

УДК 532.54

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ МАГНИТНОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОГО КАПИЛЛЯРНОГО ВИСКОЗИМЕТРА

© 2024 г. А. А. Чураев<sup>1</sup>, Е. В. Шельдешова<sup>1</sup>, Е. В. Бондарь<sup>1</sup>, П. А. Ряполов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
"Юго-Западный государственный университет", Курск, Россия

\*E-mail: r-piter@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024

После доработки 25.06.2024

Принята к публикации 31.07.2024

Изучена вязкость жидкостей с помощью капиллярного вискозиметра собственной разработки. Значение вязкости определяется по перепаду давления в капилляре, что позволяет исследовать оптически непрозрачные жидкости и проводить измерения в магнитном поле. Проведена серия тарировочных экспериментов на жидкостях с известным значением вязкости. Полученные зависимости магнитовязкого эффекта в образцах магнитной жидкости с различной структурой и физическими параметрами согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными.

DOI: 10.31857/S0367676524110269, EDN: FIZUIW

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитные жидкости — это коллоидные системы, состоящие из очень мелких частиц, равномерно диспергированных в жидкости, такой как вода или органический растворитель. Магнитные жидкости — это уникальные технические синтетические материалы с жидкотекучими, магнитоуправляемыми свойствами, которые имеют широкий спектр перспективных применений в промышленности, машиностроении, электронике, оптике, медицине и других научно-технических областях [1–10]. Коллоидные системы на основе магнитных наночастиц вызывают все больший интерес в биомедицинских исследованиях. Магнитные жидкости имеют потенциал для применения в лечении рака, основывающегося на принципе точного нацеливания лекарственных средств или управляемого искусственного нагрева. Для безопасного применения основные свойства магнитных жидкостей должны быть хорошо изучены, включая вязкость жидкостей при приложении внешнего магнитного поля.

Одним из параметров который характеризует магнитную жидкость, является вязкость. Вязкостью магнитных жидкостей можно управлять при помощи внешнего магнитного поля. В случае, когда магнитная жидкость находится в магнитном поле, в ее частицах индуцируется магнитный момент. Для таких частиц момент магнитных сил может противодействовать механическому моменту, создаваемому вязким трением в потоке, и тем самым препятствовать свободному вращению частиц.

Это замедляет течение магнитной жидкости и повышает ее вязкость за счет добавления к сдвиговой вязкости, так называемого вращательного вклада. Для сильно разбавленных магнитных жидкостей теоретическое описание вращательной вязкости было получено Шлиомисом [11].

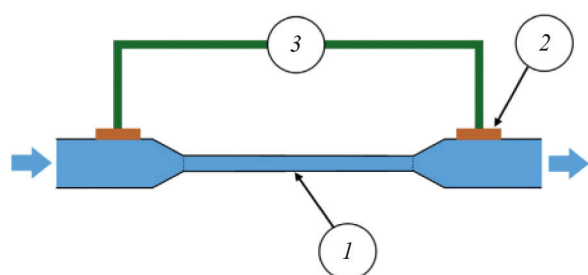
Для концентрированных коммерческих магнитных жидкостей наблюдалось сильное увеличение вязкости в магнитном поле [12–14] что указывает на доминирующую роль межчастичных взаимодействий и образование цепочек частиц, которые также препятствуют потоку и увеличивают вязкость. Данное явление известно как магнитовязкий эффект [15]. Наиболее распространенным методом исследования вязкости является ротационные вискозиметры, в которых образец коллоида помещается между вращающимися поверхностями [16–19]. Что вступает в противоречие с существующими вариантами применения, в которых магнитная жидкость либо течет по трубкам (капиллярам), либо совершает колебания (датчики и демпферы).

