшается время роста  $\tau_{\text{роста}}$  капли. Это и приводит к увеличению частоты отрыва капель.

Вместе с тем с увеличением давления влияние магнитного поля на частоту отрыва капель возрастает. Так, при давлении 1,7 кПа частота отрыва капель магнитной жидкости не зависит от напряженности магнитного поля с точностью до величины ошибки измерений. При давлении 3,1 кПа с увеличением напряженности магнитного поля от 0 до 6 кА/м в вертикальном магнитном поле частота возрастает на 40%, а в горизонтальном уменьшается на 50%.

Результатам этих экспериментов можно дать следующее объяснение. 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:

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

Здесь  $\sigma$  – 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  $V$  является однозначной функцией периметра основания капли  $l$  на поверхности пластины. Периметр основания капли на поверхности пластины, как это следует из рис. 3, зависит от величины приложенного магнитного поля. Поэтому при постоянном давлении в капилляре, подающем МЖ, время роста капли  $\tau_{\text{роста}}$  до отрывного размера будет изменяться с изменением величины приложенного магнитного поля.

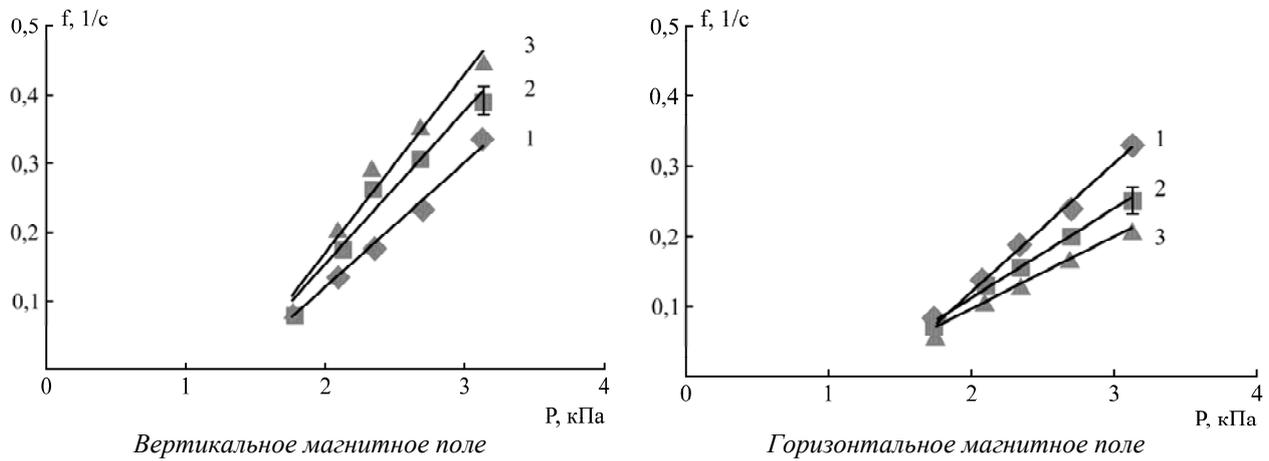


Рис. 4. Графики зависимости частоты отрыва капли магнитной жидкости от величины давления в капиллярном канале.

Частота отрыва капли МЖ от поверхности определяется выражением  $f = 1/(\tau_{\text{ожид}} + \tau_{\text{роста}})$ . Здесь  $\tau_{\text{ожид}}$  – время между моментом отрыва капли и зарождением новой. 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 ее объема, 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.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМЫ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Рассчитаем равновесную форму капли магнитной жидкости, находящейся на горизонтальной пластине, в объеме немагнитной жидкости во внешнем однородном магнитном поле. Условие равновесия границы раздела намагничивающаяся жидкость–немагнитная среда во внешнем магнитном поле может быть описано уравнением [9]:

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

Здесь  $\Delta \rho$  – разность плотностей глицерина и магнитной жидкости;  $z$  – вертикальная координата, определяющая высоту капли;  $M$  – намагниченность магнитной жидкости;  $H$  – напряжен-

