

УДК 681.2-5, 544.77.032.13, 532.135

Количественная оценка скорости седиментации магнитореологической жидкости с тиксотропными свойствами

Базиненков Алексей Михайлович

fkv20t335@student.bmstu.ru

Шелковый Михаил Андреевич

Фадеев Константин Вадимович

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлено исследование влияния ксантановой камеди в качестве тиксотропной добавки на скорость седиментации магнитореологической жидкости. Метод исследования седиментационной устойчивости основан на анализе магнитной проницаемости жидкости с использованием экспериментальной установки, включающей катушки Гельмгольца и чувствительную катушку для измерения индуцированного напряжения. Результаты показали, что увеличение концентрации ксантановой камеди (1, 2, 3 %) значительно снижает скорость седиментации магнитных частиц, при этом наилучшие результаты достигнуты при 3%-ной концентрации.

Ключевые слова: магнитореологическая жидкость, седиментация, тиксотропные свойства, магнитная проницаемость, стабилизация, реологические свойства

Quantitative evaluation of sedimentation rate of magnetorheological fluid with thixotropic properties

Bazinenkov Alexey Mikhailovich

fkv20t335@student.bmstu.ru

Shelkovy Mikhail Andreevich

Fadeev Konstantin Vadimovich

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents a study of the effect of xanthan gum as a thixotropic additive on the sedimentation rate of magnetorheological fluid. The method for studying sedimentation stability is based on the analysis of magnetic permeability of the fluid using an experimental setup that includes Helmholtz coils and a sensitive coil for measuring induced voltage. The results showed that increasing the concentration of xanthan gum (1, 2, 3 %) significantly reduces the sedimentation rate of magnetic particles. The best results were achieved at a concentration of 3 %.

Keywords: magnetorheological fluid, sedimentation, thixotropic properties, magnetic permeability, stabilization, rheological properties

Введение. Магнитореологические жидкости (МРЖ) относятся к классу «интеллектуальных» материалов, применяемых в таких устройствах как: установки прецизионной полировки [1], управляемые амортизаторы подвески автомобилей [2], приводы точных перемещений [3] и др. Ключевой

особенностью МРЖ является обратимое изменение реологических свойств и, в том числе, эквивалентной вязкости при приложении внешнего магнитного поля. Гидравлические приводы на основе такого материала могут быть отнесены к классу «прецизионных» за счет исключения инерционных элементов из контура управления, что позволяет обеспечить недостижимое для гидравлических систем ранее время отклика вплоть до 10 мс и погрешности позиционирования до 100 нм [4].

Основными компонентами МРЖ являются жидкость-носитель, магнитоактивный наполнитель (микрометровые частицы из мягкого магнитного материала) и функциональные добавки. В связи с тем, что плотность магнитоактивных наполнителей значительно превышает плотности жидкостей-носителей, со временем происходит седиментация частиц магнетика, что приводит к снижению или полной потере эксплуатационных характеристик. Функциональные добавки используются для снижения скорости седиментации [5] и делятся на два основных типа: поверхностно-активные вещества (ПАВ), покрывающие поверхность частиц наполнителя и предотвращающие возникновение агломераций частиц, и тиксотропные вещества, способные обратимо формировать структуры, удерживающие частицы магнетика во взвешенном состоянии за счет многократного повышения вязкости жидкости-носителя. Осаждение и агломерация магнитных частиц напрямую влияют на работу МРЖ, поэтому очень важно изучить устойчивость суспензий к осаждению.

Классическая модель седиментации описывается уравнением Стокса и была заложена в его работе (1851 г.) [6]. Несмотря на простоту модели, она имеет ряд серьезных ограничений. Так, коллоидный раствор должен обладать низкой концентрацией частиц (не более 2 % объемной концентрации), чтобы можно было считать, что рассматриваемая осаждающаяся частица не взаимодействует с другими частицами.

В свою очередь, теория седиментации Кинча (1952 г.) [7], с пониманием неполноты классической модели, предлагает считать, что в любой точки дисперсии скорость осаждения зависит только от локальной концентрации частиц. Преимущества теории: предсказание возникновения слоев жидкости с различной концентрацией и их движение, в том числе верхнего слоя седиментации, а также вычисление скорости седиментации частиц основываясь на их концентрации. Недостатками модели является необходимость знать начальную и мгновенную концентрацию частиц в исследуемой дисперсной системе, а также неприменимость данной к теории к средам низкой и промежуточной концентрации частиц.