Из-за оптической непрозрачности вязкость магнитной жидкости нельзя измерять с помощью традиционных капиллярных вискозиметров, в которой измеряется время течения жидкости. Единственным методом измерения вязкости капиллярным вискозиметром является оценка перепада давления, основы которой изложены в работах Ш. Оденбаха [20–23]. В ней в качестве объекта исследования используется овечья кровь с добавлением микро- и наночастиц магнетита. При этом данный метод

не использовался для исследования традиционных магнитных жидкостей. Целью данной работы является разработка капиллярного вискозиметра для измерения вязкости магнитных жидкостей на основе оценки перепада давления под действием внешнего магнитного поля, исследование магнитовязкого эффекта в магнитных жидкостях и сравнение полученных результатов с известными данными.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения исследований был изготовлен капиллярный вискозиметр. Блок-схема представлена на рис. 1.

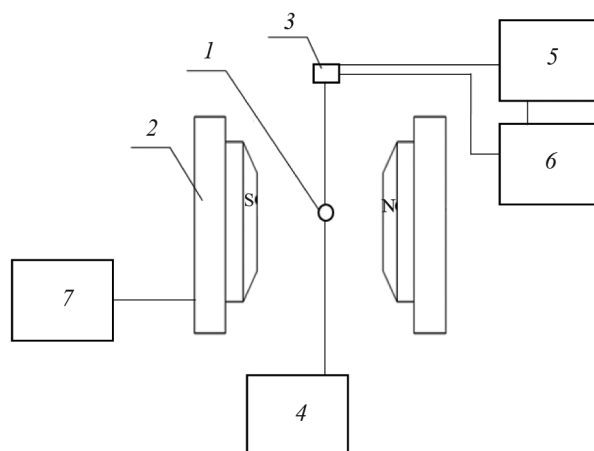


**Рис. 1.** Блок-схема капиллярного вискозиметра: 1 — капилляр, 2 — область, в которой будет производиться измерение перепада давления, 3 — датчик давления.

Для создания капиллярного вискозиметра был использован капилляр, диаметр которого равен 1 мм, а его длина составляет 90 мм. К каналам давления подсоединялся датчик MPX5050DP, при помощи которого производилось измерение перепада давления. В процессе эксперимента жидкость подавалась с постоянной скоростью 0.1 мм/с при помощи шприцевого насоса.

Внешнее магнитное поле генерировалось при помощи лабораторного электромагнита ФЛ-1. Капиллярный вискозиметр в корпусе фиксировался между полюсами электромагнита, так чтобы капилляр находился в центре этих полюсов. На рис. 2 представлена блок-схема установки для измерения магнитовязкого эффекта магнитных жидкостей под действием внешнего магнитного поля.

В работе исследовались магнитные жидкости разной концентрации на основе керосина, полиэтилсилоксана и бидисперсная магнитная система. Образцы магнитной жидкости изготовлены на основе высокодисперсного магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , стабилизированного поверхностно-активным веществом — олеиновой кислотой  $\text{C}_8\text{H}_{17}\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$  методом химической конденсации частиц магнетита из водного раствора солей двух- и трехвалентного железа избытком концентрированного раствора щелочи. Размер магнитных частиц порядка 10 нм.



**Рис. 2.** Блок-схема установки для измерения магнитовязкого эффекта магнитных жидкостей под действием внешнего магнитного поля: 1 — капилляр, 2 — электромагнит ФЛ-1, 3 — датчик давления, 4 — шприцевой насос, 5 — вольтметр, 6 — источник питания для датчика, 7 — источник питания для электромагнита.

В качестве объектов исследования были выбраны образцы магнитной жидкости, ранее уже охарактеризованные в наших работах [24, 25]. В предыдущих работах показано, что дисперсный состав образцов не изменялся при разбавлении.

Образец МЖ-1.1 был получен на основе керосина в Ивановском государственном энергетическом университете. МЖ-1.2.1, МЖ-1.3 произведены путем разбавления МЖ-1.1 керосином в определенной пропорции.

В образец МЖ-1.2.1 были добавлены частицы магнетита (размером 300 нм) в соотношении 10% от массы твердой фазы, в результате чего была получена бидисперсная система МЖ-1.2.2. Для приготовления данной системы использовались методы механического и ультразвукового смешивания порошка магнетита с магнитной жидкостью. Последующие анализы показали отсутствие разделения на фазы и образования осадка в образце МЖ-1.2.2. Полученная бидисперсная система оказались стабильная [24, 25].

