

01;03

О магнитной проницаемости магнитодиэлектрической эмульсии

© Ю.И. Диканский, А.Р. Закинян, Н.Ю. Константинова

Ставропольский государственный университет,
355009 Ставрополь, Россия
e-mail: zakinyan@mail.ru

(Поступило в Редакцию 8 февраля 2007 г.)

Рассмотрены особенности взаимодействия магнитодиэлектрических эмульсий с магнитным полем. Исследованы процессы структурных превращений в таких средах, в частности, явление обращения эмульсии и связанное с этим изменение ее магнитной проницаемости. Развита теория рассматриваемых явлений, сделан вывод о возможности эффективного управления свойствами магнитодиэлектрических эмульсий посредством воздействия на них магнитного поля.

PACS: 77.84.Nh, 81.40.Rs

Введение

В последнее время предпринимаются попытки создания на основе ферроколлоидов (магнитных жидкостей) новых композиционных жидких намагничивающихся сред, способных более эффективно взаимодействовать с магнитными и электрическими полями. К ним следует отнести магниточувствительные эмульсии, которые могут представлять собой как капли магнитной жидкости, взвешенные в жидкой среде [1,2], так и капли жидкой среды, взвешенные в магнитной жидкости [3]. Действие магнитного поля на магнитные эмульсии приводит к возникновению в них структурной анизотропии и, как следствие — к изменению их макроскопических свойств.

Ранее в работе [4] были представлены результаты исследования деформации микрокапель магнитной эмульсии, представляющей собой взвесь микрокапель масла в магнитной жидкости на основе керосина, при ее взаимодействии с магнитным и электрическим полями.

Настоящая работа посвящена исследованию структурных превращений в такой магнитодиэлектрической эмульсии и связанных с ними особенностей ее магнитной проницаемости.

Объекты и методы экспериментальных исследований

Магнитная эмульсия была приготовлена путем диспергирования авиационного масла АМГ-10 в несмешивающейся с ним магнитной жидкости на основе керосина. Выбор этого масла для получения эмульсии был обусловлен тем, что межфазное натяжение на границе между ним и магнитной жидкостью оказывается сравнительно мало ($\sigma \cong 10^{-6}$ N/m). Именно это делает возможным обращение эмульсии при увеличении содержания дисперсной фазы. Кроме того, при действии магнитного поля на такую эмульсию ее капли способны деформироваться и принимать форму вытянутых эллипсоидов вращения, что должно приводить к изменению макроскопических свойств эмульсии.

Для визуального наблюдения и исследования изменения структурного состояния эмульсии использовался оптический микроскоп, полученное изображение передавалось на монитор компьютера для последующей обработки. Исследование магнитной проницаемости эмульсии проводилось мостовым методом, ее величина определялась по индуктивности соленоида, заполненного образцом. В качестве измерительной ячейки использовался однослойный бескаркасный соленоид, длина которого (0.3 м) намного превышала его диаметр (0.01 м). Для измерения индуктивности использовался цифровой мост типа Е7-8, измерительное поле которого достаточно мало и не оказывает влияния на характер структурного состояния исследованной среды. Магнитная проницаемость рассчитывалась по формуле $\mu = L/L_0$ (L_0 — индуктивность пустого соленоида; L — индуктивность соленоида, заполненного эмульсией).

Для изучения влияния магнитного поля на магнитную проницаемость магниточувствительной эмульсии последняя подвергалась действию внешнего постоянного однородного магнитного поля, направленного параллельно переменному измерительному полю. Для этого соленоид с эмульсией помещался в кубическую намагничивающую систему, позволяющую создавать однородное магнитное поле в месте расположения соленоида.