Современные исследования моделей седиментации высококонцентрированных смесей направлены на уточнение моделей, рассматривая различные эффекты, оказывающие свое влияния на скорость движение частиц дисперсной фазы [8].

В настоящее время множество исследований направлено на повышение седиментационной стабильности магнитореологической жидкости. Часть из них сосредоточена на покрытии частиц полимерными композитами,

например полиметилметакрилат (PMMA), [9], полиэтиленгликоль (PEG) [10], поли(2-фторстирол) [11], многостенные углеродные нанотрубки [12], а также холестерилхлорформиат [13]. Покрытие частиц магнетика позволяет улучшить дисперсность системы и способность к редиспергированию, в дополнение к снижению скорости седиментации.

Другая часть исследований сосредотачивается на создании тиксотропных дисперсных сред, как за счет использования уникальных жидкостей высокой вязкости в состоянии покоя [14], так и за счет добавления дисперсной фазы, являющейся тиксотропным агентом. Среди таких тиксотропных веществ могут применяться: ксантановая камедь [15] и органические глины [16].

В рамках данного исследования предлагается изучение влияния ксантановой камеди на скорость седиментации МРЖ, в зависимости от концентрации тиксотропной добавки методом анализа магнитной проницаемости жидкости.

Методы и материалы. Метод измерения непрозрачных и/или высококонцентрированных магнитных суспензий основан на анализе магнитной проницаемости жидкости. Экспериментальная установка состоит из пары катушек Гельмгольца, которые используются для создания переменного магнитного поля низкой неравномерности в вертикальном направлении, пробирки, содержащей МРЖ, расположенной в центре катушек, чувствительной катушки, расположенной вокруг пробирки.

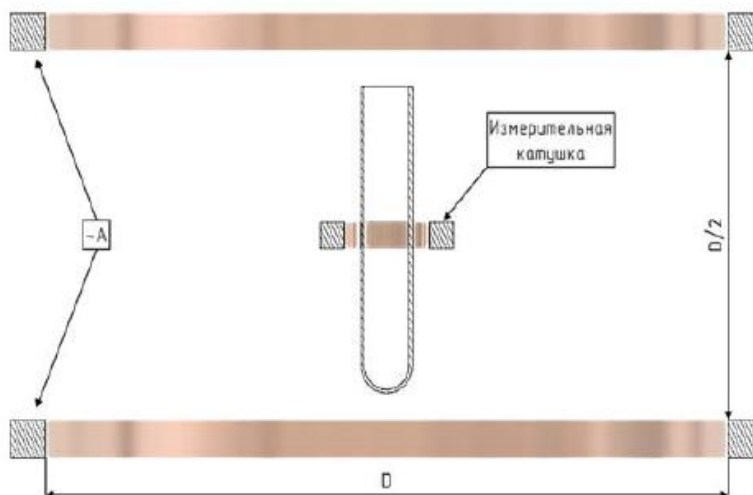


Рис. 1. Схема измерения седиментации магнито-реологической жидкости

МРЖ в зоне измерительной катушки выполняет функцию сердечника. Количество частиц МРЖ в измеряемой области определяет величину индуцированного напряжения на чувствительной катушке. Данная зависимость позволяет коррелировать изменения напряжения с процессом седиментации МРЖ.

Перед началом проведения эксперимента осуществляется изготовление МРЖ. Состав жидкости, используемой для исследования, включает в себя:

карбонильное железо марки Р-10, покрытое олеиновой кислотой, и вакуумное масло марки ВМ-1С. В качестве тиксотропной добавки используется ксантановая камедь, в массовых концентрациях 1, 2 и 3 %. Размер частиц ксантановой камеди был исследован на аппарате Horiba LA 960 и составляет 50 мкм.

Непосредственно перед экспериментом осуществляется тщательное перемешивание состава с целью обеспечения равномерного распределения магниточувствительных частиц по всему объему жидкости. Затем пробирка с жидкостью устанавливается в экспериментальный стенд. После этого на генераторе напряжения ГЗ-112 задаются параметры возбуждающего сигнала (120 Гц, 0,64 А), который подается на катушки Гельмгольца. Для обработки сигнала используется АЦП NI USB-6009, для записи — персональный компьютер.

Результаты и обсуждения. В результате измерения были получены кривые зависимости индуцированного напряжения в катушке от времени (рис. 2).

