

02;03

Метод измерения, экспериментальная установка и результаты измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования

© М.А. Кобозев,¹ А.Я. Симоновский²

¹ Ставропольский государственный аграрный университет,
355017 Ставрополь, Россия
e-mail: mikeyk@yandex.ru

² Институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119192 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 6 октября 2006 г. В окончательной редакции 11 апреля 2007 г.)

Предложен и обоснован метод измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования в однородном внешнем магнитном поле, на основе которого разработана и изготовлена экспериментальная установка. Экспериментально показано, что магнитное поле существенно влияет на частоту отрыва пузырьков пара в широком интервале температур недогрева жидкости до температуры насыщения. Произведена оценка отрывного диаметра пузырька пара при отрыве в магнитном поле.

PACS: 47.65.-d, 75.50.Mm

Введение

Одним из перспективных применений магнитной жидкости является использование их в качестве закалочных сред в процессах термической обработки металлов [1,2]. Закалочная среда в процессе охлаждения в ней детали претерпевает различные режимы кипения — пленочный, переходный и пузырьковый. Однако несмотря на более чем 40-летнюю историю изучения магнитной жидкости механизмы влияния магнитного поля на процессы кипения магнитной жидкости остаются малоизученными. В связи с применением магнитной жидкости в качестве закалочной среды изучение влияния магнитного поля на процессы образования пузырьков пара при пузырьковом кипении магнитной жидкости представляется важной задачей теплофизики магнитных жидкостей.

В данной работе исследуется влияние однородного магнитного поля на процессы образования пузырьков пара при капении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования.

1. Особенности применяемого метода измерений

Наиболее эффективные методы изучения микрохарактеристик пузырькового кипения жидкостей — оптические [3]. Однако магнитные жидкости становятся прозрачными только в тонких слоях или при очень малых концентрациях магнитной фазы. Известны способы измерения частоты образования паровых пузырей в непрозрачных жидкостях с помощью различного рода электродов. Применение электродов эффективно в случае хорошо проводящих жидкостей. Магнитная жидкость на основе керосина обладает слабой проводимо-

стью. Кроме того, применение электродов для изучения микрохарактеристик пузырькового кипения магнитных жидкостей ограничено возможностью возникновения в условиях экспериментов градиентов магнитного поля, имеющих горизонтальную составляющую, что приведет к смещению пузырьков пара при движении после отрыва относительно точки первоначальной установки электродов, т.е. к потере информации.

Поэтому в настоящей работе изучены частоты образования пузырьков пара проводилось с использованием в качестве измерительной ячейки системы индукционных катушек. Метод измерения основан на возбуждении в витках катушки ЭДС индукции при изменении магнитного потока через поверхность витков при образовании в объеме намагничивающейся среды, заполняющей катушку, немагнитного включения, граница которого перемещается со временем.

Схема метода измерения приведена на рис. 1. На теплоотдающей поверхности 1, в магнитной жидкости 2, образуется пузырек пара 3. В последующий момент времени пузырек пара отрывается от нагревателя и попадает в объем измерительной катушки. Возникновение пузырька с магнитной проницаемостью μ_a в объеме жидкого магнетика с магнитной проницаемостью μ_i приведет к искажению магнитного поля, первоначально существующего в рабочем зазоре катушки. Магнитный поток через поверхность Σ витка катушки будет определяться выражением

$$\Phi = \mu_i \int_{\Sigma} H_n d\Sigma. \quad (1)$$

Здесь H_n — нормальная к плоскости витка компонента магнитного поля.

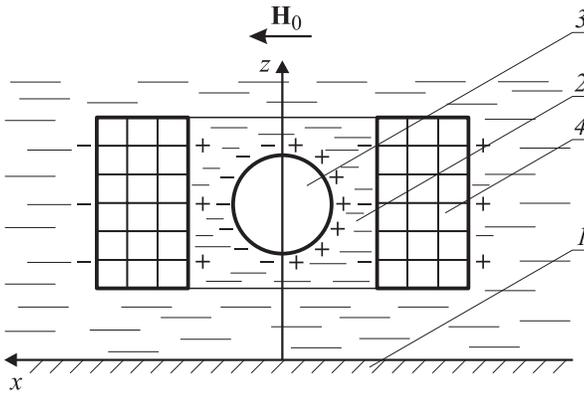


Рис. 1. Схема для расчета вкладов в Z -компоненту магнитного поля в произвольной точке объема индукционной катушки от распределенных по внутренней поверхности катушки фиктивных магнитных зарядов: 1 — теплоотдающая поверхность; 2 — магнитная жидкость; 3 — паровой пузырек; 4 — индукционная катушка.

