

А.В. Радионов, канд. техн. наук, директор (ООО «НПВП «Феррогидродинамика», г. Николаев, Украина)

## Влияние магнитовязкого эффекта на работоспособность и безопасность магнитожидкостных герметизаторов

*Рассмотрено влияние внешнего магнитного поля на увеличение эффективной вязкости магнитной жидкости. Показано, что основной вклад в рост вязкости вносят крупные частицы и агломераты. Приведены результаты экспериментальных исследований по изменению вязкости в зависимости от напряженности магнитного поля. Обосновано применение относительной эффективной вязкости в качестве критерия качества магнитной жидкости и работоспособности и безопасности магнитожидкостного герметизатора.*

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, относительная эффективная вязкость, напряженность магнитного поля, магнитожидкостный герметизатор.

*Розглянуто вплив зовнішнього магнітного поля на збільшення ефективної в'язкості магнітної рідини. Показано, що основний внесок в зростання в'язкості вносять великі частки і агломерати. Наведено результати експериментальних досліджень по зміні в'язкості в залежності від напруженості магнітного поля. Обґрунтовано застосування відносної ефективної в'язкості як критерію якості магнітної рідини і працездатності і безпеки магніторідинні герметизатора.*

**Ключові слова:** магнітна рідина, відносна ефективна в'язкість, напруженість магнітного поля, магніторідинні герметизатор.

*The influence of an external magnetic field on increasing the effective viscosity of the magnetic fluid is considered. It is shown that the large particles and agglomerates make the main contribution to the increase in viscosity. The results of experimental studies on the change in viscosity depending on the magnetic field strength are shown. The application of the relative effective viscosity as a quality criterion of the magnetic fluid and magnetic seal efficiency and safety is proved.*

**Keywords:** magnetic fluid, the relative effective viscosity, the magnetic field strength, magnetic seal.

### Постановка задачи и анализ последующих публикаций

Общим свойством коллоидных растворов является увеличение их вязкости по сравнению с вязкостью жидкой основы, т. к. наличие наночастиц в жидкости приводит к увеличению внутреннего трения при ее движении. С ростом концентрации частиц вязкость коллоида возрастает. Однако изменение вязкости под воздействием магнитного поля – специфическое свойство магнитных жидкостей (МЖ). Наибольшее применение МЖ получили в качестве уплотняющей среды в магнитожидкостных герметизаторах (МЖГ). Работоспособность и безопасность эксплуатации МЖГ во многом зависит от характера течения в узком зазоре герметизатора. Поэтому вязкость является одним из определяющих факторов применения МЖ.

Эксперименты, выполненные в последние годы, показывают, что многие современные промыш-

ленные магнитные жидкости образуют сильными магнитовязкими свойствами – рост их вязкости под действием поля достигает одного – двух порядков [1,2,3]. Особо сильный магнитовязкий эффект наблюдается, если поле ориентировано вдоль направления градиента скорости течения.

Приложение внешнего магнитного поля изменяет вязкость и реологическое поведение МЖ по двум причинам. Во-первых, внешнее магнитное поле, взаимодействуя с магнитными моментами наночастиц, ориентирует их, препятствуя вращению частиц. Это приводит к росту вязкости МЖ, так как при их перемещении частицы не могут вращаться, свободно увлекаясь слоями жидкости с различными скоростями сдвига, а следовательно, тормозят жидкость вблизи частиц.

Во-вторых, в настоящее время считается доказанным, что такие сильные магнитореологические эффекты могут обеспечиваться

только появлением гетерогенных агрегатов, состоящих из наночастиц, объединенных силами магнитного взаимодействия [4,5]. Известно два типа таких агрегатов – линейные цепочки и объемные плотные «капли», образованные большим числом частиц. При этом однозначного ответа об условиях их формирования в настоящее время не существует, но считается, что сильные магнитовязкие эффекты могут вызывать агрегаты обоих типов [6].

Связь между структурой и вязкостью обычных дисперсных систем установлена достаточно давно. В работах [7,8] особенности неньютоновского течения суспензий объясняются изменением их структуры, в частности возникновением и разрушением агрегатов частиц. До настоящего времени не существует единой точки зрения о механизме течения дисперсных систем, о чем свидетельствует обилие предлагаемых реологических уравнений.