Результаты экспериментальных исследований

Исследования проводились при различном объемном содержании дисперсной фазы, для этого последовательно увеличивалась объемная доля авиационного масла в эмульсии. При некоторой объемной концентрации дисперсной фазы ($\sim 50\%$) наблюдалось обращение фаз эмульсии — эмульсия из системы микрокапель масла, взвешенных в магнитной жидкости, превратилась в систему микрокапель магнитной жидкости, взвешенных в масле. Полученная концентрационная зависимость магнитной проницаемости эмульсии представлена на рис. 1, где по оси абсцисс отложена объемная доля магнитной

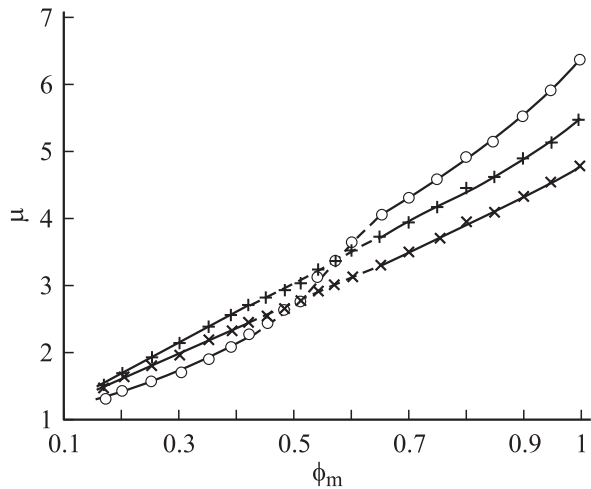


Рис. 1. Зависимость проницаемости магниточувствительной эмульсии от объемной доли магнитной жидкости при различных значениях напряженности магнитного поля (\circ — $H = 0$, $+$ — 2 , \times — 3.2 kA/m).

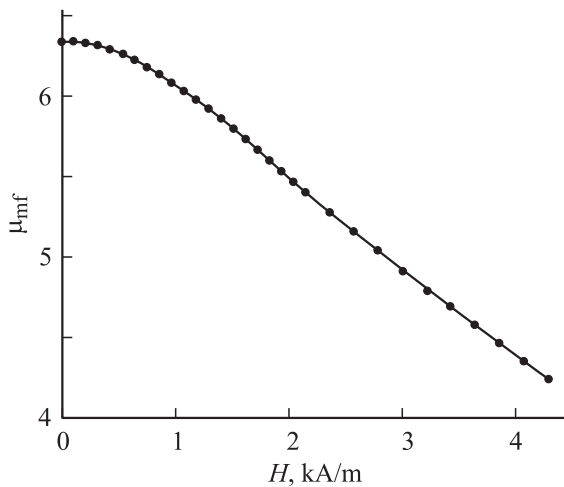


Рис. 2. Зависимость проницаемости магнитной жидкости от напряженности внешнего магнитного поля.

жидкости в эмульсии (ϕ_m), а по оси ординат — магнитная проницаемость эмульсии (μ). Как видно из графика, концентрационная зависимость в отсутствие внешнего магнитного поля ($H = 0$) имеет перегиб вблизи концентрации $\phi_m \approx 0.5$, свидетельствующий об изменении фазового состояния эмульсии и соответствующий ее обращению. Также можно отметить, что переходные процессы в эмульсии начинают происходить в области концентраций $0.4 \leq \phi_m \leq 0.6$ (отмечено пунктиром).

Действие магнитного поля изменяет ход концентрационной зависимости (рис. 1). В частности, практически исчезает перегиб кривой. Можно заметить, что при воздействии внешнего магнитного поля участок концентрационной зависимости, соответствующий дисперсии капель магнитной жидкости в масле, проходит выше, а дисперсии капель масла в магнитной жидкости — ниже,

чем соответствующие участки зависимости в отсутствие магнитного поля.

Это позволяет заключить, что характер концентрационных зависимостей, полученных при действии дополнительного магнитного поля, связан с некоторыми особенностями, которые наблюдаются в зависимости магнитной проницаемости эмульсии от величины внешнего магнитного поля. Влияние внешнего магнитного поля проявляется в вытяжении капель эмульсии независимо от соотношения фаз. Такое вытяжение должно приводить к уменьшению размагничивающего фактора каждой капли и проявляться в увеличении магнитной проницаемости эмульсии в целом. Однако, с другой стороны, действие магнитного поля на исходную магнитную жидкость приводит к уменьшению ее магнитной проницаемости. В качестве иллюстрации последнего на рис. 2 приведена зависимость проницаемости магнитной жидкости, использовавшейся в опытах, от величины внешнего поля.