Покажем, что при направлении внешнего магнитного поля вдоль поверхности нагрева и симметричном расположении пузырька относительно оси симметрии витка катушки поток магнитного поля через витки катушки равен нулю. Введем фиктивный магнитный заряд с поверхностной плотностью σ_m (σ_m равно скачку нормальной компоненты намагниченности жидкости на межфазной поверхности пар-жидкость). Магнитное поле \mathbf{H} в произвольной точке с радиусом-вектором \mathbf{r} в объеме катушки определится из выражения

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \int_S \frac{\sigma_m(\mathbf{r}_S)(\mathbf{r} - \mathbf{r}_S)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_S|^3} dS. \quad (2)$$

Здесь \mathbf{r}_S — радиус-вектор точки поверхности S границы раздела магнитной жидкости и немагнитной среды.

Распределение магнитного поля и намагниченности симметрично в рассматриваемом случае относительно плоскости, проходящей через ось катушки и перпендикулярной направлению приложенного внешнего магнитного поля. Введем декартову систему координат, ось z которой совпадает с осью катушки и направлена вертикально вверх. Ось x совпадает с направлением внешнего магнитного поля. Представим магнитное поле в любой точке объема катушки в виде суммы полей от зарядов с одной и другой стороны плоскости симметрии катушки

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \int_{S_1} \frac{\sigma_m(\mathbf{r}_S)(\mathbf{r} - \mathbf{r}_S)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_S|^3} dS + \int_{S_2} \frac{\sigma_m(\mathbf{r}_S)(\mathbf{r} - \mathbf{r}_S)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_S|^3} dS. \quad (3)$$

Здесь S_1 — часть поверхности S , расположенная на схеме слева от плоскости симметрии системы; S_2 расположена с другой стороны. Вклад в поток магнитного

поля через рассматриваемый виток катушки дает только Z -компонента поля, для которой с учетом (3) запишем

$$H_Z(x, y, z) = \int_{S_1} \frac{\sigma_m(x_S, y_S, z_S)(z - z_S)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_S|^3} dS + \int_{S_2} \frac{\sigma_m(x_S, y_S, z_S)(z - z_S)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_S|^3} dS, \quad (4)$$

где $(r - r_S)^2 = (x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + (z - z_S)^2$.

В точке с координатами $(-x, y, z)$, симметрично расположенной к точке (x, y, z) относительно плоскости симметрии системы, Z -компонента магнитного поля имеет вид

$$H_Z(-x, y, z) = \int_{S_1} \frac{\sigma_m(-x_S, y_S, z_S)(z - z_S)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_S|^3} dS + \int_{S_2} \frac{\sigma_m(-x_S, y_S, z_S)(z - z_S)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_S|^3} dS, \quad (5)$$

где $(r - r_S)^2 = (x + x_S)^2 + (y + y_S)^2 + (z - z_S)^2$.

Вследствие симметричной поляризации объема жидкости знак нормальной компоненты намагниченности на границе раздела магнитная жидкость-немагнитная среда в левой и правой частях объема разный, поэтому

$$\sigma_m(x_S, y_S, z_S) = -\sigma_m(-x_S, y_S, z_S). \quad (6)$$

Уравнения (4) и (5) можно привести к виду

$$H_Z(x, y, z) = \int_{S_1} \frac{\sigma_m(x_S, y_S, z_S)(z - z_S)}{[(x + x_S)^2 + (y + y_S)^2 + (z + z_S)^2]^{3/2}} dS + \int_{S_2} \frac{\sigma_m(-x_S, y_S, z_S)(z - z_S)}{[(x + x_S)^2 + (y + y_S)^2 + (z + z_S)^2]^{3/2}} dS; \quad (7)$$

$$H_Z(-x, y, z) = \int_{S_1} \frac{\sigma_m(x_S, y_S, z_S)(z - z_S)}{[(x + x_S)^2 + (y + y_S)^2 + (z + z_S)^2]^{3/2}} dS + \int_{S_2} \frac{\sigma_m(-x_S, y_S, z_S)(z - z_S)}{[(x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + (z + z_S)^2]^{3/2}} dS, \quad (8)$$

откуда с учетом (6) получаем

$$H_Z(x, y, z) = -H_Z(-x, y, z),$$

поэтому интегрирование в уравнении (1) при симметричном расположении пузырька относительно оси симметрии катушки даст магнитный поток $\Phi = 0$.