Образец МЖ-2.1 был получен на основе полиэтилсилоксана в Ивановском государственном энергетическом университете. МЖ-2.2, МЖ-2.3 произведены путем разбавления МЖ-2.1 полиэтилсилоксаном в определенной пропорции [25].

Измерения физических параметров, исследуемых образцов жидкостей, проводились по методикам и на установках, разработанных в лаборатории наномасштабной акустики Юго-Западного государственного университета [26–28]. Физические характеристики всех измеряемых жидкостей представлены в табл. 1.

Таблица 1. Физические характеристики измеряемых жидкостей

Жидкость	Вязкость $\eta$ , мПа·с	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Объемная концентрация твердой фазы $\phi$ , %	Намагниченность насыщения $M_s$ , кА/м
ПМС-5	5	918	—	—
ПМС-10	10	943	—	—
ПМС-100	85	966	—	—
Минеральное масло	184	882	—	—
МЖ-1.1	240	1382	14.2	49
МЖ-1.2.1	6	1078	7.0	24.1
МЖ-1.3	2.45	936	3.6	12.5
МЖ-2.1	119.97	1323	10.8	39.6
МЖ-2.2	9.45	1074	4.8	17
МЖ-2.3	4.75	981	2.5	10.03
МЖ-1.2.2	6.2	1134	7.2	26.1

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате измерений были получены значения начального и конечного напряжений.

Значение перепада давления определяется при помощи формулы, указанной в спецификации датчика MPX5050DP:

$$\Delta P = \left( \frac{V_{\text{out}}}{V_s} - 0.04 \right) / 0.018, \quad (1)$$

где  $V_{\text{out}}$  — напряжение на выходе,  $V_s$  — подаваемое напряжение,  $\Delta P$  — перепад давления.

Используя физические характеристики капилляра, скорость подачи и перепад давления, рассчитывалась вязкость жидкости по формуле [18]:

$$\eta = \frac{\pi \Delta P \tau r^4}{8lV}, \quad (2)$$

где  $\eta$  — динамическая вязкость, Пз;  $\Delta P$  — разность давлений на концах капилляра, дин/см<sup>2</sup>;  $r$  — радиус капилляра, см;  $l$  — длина капилляра, см;  $V$  — объем жидкости, см<sup>3</sup>, вытекающей из капилляра в течение времени  $\tau$ , с.

Для оценки корректности определения вязкости предложенным методом были проведены исследования перепада давления, возникающего при течении по капилляру жидкости с известными параметрами вязкости, при различных скоростях протекания. Эксперимент проводился, как минимум по пять раз при одинаковых условиях для каждой жидкости, данные представлены в табл. 2. Были представлены жидкости как маловязкие (5 мПа·с), так и вязкие образцы (184 мПа·с). Таким образом, диапазон исследуемых жидкостей

был репрезентативен. В табл. 2 можно заметить, что измеренная вязкость показывает ожидаемую тенденцию, хотя абсолютные значения должны быть скорректированы с учетом влияния способа измерения давления. Отношение вязкости, измеренной ротационным вискозиметром к вязкости, измеренной капиллярным вискозиметром, отличаются примерно в 5.18 раза. На рис. 3 показано отношение вязкостей при измерении двумя разными способами. Как видно из рис. 3, отношение вязкости, измеренной на ротационном вискозиметре к вязкости, измеренной на капиллярном вискозиметре, остается в пределах погрешности для всех жидкостей независимо от величины их вязкости, что говорит о правильной работе капиллярного вискозиметра.

Данный коэффициент может быть отнесен к особенностям измерения перепада давления, наличию воздуха в трубках. Однако данное отклонение носит систематический характер для всех исследуемых диапазонов измерения вязкости. С учетом коэффициента можно утверждать, что значения вязкости совпадает с реальными измерениями, что послужило основой для измерения магнитовязкого эффекта в образцах магнитной жидкости.