Для физики магнитных жидкостей проблема усугубляется тем, что взаимодействие феррочастиц во внешнем магнитном поле дает вклад в эффективную вязкость суспензии того же порядка, что и гидродинамическое взаимодействие. Это связано с тем, что механизм увеличения вязкости в принципе один и тот же: взаимодействие частиц приводит к изменению относительной скорости частиц и, как следствие этого, к дополнительной диссипации энергии [9].

Теоретические модели из-за вводимых авторами допущений позволяют получать скорее качественную оценку, чем количественные результаты. Существенным их недостатком является невозможность учитывать полидисперсность реальных магнитных жидкостей. Типичные гистограммы распределения частиц в МЖ производства ООО «НППВ «Феррогидродинамика» приведены на рис. 1 [10].

Концентрация крупных частиц (более 16 нм) достаточна мала и составляет не более 1...2 %. Но именно эти частицы могут объединяться в цепочно-подобные агрегаты, влияние которых на реологические характеристики МЖ достаточно велико [11, 12].

Также практически невозможно учесть в математической модели то, что эффективная вязкость достаточно сложным образом зависит от технологии приготовления МЖ [13, 14]. На величину вязкости влияют особенности процесса синтеза МЖ: скорость прилива раствора солей двух- и трехвалентного железа к щелочи, интенсивность перемешивания смеси, выбор осадителя, удаление воды, температурный режим. Кроме того, определенным образом на свойства МЖ влияют вид и концентрация стабилизатора, состав дисперсионной среды, наличие различных добавок. Количество факторов, а также особенностей технологии синтеза, влияющих на свойства промышленных

МЖ столь велико, что их далеко не всегда возможно проконтролировать и, более того, получение жидкости с заданными свойствами зачастую представляет из себя нерешаемую проблему.

Из вышеизложенного следует, что все математические модели являются весьма приближенными и их можно использовать только для качественной оценки характера протекающих процессов.

В тоже время представляет интерес на основании простых измерений физических свойств наножидкости определить степень устойчивости магнитной жидкости быстрым и надежным экспресс-методом.

Седиментационная устойчивость и вязкость магнитной жидкости в сильных магнитных полях зависят от количества и размеров крупных частиц и агрегатов в МЖ. В конечном итоге синтез любой промышленной МЖ представляет собой решение компромиссной задачи: относительно слабый магнеторез частиц должен сочетаться с достаточной по величине намагниченностью насыщения и приемлемым значением вязкости.

Поэтому необходимо изучить влияние внешнего магнитного поля на изменение эффективной вязкости промышленных МЖ, данные о седиментационной устойчивости которых известны из опыта их эксплуатации в составе магнитожидкостных герметизаторов.

Целью работы являются экспериментальные исследования влияния внешнего магнитного поля на эффективную вязкость промышленных магнитных жидкостей с высокой седиментационной устойчивостью для определения критерия их работоспособности и безопасности.

### Результаты исследования

В работе были исследованы три типа МЖ, получившие наиболее

широкое применение в промышленности. Жидкими основами для этих жидкостей являлись вакуумное масло VM-3, кремнийорганическая жидкость ПЭС-3 и рабочая гидравлическая жидкость АЗМГ-2.

Все три типа жидкостей представляли собой однородный коллоидный раствор однодоменных частиц магнетита. В качестве стабилизатора использовалась олеиновая кислота, средний диаметр наночастиц магнетита составлял около 8 нм. Подробно их характеристики изложены в [15].

Для определения вязкости использовалась специально сконструированная установка, в основе которой находится капиллярный вискозиметр. Такого же типа установка и принцип их работы описаны в [16,17]. Данная установка помещалась в пространство между сердечниками электромагнита, создававшего однородное магнитное поле по всему объему капиллярной ячейки.

Измерительная ячейка представляла собой узкую щель между стеклянными пластинами, закрепленными между двумя емкостями, объем которых значительно больше объема капилляра. Время измерения истечения должно было быть в интервале 2...30 сек, а разность давления на концах ячейки не должно было превышать 100 кПа. Данные требования к ячейке диктуются методом обработки экспериментальных данных по определению эффективной вязкости, т. к. течение должно быть ламинарным, а время измерения таким, чтобы разность давления не изменилась на значимую величину. Поэтому для каждого образца МЖ создавался индивидуальный капилляр.

Дополнительная проверка ламинарного характера течения показана на рис. 2, где зависимость тангенциального напряжения  $\tau$  на стенке капилляра от градиента скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  имеет линейный характер при напряженности магнитного поля 40 кА/м.