При симметричном расположении поверхности пузырька относительно стенок катушки при направлении намагничивающего поля вдоль поверхности витка катушки регистрация пузырька может произойти только

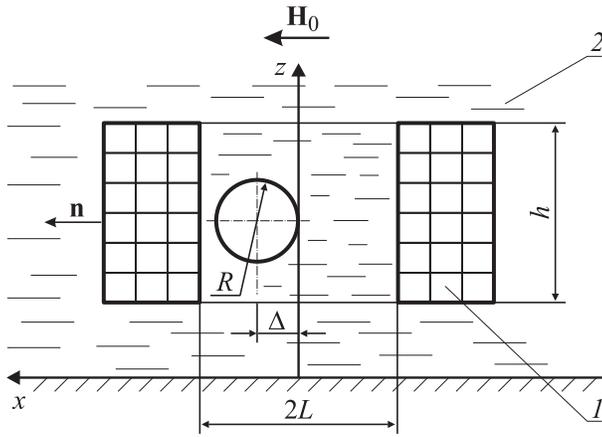


Рис. 2. Схема для расчета величины магнитного потока Φ через витки индукционной катушки при произвольном относительно оси катушки положении растущего пузырька.

при движении его в объеме катушки со смещением относительно оси симметрии.

Факторы, влияющие на возникновение ЭДС в индукционном датчике в общем случае расположения пузырька относительно оси симметрии катушки в магнитном поле, направленном вдоль поверхности нагрева, можно выявить на основе анализа размерностей.

Схема для расчета приведена на рис. 2. В связи с малым различием магнитных проницаемостей материала обмотки катушки и пузырька пара область пространства, занимаемую этими объектами, обозначим номером 1. Область пространства, занимаемую магнитной жидкостью — 2. Введем обозначения: L — радиус витка катушки, R — радиус пузырька пара; Δ — смещение в расположении оси пузырька относительно оси симметрии катушки; h — высота катушки; Σ — площадь отдельного витка катушки; \mathbf{n} — вектор нормали к границе раздела областей 1 и 2.

Во внешнем магнитном поле \mathbf{H}_0 , направленном горизонтально, поле в объеме катушки может быть представлено в виде

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}', \quad (9)$$

где \mathbf{H}' — магнитное поле, создаваемое намагниченностью магнитной жидкости.

Магнитное поле, приведенное к безразмерному виду, зависит от следующих параметров системы:

$$\mathbf{H}' = H_0 \cdot \mathbf{H}^*(r, \Delta, L, h, R, \mu). \quad (10)$$

На основании π -теоремы теории размерностей количество переменных в зависимости (10) можно сократить:

$$\mathbf{H}' = H_0 \cdot \mathbf{H}^*\left(\frac{r}{R}, \frac{R}{L}, \frac{\Delta}{L}, \frac{h}{L}, \mu\right). \quad (11)$$

Магнитный поток через поверхность всех витков катушки определится из выражения

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_0^h \mu n(z) dz \int_{\Sigma} \mathbf{H}_n d\Sigma \\ &= \int_0^{h/R} \mu N \frac{R}{h} H_0 R^2 \int_{\Sigma^*} \mathbf{H}_n^*\left(\frac{\mathbf{r}}{R}, \frac{R}{L}, \frac{\Delta}{L}, \mu\right) d\Sigma^* dZ^*. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $n(z) = N/R$ — число витков на единицу длины катушки; $Z^* = Z/R$ — безразмерная вертикальная координата витка катушки; $d\Sigma^*$ — элемент площади витка катушки, приведенный к безразмерному виду, с использованием характерного размера R .

Введем следующую безразмерную функцию потока магнитного поля через катушку:

$$\Psi = \frac{R}{h} \int_0^{h/R} \int \mathbf{H}_n^*\left(\frac{\mathbf{r}}{R}, \frac{R}{L}, \frac{\Delta}{L}, \mu\right) d\Sigma^*, dZ^*. \quad (13)$$

Интегрирование в (13) производится по площади витка, тогда поток магнитного поля через катушку с учетом (13) представится в виде

$$\Phi = \mu H_0 R^2 N \Psi\left(\frac{R}{h}, \frac{R}{L}, \frac{\Delta}{L}, \mu, \frac{h}{L}\right). \quad (14)$$

Предположим, что размер R пузырька мал по сравнению с радиусом катушки L , разложим функцию Ψ по малому параметру $R/L \ll 1$:

$$\Psi = \Psi_0 + \frac{R}{L} \Psi_1 + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \Psi_2 + \dots \quad (15)$$

При стремлении размера пузырька к нулю возмущения поля в системе исчезают. Тогда из условия равенства нулю магнитного потока через витки катушки при отсутствии возмущений поля в системе получим $\Psi_0 = 0$. Пренебрегая членами второго порядка малости в уравнении (15), для магнитного потока можно записать выражение

$$\Phi = \mu H_0 R^2 N \frac{R}{L} \Psi_1\left(\frac{\Delta}{L}, \frac{R}{h}, \frac{h}{L}, \mu\right). \quad (16)$$

Далее, приняв, что смещение пузырька пара относительно оси симметрии катушки мало по сравнению с радиусом витка катушки, т.е. $\frac{\Delta}{L} \ll 1$, окончательно уравнение для магнитного потока можно записать в виде

$$\Phi = \mu H_0 N R^2 \frac{R}{L} \frac{\Delta}{L} \Psi_{12}\left(\mu, \frac{R}{h}, \frac{h}{L}\right). \quad (17)$$

На основании этого выражения можно сделать заключение, что величина индукционного сигнала в катушке будет зависеть от размеров проходящего через катушку пузырька и его смещения относительно оси катушки.

