

Оригинальная статья / Original article

УДК 538.9

Полевая зависимость ротационного эффекта в магнитных жидкостях

А. Г. Беседин¹, И. А. Шабанова¹, А. О. Танцюра¹, А. С. Чекаданов¹,
А. М. Стороженко¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: storogenko_s@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Динамика вращения масс жидкости, изучение равновесных форм вращающихся жидких тел и их неравновесных состояний традиционно привлекает внимание исследователей. Центральной проблемой настоящей работы является экспериментальное исследование ротационного эффекта в магнитной жидкости. За счет пространственной ориентации наночастиц магнетита под действием внешнего вращающегося магнитного поля макроскопическая капсула с образцом приобретает вращательный момент, величина которого зависит от множества параметров. Обсуждается зависимость ротационного эффекта от частоты и амплитуды внешнего вращающегося магнитного поля, а также от концентрации и вязкости образца магнитной жидкости.

Методы. Объектом исследования являются магнитные жидкости APG 942 и APG 2135, изготовленные на заводе Ferrotec Corporation (Япония), и их производные, полученные путем смешивания с жидкостями додекан и дуразин.

Экспериментальные данные получены на установке, представляющей собой торсионный маятник, находящийся во вращающемся магнитном поле. Исследуемые образцы заливаются в сферическую капсулу и подвешиваются на тонкой упругой нити. Размещенная под образцом веб-камера регистрирует угол поворота сферы относительно положения равновесия.

Результаты. В результате экспериментальных исследований получен массив данных по зависимости величины ротационного эффекта в магнитной жидкости от амплитуды и частоты внешнего магнитного поля. Обсуждается влияние на ротационный эффект концентрации, магнитных характеристик и вязкости образцов магнитной жидкости. Предлагается агрегационная модель ротационного эффекта, описывающая экспериментальные данные с точки зрения образования и разрушения агрегатов и кластеров из магнитных наночастиц.

Заключение. Результаты работы позволяют анализировать магнитные дисперсные системы с точки зрения их строения и внутренней структуры и могут быть использованы при разработке устройств, основанных на воздействии переменных магнитных полей на магнитную жидкость.

Ключевые слова: магнитная жидкость; ротационный эффект; вращательный момент; вращающееся магнитное поле; торсионный маятник; агрегат.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Благодарности: Авторы выражают признательность доктору Триттелю за помощь в постановке эксперимента и профессору Штаннариусу за конструктивное обсуждение полученных результатов.

Для цитирования: Полевая зависимость ротационного эффекта в магнитных жидкостях / А. Г. Беседин, И. А. Шабанова, А. О. Танцюра, А. С. Чекаданов, А. М. Стороженко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11, № 2. С. 119–132.

Поступила в редакцию 20.03.2021

Подписана в печать 28.04.2021

Опубликована 16.06.2021

The Dependence of the Rotational Effect in Magnetic Fluids on the Parameters of Magnetic Field

Alexander G. Besedin¹, Irina A. Shabanova¹, Anton O. Tantsyura¹,
Alexander S. Chekadanov¹, Anastasiya M. Storozhenko¹ ✉

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: storogenko_s@mail.ru

Abstract

Purpose. The dynamics of the rotation of liquid masses, the study of the equilibrium shapes of rotating liquids and their nonequilibrium states have traditionally attracted the researchers' attention. The key problem of this work is the experimental study of the rotational effect in magnetic fluids. A macroscopic capsule filled with magnetic fluid acquires a rotational moment because of spatial orientation of magnetite nanoparticles under the action of an external rotating magnetic field. The magnitude of this effect depends on many parameters. We discuss how it depends on the frequency and amplitude of the external rotating magnetic field, as well as on the concentration and viscosity of the magnetic fluid.

Methods. Our research object is magnetic fluids APG 942 and APG 2135, produced at the Ferrotec Corporation (Japan), and their derivants obtained by mixing with dodecane and durazin. Magnetic nanoparticles are from magnetite, dispersion medium is synthetic hydrocarbon oil.

The experimental data were obtained using a torsion pendulum in a rotating magnetic field. A spherical capsule was filled with the samples and suspended on a thin elastic thread. A webcam placed under the capsule registered the angle of its rotation relative to the equilibrium position. Taking into account the elastic coefficient of the thread, we plotted the dependences of the rotational moment of the sample on the parameters of the external rotating magnetic field.

Results. The result of our experimental research is the dependences of the rotational effect in a magnetic fluid on the amplitude and frequency of the external magnetic field. The influence of the concentration, magnetic characteristics and viscosity of magnetic fluid samples on the rotational effect is also discussed. We suggest the aggregation model of the rotational effect, which describes the experimental data from the point of view of the formation and destruction of aggregates and clusters of magnetic nanoparticles.

Conclusion. The research results allow analyzing the structure of magnetic dispersed systems. It can be used in the development of devices based on the action of alternating magnetic fields on a magnetic fluid.

