

УДК 541.182,537.632

## ЭФФЕКТ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ МАГНИТНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МАГНИТНОГО И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ

© 2019 г. С. С. Белых<sup>1</sup>, К. В. Ерин<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Северо-Кавказский федеральный университет”, Ставрополь, Россия

\*E-mail: exiton@inbox.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Исследован эффект изменения прозрачности в магнитных эмульсиях на водной основе при воздействии импульсного магнитного поля и гидродинамического поля, образующегося при вращении кюветы с образцом. Обнаружено существенное (4–5 кратное) изменение прозрачности образцов эмульсии при воздействии магнитного поля. Показано, что при вращении кюветы с образцом величина эффекта изменения прозрачности в магнитном поле уменьшается.

DOI: 10.1134/S036767651907007X

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитная эмульсия представляет собой систему микрокапель магнитной жидкости, взвешенных в жидкой среде. Выделяют два типа магнитных эмульсий, отличающихся величиной межфазного натяжения на границе капля магнитной жидкости–дисперсионная среда. К первому типу относятся магнитные эмульсии на водной основе, в которой диспергированы капли магнитной жидкости – коллоидного раствора частиц ферро- или ферритмагнитных материалов в углеводородах (керосине, толуоле и т.п.). Межфазное натяжение в таких системах достаточно велико и характерной особенностью таких систем является отсутствие существенной деформации микрокапель в магнитном поле. При этом капли магнитной жидкости могут образовывать цепочечные агрегаты, вытянутые в направлении поля. К другому типу относят магнитные эмульсии на основе минеральных масел. Диспергирование в них углеводородных магнитных жидкостей приводит к образованию развитой системы микрокапель, которые способны деформироваться даже в самых небольших магнитных полях. В таких эмульсиях при воздействии электрического и магнитного полей образуются сложные агрегативные, в том числе лабиринтные структуры из микрокапель [1]. При определенных условиях возможно даже образование эмульсии, когда дисперсная фаза – магнитная жидкость и дисперсионная среда – минеральное масло меняются местами. Физические свойства магнитных эмульсий активно исследуются в

последнее время [2]. Процессы деформации капель, образование агрегативных структур приводят к изменению магнитных, реологических, электрофизических и оптических свойств магнитных эмульсий [3–5]. Среди оптических эффектов в магнитных эмульсиях известны дифракционное рассеяние света [6, 7] и изменение прозрачности [8]. Магнитные эмульсии являются перспективной средой для дефектоскопии магнитных материалов [9], а также для создания магнитоуправляемых оптических фильтров [10]. Настоящая работа посвящена исследованию оптических эффектов, возникающих в магнитных эмульсиях при воздействии магнитного поля, а также влиянию гидродинамических полей на их величину.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследований был приготовлен образец магнитной эмульсии на водной основе, с каплями, представляющими собой керосиновую магнитную жидкость. Образцы готовились методом ультразвукового смешивания с добавлением ПАВ и последующим осаждением в неоднородном магнитном поле наиболее крупных капель. Таким образом, достигалась относительная агрегативная и седиментационная устойчивость, достаточная для проведения длительных серий измерений. Итоговая концентрация получившегося образца вычислялась по плотности и составляла порядка 0.5%.