Таким образом, влияние внешнего магнитного поля на проницаемость магниточувствительной эмульсии проявляется в наличии двух факторов, действие которых

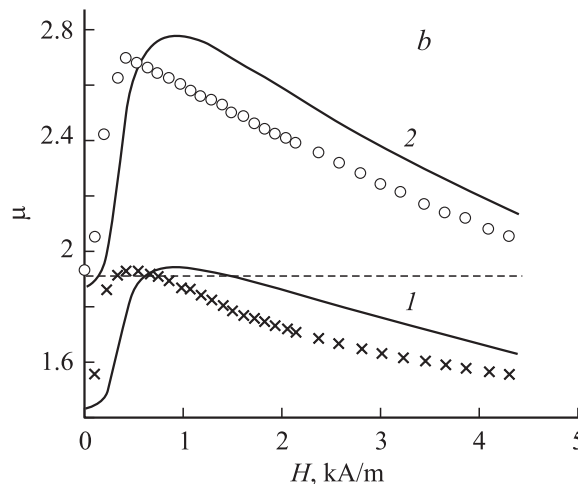
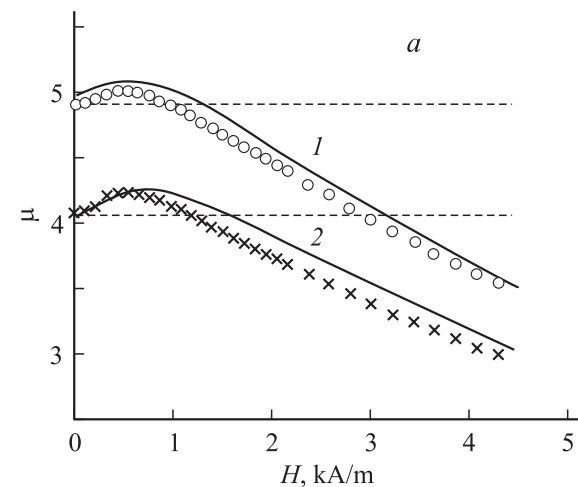


Рис. 3. Зависимость проницаемости эмульсии от напряженности внешнего магнитного поля.

противоположно друг другу. Очевидно, с этим связано наличие максимумов в полученных зависимостях проницаемости эмульсии от напряженности внешнего магнитного поля.

На рис. 3, *a* показана полученная зависимость проницаемости от напряженности постоянного магнитного поля для эмульсии капель масла в магнитной жидкости, когда объемная доля дисперсной фазы составляет 20% (○ — экспериментальные точки) и 35% (× — экспериментальные точки). На рис. 3, *b* представлена зависимость проницаемости от поля для эмульсии капель магнитной жидкости в масле, когда объемная доля дисперсной фазы также составляет 20% (× — экспериментальные точки) и 35% (○). Как видно, характер кривых схож, однако в случае, когда дисперсная фаза представлена магнитной жидкостью, наблюдается более значительное первоначальное увеличение проницаемости. Это должно быть вызвано тем, что эффект вытяжения капель (и, как следствие, уменьшения размагничивающего фактора и увеличения проницаемости) более существен для дисперсии капель магнитной жидкости в масле. С этим связан и тот факт, что для эмульсии, в которой дисперсной фазой является магнитная жидкость, проницаемость становится меньше своего исходного значения при более высоком значении напряженности поля, чем для эмульсии, в которой дисперсная фаза представлена маслом.

Действительно, как видно из рис. 3, при некоторых значениях напряженности поля проницаемость эмульсии, представляющей дисперсию магнитной жидкости в масле, оказывается больше, чем ее проницаемость в отсутствие поля. При этом проницаемость эмульсии, представляющей дисперсию масла в магнитной жидкости, при этих же полях, наоборот, оказывается всегда меньше проницаемости в отсутствие поля. Из-за этого в первом случае концентрационная зависимость проходит выше, а во втором — ниже соответствующей зависимости, полученной в отсутствие поля. Этим и объясняется сглаживание концентрационной зависимости магнитной проницаемости исследованной магниточувствительной эмульсии при воздействии постоянного магнитного поля. Таким образом, можно заключить, что эффект обращения эмульсии проявляется в значимом изменении характера ее намагничивания.