Keywords: fluid, rotational effect, rotational moment, rotating magnetic field, torsion pendulum, aggregate.

Conflict of interest: The authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Dr. Trittel for his help in setting up the experiment and to Professor Stannarius for a constructive discussion of the results obtained.

For citation: Besedin A. G., Shabanova I. A., Tantsyura A. O., Chekadanov A. S., Storozhenko A. M. The Dependence of the Rotational Effect in Magnetic Fluids on the Parameters of Magnetic Field. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2021; 11(2): 119–132. (In Russ.)

Received 20.03.2021

Accepted 28.04.2021

Published 16.06.2021

Введение

Высокостабильные дисперсные системы магнитных наночастиц в жидкостях-носителях носят название магнитных жидкостей (МЖ). Они относятся к материалам, свойствами которых можно управлять воздействием внешних электромагнитных полей, что открывает широкие перспективы их практического применения. Сочетание текучести магнитных жидкостей и их способности активно взаимодействовать с внешним магнитным полем способствует их применению в промышленности, технике и медицине. Кроме прикладного значения, такие системы вызывают и теоретический интерес, вследствие обладания ими оригинальными магнитомеханическими, электрооптическими и акустическими свойствами.

Взаимосвязь между макроскопическим потоком жидкости и микроскопическими магнитными моментами наночастиц, диспергированных в ней, представляет значительный научный интерес. Первые эксперименты по измерению потока магнитной жидкости в цилиндрической геометрии относятся к

концу 1960-х гг. [1] Динамика этого процесса находит применение в технике (магнитомеханические и магнитооптические устройства и датчики) и медицине [2]. Опубликовано множество статей о поведении магнитных жидкостей в переменных (вращательных и колебательных) магнитных полях. В значительной части таких исследований обсуждается эффект отрицательной вязкости, возникающей из-за вращения магнитных частиц с завихренностью потока, что снижает эффективную вязкость [3]. При этом описываются результаты, полученные в различных экспериментальных геометриях: цилиндрические контейнеры [4; 5], сферические образцы [6] и капли [7]. Построенные профили поверхностной скорости потока показывают, что МЖ вращается в направлении, зависящем от приложенной амплитуды магнитного поля, частоты и направления вращения [5]. Описаны случаи, когда МЖ вращается в направлении вращения магнитного поля, а также случаи, когда вращение встречное [8; 9]. Обычно совпадение направлений вращения наблюдается в слабых магнитных полях, а

встречное вращение – в сильных. Однако возможен и обратный случай.

Разработано множество теоретических моделей, описывающих экспериментальные данные по измерению потока и вращательного момента образцов МЖ во вращающемся магнитном поле. Феноменологическая теория континуума [10], основанная на спиновой диффузии, позволяет аналитически рассчитать поток МЖ в однородном вращающемся магнитном поле. При этом теория дает корректные результаты для точек в объеме образца, но приводит к значительным расхождениям с экспериментом на поверхности МЖ [11]. Тщательное измерение объемного потока и механического вращательного момента МЖ в цилиндрической геометрии проведено в [5]. При этом в теоретических расчетах предполагается, что поля намагничивания и размагничивания однородны, что невозможно реализовать на практике в случае использования цилиндров. В этом отношении эллипсоид или сфера являются более подходящей геометрией для проверки теории.

Другим важным аспектом ротационного эффекта является механизм релаксации намагниченности магнитных наночастиц в разбавленных образцах МЖ. Известно, что для более крупных частиц основной вклад вносит броуновская релаксация, где магнитный момент «вморожен» в объем частицы, а для мелкодисперсной фракции становится более существенной неелевская релаксация,

при которой магнитный момент ориентируется независимо от движения и вращения самой частицы. Поскольку в МЖ наблюдается широкое распределение частиц по размерам, необходимо учитывать оба типа релаксации. Соответствующая теория должна включать в себя уравнения динамики вращения магнитного момента относительно наночастицы, передачу магнитного момента от частицы к капсуле с образцом через энергию анизотропии частицы и потери на трение из-за вращательного движения частиц в жидкости [12; 13]. Эта проблема также обсуждается в связи с биологическими применениями разбавленных дисперсий магнитных наночастиц [12; 14–21]. Экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, укладываются в эту общую концепцию.

Материалы и методы

Экспериментальная установка (подробное описание см. в [22]) представляет собой торсионный маятник, помещенный во вращающееся магнитное поле. Исследуемый образец МЖ заливается в стеклянную сферическую капсулу диаметром ~ 2 см и подвешивается на тонкой упругой нити длиной ~ 80 см. Создаваемое катушками Гельмгольца магнитное поле вращается в горизонтальной плоскости с частотой от 5 Гц до 50 кГц (амплитудное значение 10 мТл). Для поддержания постоянной температуры и уменьшения колебаний сфера с

образцом помещается в прозрачную кювету с дистиллированной водой. Угол поворота капсулы с образцом относительно положения равновесия регистрируется размещенной под ним веб-камерой, соединенной с компьютером.