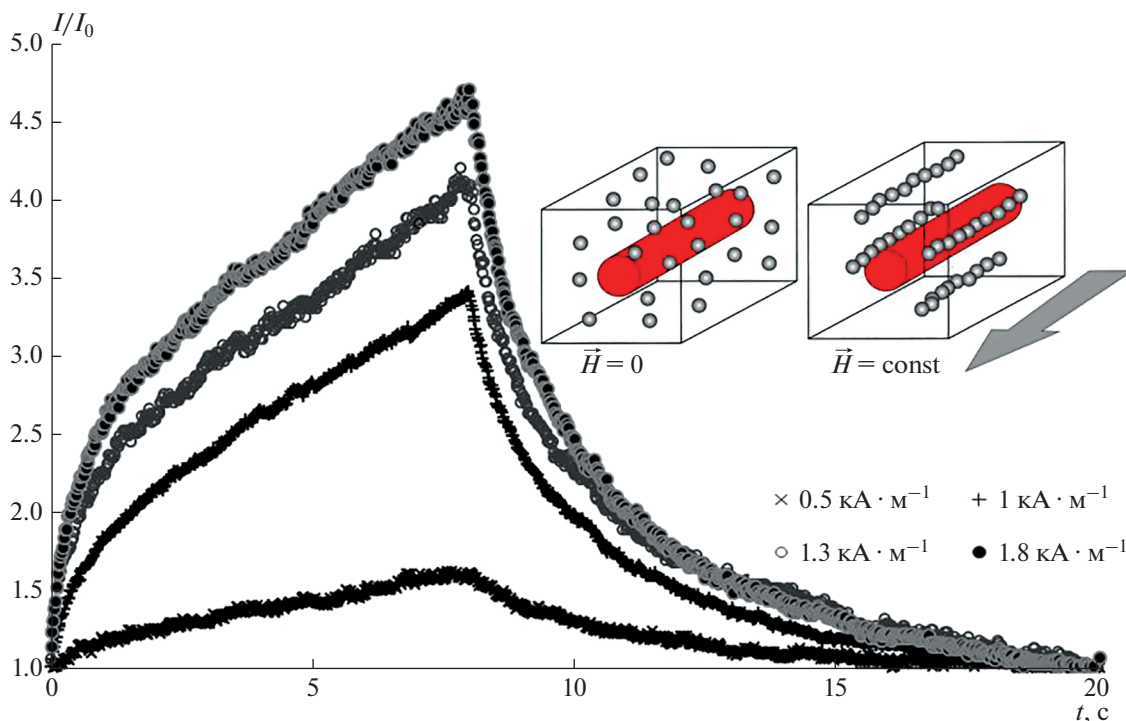


Рис. 1. Эффект изменения прозрачности магнитной эмульсии в продольном поле при различных амплитудах магнитного поля (длительность импульса 8 с). На врезке — механизм изменения прозрачности эмульсии под действием поля.

Для исследования изменения прозрачности магнитных эмульсий при воздействии импульсного магнитного поля прозрачная стеклянная ячейка с образцом толщиной 1 мм помещалась в область однородного поля катушек Гельмгольца, через которые пропусклся импульсный электрический ток при помощи электронного ключа. Сквозь ячейку с образцом эмульсии пропусклся свет гелий-неонового лазера с длиной волны 633 нм, который затем регистрировался фотодетектором. Амплитуда напряженности магнитного поля составляла от 0.1 до 6 кА/м, длительность импульсов от 5 до 30 с. Длительность промежутка между импульсами подбиралась экспериментально таким образом, чтобы прозрачность системы могла восстанавливаться до первоначального значения. Для проведения исследований методом вращающейся кюветы в магнитном поле использовалась установка аналогичная [11]. Кювета приводилась во вращение двигателем постоянного тока с ШИМ-регулятором оборотов, который позволял плавно менять скорость вращения в пределах 40–250 об./мин.

При воздействии магнитного поля прозрачность магнитной эмульсии увеличивается. Наибольший эффект увеличения прозрачности достигается в так называемой продольной конфигурации, когда магнитное поле направлено вдоль луча света. На рис. 1 представлены кривые изменения

прозрачности при воздействии прямоугольных импульсов магнитного поля длительностью 8 секунд с различными амплитудами. Видно, что в достаточно сильном поле с напряженностью около 2 кА/м прозрачность эмульсии увеличивается почти в 5 раз. Время полной релаксации эффекта после выключения поля до первоначального уровня 8–12 с.

Воздействие гидродинамического поля вращающейся жидкости в кювете приводит к изменению формы зависимости прозрачности образца от времени, а также к уменьшению времени релаксации эффекта после выключения поля. Величина максимального изменения интенсивности прошедшего света при увеличении скорости вращения кюветы также уменьшается (рис. 2). При возрастании частоты вращения кюветы с 80 до 200 об./мин амплитуда оптического эффекта уменьшается примерно в три раза. При этом существенно уменьшается время релаксации оптического эффекта до 0.5–1 с.

Эффект изменения прозрачности в продольном поле может быть интерпретирован формированием цепочек из капель эмульсии в магнитном поле и последующим вторичным агрегированием цепей в более крупные структуры, ориентированные вдоль направления поля. При этом суммарное сечение ослабления света существенно уменьшается, что приводит к значительному увеличению прозрачности образца. После выключения поля струк-