2. Экспериментальная установка

Для измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости в однородном магнитном поле была создана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 3. Магнитная жидкость заполняла внутреннее пространство цилиндрического контейнера 1 диаметром 20, высотой 150 мм. Жидкость, применяемая в эксперименте, представляла собой коллоидный раствор магнетика в керосине и имела плотность 1447 kg/m^3 с намагниченностью насыщения 50.9 kA/m , эта жидкость считалась концентрированной (далее „жидкость № 1“). Путем разбавления жидкости № 1 керосином в два и четыре раза получали два других состава жидкости № 2 и 3 соответственно. Дном контейнера служила фторопластовая пробка 2, через осевое отверстие которой пропускали медный стержень 3 диаметром 1.5 мм. Торец стержня, примыкающий к объему магнитной жидкости, служил теплоотдающей поверхностью. Тепло к стержню подавалось от электрического нагревателя 4.

Для теплоизоляции боковую поверхность стержня покрывали слоем асбеста, что обеспечивало преимущественно осевое направление теплового потока в стержне. На торцевой поверхности стержня 3, примыкающей к объему магнитной жидкости, устанавливали спай хромель-копелевой термопары 5. Электроды термопары пропускали через осевой канал в стержне диаметром 0.5 мм.

На расстоянии 7 мм от теплоотдающего торца стержня внутри него устанавливали спай второй хромель-копелевой термопары 6. Контейнер 1 с жидкостью помещали с межполюсное пространство электромагнита. Диаметр полюсных наконечников 7 электромагнита

составлял 100 мм. Расстояние между полюсами электромагнита — 66 мм.

На поверхности контейнера с жидкостью устанавливали дополнительный нагреватель 8. Во избежание воздействия на процесс капения собственных полей нагревателей их обмотки выполняли бифилярно. Напряжение на обмотки нагревателей подавалось от выпрямителей ВС-24М. Для измерения температуры ядра жидкости в объеме контейнера устанавливали спай термопары 9.

На поверхности стержня 3 происходило кипение жидкости и образование пузырьков пара. Для регистрации образующихся пузырьков пара использовали систему измерительных индукционных катушек 10. Индукционные катушки располагались на поверхности стеклянной трубки 11 диаметром 5 мм. Обмотка каждой катушки содержала по 325 витков медного провода диаметром 0.12 мм. Катушки располагались по высоте стеклянной трубки на расстоянии 35 мм друг от друга. Система катушек, намотанных на стеклянную трубку, помещалась в охранную стеклянную трубку 12 диаметром 8 мм. Свободное пространство между двумя стеклянными трубками, охватывающими индукционные катушки, заполнялось теплоустойчивым герметиком. Нижний торец системы катушек, выполненный вышеуказанным образом, упирался во фторопластовую пробку, служащую дном контейнера. Ось теплоподводящего стержня 3 совпадала с осью системы катушек. Токоведущие электроды катушек укреплялись на расположенной в верхней части системы стеклянных трубок многоканальной клемме. Показания индукционных датчиков и термопар в процессе кипения магнитной жидкости регистрировались с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и подавались на экран монитора компьютера, работающего в режиме осциллографа. Возникновение сигнала в индукционных катушках было связано с прохождением через плоскости витков катушек немагнитных пузырьков пара, находящихся в объеме намагничивающейся жидкости, заполнявшей осевое пространство катушек при включенном магнитном поле.

Способ регистрации пузырьков, использованный в предлагаемой измерительной установке, как уже было сказано, основан на явлении возникновения ЭДС индукции в витках катушки при изменении во времени магнитного потока через площади витков. Это изменение магнитного потока через площадь витков катушки было связано с прохождением немагнитного парового пузырька в объеме магнитной жидкости, заполнявшей катушку, через площади витков катушки.

Как было показано в п. 1, ЭДС индукции в витках катушки возрастала с увеличением объема пузырька пара, проходящего через объем катушки. Напомним, что в эксперименте вектор магнитного поля лежит в плоскости витков катушки. В этом случае значение сигнала зависело также от расстояния между геометрическим центром пузырька пара и геометрическим центром катушки.