Такие же линейные зависимости получены для всех трех исследуемых типов МЖ при различных значениях напряженности магнитного поля. Собственно, тангенс угла наклона прямой и дает значение эффективной вязкости для данной напряженности магнитного поля.

На рис. 3, 4, 5 приведены экспериментальные зависимости вязкости от напряженности магнитного поля соответственно для VM-3, ПЭС-3 и «рабочей жидкости».

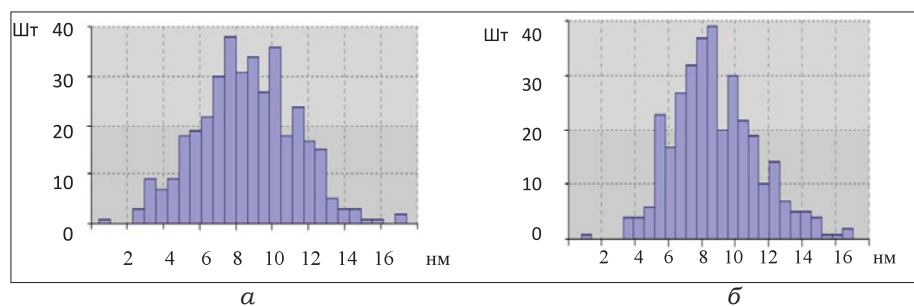


Рис. 1. Гистограммы распределения наночастиц по размерам в магнитной жидкости на основе: а – глицерина; б – вакуумного масла VM-3

Для всех трех графиков можно видеть следующую закономерность: при относительно малых внешних магнитных полях вязкость возрастает практически линейно, далее кривая имеет изгиб, после чего с увеличением величины магнитного поля вязкость не изменяется и выходит на насыщение.

Качественно графики, приведенные на рис 3, 4, 5, совпадают, но прекращение увеличения вязкости происходит при различных значениях напряженности магнитного поля для каждой из рассматриваемых жидкостей. Можно сделать вывод, что менее вязкие жидкости быстрее достигают «насыщения», чем жидкости с более вязкой основой.

Однако сравнительный анализ различных МЖ приготовленных по стандартным технологиям, провести сложно. Целесообразно ввести параметр относительной вязкости, который характеризует приращение вязкости МЖ. В качестве начального значения вязкости для каждой из рассматриваемых МЖ было взято величина вязкости этой МЖ при отсутствии магнитного поля.

Полученные результаты приведены на рис. 6. Из них видно, что рост вязкости прекращается при значительно более низких величинах напряженности магнитного поля, по сравнению с той напряженностью, которая создается в зазоре магнитоэластичного герметизатора (как правило она превышает 1500 кА/м). По такой же методике были определены значения относительной вязкости МЖ на жидких основах: алкарен, глицерин, трансформаторное масло, керосин, апиэзон. Полученные величины для различных МЖ находились в интервале 1,6...2,5.

Далее исследования были продолжены с МЖ, которые в процессе их синтеза не проходили стадии центрифугирования, из-за чего количество наночастиц с диаметром более 15 нм составляло 5–10 % от общего количества частиц. Для такой жидкости на основе ВМ-3 уже при напряженности магнитного поля 100 кА/м относительная вязкость была равна 6,3.

Анализ полученных результатов показывает, что относительную вязкость можно использовать в качестве критерия качества магнитной жидкости и рекомендовать для эксплуатации в магнитоэластичных герметизаторах, если отношение  $\eta/\eta_0 \leq 2,5$ . Для реализации данного метода не требуется дорогостоящего специализированного оборудования. Необходимость