Теоретический анализ и обсуждение результатов

Для объяснения наблюдаемых закономерностей проведем теоретический анализ описанных явлений по аналогии с теорией диэлектрической проницаемости эмульсий Вагнера [5]. Рассмотрим в среде с магнитной проницаемостью μ_e некоторую область в форме вытянутого эллипсоида вращения объемом V , содержащую n маленьких эллипсоидов вращения объемом V_0 каждый с магнитной проницаемостью μ_i . Система находится в однородном магнитном поле с напряженностью H , при

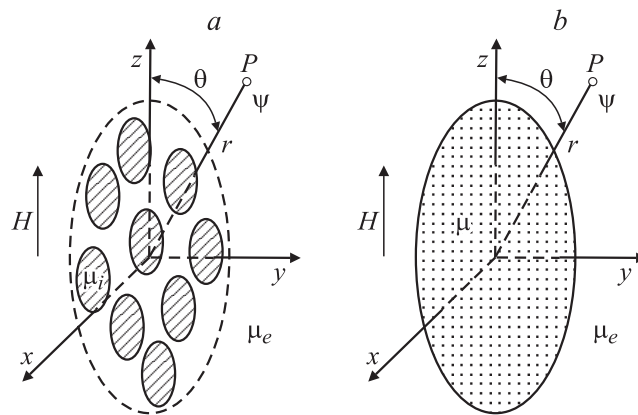


Рис. 4. Модель дисперсной системы эллипсоидальных частиц.

этом все эллипсоиды ориентированы своей большой полуосью вдоль магнитного поля (рис. 4, *a*).

Очевидно, что в каждой точке пространства, заполненного эмульсией, выполняется равенство $\text{rot } \mathbf{H} = 0$, и следовательно, в этой области может быть введен скалярный потенциал магнитного поля ψ . Отметим, что, поскольку область, занятая эмульсией, при этом является односвязной, то скалярный потенциал определен однозначно. Потенциал, создаваемый одним маленьким эллипсоидом в точке P , которая находится на расстоянии r от эллипсоида, определяется выражением

$$\psi_0 = -Hz + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_m}{r^2} \cos \theta, \quad (1)$$

где p_m — магнитный момент эллипсоида, определяемый выражением [6]

$$p_m = \frac{\left(\frac{\mu_i}{\mu_e} - 1\right)HV_0}{1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_e} - 1\right)N}, \quad (2)$$

где N — размагничивающий фактор эллипсоида, для расчета которого может быть использовано [6] следующее выражение:

$$N = \frac{1 - e^2}{2e^3} \left(\ln \frac{1 + e}{1 - e} - 2e \right), \quad (3)$$

где e — эксцентриситет эллипсоида.

Второй член в уравнении (1) выражает влияние каждого маленького эллипсоида, поэтому потенциал, обусловленный влиянием n эллипсоидов, заключенных внутри эллипсоидальной области объемом V , определяется уравнением:

$$\psi = -Hz + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_m}{r^2} n \cos \theta. \quad (4)$$

Подставив (2) в (4), получим выражение для потенциала в виде

$$\psi = -Hz + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\left(\frac{\mu_i}{\mu_e} - 1\right)HV_0n \cos \theta}{1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_e} - 1\right)n \frac{V_0}{V}}. \quad (5)$$

С другой стороны, если считать, что эффективная магнитная проницаемость эллипсоидальной области объемом V есть μ , то потенциал точки P , обусловленный этой областью (рис. 4, b), будет равен

$$\psi = -Hz + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\left(\frac{\mu}{\mu_e} - 1\right)HV \cos\theta}{1 + \left(\frac{\mu}{\mu_e} - 1\right)N} \frac{1}{r^2}. \quad (6)$$

В этом выражении μ является искомой величиной магнитной проницаемости эмульсии. Приравняв выражения (6) и (5) и учитывая, что величина $\varphi = \frac{nV_0}{V}$ есть объемная доля дисперсной фазы эмульсии, после некоторых преобразований получим

$$\frac{\mu - \mu_e}{\mu_e + (\mu - \mu_e)N} = \frac{\mu_i - \mu_e}{\mu_e + (\mu_i - \mu_e)N} \varphi. \quad (7)$$

Выразив отсюда μ в явном виде, окончательно имеем

$$\mu = \mu_e + \mu_e \frac{(\mu_i - \mu_e)\varphi}{\mu_e + N(\mu_i - \mu_e)(1 - \varphi)}. \quad (8)$$