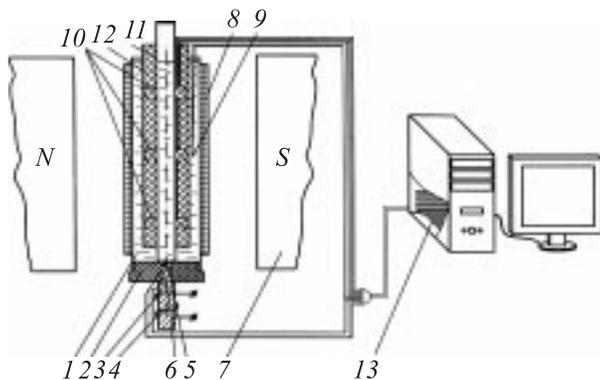


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 — немагнитный цилиндрический контейнер; 2 — фторопластовая пробка; 3 — медный стержень; 4 — нижний нагреватель; 5, 6 — хромель-копелевые термопары; 7 — полюс электромагнита; 8 — верхний нагреватель; 9 — спай термопары для измерения температуры ядра жидкости; 10 — система измерительных индукционных катушек; 11 — стеклянная трубка диаметром 5 мм; 12 — стеклянная трубка диаметром 8 мм; 13 — плата АЦП „La-1.5 PC114“.

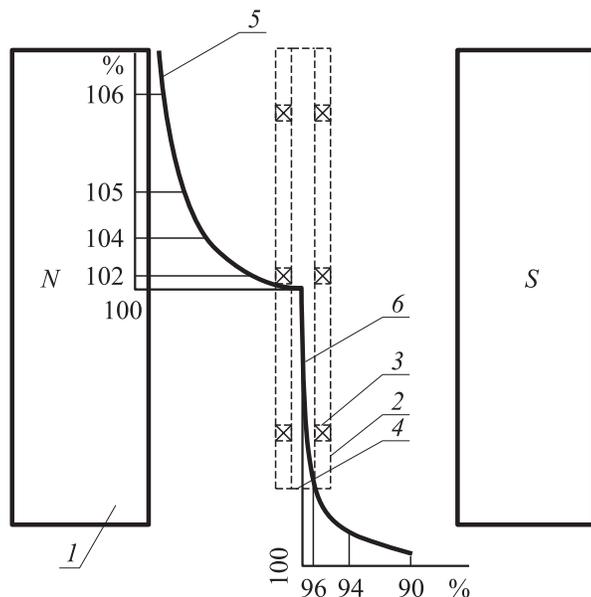


Рис. 4. Распределение магнитного поля между полюсами электромагнита: 1 — полюсные наконечники электромагнита; 2 — контуры измерительной ячейки; 3 — индукционные датчики; 4 — поверхность нагревателя, на которой происходило образование пузырьков пара; 5 — кривая, характеризующая изменение магнитного поля в горизонтальном направлении; 6 — кривая, характеризующая изменение магнитного поля в вертикальном направлении.

Следует заметить, что между полюсами электромагнита распределение магнитного поля было, вообще говоря, неоднородным. Однако система измерительных катушек и поверхность нагревателя, на которой возникали пузырьки пара, располагались соосно с осью симметрии пространства между полюсными наконечниками электромагнита, и рабочий объем измерительной ячейки находился в однородном поле с неоднородностью, не превышающей 2–3%. Это следует из рис. 4, на котором приведено взаимное расположение полюсных наконечников электромагнита и измерительной ячейки и графики распределения магнитного поля в вертикальном и радиальном направлениях.

На рис. 4 жирными сплошными линиями обозначены полюсные наконечники электромагнита (рис. 4, 1). Пунктир — контуры измерительной ячейки (рис. 4, 2) с установленными в ней индукционными датчиками (рис. 4, 3). Образование паровых пузырьков при кипении магнитной жидкости происходило в нижней части измерительной ячейки. Поверхность нагревателя, где происходило образование пузырьков пара, обозначена на рис. 4 как 4; 5 — кривая изменения величины магнитного поля в горизонтальном направлении от оси симметрии намагничивающей системы. Кривая 5 построена в координатах: горизонтальная ось — расстояние точки поля до оси симметрии намагничивающей системы; вертикальная ось — изменение поля в точке межполюсного пространства электромагнита в процентах к величине

магнитного поля на оси симметрии намагничивающей системы. Кривая 6 показывает изменение магнитного поля в вертикальном направлении, она построена в координатах: вертикальная — расстояние точки поля от геометрического центра намагничивающей системы; горизонтальная — изменение величины магнитного поля в процентах от величины магнитного поля в геометрическом центре намагничивающей системы.