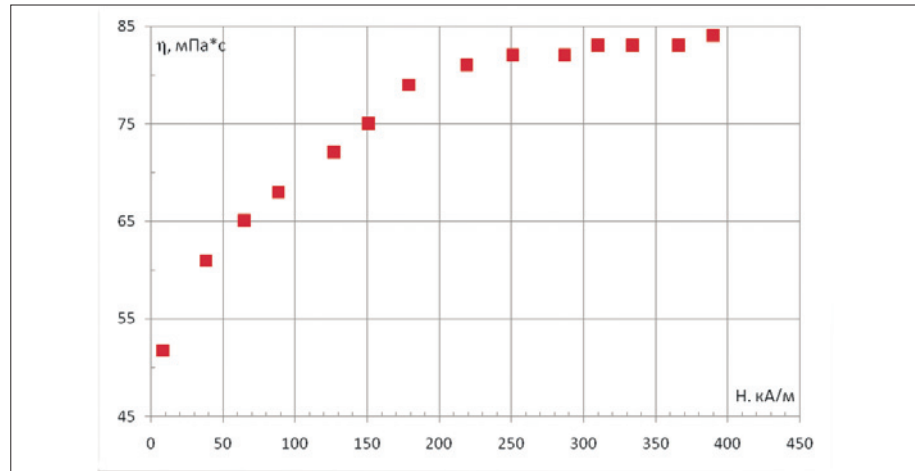


Рис. 3. Зависимость вязкости магнитной жидкости на основе ВМ-3 от внешнего однородного магнитного поля

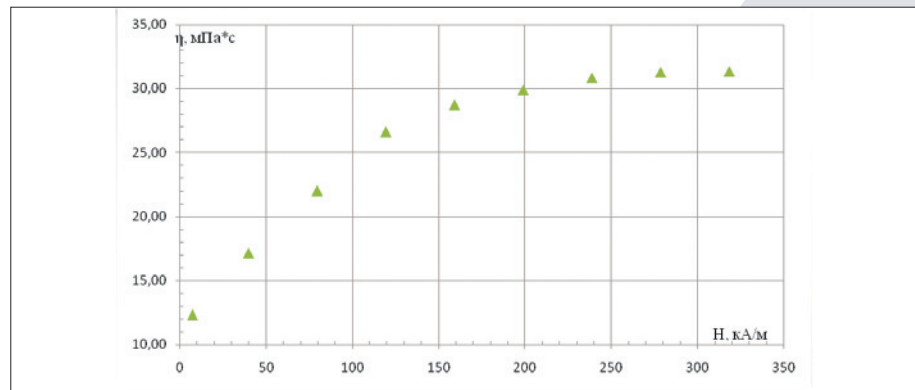


Рис 4. Зависимость вязкости магнитной жидкости на основе ПЭС-3 от внешнего однородного магнитного поля

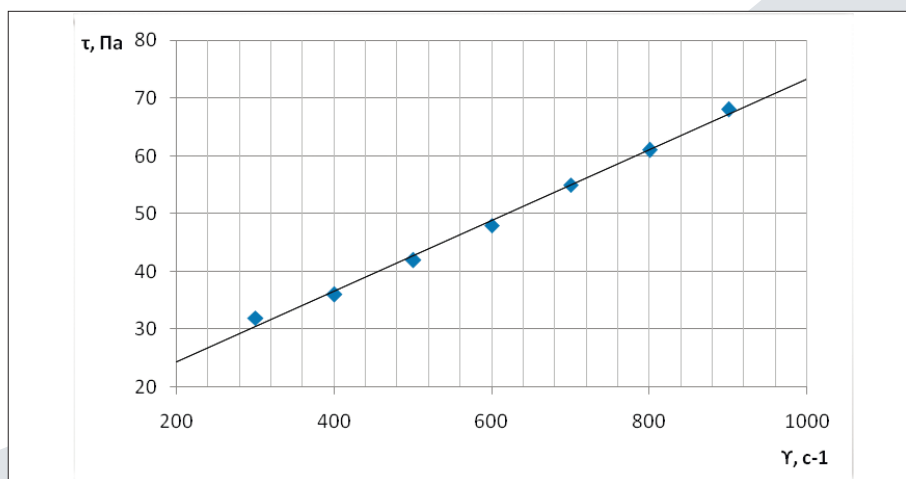


Рис 2. Зависимость тангенциального напряжения  $\tau$  на стенке капилляра от градиента скорости сдвига  $\gamma$

иметь простой капиллярный вискозиметр и электромагнит позволяет организовать входной контроль магнитной жидкости непосредственно на предприятиях, эксплуатирующих магнитоэластичные герметизаторы. Это приведет к увеличению работоспособности герметизаторов и повышению безопасности их эксплуатации.

#### Выводы:

1. Эффективная вязкость магнитной жидкости в зазоре герметизатора является функцией напряженности магнитного поля.

Интенсивность роста вязкости зависит от количества и размеров крупных частиц в МЖ.

2. Седиментационная устойчивость МЖ также зависит от структурообразования в жидкости.