Экспериментальные данные получены для коммерческих образцов магнитных жидкостей APG 942 и APG 2135,

предоставленных заводом Ferrotec Corporation (Япония). В обеих МЖ дисперсионной средой является синтетическое углеводородное масло, а дисперсной фазой – магнетит. Характеристики образцов приведены в таблице 1. Начальная магнитная восприимчивость и намагниченность насыщения вычислены по кривой намагничивания, остальные параметры указаны в паспорте образцов.

Таблица. Физические свойства образцов

Table. Physical properties of magnetic fluid samples

Коммерческое название МЖ	APG 942	APG 2135
Теплопроводность, мВт/К·м	150	150
Коэффициент теплового расширения, K^{-1}	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$
Динамическая вязкость, мПа·с	10000	1500
Температура плавления, °C	–25	–32
Плотность, кг/м ³	1100	1070
Начальная магнитная восприимчивость χ	1,8	1,7
Намагниченность насыщения M_s , кА/м	24	22

Экспериментальные исследования проводились для неразбавленных образцов APG 942 и APG 2135, а также для их производных, полученных путем смешивания с додеканом (APG 942) и дуразином (APG 2135) до объемных концентраций исходной МЖ 45%, 60%, 70%, 80%, 86%, 90%, 93%.

Результаты и их обсуждение

Влияние напряженности внешнего магнитного поля

Для всех исследуемых жидкостей были получены экспериментальные зависимости вращающего момента, нормированного по объему МЖ [23], от амплитуды вращающегося магнитного поля в диапазоне от 0 до 3 мТл (рис. 1)

(для неразбавленных МЖ). Как и в случае диэлектрических цилиндров [4; 23], экспериментальные значения аппроксимируются квадратичной функцией. Иными словами, величина ротационного эффекта квадратично зависит от индукции внешнего магнитного поля $T \sim B^2$.

Следует отметить, что несмотря на схожие магнитные параметры образцов APG 942 и APG 2135 (см. табл.) абсолютная величина ротационного эффекта, наблюдаемого в APG 2135, значительно превышает соответствующую величину в APG 942. Причиной этого является существенная разница в вязкости образцов.

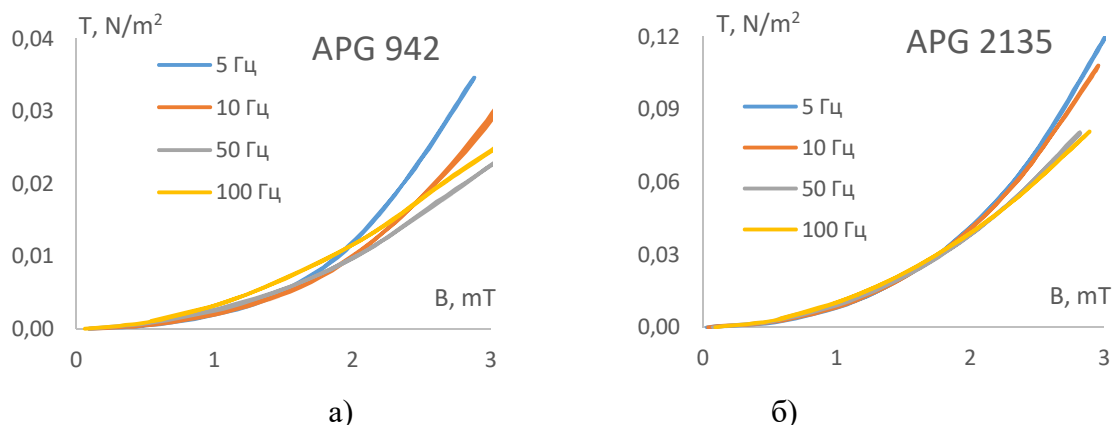


Рис. 1. Зависимость ротационного эффекта от амплитуды вращающегося магнитного поля:
а – APG 942; б – APG 2135

Fig. 1. The dependence of rotational effect on the strength of rotating magnetic field: а – APG 942;
б – APG 2135

Влияние частоты вращающегося магнитного поля

При фиксированной амплитуде 2 мТл внешнего вращающегося магнитного поля с ростом частоты от 2 до 350 Гц наблюдается немонокотонное изменение

величины ротационного эффекта. На форму экспериментальных зависимостей удельного вращающего момента от частоты оказывает существенное влияние степень разбавления исходного образца (рис. 2 и 3).