Необходимо отметить, что помимо абсолютного значения вязкости, в центре внимания исследователей является величина ее относительного приращения в магнитном поле: магнитовязкий эффект. Он рассчитывается с помощью вязкости под воздействием внешнего магнитного поля и вязкости без влияния внешнего магнитного поля:

Таблица 2. Результаты измерения вязкости

Вещество	$\Delta P$ , Па	$\eta$ , мПа·с	$\eta$ ротационная, мПа·с	$\eta$ рот. / $\eta$ кап.
ПМС-5	70.37	1.16	5.6	4.83
ПМС-10	88.89	2.07	10.8	5.21
ПМС-100	683.33	15.94	85.9	5.39
Минеральное масло	1372.22	32.01	185.96	5.81
МЖ-1.1	2257.22	52.66	255.95	4.86
МЖ-1.2.1	61.11	1.43	7.4	5.19
МЖ-1.3	28.89	0.67	3.4	5.04
МЖ-2.1	1093.33	25.51	119.97	4.70
МЖ-2.2	90.00	2.10	10.4	4.95
МЖ-2.3	73.89	1.72	9.6	5.57
МЖ-1.2.2	48.89	1.14	6.2	5.44

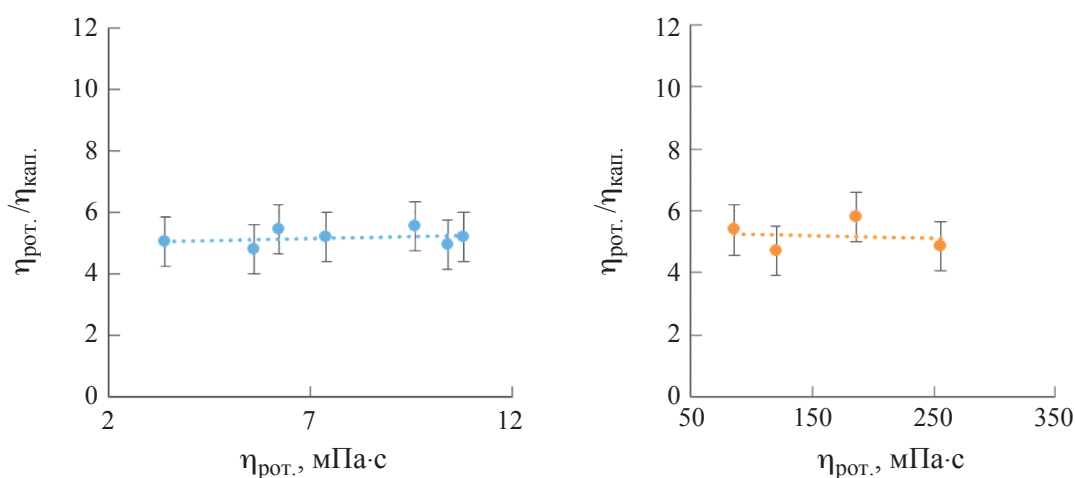


Рис. 3. Зависимость отношения вязкостей к вязкости ротационного вискозиметра.

$$R = \frac{\eta_H - \eta_{H=0}}{\eta_{H=0}}, \quad (3)$$

где  $R$  — магнитовязкий эффект,  $\eta_H$  — вязкость под воздействием внешнего магнитного поля,  $\eta_{H=0}$  — вязкость без влияния внешнего магнитного поля.

Это позволяет определить относительное влияние внешнего магнитного поля на вязкость магнитной жидкости путем измерения перепада давления без внешнего магнитного поля и при наложении внешнего магнитного поля.

Магнитовязкий эффект магнитной жидкости измерялся при направлении магнитного поля перпендикулярно к направлению потока. Результаты измерения магнитовязкого эффекта для МЖ-2.1, МЖ-2.2, МЖ-2.3, представлены рис. 4. Результаты измерения магнитовязкого эффекта для МЖ-1.1,

МЖ-1.3 представлены на рис. 5. Результаты измерения магнитовязкого эффекта для МЖ-1.2.1, МЖ-1.2.2 представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 4–6 магнитовязкий эффект растет при увеличении напряженности магнитного поля, что соотносится с данными в статьях [16, 17].

