

03;12

©1994 г.

## МАГНИТНЫЕ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ

*А.О.Кузубов, О.И.Иванова, Е.И.Иванников*

Институт общей физики РАН, Тарусский филиал,

24910, Таруса, Россия

(Поступило в Редакцию 8 июня 1993 г.)

Рассмотрим магнитные жидкости, имеющие в качестве дисперсной фазы смешанные Me-Zn ферриты. Измерены температурные зависимости намагниченности жидкостей, вычислены их пиромагнитные коэффициенты. Проведено сравнение с традиционной магнетитовой магнитной жидкостью. Показано более эффективное использование рассмотренных жидкостей в качестве рабочей среды теплообменных устройств.

Зависимость намагниченности магнитной жидкости от температуры дает перспективную возможность использования ее в качестве рабочей среды различных тепловых машин: преобразователей энергии, насосов и просто теплообменных устройств [1]. Преимуществом теплообменных устройств, использующих магнитную жидкость в качестве теплоносителя, является отсутствие каких бы то ни было движущихся механических частей, необходимых для приведения жидкости в движение в обычных теплообменных системах. Движение магнитной жидкости обусловлено разницей температур и неоднородным магнитным полем, которое может быть создано системой постоянных магнитов. Направление и характер течения магнитного теплоносителя определяется конфигурацией магнитной системы. Таким образом, термомагнитная конвекция легко управляема. Кроме того, она гораздо интенсивнее гравитационной, что дает ей важное преимущество перед последней [2].

Интенсивность термомагнитной конвекции, а следовательно, эффективность теплообменных устройств с магнитной жидкостью определяется при прочих равных условиях величиной пиромагнитного коэффициента магнитной жидкости  $K = |dM/dT|$ , т.е. степенью зависимости намагниченности жидкости от температуры. Намагниченность магнитной жидкости достаточно хорошо описывается формулой Ланжевена

$$M = \varphi_m m (\operatorname{cth} \xi - 1/\xi), \quad \xi = mVH/kT, \quad (1)$$

где  $\varphi_m$  — объемная концентрация магнитной фазы,  $m$  — намагниченность дисперсного вещества,  $V$  — средний объем магнитной частицы,  $H$  — напряженность магнитного поля,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

Дифференцируя намагниченность по температуре, получим, что пиромангнитный коэффициент представляет собой сумму трех членов

$$K = \beta M + (\partial M / \partial m) |dm/dT| + |\partial M / \partial T|, \quad \beta = -(1/\rho)(d\rho/dT), \quad (2)$$

каждый из которых соответствует определенному механизму изменения намагниченности с температурой. Во-первых, это тепловое расширение жидкости и, как следствие, изменение объемной концентрации магнитных частиц. Во-вторых, это изменение величины магнитного момента магнитной частицы. Главным образом оно происходит из-за изменения с температурой намагниченности насыщения магнитного материала частицы. Изменением объема частицы вследствие теплового расширения можно, во-видимому, пренебречь из-за малости коэффициента объемного расширения твердых веществ по сравнению с жидкими. В-третьих, происходит изменение направления магнитного момента данной магнитной частицы вследствие разупорядочивающего теплового движения окружающих частицу молекул жидкости-носителя.

В достаточно сильных магнитных полях, когда намагниченность жидкости близка к насыщению, выражение для пиромангнитного коэффициента сводится к следующему:

$$K = M(\beta + \beta_m), \quad \beta_m = -(1/m)(dm/dT). \quad (3)$$

Таким образом, задача увеличения пиромангнитного коэффициента магнитной жидкости сводится (для одних и тех же значений  $\beta$  и  $\varphi_m$ , т. е. для одной и той же жидкости-носителя и одинаковой концентрации магнитной фазы) к подбору такого дисперсного материала, который в требуемом интервале температур давал бы для данной жидкости максимальное значение суммы  $\beta m + |dm/dT|$ . Следовательно, подбор дисперсного материала зависит и от жидкости-носителя. Как видно из последней формулы, для жидкостей с большим коэффициентом теплового расширения большую роль играет величина намагниченности дисперсного материала. Для жидкостей с малым коэффициентом объемного расширения более значительную роль играет величина  $|dm/dT|$ .