3. Методика проведения измерений

Измерения проводили следующим образом. На основной и дополнительный нагреватели одновременно подавались различные напряжения. Установка дополнительного нагревателя позволяла за более короткий срок повысить температуру в объеме жидкости для ускорения закипания на поверхности теплоподводящего стержня. Интенсивность подвода тепла от дополнительного нагревателя к жидкости подбирали такой, что закипание на поверхности установленного на дне контейнера нагревателя происходило, когда температура жидкости в объеме могла быть меньше температуры насыщения жидкости. Такая постановка эксперимента позволяла избежать кипения жидкости в объеме и выплескивания жидкости из контейнера.

Все измерения проводились при одинаковых значениях напряжения, подаваемого на обмотки нагревателей. В процессе нагрева показания датчиков записывались с помощью автоматизированной системы 13 (рис. 3), состоящей из компьютера класса Pentium III при помощи платы АЦП „La-1,5 PCI14“ и программы ADCLab (версия 1.7). С течением времени температура жидкости и поверхности нагревателя возрастала. Измерения производились до тех пор, пока жидкость в объеме не закипала и не выливалась из контейнера. Во избежание налипания остатков расслоившейся жидкости на поверхность нагревателя после каждого замера жидкость удалялась из контейнера, а его внутренняя поверхность тщательно промывалась керосином. Так как значение теплового потока через поверхность основного нагревателя могло зависеть от начальной температуры массивного тела контейнера и заполняющей его жидкости, то перед началом каждого измерения установку охлаждали до комнатной температуры.

4. Результаты экспериментов

На рис. 5 представлены характерные области осциллограмм, полученных с помощью системы индукционных катушек для концентрированного состава жидкости (жидкость № 1) во внешнем магнитном поле 25.3 кА/м. До температуры жидкости, меньшей 95°C, при температуре нагревателя 105°C на осциллограммах (рис. 5, а) никаких всплесков, связанных с образованием пузырьков пара, не наблюдалось. Это позволяет считать, что при данных температурных режимах теплообмен происходит

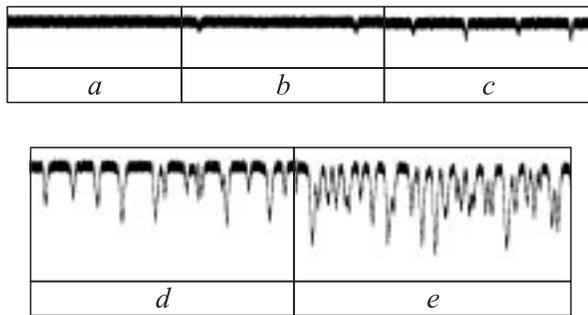


Рис. 5. Характерные осциллограммы подсчета частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования, полученные при включенном внешнем магнитном поле 25.3 кА/м при температуре магнитной жидкости № 1: 105, 109, 113, 117, 121 °С (участки осциллограмм *a, b, c, d, e* соответственно).

путем однофазной конвекции. При температуре жидкости выше 95 °С и температуре нагревателя выше 105 °С на осциллограммах начинали возникать одиночные периодически повторяющиеся всплески малой амплитуды (рис. 5, *b*). Характер образующихся всплесков (их периодичность) позволяет считать, что при этих температурных режимах на поверхности нагревателя начиналось образование пузырьков пара. С последующим ростом температуры жидкости и температуры нагревателя частота всплесков и их амплитуда начинали возрастать (рис. 5, *c*). По характеру всплесков на осциллограммах можно было судить об увеличении частоты образования пузырьков пара на поверхности нагревателя с ростом температуры жидкости и температуры нагревателя в неизменном по величине внешнем магнитном поле. В исследованном интервале температур жидкости от 99 до 130 °С и интервале температур нагревателя от 105 до 150 °С частота всплесков существенно возрастала. Таким образом, измерения показали, что в неизменном по величине внешнем магнитном поле с увеличением температуры жидкости и температуры поверхности нагревателя частота образования пузырьков пара на поверхности нагревателя изменялась. Поэтому для выяснения влияния величины магнитного поля на частоту образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования строилась зависимость частоты образования пузырьков пара от температуры магнитной жидкости в различных по величине внешних магнитных полях.

На полученных осциллограммах, характерный вид которых приведен на рис. 5, выбирались участки длительностью порядка 16 с, в течение которых температура жидкости и температура нагревателя не изменялись более чем в пределах ошибок измерений. Проводился подсчет числа всплесков, связанных с прохождением паровых пузырьков через витки индукционных катушек. Число всплесков, отнесенное к длительности их наблю-

дения, принималось за частоту образования пузырьков пара в системе.