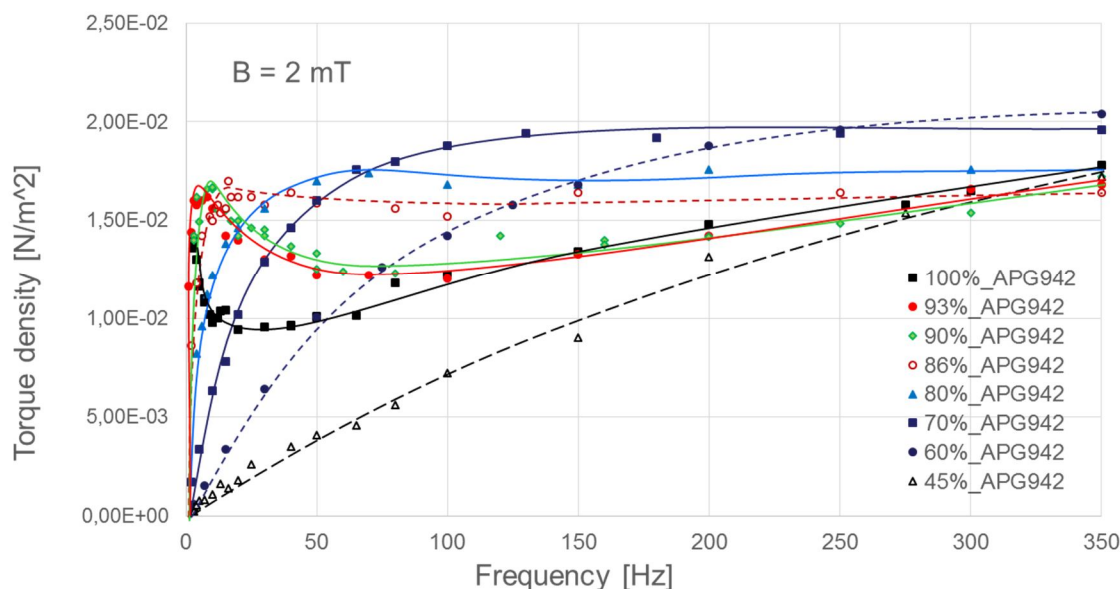


Рис. 2. Зависимость ротационного эффекта от частоты вращающегося магнитного поля (серия образцов на основе APG 942)

Fig. 2. The dependence of rotational effect on the frequency of rotating magnetic field (samples based on APG 942)

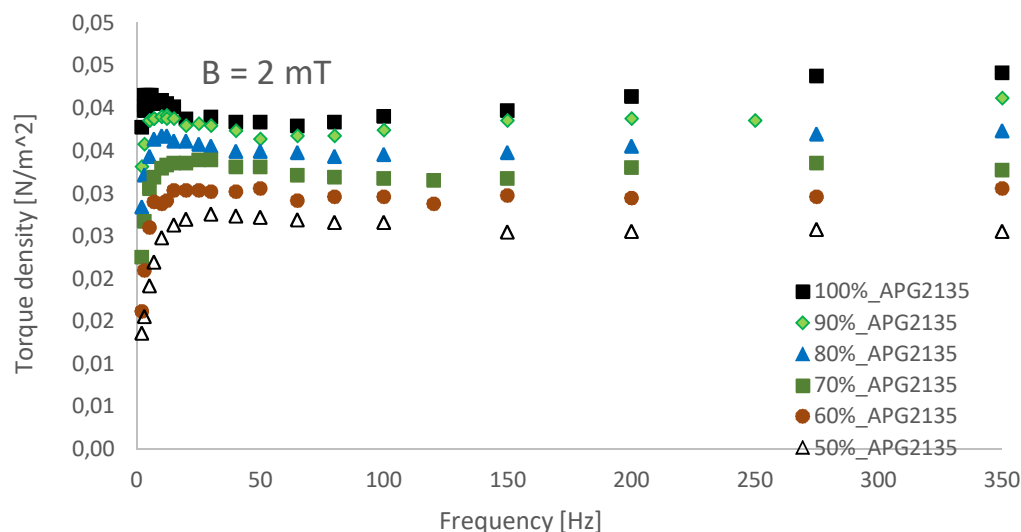


Рис. 3. Зависимость ротационного эффекта от частоты вращающегося магнитного поля (серия образцов на основе APG 2135)

Fig. 3. The dependence of rotational effect on the frequency of rotating magnetic field (samples based on APG 2135)

В целом наблюдается общая тенденция к смещению максимума величины ротационного эффекта в сторону более низких частот с ростом вязкости и концентрации магнитной фазы.

Влияние концентрации магнитной жидкости

При фиксированных параметрах внешнего магнитного поля получены

экспериментальные зависимости величины ротационного эффекта от объемной концентрации МЖ в разбавленных образцах (рис. 4). Единица по оси абсцисс означает неразбавленный образец APG 942 или APG 2135. В образцах на основе APG 942 наблюдается максимум величины вращающего момента, а в образце APG 2135 концентрационные зависимости являются монотонными.