На рис. 7 видно, что при увеличении концентрации магнитной жидкости магнитовязкий эффект растет, что полностью соотносится с теоретическими данными [29–32].

Анализ представленных в табл. 1 значений вязкости, показывает, что исходный образец МЖ-1.1 на керосине имеет гораздо большее значение вязкости, чем образец МЖ-2.1 на полиэтилсилоксане. При разбавлении образцов происходит значительное снижение вязкости для образца на основе

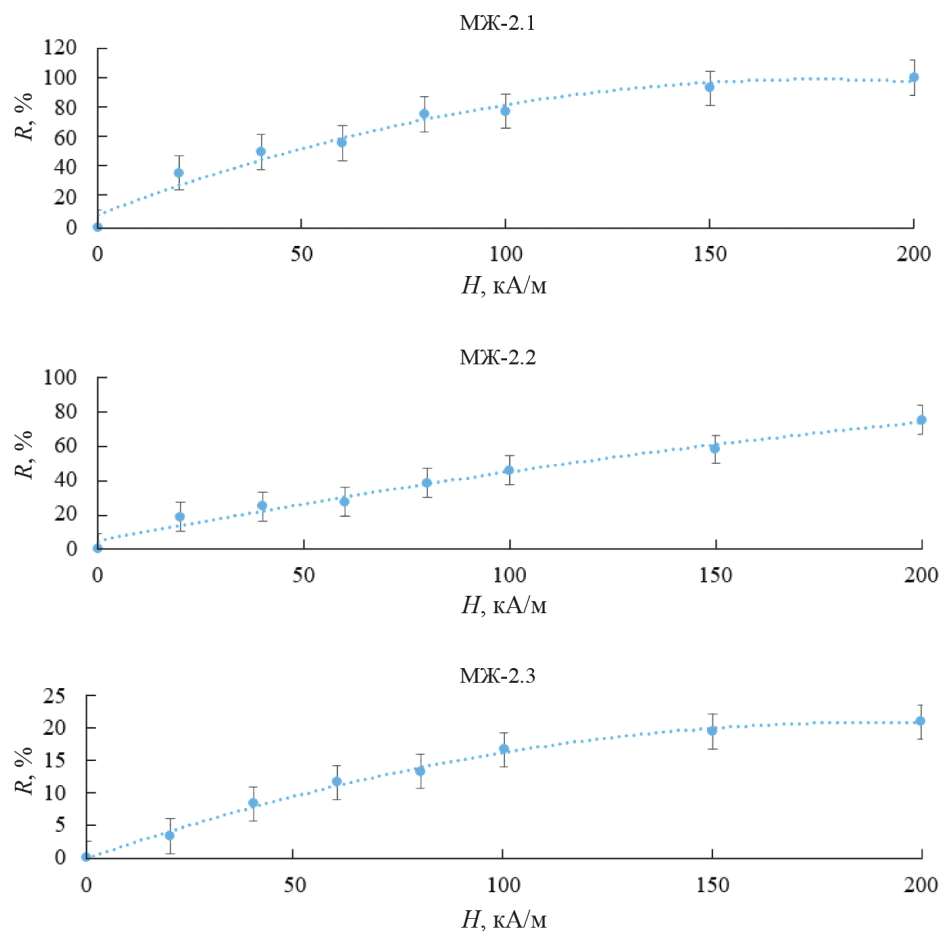


Рис. 4. Зависимость магнитовязкого эффекта МЖ-2.1, МЖ-2.2, МЖ-2.3 от напряженности магнитного поля.