Графики зависимости частоты образования пузырьков пара f при кипении концентрированного состава жидкости (жидкость № 1) от температуры жидкости, полученные в результате приложения разных по величине внешних магнитных полей представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, однородное внешнее магнитное поле слабо влияет на частоту отрыва пузырьков пара при температурах кипящей жидкости № 1 ~ 100 °С. С увеличением интенсивности приложенного магнитного поля в интервале температур жидкости от 100 до 113 °С происходит более чем двукратное увеличение частоты отрыва пузырьков пара. Это влияние оказывается немонотонным. Увеличение частоты образования пузырьков пара происходит в интервале полей от 0 до 60 кА/м. В полях с интенсивностью более 89 кА/м частота образования пузырьков пара уменьшается. Кривая 5 на рис. 6 показывает, что поле свыше 107 кА/м подавляет процесс кипения. Пузырьки начинают возникать при температурах жидкости выше 110 °С.

На рис. 7 приведены зависимости частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидко-

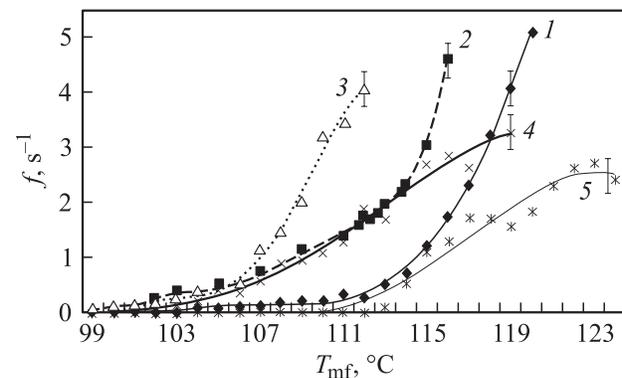


Рис. 6. Экспериментально найденные зависимости частоты образования пузырьков пара f , при кипении магнитной жидкости № 1 в однородном внешнем магнитном поле интенсивностью: 25.3, 49.4, 70.1, 89.3 и 107.7 кА/м для кривых 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно. Здесь T_{mf} — температура магнитной жидкости.

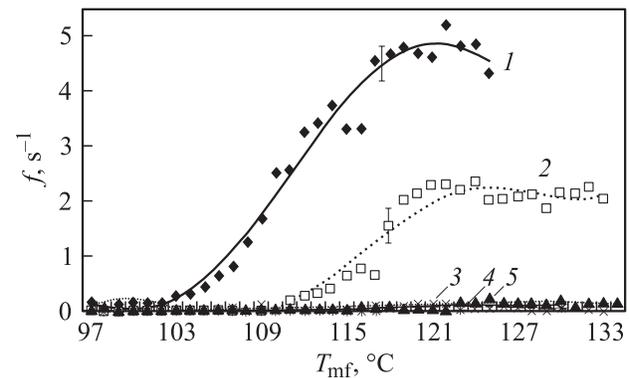


Рис. 7. То же, что для рис. 6, для жидкости № 2.

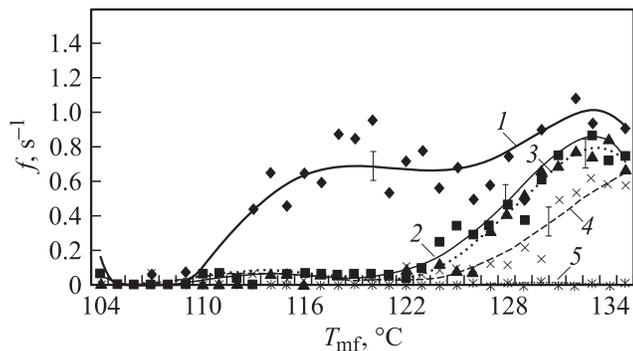


Рис. 8. То же, что для рис. 6, для жидкости № 3.

сти № 2 на одиночном центре парообразования в зависимости от температуры жидкости в условиях приложения разных по величине внешних магнитных полей.

Из рис. 7 видно, что что магнитное поле с индукцией 25.3 кА/м приводит к пятикратному увеличению частоты образования пузырьков пара в магнитной жидкости № 2 при температуре ядра жидкости в пределах от 97 до 125 °С. Магнитное поле с индукцией 49.4 кА/м приводит к более чем двукратному увеличению частоты отрыва пузырьков пара при кипении магнитной жидкости № 2 в интервале температур жидкости от 97 до 133 °С. Дальнейшее увеличение магнитного поля существенно не влияет на частоту образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости № 2 во всем изученном интервале температур ядра жидкости.

На рис. 8 приведены зависимости частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости № 3 на одиночном центре парообразования от температуры жидкости, полученные в различных по величине внешних магнитных полях.