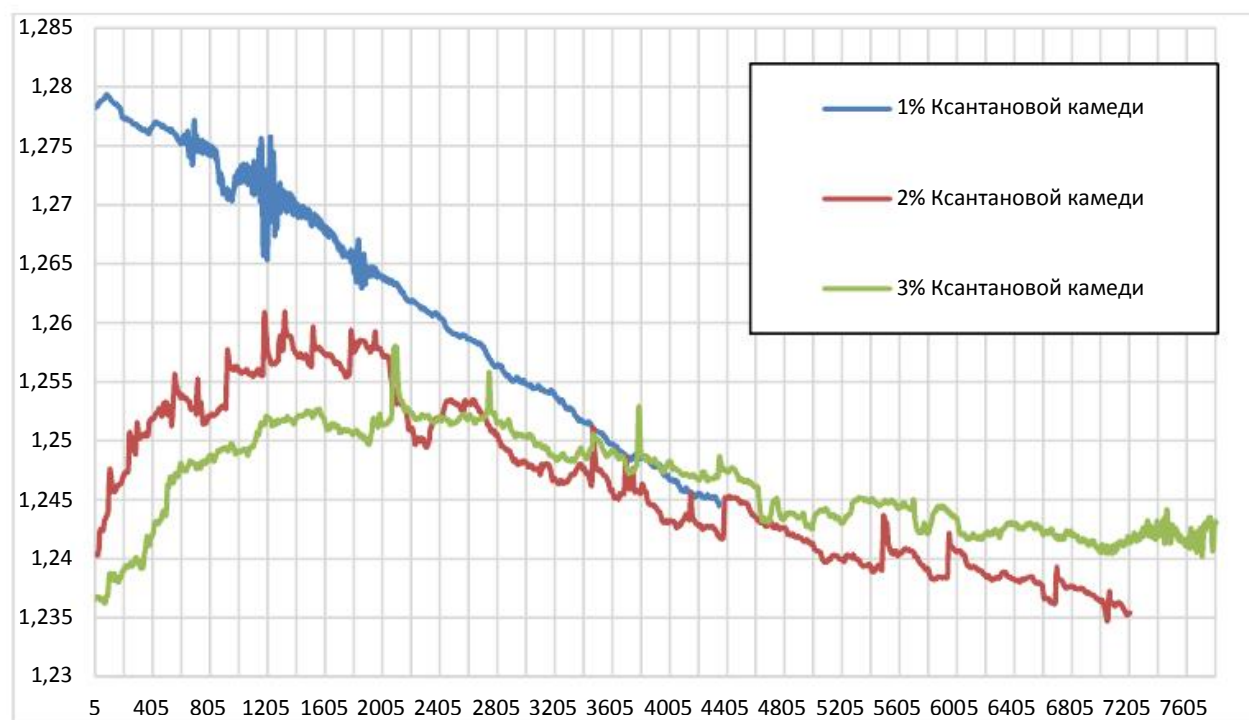


Рис. 2. Кривые седиментации зависимости индуцированного напряжения на измерительной катушке от времени

Полученные кривые соответствуют верхней части пробирки на 20 мм ниже поверхностного слоя МРЖ. В начальный момент времени наблюдается постепенное повышение индуцированного напряжения, что связывается с процессом первичной седиментации частиц из верхнего слоя жидкости, что соответствует теории Кинча, согласно которой частицы из верхних слоев постепенно перемещаются вниз, тем самым увеличивая скорость седиментации верхней точки и замедляя ее в нижних точках.

После окончания роста концентрации частиц в исследуемой области наблюдается непродолжительное плато концентрации. В этот момент число частиц, перемещающихся в нижние слои, равно числу таких же частиц, опускающихся из верхних слоев. Раствор с 1 %-ной концентрацией ксантановой камеди данного плато практически не имеет, растворы с концентрацией 2 и 3 % имеют значимое плато равновесного состояния.

Наибольшую скорость осаждения магнитоактивных частиц, сравниваемую по углу наклона кривой седиментации, показывает раствор с 1 %-ной концентрацией тиксотропной добавки, растворы 2 и 3 % в значительной степени медленнее осаждаются. Предположительно, структура образуемая тиксотропной добавкой удерживает частицы магнетика во взвешенном состоянии, препятствуя их перемещению в нижние слои жидкости. Наилучшие результаты были получены для раствора концентрацией 3 % ксантановой камеди.