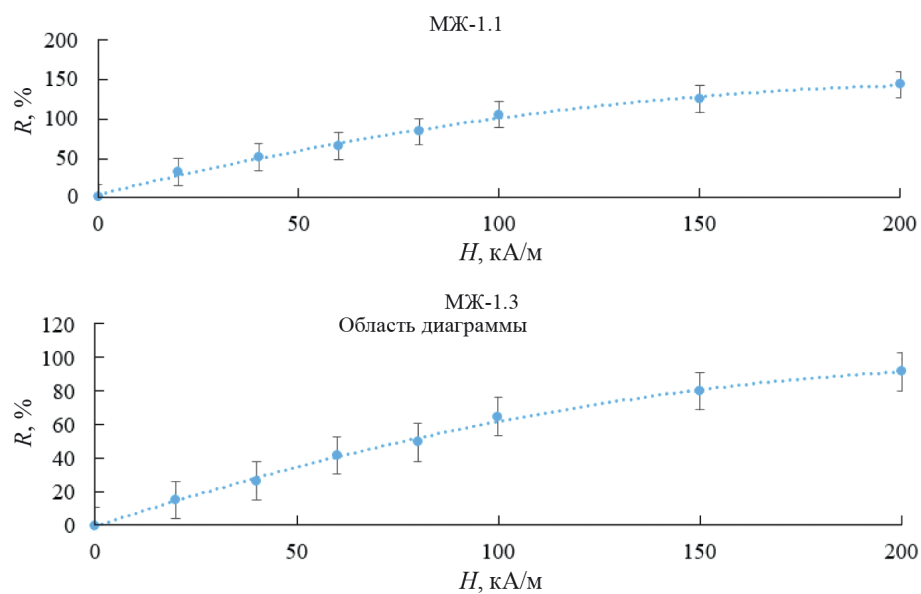


Рис. 5. Зависимость магнитовязкого эффекта МЖ-1.1, МЖ-1.3 от напряженности магнитного поля.

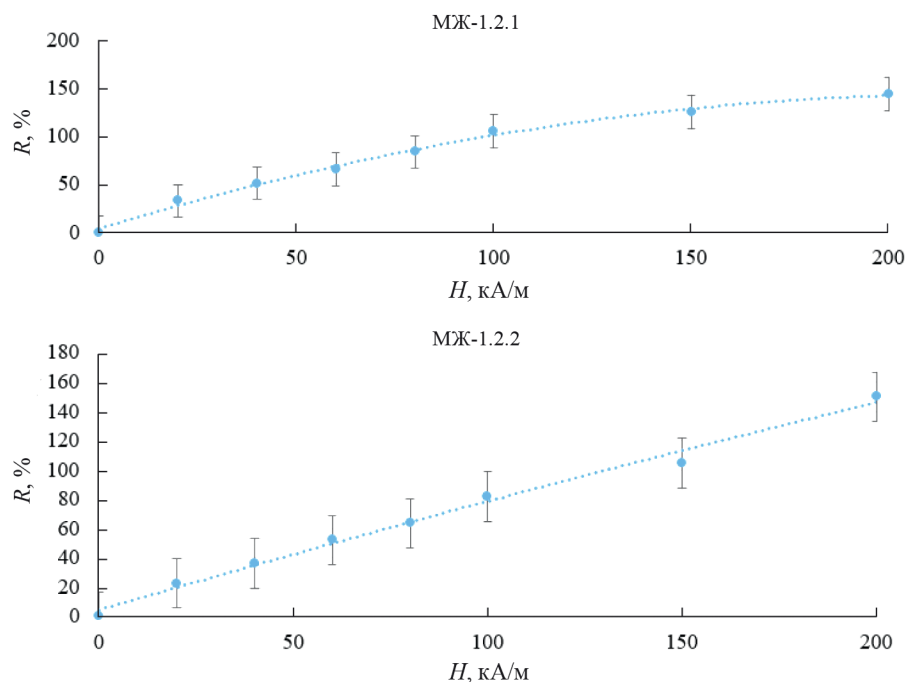


Рис. 6. Зависимость магнитовязкого эффекта МЖ-1.2.1, МЖ-1.2.2 от напряженности магнитного поля.