ность магнитного поля;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали к межфазной поверхности;  $\sigma$  – коэффициент межфазного натяжения;  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны поверхности раздела намагничивающаяся жидкость–немагнитная среда, описываемые выражениями  $\frac{1}{R_1} = \frac{z''}{(1+z'^2)^{3/2}}$  и  $\frac{1}{R_2} = \frac{z'}{x(1+z'^2)^{1/2}}$ ,  $C$  – постоянная величина. Первое слагаемое в уравнении (2) – гидростатическое давление, действующее в магнитной жидкости, второе слагаемое – магнитное давление, возникающее в магнитном поле, третье слагаемое – скачок давления, связанный со скачком намагниченности на границе раздела магнитная–немагнитная среда, и четвертое слагаемое – лапласово давление, обусловленное кривизной поверхности границы раздела капли и окружающей ее среды.

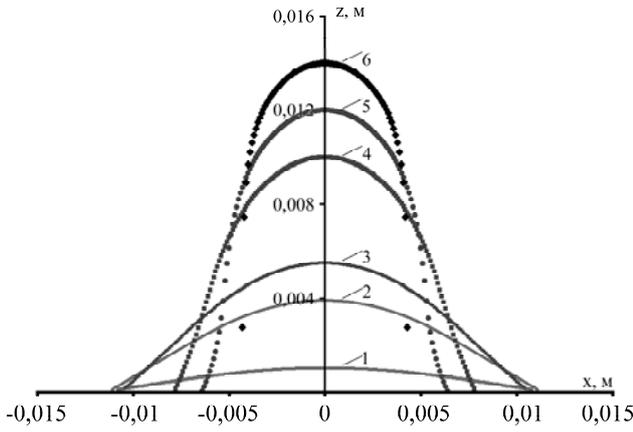
Рассмотрим случай, когда внешнее магнитное поле отсутствует. В отсутствие магнитного поля второе и третье слагаемые в выражении (2) равны нулю. И оно приобретает вид:

$$\alpha^2 \left( x \frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{dz}{dx} \left( 1 + \left( \frac{dz}{dx} \right)^2 \right) \right) = -2xz \left( 1 + \left( \frac{dz}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}. \quad (3)$$

Здесь введено обозначение  $\alpha = \frac{\sqrt{2\sigma}}{\sqrt{\Delta \rho g}}$  – капиллярная постоянная магнитной жидкости. Форма поверхности капли МЖ определяется этой величиной. В нашем случае – значение  $\alpha^2 = 4,9 \cdot 10^{-5}$ .

Уравнение (3) было решено численно – методом конечных разностей. Граничным условием при решении уравнения являлось значение высоты капли  $z(0)$ . Решения уравнения для различных значений высоты  $z(0)$  представлены на графике рис. 5.

Как видно из рисунка, с ростом высоты капли магнитной жидкости ширина ее основания уменьшается.



**Рис. 5.** Последовательность стадий роста капли МЖ при отсутствии магнитного поля: 1 – форма капли, полученная при граничном условии  $z(0) = 0,001$  м; 2 – 0,004 м; 3 – 0,006 м; 4 – 0,010 м; 5 – 0,012 м; 6 – 0,014 м.

Рассмотрим случай, когда капля находится во внешнем однородном магнитном поле, направленном горизонтально. В процессе роста при больших высотах  $z$  капли ее форма слабо отличается от цилиндрической. В этом случае можно сделать допущение, что распределение магнитного поля на границе магнитная–немагнитная среда соответствует распределению поля в окрестности намагничивающегося цилиндра [8]:

$$\begin{aligned} H_\varphi &= H_0 \left( k \frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \sin \varphi; \\ H_r &= H_0 \left( k \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \cos \varphi; \quad k = \frac{\mu_i - \mu_e}{\mu_i + \mu_e}. \end{aligned} \quad (4)$$