В малых полях, когда можно принять линейный закон намагничения, выражение для пиромангнитного коэффициента принимает вид

$$K = M(1/T + \beta + 2\beta_m). \quad (4)$$

Таким образом, вклад дисперсного материала в пиромангнитный коэффициент магнитной жидкости становится еще более существенным.

Наиболее распространенным магнитным материалом, используемым для получения магнитных жидкостей, является магнетит. Обладая достаточно высокой намагниченностью насыщения ( $M_s \approx 500$  Гс), он, однако, имеет достаточно низкий пиромангнитный коэффициент в температурном интервале существования большинства жидкостей, поскольку его точка Кюри ( $T_c = 585^\circ\text{C}$ ) лежит гораздо выше данного интервала.

Поэтому необходимо было подобрать магнитный материал, точка Кюри которого лежала бы при значительно более низких температурах, а пиромангнитный коэффициент в области комнатных температур был бы максимален. Такими свойствами обладает целый ряд металлов, нитридов, оксидов. Для синтеза магнитных жидкостей с низкими точками Кюри были выбраны вещества, по природе аналогичные магнетиту и имеющие аналогичную, достаточно простую методику получения. Это смешанные Me-Zn ферриты типа шпинелей  $Me_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ , где Me—Mn, Ni, Co [3]. Выбор этих ферритов был также обусловлен тем обстоятельством, что, варьируя соотношение исходных компонентов и условия получения, можно варьировать состав феррита и, следовательно, получать магнитные жидкости с различными точками Кюри и различными пиромангнитными коэффициентами.

С целью выбора магнитной жидкости, наиболее подходящей для использования в качестве теплоносителя, было синтезировано 20 образ-

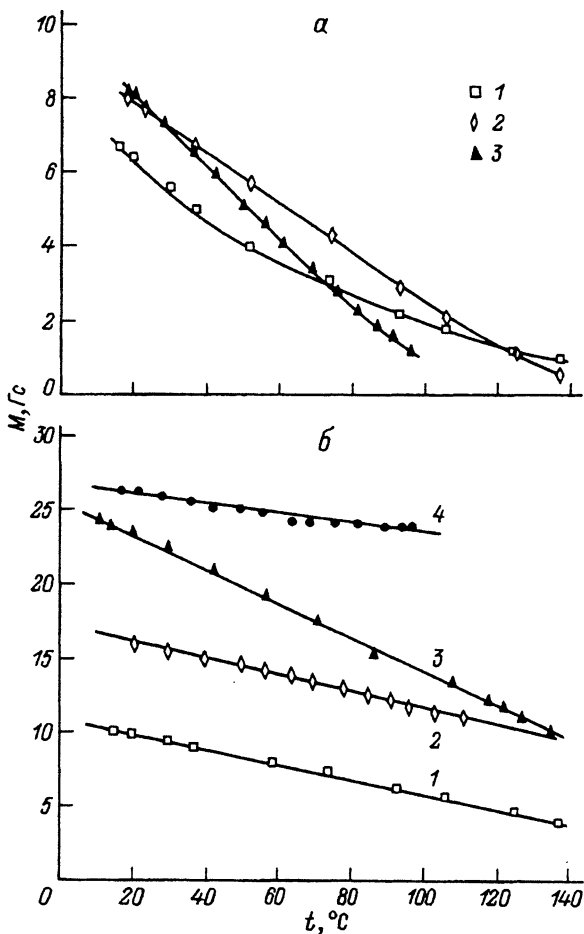


Рис. 1. Намагниченность магнитной жидкости от температуры. Состав дисперсной фазы: а —  $Mn_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  (1),  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  (2),  $Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  (3); б —  $Mn_{0.7}Zn_{0.3}Fe_2O_4$  (1),  $Ni_{0.7}Zn_{0.3}Fe_2O_4$  (2),  $Co_{0.7}Zn_{0.3}Fe_2O_4$  (3),  $Fe_3O_4$  (4).