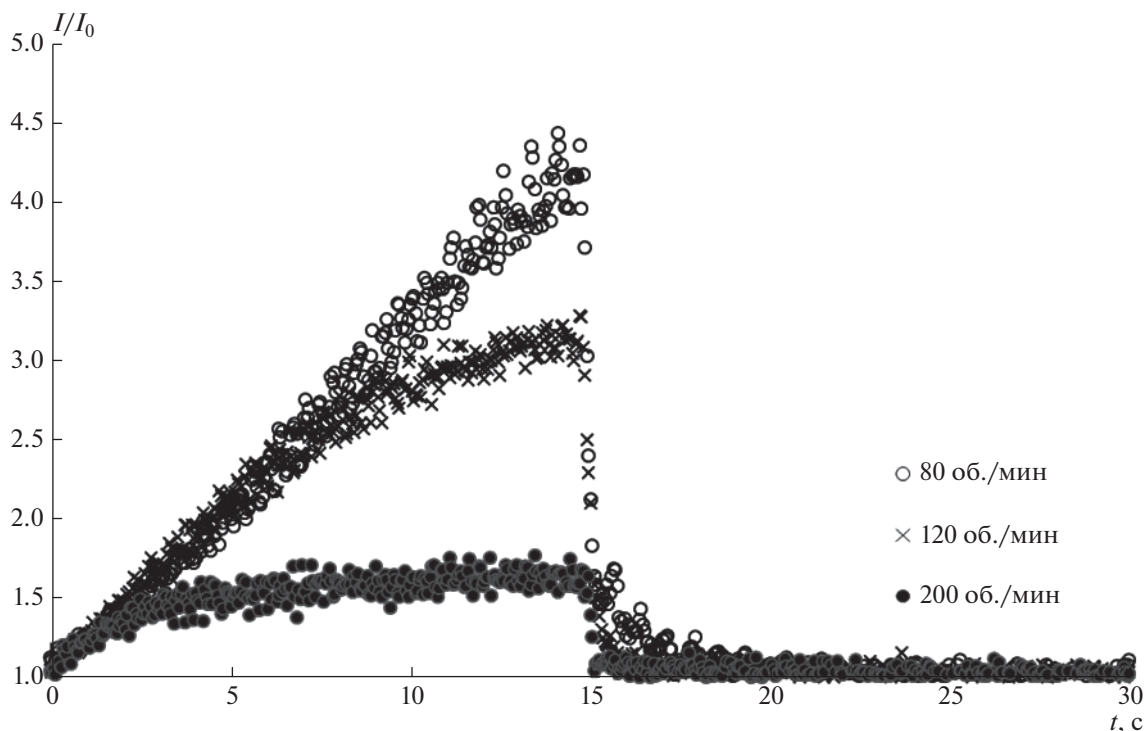


Рис. 2. Эффект изменения прозрачности во вращающейся кювете при различных скоростях вращения (длительность импульса магнитного поля 15 с, амплитуда – 2 кА/м).

тура цепочечного агрегата становится рыхлой, и он распадается за счет броуновской диффузии отдельных микрокапель.

Релаксация электро- или магнитооптических эффектов после выключения поля описывается выражением [12]:

$$A(t) = A \exp(-t/\tau)_{max}, \quad (1)$$

где  $A$  – величина электро- или магнитооптического эффекта,  $\tau$  – характерное время его релаксации. В случае ориентационных оптических эффектов (двойное лучепреломление, дихроизм) время релаксации определяется коэффициентом вращательной броуновской диффузии  $\tau \approx 1/6D_r$ . В магнитных эмульсиях на водной основе магнитооптический эффект, по-видимому, не является ориентационным, и релаксация после выключения поля определяется поступательной диффузией отдельных капель. После выключения поля возникшие цепочечные агрегаты из микрокапель эмульсии разрушаются под действием теплового движения. Время релаксации в таком случае можно оценить по формуле:

$$\tau \approx \frac{L^2}{D_t}, \quad (2)$$

где  $L$  – среднее расстояние между цепочечными агрегатами из микрокапель, а  $D_t$  – коэффициент поступательной диффузии микрокапли.

Воздействие на цепочки капель гидродинамического поля во вращающейся кювете приводит к появлению момента сил, отклоняющего цепочки от направления магнитного поля, что способствует их разрушению при достаточно быстром вращении кюветы с образцом. Разрушение цепочечных агрегатов из микрокапель приводит к уменьшению оптического эффекта изменения прозрачности, а также к его более быстрой релаксации после выключения поля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магнитных эмульсиях на водной основе с высоким межфазным натяжением обнаружено значительное (4–5 раз) увеличение прозрачности при воздействии продольного магнитного поля с напряженностью до 2 кА/м. Изучено влияние вращения кюветы на эффект изменения прозрачности в магнитном поле. Установлено, что при вращении образца величина оптического эффекта уменьшается с ростом скорости вращения кюветы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-03-00279а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Philip J., Kiran R., Jayakumar T. et al. // *Ind. J. Pure Appl. Phys.* 2002. V. 40. P. 370.
2. Dikansky Yu.I., Zakinyan A.R., Tyatyushkin A.N. // *Phys. Rev. E.* 2011. V. 84. Art. № 031402.
3. Zakinyan A., Dikansky Yu., Bedzhanyan M. // *J. Disp. Sci. Techn.* 2014. V. 35. № 1. P. 111.
4. Ivey M., Jing Liu, Zhu Yun et al. // *Phys. Rev. E.* 2000. V. 63. Art. № 011403.
5. Brown P., Butts C.P., Cheng J. et al. // *Soft Matt.* 2012. V. 8. P. 3545.
6. Parekh K., Patel R., Upadhyay R.V. et al. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2005. V. 289. P. 311.
7. Belykh S.S., Yerin C.V. // *Magnetohydrodynamics.* 2018. V. 54. № 1–2. P. 5.
8. Ерин К.В., Куникин С.А. // *Опт. и спектроск.* 2008. Т. 104. № 2. С. 319.
9. Mahendran V., Philip J. // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 100. Art. № 073104.
10. Philip J., Jaykumar T., Kalyanasundaram P. et al. // *Meas. Sci. Techn.* 2003. V. 14. № 8. P. 1289.
11. Скибин Ю.Н., Чеканов В.В. // *Магн. гидродинамика.* 1979. № 1. С. 19.
12. Khlebtsov N.G., Melnikov A.G., Bogatyrev V.A. et al. // *J. Quant. Spectr. Radiat. Transf.* 1999. V. 63. P. 469.