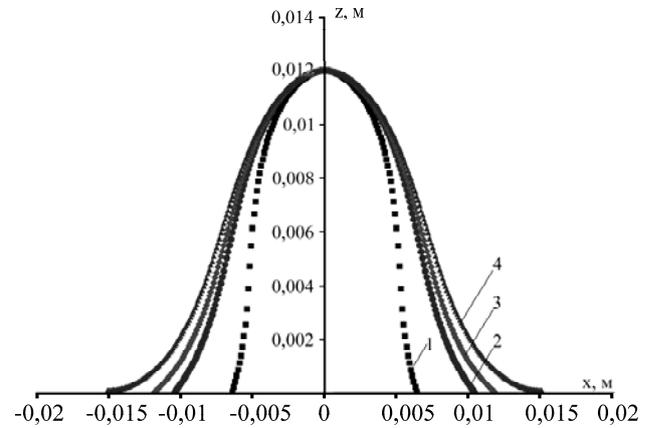
Здесь  $H_\varphi$  и  $H_r$  – угловая и радиальная компоненты магнитного поля в цилиндрической системе координат;  $\varphi$  – полярный угол, отсчитываемый от направления внешнего магнитного поля  $H_0$ ;  $R$  – радиус цилиндра;  $r$  – расстояние от оси цилиндра до точки, в которой определяются компоненты магнитного поля;  $\mu_i$  – магнитная восприимчивость цилиндра;  $\mu_e$  – магнитная восприимчивость окружающей цилиндра среды. С учетом данного распределения поля проекция уравнения (2) на плоскость  $xOz$  декартовой системы координат примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta p g z - \mu_0 \chi H_0^2 - \frac{2\mu_0 \chi^2 H_0^2}{(2 + \chi)^2} + \\ x \frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{dz}{dx} \left( 1 + \left( \frac{dz}{dx} \right)^2 \right) \\ + \sigma \frac{x \left( 1 + \left( \frac{dz}{dx} \right)^2 \right)^{3/2}}{x \left( 1 + \left( \frac{dz}{dx} \right)^2 \right)} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

на плоскость  $yOz$ :

$$\Delta p g z - \frac{2\mu_0 \chi^2 H_0^2}{(2 + \chi)^2} + \sigma \frac{y \frac{d^2 z}{dy^2} + \frac{dz}{dy} \left( 1 + \left( \frac{dz}{dy} \right)^2 \right)}{y \left( 1 + \left( \frac{dz}{dy} \right)^2 \right)} = 0. \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6), описывающие форму капли МЖ во внешнем горизонтальном магнитном поле в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, решались численно. Расчеты проводились для капли высотой  $z = 0,012$  м при разных значениях напряженности магнитного поля. Устойчивые решения уравнения (5) удалось получить в интервале напряженности магнитного поля от 0 до 1,3 кА/м, для уравнения (6) – в интервале от 0 до 2 кА/м. При увеличении величины напряженности поля вышеуказанных значений решение становилось неустойчивым. На рис. 6 показаны интегральные кривые решения уравнения (5), описывающие форму капли магнитной жидкости в магнитных полях различной напряженности в плоскости  $xOz$ .



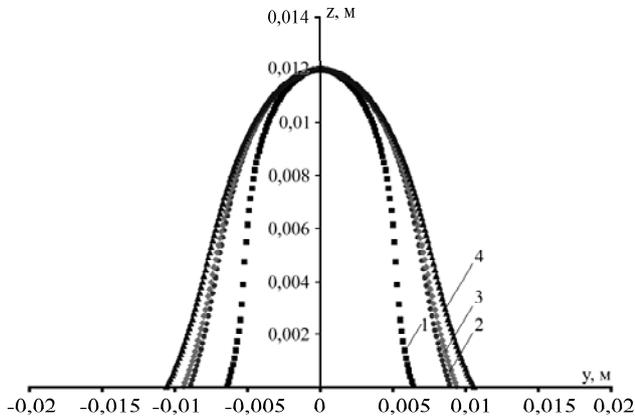
**Рис. 6.** Изменение формы капли магнитной жидкости высотой  $z = 0,012$  м в горизонтальном магнитном поле в проекции на плоскость  $xOz$ . 1 – 0 кА/м; 2 – 1 кА/м; 3 – 1,2 кА/м; 4 – 1,3 кА/м.