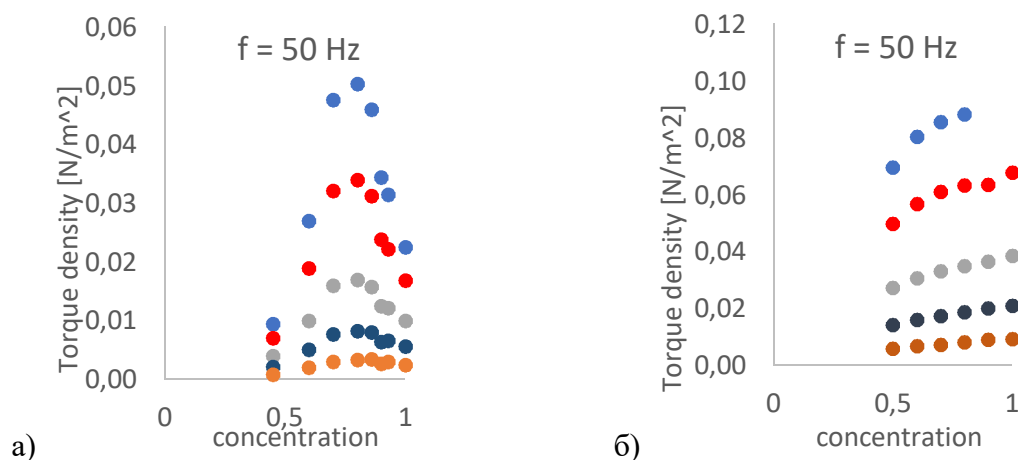


Рис. 4. Концентрационные зависимости ротационного эффекта: а – APG 942; б – APG 2135

Fig. 4. Concentration dependences of rotational effect: а – APG 942; б – APG 2135

Анализ эксперимента. Механизмы ротационного эффекта

С точки зрения инженерной реализации цилиндрическая геометрия является наиболее простой для измерения ротационного эффекта. Исследуемый образец МЖ помещается в промежуток между двумя коаксиальными цилиндрами, один из которых неподвижен, а второй – может вращаться, но закреплен на упругой нити [23]. Поток МЖ вследствие действия на нее вращающегося магнитного поля приводит в движение подвижный цилиндр, вращательный момент которого может быть измерен. Величину ротационного эффекта в этом случае предлагается рассчитать по формуле [23]

$$T = - \frac{16\mu_0\chi_2(1+\chi_1)H_0^2}{\left(4 + 4\chi_1 + \chi^2 - \chi^2 R_1^2 / R_2^2\right)^2},$$

где R_1 и R_2 – радиусы подвижного и неподвижного цилиндров; χ_1 и χ_2 – действительная и мнимая части магнитной восприимчивости образца МЖ.

Поскольку магнитная восприимчивость быстро увеличивается с ростом концентрации магнитных частиц в образце, концентрационная зависимость ротационного эффекта оказывается не монотонной. В начале вращающий момент увеличивается благодаря множителю χ_2 в числителе, а затем уменьшается из-за быстрого роста знаменателя [23]. При этом важную роль играет размагничивающее поле, которое сильно зависит от геометрии образца. Именно по этой причине более предпочтительной оказывается сферическая геометрия,

где размагничивающий фактор во всех направлениях равен $1/3$.

Известно, что с ростом концентрации магнитных наночастиц в образце увеличивается как количество агрегатов, так и среднее число частиц в агрегате. Даже при выключенном магнитном поле в МЖ присутствует некоторое количество образований из крупных частиц, которые при наложении магнитного поля способны трансформироваться в различные типы агрегатов: веревочные, каплевидные, квазитвердые и др.

Интерпретация экспериментальных данных по полевой зависимости ротационного эффекта невозможна без учета агрегирования магнитных наночастиц в магнитном поле (рис. 5). Примем, что 1 на оси концентрации – это неразбавленный образец МЖ, а 0 – жидкость-разбавитель (для APG 942 это додекан).

В случае, когда образец не разбавлен, а вращающееся магнитное поле имеет низкую частоту, внутри капсулы с МЖ образуется некоторое небольшое количество крупных агрегатов (т. е. состоящих из множества частиц). Время релаксации таких агрегатов значительно больше времени релаксации одиночных наночастиц, поэтому такие образования нестабильны и быстро разрушаются при увеличении частоты магнитного поля. В экспериментальной зависимости ротационного эффекта от частоты поля имеет место резкий спад, объясняемый указанным процессом, и затем увеличение сигнала, показывающее ориентацию по полю отдельных частиц и небольших кластеров.