Различия в амплитуде сигнала между измерениями может быть связано с неточностью оборудования, применяемого для генерации сигнала на катушки Гельмгольца, отличающейся концентрацией частиц магнитоактивного наполнителя в образцах, а также влиянии ксантановой камеди на магнитную проницаемость МРЖ в исследуемой области. Эти различия являются важным аспектом для изучения в дальнейшем, так как может оказать значимый эффект на реологические свойства МРЖ.

Заключение. В результате работы был испытан метод исследования седиментации МРЖ, основанный на анализе магнитной проницаемости жидкости. Результаты показывают применимость данного метода, однако в дальнейшем необходимо совершенствование используемого для анализа оборудования в целях уменьшения привносимой погрешности в результаты измерения. Полученные кривые седиментации показывают наличие значимого эффекта от применения тиксотропных добавок для стабилизации МРЖ. В дальнейшем необходимо проведение всестороннего изучения реологических характеристик получаемых жидкостей, а также уточняющие исследования эффективной концентрации добавки.

Список источников

- [1] Худoley А.Л. *Способ магнитореологического полирования торцов оптических элементов*. Патент № 2 569 877 С1 РФ, 2014, 7 с.
- [2] Андерфаас Э.Н., Бэнкс Д. *Магнитореологическая демпфирующая система*. Патент № 9273748 В2, 2016.
- [3] Найгерт К.В., Редников С.Н. *Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы золотника*. Патент № 2015138981 РФ, бюл. № 8, 2014, 2 с.
- [4] Борин Д.Ю., Михайлов В.П., Базиненков А.М. Моделирование магнитореологического дросселя модуля линейных сверхточных перемещений. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*, 2007, № 4, с. 58–71.
- [5] Yu L., Chen F., Li H. Study on sedimentation stability of silicone oil-based magnetorheological fluids with fumed silica as additive. *Frontiers in Materials*, 2024, no. 11, art. no. 1395507.

- [6] Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. *Коллоидная химия*. Москва, Высшая школа, 1992.
- [7] Kynch G.J. A theory of sedimentation. Transactions of the Faraday Society, 1952, vol. 48, art. no. 166. <https://doi.org/10.1039/tf9524800166>
- [8] Шелухин В.В. Квазистационарная седиментация с адсорбцией. *Прикладная механика и техническая физика*, 2005, т. 46, № 4, с. 66.
- [9] Xue Q. Poly(methyl methacrylate)-coated carbonyl iron particles and their magnetorheological characteristics. *Polymer International*, 2010, vol. 59 (11), pp. 1435–1439.
- [10] Qiao X., Bai M., Tao K., Gong X. Magnetorheological Behavior of Polyethylene Glycol-Coated Fe_3O_4 Ferrofluids. *Nihon Reoroji Gakkaishi*, 2010, vol. 38 (1), pp. 23–30. <https://doi.org/10.1678/rheology.38.23>
- [11] Gordaninejad F. Surface coated iron particles via atom transfer radical polymerization for thermal-oxidatively stable high viscosity magnetorheological fluid. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 11 p. <https://doi.org/10.1002/APP.38199>
- [12] Guo Y.-Q., Sun C.-L., Xu Z.-D., Jing X. Preparation and Tests of MR Fluids With CI Particles Coated With MWNTs. *Frontiers in Materials*, 2018, vol. 5, art. no. 50. <https://doi.org/10.3389/fmats.2018.00050>
- [13] Mrlik M., Ilcikova M., Pavlinek V., Mosnacek J., Peer P., Filip P. Improved thermooxidation and sedimentation stability of covalently-coated carbonyl iron particles with cholesteryl groups and their influence on magnetorheology. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, vol. 396, pp. 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.01.027>
- [14] Xie L., Choi Y.-T., Liao C.-R., Wereley N.M. Characterization of stratification for an opaque highly stable magnetorheological fluid using vertical axis inductance monitoring system. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117(17), art. no. 17C754. <https://doi.org/10.1063/1.4918629>
- [15] Kwon S.H., Choi H.J., Lee J.W., Hong K.P., Cho M.W. Investigation of the effect of temperature on the properties of magnetic fluids. *Journal of the Korean Physical Society*, 2013, vol. 62 (12), pp. 2118–2122.
- [16] Rodrigues Da Rocha J.H., De Falco Manuel J.G., Bombard A. Synthetic Oil Gels with Organoclays in the Formulation of Magnetorheological Fluids. Preprint, 2024.