Согласно представленным на рис. 6 зависимостям, описывающим форму капли в проекции на плоскость  $xOz$ , ширина основания капли существенно возрастает с увеличением напряженности горизонтального магнитного поля. Так, в поле напряженностью 1,3 кА/м она в два раза больше, чем без внешнего магнитного поля.

На рис. 7 изображены интегральные кривые уравнения (6), описывающие форму капли МЖ в горизонтальном магнитном поле в интервале напряженности от 0 до 2 кА/м в плоскости  $yOz$ .

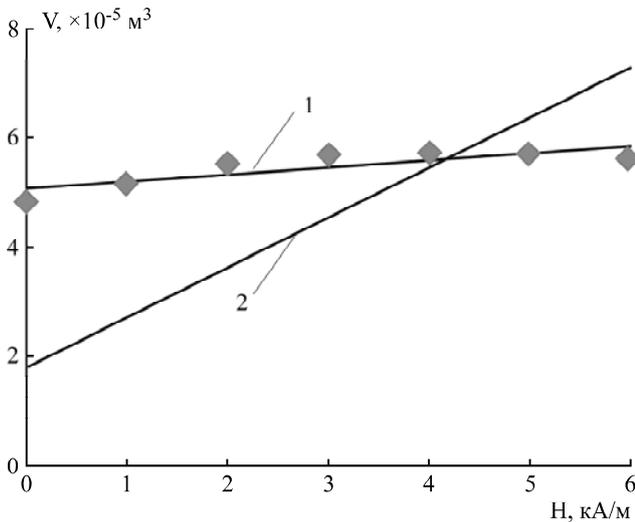
Из рисунка видно, что с увеличением напряженности магнитного поля ширина основания капли в плоскости  $yOz$  также увеличивается, но в меньшей степени, чем в плоскости  $xOz$ , в которой лежал вектор магнитного поля. Таким образом, решения уравнений (5) и (6) показывают, что ширина основания капли МЖ увеличивается не только вдоль плоскости, параллельной направлению действия силовых линий магнитного поля (плоскость  $xOz$ ), но и в плоскости, к ней перпендикулярной (плоскость  $yOz$ ). Отношение ширины основания капли в проекциях на плоскостях  $xOz$  и  $yOz$  меняется от 1 до 1,33 при из-

менении величины магнитного поля от 0 до 1,3 кА/м. То есть при отсутствии магнитного поля поперечными сечениями капли будут являться окружности. При включении же магнитного поля капля вытягивается в обоих направлениях, и ее поперечные сечения приобретают эллипсоидальную форму, как это и наблюдалось в эксперименте (см. рис. 3).



**Рис. 7.** Изменение формы капли магнитной жидкости высотой  $z = 0,012$  м в горизонтальном магнитном поле в проекции на плоскость  $yOz$ . 1 – 0 кА/м; 2 – 0,6 кА/м; 3 – 1,2 кА/м; 4 – 2 кА/м.

На рис. 8 представлены зависимости объема капли магнитной жидкости от величины внешнего однородного горизонтального магнитного поля. Зависимость 1 получена экспериментально, зависимость 2 – на основе решений уравнения (2) и вычисления объема капли жидкости методом поперечных сечений.



**Рис. 8.** Зависимость объема капли магнитной жидкости от напряженности внешнего горизонтального магнитного поля. 1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая зависимость.

Согласие между кривыми 1 и 2 на рисунке заключается в том, что и в эксперименте, и в расчете наблюдается рост объема капли с увеличением приложенного магнитного поля. Различие между этими кривыми связано с тем, что в экс-

перименте измерялся объем оторвавшейся части капли, а в расчетах определялся объем капли в магнитном поле на момент ее роста, когда распределение магнитного поля в системе можно было считать подобным распределению поля в окрестности намагничивающегося цилиндра.