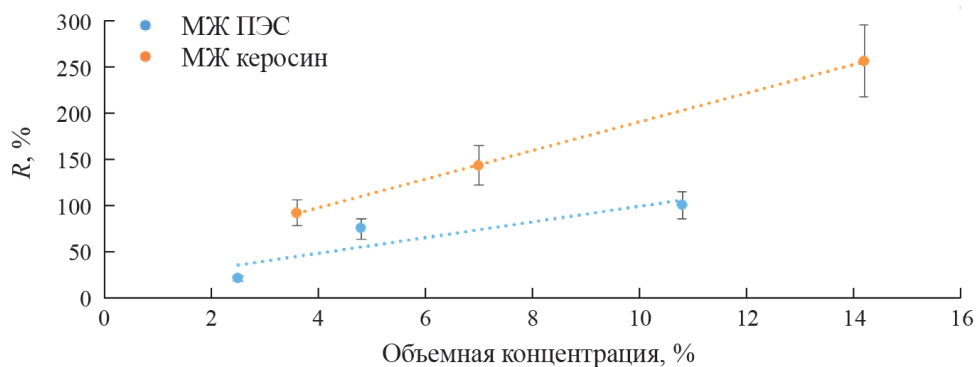


Рис. 7. Зависимость магнитовязкого эффекта от концентрации магнитной жидкости.

керосина. Причиной этому является избыток ПАВ в образце МЖ-1.1. Косвенным подтверждением такого избытка является стабильное состояние бидисперсной системы на его основе — образец МЖ-1.2.2. Наличие избытка ПАВ негативно влияет на величину магнитовязкого эффекта, который составляет 100% для образца на основе керосина в отличие от образца на основе полиэтилсилоксана, в котором вязкость в магнитном поле возрастает в 2.5 раза.

Чем больше концентрация магнитной жидкости, тем интенсивнее идет процесс образования структур поля из наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  под действием

магнитного поля, как следствие, отражается на увеличении вязкости системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана недорогостоящая установка для измерения вязкости, являющийся приставкой к распространенному электромагниту ФЛ-1, позволяющая исследовать магнитовязкий эффект в широком диапазоне изменения напряженности магнитного поля. Произведены тарировочные эксперименты на жидкостях с известным значением вязкости, охватывающих широкий диапазон значений от 5 до 200 мПа·с, определен



коэффициент пересчета абсолютного значения вязкости. Исследован магнитовязкий эффект в образцах с различной концентрацией, намагниченностью и с содержанием крупных частиц. Показано, что величина магнитновязкого эффекта зависит от концентрации магнитной жидкости и от наличия крупной фракции. Максимальное приращение вязкости составило для образца МЖ-1.1, что объясняется межчастичными взаимодействиями. Ввиду стабильности данного образца и значительного приращения вязкости в магнитном поле, подобные магнитные жидкости могут быть перспективны для применения в управляемых амортизаторах и демпферах.