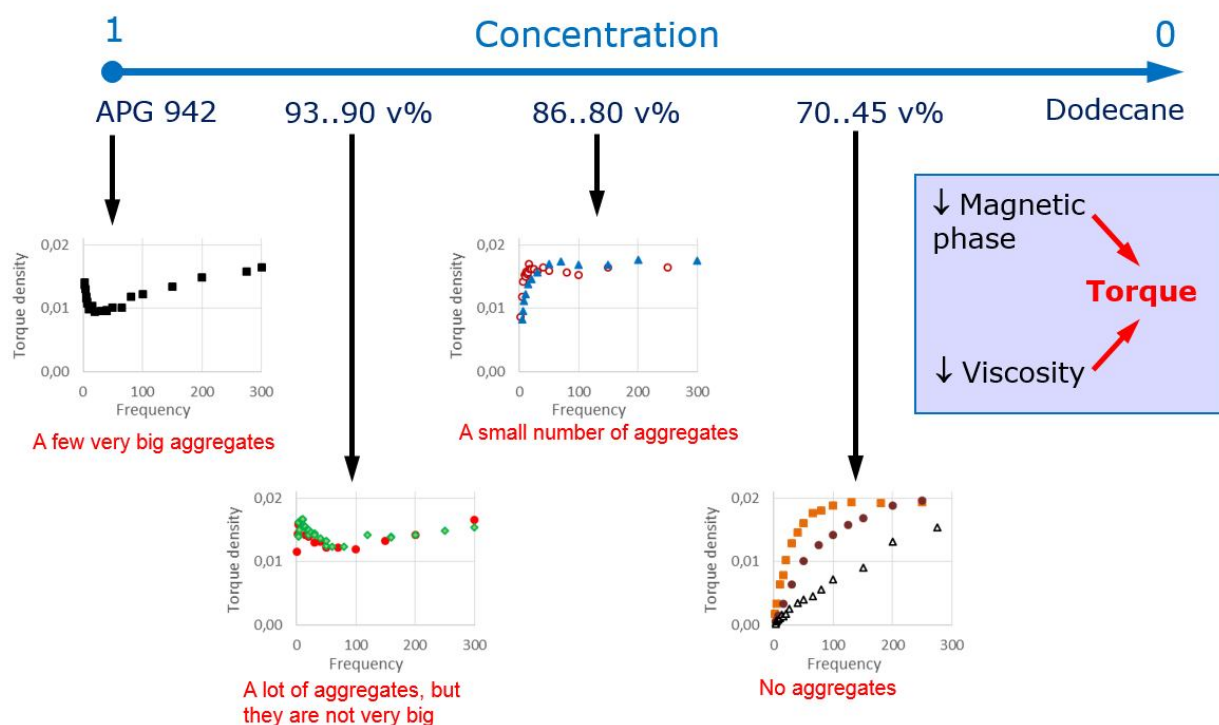


Рис. 5. Агрегационный механизм ротационного эффекта

Fig. 5. The aggregation mechanism of rotational effect

При уменьшении концентрации начального образца до ~90% также предполагается процесс образования агрегатов и кластеров, но они уже не так велики, как в предыдущем случае. Их разрушение происходит в магнитных полях с большей частотой, а их вклад в общую величину ротационного эффекта меньше по сравнению с неразбавленным образцом.

Для образца APG 942 немонотонный характер экспериментальных зависимостей ротационного эффекта от частоты вращающегося магнитного поля наблюдается для концентраций $\geq 70\%$. На графиках (рис. 2, 5) присутствует максимум на частоте ~20 Гц. В магнитных дисперсных системах с объемной концентрацией исходной магнитной

жидкости менее 70% агрегаты практически отсутствуют, поэтому наблюдается монотонное возрастание сигнала с частотой.

Кроме указанных процессов агрегирования, на величину ротационного эффекта также влияет снижение вязкости и уменьшение магнитных свойств системы при разбавлении ее маловязкой и немагнитной жидкостью-разбавителем (додеканом и дуразином). Оба параметра также снижают способность образца следовать изменению внешнего магнитного поля.

Выводы

В работе проведено экспериментальное исследование ротационного эффекта в коммерческих магнитных жид-

костях APG 942 и APG 2135, предоставленных заводом-изготовителем Ferrotec Corporation (Япония).

Измерение величины ротационного эффекта проводилось на экспериментальной установке, в основе которой лежит торсионный маятник, размещенный в центре системы катушек Гельмгольца. Вращающееся магнитное поле изменялось в диапазоне от 0 до 3 мТл и от 5 Гц до 50 кГц.

Результатами работы являются экспериментальные зависимости величины ротационного эффекта от амплитуды и частоты внешнего магнитного поля, а также от концентрации и вязкости МЖ. В ходе анализа экспериментальных дан-

ных предложен агрегационный механизм, объясняющий немонотонность изменения ротационного эффекта с концентрацией МЖ и частотой магнитного поля.

Практическая значимость работы заключается в детальном описании поведения магнитной жидкости, находящейся во внешнем вращающемся магнитном поле. Результаты работы позволяют анализировать магнитные дисперсные системы с точки зрения их строения и внутренней структуры и могут быть использованы при разработке устройств, основанных на воздействии переменных магнитных полей на МЖ (например, в магнитожидкостных уплотнителях).