Согласно полученному выражению, магнитная проницаемость эмульсии нелинейно зависит от концентрации дисперсной фазы. Она также оказывается зависимой от внешнего магнитного поля, так как величина размагничивающего фактора N вследствие деформации микрокапель может уменьшаться при увеличении поля, кроме того, от величины магнитного поля зависит магнитная проницаемость магнитной компоненты (магнитной жидкости) эмульсии. Установление точного вида теоретической зависимости магнитной проницаемости магнитной жидкости представляет серьезные трудности, поэтому в дальнейшем для определения зависимости от поля проницаемости магнитной компоненты эмульсии будем пользоваться эмпирической зависимостью $\mu_{mf}(H)$, представленной на рис. 2.

Размагничивающий фактор N определяется вытянутостью капель эмульсии под действием поля. Для определения зависимости размагничивающего фактора N от напряженности внешнего магнитного поля воспользуемся выражением, определяющим связь эксцентриситета капли с величиной внешнего поля [7]:

$$H^2 = \frac{2\sigma}{\mu_0\mu_e R} \left(\frac{\mu_e}{\mu_i - \mu_e} + N \right)^2 \times \frac{(3 - 2e^2)/e^2 - (3 - 4e^2) \arcsin e / (e^3(1 - e^2)^{1/2})}{(1 - e^2)^{2/3} [(3 - e^2) \ln((1 + e)/(1 - e)) / e^5 - 6/e^4]}, \quad (9)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения границы капли со средой; R — радиус невозмущенной капли, т.е. в отсутствие действия на нее магнитного поля. Уравнение (9) представляет собой нелинейное уравнение относительно одной переменной e .

Таким образом, окончательное решение задачи о магнитной проницаемости магниточувствительной эмульсии представляется уравнениями (8), (9) и (3). При

этом следует учитывать также зависимость от поля проницаемости магнитной компоненты эмульсии. Задача решается численно ввиду сложности получения ее точного аналитического решения.

Отметим, что при применении изложенной теории к вышеописанным опытам следует учитывать, что в них эмульсия может представлять собой как дисперсию капель масла в магнитной жидкости, так и дисперсию капель магнитной жидкости в масле. Поэтому, описывая поведение эмульсии масла в магнитной жидкости, в формулах (8), (9) следует заменить μ_e на $\mu_{mf}(H)$ и положить $\mu_i = 1$, а для эмульсии магнитной жидкости в масле наоборот: $\mu_e = 1$, $\mu_i = \mu_{mf}(H)$. Кроме того, концентрационные зависимости удобнее строить от объемной доли магнитной жидкости в эмульсии, поэтому в (8) для эмульсии масла в магнитной жидкости $\varphi_m = 1 - \varphi$.

Следует заметить, что капли невозмущенной эмульсии распределены по размерам, значения их радиусов колеблются от $2 \cdot 10^{-6}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ м, кроме того, средний радиус капель несколько отличается в зависимости от концентрации эмульсии. Однако для упрощения теоретических расчетов размеры капель считались одинаковыми и не изменяющимися, а в формулу (8) подставлялось среднее значение радиуса капель $R \approx 3.5 \cdot 10^{-6}$ м. Кроме того, для проведения теоретических построений предварительно было определено межфазное натяжение σ величиной $\approx 10^{-6}$ Н/м.

На рис. 5 показана зависимость магнитной проницаемости эмульсии от объемной доли магнитной жидкости, рассчитанная теоретически (сплошная линия соответствует теоретической зависимости, получаемой в отсутствие поля; пунктир — теоретическая зависимость при $H = 2.6$ кА/м). Для сравнения на рисунке также приведены соответствующие экспериментальные точки. Как видно, наблюдается хорошее согласие теории и экспериментальных данных. В частности, теория подтверждает исчезновение перегиба концентрационной за-