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213) и темы государственного задания (№ 0851-2020-0035).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schintie G., Palade P., Vekas L., Iacob N. et al. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2013. V. 46. No. 39. Art. No. 395501.
2. Zhou H., Chen Y., Zhang Y. et al. // Tribol. Trans. 2021. V. 64. No. 1. P. 31.
3. Wei F., Mallik A.K., Liu D. et al. // Sci. Reports. 2017. V. 7. No. 1. P. 4725.
4. Zhao Y., Wang X.X., Lv R.Q. et al. // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2020. V. 70. P. 1.
5. Munshi M.M., Patel A.R., Deheri G.M. // IJMMS. 2019. V. 4. No. 4. P. 982.
6. Jia J., Yang G., Zhang C. et al. // Friction. 2021. V. 9. P. 61.
7. Wang J., Zhuang W., Liang W. et al. // Friction. 2022. V. 10. No. 5. P. 645.
8. Ряполов П.А., Соколов Е.А., Шельдешова Е.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 3. С. 343; Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Sheldeshova E.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2023. V. 87. No. 3. P. 295.
9. Ряполов П.А., Соколов Е.А., Калюжная Д.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 3. С. 348; Ryapolov P.A., Sokolov E.A., Kalyuzhnaya D.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2023. V. 87. No. 3. P. 300.
10. Ерин К.В., Вивчарь В.И., Шевченко Е.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 3. С. 315; Yerin K.V., Vivchar V.I., Shevchenko E.I. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2023. V. 87. No. 3. P. 272.
11. Shliomis M.I. // Lect. Notes Phys. 2008. P. 85.
12. Rosensweig R.E., Kaiser R., Miskolczy G. // J. Colloid Interface Sci. 1969. V. 29. No. 4. P. 680.
13. Ambacher O., Odenbach S., Stierstadt K. // Z. Phys. B. Cond. Matter. 1992. V. 86. No. 1. P. 29.
14. Odenbach S. // Int. J. Modern Phys. B. 2000. V. 14. No. 16. P. 1615.
15. Odenbach S., Thurm S. // In: Ferrofluids: magnetically controllable fluids and their applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. P. 185.
16. Viswanath D.S., Ghosh T.K., Prasad D.H. et al. Viscosity of liquids: theory, estimation, experiment, and data. Springer Science & Business Media, 2007.
17. Woodfield P.L., Seagar A., Hall W. // Int. J. Thermophys. 2012. V. 33. P. 259.
18. Sato Y., Kameda Y., Nagasawa T. et al. // J. Crystal Growth. 2003. V. 249. No. 3–4. P. 404.
19. Zhu P., Lai J., Shen J. et al. // Measurement. 2018. V. 122. P. 149.
20. Linke J.M., Odenbach S. // J. Phys. Cond. Matter. 2015. V. 27. No. 17. Art. No. 176001.
21. Pop L.M., Odenbach S. // J. Phys. Cond. Matter. 2008. V. 20. No. 20. Art. No. 204139.
22. Nowak J., Odenbach S. // J. Magn. Magn. Mater. 2016. V. 411. P. 49.
23. Nowak J., Borin D., Haefner S. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 442. P. 383.
24. Шельдешова Е.В., Ряполов П.А., Рекс А.Г. и др. // Изв. Юго-Запад. гос. ун-та. Сер. Техн. и технол. 2022. Т. 12. № 3. С. 130.
25. Shel'deshova E., Churaev A., Ryapolov P. // Fluids. 2023. V. 8. No. 2. P. 47.
26. Полуни В.М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей. М.: Физматлит, 2012. 384 с.
27. Polunin V. Acoustics of nanodispersed magnetic fluids. CRC Press, 2015.
28. Polunin V.M., Storozhenko A.M., Ryapolov P.A. Mechanics of liquid nano- and microdispersed magnetic media. CRC Press, 2017.
29. Afifah A.N., Syahrullail S., Sidik N.A.C. // Renew. Sustain. Energy Rev. 2016. V. 55. P. 1030.
30. Felicia L.J., Vinod S., Philip J. // J. Nanofluids. 2016. V. 5. No. 1. P. 1.
31. Vékás L., Raşa M., Bica D. // J. Colloid Interface Sci. 2000. V. 231. No. 2. P. 247.
32. Hong R.Y., Zhang S.Z., Han Y.P. et al. // Powder Technol. 2006. V. 170. No. 1. P. 1.

## **Investigation of the viscosity of magnetic-liquid systems using the developed capillary viscometer**

**A. A. Churaev<sup>1</sup>, E. V. Shel'deshova<sup>1</sup>, E. V. Bondar<sup>1</sup>, P. A. Ryapolov<sup>1,\*</sup>**

*<sup>1</sup> Southwest State University, Kursk, 305040, Russia*

*\* e-mail: r-piter@yandex.ru*

We studied the viscosity of liquids using a capillary viscometer of our own design. The viscosity value is determined by the pressure drop in the capillary, which makes it possible to study optically opaque liquids and carry out measurements in a magnetic field. A series of calibration experiments were carried out on liquids with a known viscosity value. The obtained dependences of the magnetic-viscous effect in magnetic fluid samples with different structures and physical parameters are consistent with known theoretical and experimental data.