Список литературы

1. Moskowitz R., Rosensweig R. E. Nonmechanical torque-driven flow of a ferromagnetic fluid by an electromagnetic field // *Appl. Phys. Lett.* 1967. Vol. 11. P. 301–303.
2. Kumar C. S., Mohammad F. Magnetic nanomaterials for hyperthermia-based therapy and controlled drug delivery // *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2011. Vol. 63. P. 789–808.
3. “Negative-Viscosity” Effect in a Magnetic Fluid / J. C. Bacri, R. Perzynski, M. I. Shliomis, G. I. Burde // *Phys. Rev. Lett.* 1995. Vol. 75. P. 2128–2131.
4. Flows and torques in Brownian ferrofluids subjected to rotating uniform magnetic fields in a cylindrical and annular geometry / I. Torres-Diaz, A. Cortes, Y. Cedeño-Mattei, O. Perales-Perez, C. Rinaldi // *Physics of Fluids*. 2014. Vol. 26. P. 012004.
5. Chaves A., Zahn M., Rinaldi C. Spin-up flow of ferrofluids: Asymptotic theory and experimental measurements // *Phys. Fluids*. 2008. Vol. 20. P. 053102.
6. Torres-Diaz I., Rinaldi C. Ferrofluid flow in a spherical cavity under an imposed uniform rotating magnetic field: Spherical spin-up flow // *Phys. Fluids*. 2012. Vol. 24. P. 082002.
7. Morozov K. I., Engel A., Lebedev A. V. Shape transformations in rotating ferrofluid drops // *Europhys. Lett.* 2002. Vol. 58. P. 229–235.
8. Brown W. F. J. Thermal Fluctuations of a Single-Domain Particle // *Phys. Rev.* 1963. Vol. 130, is. 5. P. 1677–1686.

9. Kagan I. Y., Rykov V. G., Yantovskii E. I. Flow of a dielectric ferromagnetic suspension in a rotating magnetic field // *Magnetohydrodynamics*. 1973. Vol. 9. P. 258–261.
10. Zaitsev V. M., Shliomis M. I. Entrainment of ferromagnetic suspension by a rotating field // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1967. Vol. 10, is. 5. P. 696–700.
11. Rosensweig R. E., Popplewell J., Johnston R. J. Magnetic fluid motion in a rotating field // *J. Magn. Magn. Mater.* 1990. Vol. 85. P. 171–180.
12. Usadel K. D., Usadel C. Dynamics of magnetic single domain particles embedded in a viscous liquid // *J. Appl. Phys.* 2015. Vol. 118. P. 234303.
13. Usadel K. D. Dynamics of magnetic nanoparticles in a viscous fluid driven by rotating magnetic fields // *Phys. Rev. B*. 2017. Vol. 95. P. 103–108.
14. Scherer C., Figueiredo Neto A. M. Ferrofluids: Properties and Applications // *Brazilian Journal of Physics*. 2005. Vol. 35. P. 718–727.
15. Usov N. A. Low frequency hysteresis loops of superparamagnetic nanoparticles with uniaxial anisotropy // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 107. P. 123909.
16. Topical review: Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine / Q. A. Pankhurst, J. Connolly, S. K. Jones, J. Dobson // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 36. P. R167–R181.
17. Li Q., Xuan Y., Wang J. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2005. Vol. 30. P. 109–116.
18. Connolly J., Pierre T. G. St. Proposed biosensors based on time-dependent properties of magnetic fluids // *J. Magn. Magn. Mater.* 2001. Vol. 225, no. 1–2. P. 156–160.
19. Quantification of specific bindings of biomolecules by magnetorelaxometry / D. Eberbeck, C. Bergemann, F. Wiekhorst, U. Steinhoff, L. Trahms // *J. Nanobiotechnol.* 2008. Vol. 6. P. 1–12.
20. Biological sensors based on Brownian relaxation of magnetic nanoparticles / S. H. Chung, A. Hoffmann, S. D. Bader, C. Liu, B. Kay, L. Makowski, L. Chen // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85. P. 2971–2973.
21. Kafrouni L., Savadogo O. Recent progress on magnetic nanoparticles for magnetic hyperthermia // *Prog. Biomater.* 2016. Vol. 5. P. 147–160.
22. Measurement of the torque on diluted ferrofluid samples in rotating magnetic fields / A. M. Storozhenko, R. Stannarius, A. O. Tantsyura, I. A. Shabanova // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. Vol. 431. P. 66–69.
23. Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V. Action of a rotating magnetic field on a dielectric cylinder immersed in a magnetic fluid // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1996. Vol. 37. P. 305–310.