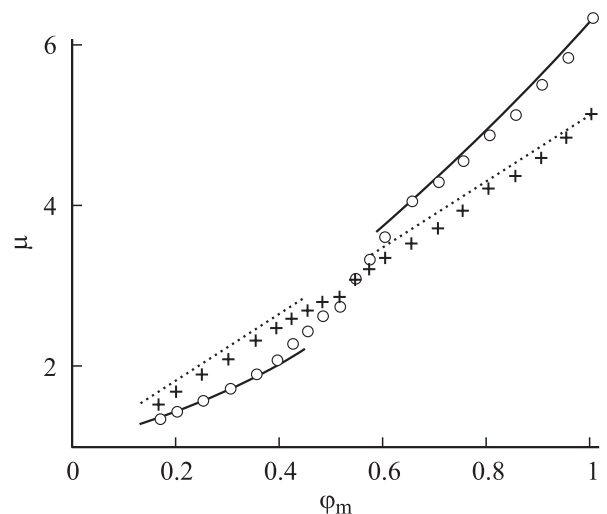


Рис. 5. Концентрационная зависимость магнитной проницаемости эмульсии.

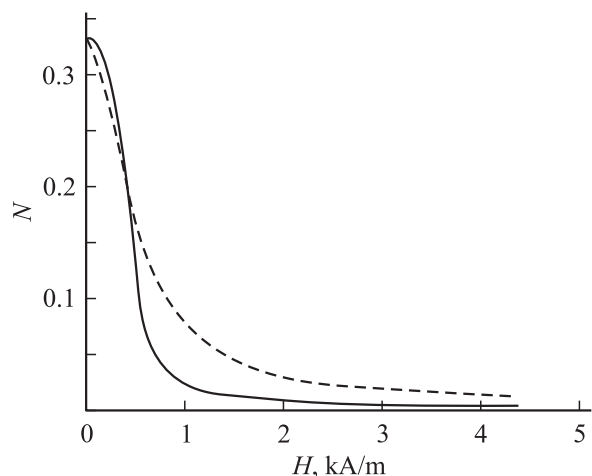


Рис. 6. Зависимость размагничивающего фактора капель от величины внешнего поля.

висимости, полученной при действии дополнительного магнитного поля. Это связано, как уже отмечалось, с различием степени деформации в магнитном поле капли масла в магнитной жидкости по сравнению с каплями магнитной жидкости в масле (капли магнитной жидкости вытягиваются сильнее, чем капли масла в магнитной жидкости в том же поле). Это должно приводить к различию зависимостей размагничивающего фактора для этих капель от величины напряженности внешнего поля.

На рис. 6 представлена зависимость $N(H)$, полученная по формулам (3), (9), для капли магнитной жидкости в масле (сплошная линия) и для капли масла в магнитной жидкости такого же размера (пунктир). Как видно из рисунка, в малом диапазоне сравнительно небольших значений напряженности поля размагничивающий фактор капли магнитной жидкости оказывается несколько больше размагничивающего фактора капли масла, взвешенной в магнитной среде. При всех остальных значениях поля размагничивающий фактор капли магнитной жидкости заметно меньше, чем капли масла. Этим объясняется тот факт, что концентрационная зависимость проницаемости эмульсии, подверженной действию поля, на участке, соответствующем дисперсии капель магнитной жидкости в масле, располагается выше соответствующего участка зависимости в отсутствие поля; для дисперсии капель масла в магнитной жидкости — соответственно ниже, что приводит к кажущемуся исчезновению или ослаблению перегиба концентрационной зависимости при воздействии внешнего поля.

Особенности деформации микрокапель эмульсии непосредственно проявляются в зависимости проницаемости эмульсии от поля. На рис. 3 сплошными линиями показаны теоретические зависимости проницаемости магниточувствительной эмульсии от напряженности внешнего поля, когда эмульсия представляет собой дисперсию капель масла в магнитной жидкости

(рис. 3, *a*) и дисперсию капель магнитной жидкости в масле (рис. 3, *b*). Кривые 1 построены для случая, когда объемная доля дисперсной фазы эмульсии составляет 20%, кривые 2 — 35%. Как видно, наблюдается хорошее согласие теории и эксперимента.