Важно отметить, что, несмотря на то что рост капли МЖ на горизонтальной поверхности в описываемых экспериментах происходил за счет ее поступления через отверстие в пластине, а рост пузырька пара при кипении МЖ – за счет испарения со всей поверхности раздела пар-жидкость, есть все основания считать, что процессы роста и формирования капли и пузырька качественно и количественно очень близки. Действительно, характерные времена роста и отрыва капель в проводимых экспериментах и пузырьков пара, наблюдавшихся в работе [6], одинаковы (порядка 1 сек). Это означает, что инерционные силы и силы гидравлического сопротивления, возникающие при росте и отрыве капель и пузырьков, практически не различаются. Кроме того, слабо отличаются силы, влияющие на размеры и форму пузырька пара и капли магнитной жидкости, описываемые уравнением (2), так как величины, входящие в это уравнение, в «холодном» для капли и в «горячем» для пузырька случаях разнятся менее чем на 30%. Сказанное дает основание утверждать, что эксперименты по наблюдению за ростом и отрывом капли МЖ в немагнитной среде адекватно описывают поведение пузырька пара при кипении магнитной жидкости.

## ВЫВОДЫ

- Экспериментально найдены частота отрыва и отрывной объем капель МЖ, растущих в немагнитной прозрачной среде под воздействием однородного постоянного магнитного поля.
- Экспериментально и теоретически определена величина деформации основания капли МЖ на горизонтальной поверхности в магнитном поле и дано объяснение влиянию последнего на процессы образования, роста и отрыва капель МЖ в объеме немагнитной среды и пузырьков пара в намагничивающейся жидкости.
- Показано, что внешнее горизонтальное магнитное поле, изменяя периметр основания капли МЖ, изменяет время роста, отрывной диаметр и частоту отрыва капли от горизонтальной поверхности.
- Эти результаты позволяют считать, что аналогичные процессы будут наблюдаться при образовании, росте и отрыве пузырьков пара при кипении МЖ в магнитном поле.

*Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-01-00056).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gogosov V.V., Simonovskii A.Ya., Smolkin R.D. Quenching and Separation in Magnetic Fluids. *J Magn Magn Mater.* 1990, **85**, 227–232.
2. Bashtovoi V.S., Challant B., Volkova O.Y. Boiling Heat Transfer in Magnetic Fluids. *J Magn Magn Mater.* 1993, **122**, 305–308.
3. Xu L., Peng X.F. Fundamental Analysis of Boiling Heat Transfer of Magnetic Fluids in a Magnetic Field. *Heat Transfer – Asian Research.* 2002, **31**(2), 69–75.
4. 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, **34**(3), 135–207.
5. Несис Е.И. *Кипение жидкостей.* М.: Наука, 1973. 280 с.
6. Kobozev M.A., Simonovskii A.Ya. Formation Rate of Vapor Bubbles in Magnetic Fluid Boiling at a Single Vaporization Center: Measuring Technique and Experimental Setup. *Tech Phys.* 2007, **52** 1422–1428.
7. Adamson A.W., Gast A.P. *Physical Chemistry of Surfaces.* New-York: A Willey-Interscience publ., 1997. 784 p.
8. Rosensweig R.E. *Ferrohydrodynamics.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1985. 344.
9. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. *Магнитные жидкости.* М.: Химия, 1989. 240 с.

*Поступила 18.03.13  
После доработки 16.09.13*

### Summary

Processes of growth and separation of the vapor bubbles in the boiling magnetic liquid have been experimentally and theoretically modeled. Experimental results of the influence of a homogeneous constant magnetic field upon the volume and departure frequency of magnetic fluid drops from the horizontal surface in the transparent non-magnetic liquid (glycerin) are presented. The mechanism of that influence is explained. The shape and volume of magnetic liquid drops placed in the non-magnetic environment are theoretically calculated for various values of a magnetic field intensity.

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