Таблица 1.

Состав дисперсной фазы	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\beta_M \cdot 10^3$ , К <sup>-1</sup>	$M$ , Гс	$\beta_m \cdot 10^3$ , К <sup>-1</sup>
Mn <sub>0.5</sub> Zn <sub>0.5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.12	15.2	6.5	6.9
Mn <sub>0.7</sub> Zn <sub>0.3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.08	5.0	9.9	4.1
Ni <sub>0.5</sub> Zn <sub>0.5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.07	8.2	7.8	2.9
Ni <sub>0.7</sub> Zn <sub>0.3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.15	3.5	16.2	1.6
Co <sub>0.5</sub> Zn <sub>0.5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.08	11.4	8.0	5.4
Co <sub>0.7</sub> Zn <sub>0.3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.22	4.9	23.4	4.7
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.14	1.2	26.1	0.55

цов магнитной жидкости различного состава. Ферриты получали методом осаждения с последующим кипячением. Полученные частицы магнитной фазы стабилизировали олеиновой кислотой, после чего их диспергировали в додекане. Подробно изучены и сопоставлены свойства шести образцов, представленных в табл. 1. Плотность измерена методом гидростатического взвешивания при температуре 20°C; плотность при более высоких температурах может быть оценена с учетом коэффициента объемного расширения додекана. Намагниченность образцов магнитной жидкости в поле 1.75 кЭ измерялась вибрационным методом в интервале температур 20–150 °С. В табл. 1 также представлены значения  $\beta_m$ , вычисленные из литературных данных для зависимости намагниченности насыщения соответствующего феррита от температуры [4,5]. Результаты измерений температурной зависимости намагниченности магнитной жидкости приведены на рис. 1.

Как отмечалось выше, относительный пиромангнитный коэффициент магнитной жидкости лежит в некоторых пределах, которые определяются тем, достигла ли намагниченность жидкости насыщения (3) или находится на линейном участке (4). Поэтому по величине пиромангнитного коэффициента можно судить о степени намагниченности жидкости в данном поле. Здесь необходимо отметить, что при измерении намагниченности в рассматриваемом методе не учитывается изменение намагниченности с температурой вследствие теплового расширения жидкости. Чтобы учесть это, необходимо умножить приводимые значения намагниченности (рис. 1) на дополнительный коэффициент  $(1 - \beta(t - 20))$ . Таким образом, при сравнении  $\beta_M = K/M$  — относительного пиромангнитного коэффициента с его предельными значениями (3), (4) необходимо было из выражений (3), (4) опустить  $\beta$ , либо к  $\beta_M$  из таблицы прибавить  $\beta$ .

Как видно из табл. 1, только жидкость, имеющая в качестве дисперсной фазы феррит Co<sub>0.7</sub>Zn<sub>0.3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, достигает насыщения в данном поле. Пиромангнитные коэффициенты остальных жидкостей имеют промежуточные значения. Для жидкости, находящейся в насыщении, легко определить концентрацию магнитной фазы  $\varphi_m = M_s/m$ , зная намагниченность насыщения последней  $m$ . Определяя таким образом концентрацию по намагниченностям жидкости и феррита при определенной температуре, мы можем затем получить зависимость  $m(T) = M(T)/\varphi_m$  до измеренной зависимости  $M(T)$  и сравнить с из-