Существенно различный характер реакции эмульсии на поле в случаях, когда она представляет дисперсию капель магнитной жидкости в масле и масла в магнитной жидкости, можно наблюдать также на примере концентрационной зависимости относительного изменения проницаемости эмульсии под действием поля. Эта зависимость изображена на рис. 7, где по оси абсцисс отложена объемная доля магнитной жидкости в эмульсии, по оси ординат — изменение проницаемости эмульсии под действием поля H , отнесенное к соответствующей проницаемости в отсутствие поля. Кривая 1 соответствует теоретической зависимости, полученной для эмульсии масла в магнитной жидкости, кривая 2 — теоретическая зависимость для эмульсии магнитной жидкости в масле. Обе теоретические зависимости построены для относительного изменения проницаемости, вызываемого действием поля $H = 750$ А/м. На графике также приведены соответствующие экспериментальные точки. Как видно из рисунка, эмульсия магнитной жидкости в масле гораздо сильнее реагирует на действие поля, чем обратная ей эмульсия масла в магнитной жидкости. Помимо этого рис. 7 позволяет продемонстрировать обращение эмульсии при увеличении содержания дисперсной фазы. Действительно, экспериментальные точки вначале ложатся на теоретическую зависимость, соответствующую поведению эмульсии магнитной жидкости в масле, а затем наблюдается переходом к теоретической зависимости, соответствующей дисперсии капель масла в магнитной жидкости.

Из рис. 1, 5, 7 можно заключить, что обращение эмульсии происходит не сразу — в области концентраций $0.4 \leq \phi_m \leq 0.6$ эмульсия проявляет промежу-

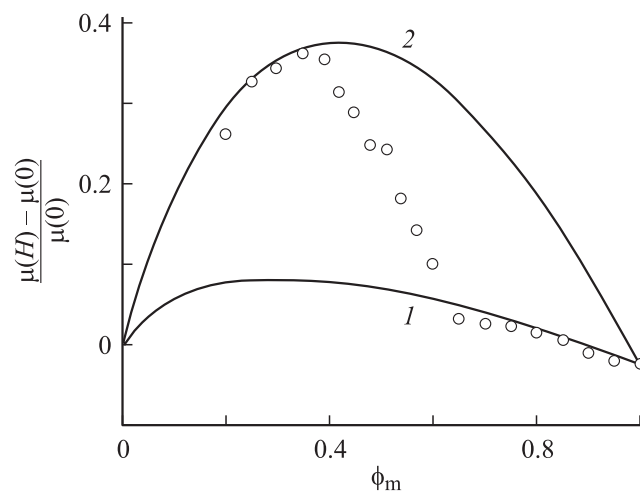


Рис. 7. Зависимость относительного изменения магнитной проницаемости эмульсии от объемной доли магнитной жидкости.

точные свойства. В зависимости от направления процесса изменения концентрации свойства эмульсии в этом диапазоне концентраций постепенно переходят в свойства эмульсии магнитной жидкости в масле либо масла в магнитной жидкости. Это, вероятно, связано с тем, что в указанном диапазоне концентраций наблюдаются локальные обращения эмульсии, т.е. обращения, происходящие в некотором ограниченном объеме, не охватывающие всей эмульсии. При дальнейшем увеличении концентрации одной из фаз число таких локальных обращений и охватываемый ими объем эмульсии растут до тех пор, пока произойдет полное обращение эмульсии во всем ее объеме.

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлены особенности взаимодействия магнитных эмульсий с магнитным полем, обусловленные процессами деформации микрокапель и эффектом обращения фаз. Анализ полученных результатов позволяет классифицировать исследованные эмульсии как жидкие среды, магнитными свойствами которых можно эффективно управлять с помощью магнитного поля.

Список литературы

- [1] *Roman Kim L.T., Briareliff N.Y.* Stable emulsion and method for preparation the reform. Patent USA № 3981844. 1976.
- [2] *Чеканов В.В., Дроздова В.И.* Магниточувствительная эмульсия. А.с. № 966735/СССР/Открытие. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки. 1982. № 38.
- [3] *Диканский Ю.И., Беджанян М.А., Киселев В.В.* // Коллоидн. журн. 2002. Т. 64. № 1. С. 34–38.
- [4] *Диканский Ю.И., Нечаева О.А., Закинян А.Р.* // Коллоидн. журн. 2006. Т. 68. № 2. С. 161–165.
- [5] Эмульсии / Под ред. Ф. Шермана: Л.: Химия, 1972. 448 с.
- [6] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 624 с.
- [7] *Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О.* Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1989. 387 с.