Как видно из рис. 8, магнитное поле с индукцией 25.3 кА/м существенно изменяет частоту отрыва пузырьков пара в интервале температур ядра жидкости от 110 до 134 °С. С увеличением индукции магнитного поля область влияния магнитного поля на частоту образования пузырьков пара в магнитной жидкости № 3 смещается в сторону более высоких температур ядра жидкости (от 122 до 134 °С).

Таким образом, эксперименты показали, что однородное магнитное поле существенно влияет на процессы образования и отрыва пузырьков пара при кипении магнитной жидкости.

5. Возможная интерпретация экспериментов

Для оценки размера пузырька пара при отрыве от поверхности в отсутствие магнитного поля при кипении обычных жидкостей, как правило, используется формула

Фритца:

$$D_{Fr} = 0.02\theta \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_f - \rho_v)g}}, \quad (18)$$

$$F_a = -g(\rho_f - \rho_v). \quad (19)$$

Здесь σ — поверхностное натяжение магнитной жидкости; ρ_f — плотность жидкости; ρ_v — плотность пара; g — ускорение свободного падения; θ — угол смачивания; F_a — архимедова сила.

При кипении жидкости на плоской поверхности нагрева температура слоя магнитной жидкости, прилегающая к поверхности нагревателя, будет неоднородна по высоте слоя. Намагниченность магнитной жидкости зависит от температуры. Точно так же, как в обычной жидкости, более плотные слои стремятся передвинуться вниз, если под ними находится менее плотные, в магнитной жидкости слои с большей намагниченностью стремятся двигаться в сторону слоев с меньшей намагниченностью. В силу сказанного при кипении магнитной жидкости в магнитном поле эффективная архимедова сила может быть записана так:

$$F_a = -g(\rho_{mf} - \rho_v) - \mu_0 H \nabla M, \quad (20)$$

где ρ_{mf} — плотность магнитной жидкости; μ_0 — магнитная постоянная; M — намагниченность магнитной жидкости.

Здесь считается, что внешнее поле H велико настолько, что его искажением, вносимым магнитной жидкостью, можно пренебречь и по высоте неоднородно нагретого слоя жидкости H оно остается неизменным. Градиент намагниченности противоположен градиенту температуры. Таким образом, в указанных условиях на немагнитный пузырек пара в однородном магнитном поле будет действовать дополнительная выталкивающая сила $\sim \mu_0 H \nabla M$, сонаправленная с обычной архимедовой выталкивающей силой.

Формулу для диаметра D_m пузырька при отрыве в магнитном поле в магнитной жидкости запишем в виде

$$D_m = 0.02\theta \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_{mf} - \rho_v)g + \mu_0 H \nabla M}}. \quad (21)$$

Таким образом, в однородном магнитном поле за счет возникновения градиента температуры и связанного с ним градиента намагниченности отрывной диаметр парового пузырька уменьшается.

Следует отметить, что формула Фритца верна только для насыщенного кипения. В наших экспериментах образование пузырьков происходит при температуре в объеме жидкости, меньшей температуры насыщения, поэтому проведенные оценки имеют только качественный характер.

Эксперименты многих авторов показали, что при насыщенном кипении обычных жидкостей выполняется соотношение

$$f D_{Fr} = \text{const.}$$

Отсюда следует, что частота отрыва f возрастает с уменьшением диаметра $D_{\text{Ф}}$. Если предположить, что аналогичное соотношение

$$fD_m = \text{const}$$

выполняется и при кипении магнитных жидкостей, то с уменьшением отрывного диаметра D_m частота отрыва пузырьков f должна возрастать. Такое увеличение частоты отрыва с увеличением напряженности магнитного поля наблюдалось нами в описанных экспериментах.

Заключение

Результаты работы показали, что с помощью однородного внешнего магнитного поля можно эффективно управлять частотой образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на плоской горизонтальной поверхности. Обнаруженное в работе влияние однородного магнитного поля на процессы массопереноса при фазовых переходах в магнитной жидкости может служить созданию управляемых тепло- и массообменных устройств, в которых магнитная жидкость используется в качестве теплоносителя.

Выражаем благодарность РФФИ (грант № 05-01-00839) за поддержку работы.

Список литературы

- [1] *Gogosov V.V., Simonovskii A.Ya., Smolkin R.D.* // J. Magn. Mater. 1990. № 1–3. P. 227–232.
- [2] *Гогосов В.В., Симоновский А.Я.* // Изв. АН СССР. Механика жидкостей и газов. 1989. № 2. С. 3–11.
- [3] *Несис Е.И.* Кипение жидкостей. М., 1973. 280 с.