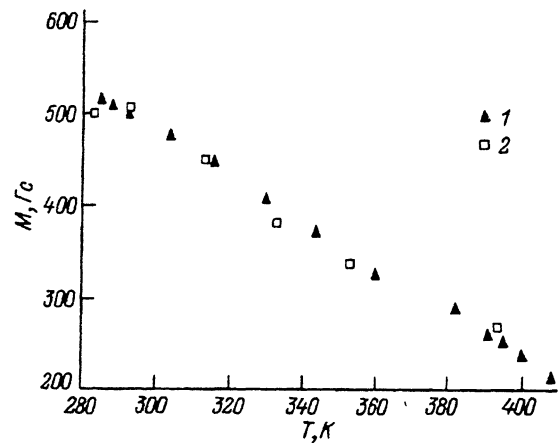


Рис. 2. Сопоставление данных для намагниченности феррита  $\text{Co}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ , полученных из измерений намагниченности магнитной жидкости (1) и из литературы [4] (2).

вестной из литературы [4]. Рис. 2 демонстрирует достаточно хорошее совпадение во всем рассматриваемом интервале температур.

Для жидкостей, не достигших насыщения, можно, используя соотношение (2) и измеренное значение  $\beta_M$ , вычислить параметр Ланжевена  $\xi$ , поскольку  $\beta_M$  зависит только от этого параметра. Отсюда можно вычислить магнитный размер частиц  $d_m$ , затем, используя соотношение (1), определить намагниченность насыщения жидкости  $M_s$  и концентрацию магнитной фазы  $\varphi_m$ . В табл. 2 приведены вычисленные таким образом концентрации магнитной фазы, размер частиц, а также концентрации твердой фазы, вычисленные из плотности жидкости  $\rho$  и плотности жидкости-носителя  $\rho_0$ :

$$\varphi = (\rho - \rho_0) / (\rho_f - \rho_0), \quad (5)$$

где  $\rho_f$  — плотность твердой фазы.

Используя значения концентраций твердой фазы и магнитного материала, можно оценить толщину немагнитного слоя твердой частицы

$$h = 0.5(d - d_m) = 0.5d_m \left( \sqrt[3]{\varphi/\varphi_m} - 1 \right). \quad (6)$$

Данная величина также представлена в табл. 2. В некоторой степени она характеризует качество магнитной жидкости. Как видно из та-

Таблица 2.

Состав дисперсной фазы	$\varphi_m$	$d_m, \text{Å}$	$\varphi$	$h, \text{Å}$
$\text{Mn}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	0.058	60	0.083	4
$\text{Mn}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$	0.029	105	0.073	19
$\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	0.054	50	0.070	2
$\text{Ni}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$	0.062	75	0.088	5
$\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	0.039	60	0.072	7
$\text{Co}_{0.7}\text{Zn}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$	0.047		0.103	
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	0.063	85	0.087	5

блицы, толщина немагнитного слоя для большинства изученных образцов колеблется с небольшими отклонениями вблизи соответствующего значения для магнетитовой магнитной жидкости. Только жидкость с ферритом  $Mn_{0.7}Zn_{0.3}Fe_3O_4$  в качестве дисперсной фазы выпадает из этого ряда, имея достаточно большую толщину немагнитного слоя. Это говорит о слишком высоком содержании немагнитной примеси в данном образце.

Таким образом, рассмотренные магнитные жидкости на смешанных Me-Xn ферритах являются гораздо более температурочувствительными, чем традиционная магнетитовая магнитная жидкость. Это свойство может быть использовано в различных применениях, одним из которых является использование магнитной жидкости в качестве теплоносителя. Выбор состава магнитной фазы и жидкости-носителя определяется конкретными условиями применения жидкости.

#### Список литературы

- [1] Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 356 с.
  - [2] Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1989. 386 с.
  - [3] Иванов О.И., Самородов И.Б., Бугославский Ю.В. и др. Ферромагнитная жидкость. А.с. № 1570543.
  - [4] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К.Кикоина. М., 1976. 1008 с.
  - [5] Смит Я., Вейн Х. Ферриты. М., 1962. 504 с.
-