References

1. Moskowitz R., Rosensweig R. E. Nonmechanical torque-driven flow of a ferromagnetic fluid by an electromagnetic field. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, vol. 11, pp. 301–303.
2. Kumar C. S., Mohammad F. Magnetic nanomaterials for hyperthermia-based therapy and controlled drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2011, vol. 63, pp. 789–808.
3. Bacri J. C., Perzynski R., Shliomis M. I., Burde G. I. “Negative-Viscosity” effect in a magnetic fluid. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, vol. 75, pp. 2128–2131.
4. Torres-Diaz I., Cortes A., Cedeño-Mattei Y., Perales-Perez O., Rinaldi C. Flows and torques in Brownian ferrofluids subjected to rotating uniform magnetic fields in a cylindrical and annular geometry. *Physics of Fluids*, 2014, vol. 26, pp. 012004.
5. Chaves A., Zahn M., Rinaldi C. Spin-up flow of ferrofluids: Asymptotic theory and experimental measurements. *Phys. Fluids*, 2008, vol. 20, pp. 053102.
6. Torres-Diaz I., Rinaldi C. Ferrofluid flow in a spherical cavity under an imposed uniform rotating magnetic field: Spherical spin-up flow. *Phys. Fluids*, 2012, vol. 24, pp. 082002.
7. Morozov K. I., Engel A., Lebedev A. V. Shape transformations in rotating ferrofluid drops. *Europhys. Lett.*, 2002, vol. 58, pp. 229–235.
8. Brown W. F. J. Thermal Fluctuations of a Single-Domain Particle. *Phys. Rev.*, 1963, vol. 130, is. 5, pp. 1677–1686.
9. Kagan I. Y., Rykov V. G., Yantovskii E. I. Flow of a dielectric ferromagnetic suspension in a rotating magnetic field. *Magnetohydrodynamics*, 1973, vol. 9, pp. 258–261.
10. Zaitsev V. M., Shliomis M. I. Entrainment of ferromagnetic suspension by a rotating field. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1967, vol. 10, is. 5, pp. 696–700.
11. Rosensweig R. E., Popplewell J., Johnston R. J. Magnetic fluid motion in a rotating field. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1990, vol. 85, pp. 171–180.
12. Usadel K. D., Usadel C. Dynamics of magnetic single domain particles embedded in a viscous liquid. *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 118, pp. 234303.
13. Usadel K. D. Dynamics of magnetic nanoparticles in a viscous fluid driven by rotating magnetic fields. *Phys. Rev. B.*, 2017, vol. 95, pp. 103–108.
14. Scherer C., Figueiredo Neto A. M. Ferrofluids: properties and applications. *Brazilian Journal of Physics*, 2005, vol. 35, pp. 718–727.
15. Usov N. A. Low frequency hysteresis loops of superparamagnetic nanoparticles with uniaxial anisotropy. *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 107, pp. 123909.
16. Pankhurst Q. A., Connolly J., Jones S. K., Dobson J. Topical review: Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, vol. 36, pp. R167–R181.

17. Li Q., Xuan Y. Wang J. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2005, vol. 30, pp. 109–116.
18. Connolly J., Pierre T. G. St. Proposed biosensors based on time-dependent properties of magnetic fluids. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2001, vol. 225, no. 1–2, pp. 156–160.
19. Eberbeck D., Bergemann C., Wiekhorst F., Steinhoff U., Trahms L. Quantification of specific bindings of biomolecules by magnetorelaxometry. *J. Nanobiotechnol.*, 2008, vol. 6, pp. 1–12.
20. Chung S. H., Hoffmann A., Bader S. D., C. Liu, B. Kay, L. Makowski, Chen L. Biological sensors based on Brownian relaxation of magnetic nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, vol. 85, pp. 2971–2973.
21. Kafrouni L., Savadogo O. Recent progress on magnetic nanoparticles for magnetic hyperthermia. *Prog. Biomater.*, 2016, vol. 5, pp. 147–160.
22. Storozhenko A. M., Stannarius R., Tantsyura A. O., Shabanova I. A. Measurement of the torque on diluted ferrofluid samples in rotating magnetic fields. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2017, vol. 431, pp. 66–69.
23. Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V. Action of a rotating magnetic field on a dielectric cylinder immersed in a magnetic fluid. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1996, vol. 37, pp. 305–310.

Информация об авторах / Information about the Authors

Александр Геннадьевич Беседин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: besedin_a_g@mail.ru

Alexander G. Besedin, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: besedin_a_g@mail.ru

Шабанова Ирина Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: irina-a-sh@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0393-3538

Irina A. Shabanova, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: irina-a-sh@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0393-3538

Антон Олегович Танцюра, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроснабжения, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: tancyra@mail.ru

Александр Сергеевич Чекаданов, научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: alexch17@mail.ru

Анастасия Михайловна Стороженко, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: storogenko_s@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4995-7407

Anton O. Tantsyura, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Power Supply, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: tancyra@mail.ru

Alexander S. Chekadanov, Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: alexch17@mail.ru

Anastasiya M. Storozhenko, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: storogenko_s@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4995-7407