3. Анализ экспериментальных данных показал, что для промышленных МЖ, прошедших эксплуатационную проверку в составе МЖГ, величина относительной эффективной вязкости не превышает 2, 5.

4. Относительная эффективная вязкость МЖ предложена в качестве критерия качества жидкости, а также работоспособности и безопасности герметизатора.

#### Список литературы:

1. Odenbach S. *Magnetoviscous Effects in Ferrofluids. Lecture notes in physics.* [Text]/S. Odenbach. – Berlin: Springer, 2002. – 151p.

2. Зубарев А. Ю. К теории магнитовязкого эффекта в феррожидкостях. [Текст]/А.Ю. Зубарев, Д. Н. Чириков//ЖЭТФ. – 2010. – Том 137, вып. 6. – С. 1139–1150.

3. Лебедев А. В. Вязкость концентрированных коллоидных растворов магнетита [Текст]/А.В.Лебедев//Коллоидный журнал. –2009. – Том 71, № 1. – С. 78–83

4. Зубарев А. Ю. Реологические свойства полидисперсных магнитных жидкостей. Влияние цепочечных агрегатов. [Текст]/А.Ю.Зубарев//ЖЭТФ – 2001. – Том 120, вып.1(7). – С. 94–103.

5. О влиянии структурной организации на релаксацию маг-

6. Odenbach S. *The influence of large particles and agglomerates on the magnetoviscous effect in ferrofluids* [Text]/S.Odenbach, K. Raj// *Magnetohydrodynamics.* – 2000. – Vol 36, № 4. – Pp.312–319.

7. Матвеев В. Н. Вязкость и структура дисперсных систем [Текст]/ В. Н. Матвеев, Е. А. Курсанов//Вестн. Моск. ун-та. Сер.2 Химия. –2011. – Т. 52, № 4. – С. 243– 276.

8. Бирик Е. Е. Реология дисперсных систем [Текст]/ Е. Е. Бирик. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. –172 с.

9. Волков П. К. Взаимодействие частиц как механизм увеличения вязкости суспензии. [Текст]/ П.К.Волков, С. И. Мартынов, А. Ю. Ткач//Вестник Югорского

[Текст]/А.В.Радионон, С. А. Кункин, С. А. Полежаева//Вісник НУК. –2014. –№ 1. – С. 180–189.

11. *A Magnetic Fluid for operation in Strong Gradient Fields* [Text]/ A. F. Pshenichnikov, A. V. Lebedev, A. V. Radionov, D. V. Efremov// *Colloid Journal.* –2015. – Vol.77, № 2. – Pp. 196–201.

12. *Effects of a superparamagnetic state of particles of a paraffin based magnetic colloid* [Text]/Yu. Dikansky, A. Ispiryay, S. Kunikin, A. Radionov// *Solid State Phenomena.* – 2015. – Vol.233–234-Pp. 297–301.

13. Морозов Н. А. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях [Текст]/ Н.А.Морозов, Ю. Б. Казаков. – Ивано-во: ФГБОУВПО «ИГЭУ им. В. И. Ленина», 2011. –264 с.

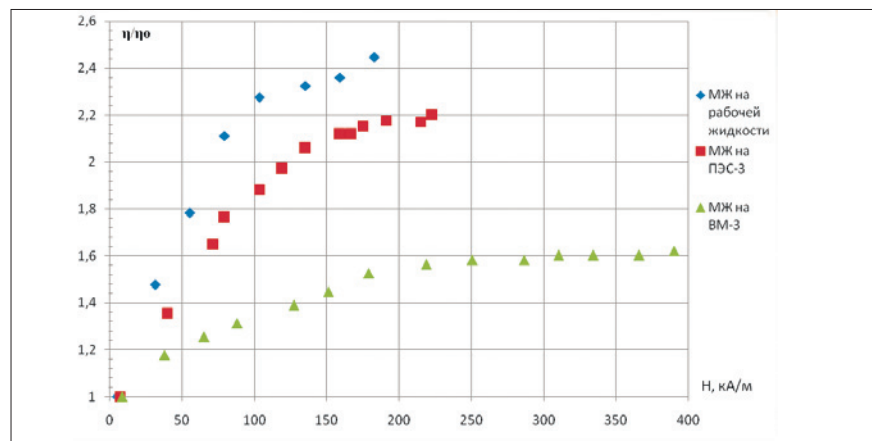


Рис 6. Зависимость относительной вязкости МЖ от внешнего магнитного поля

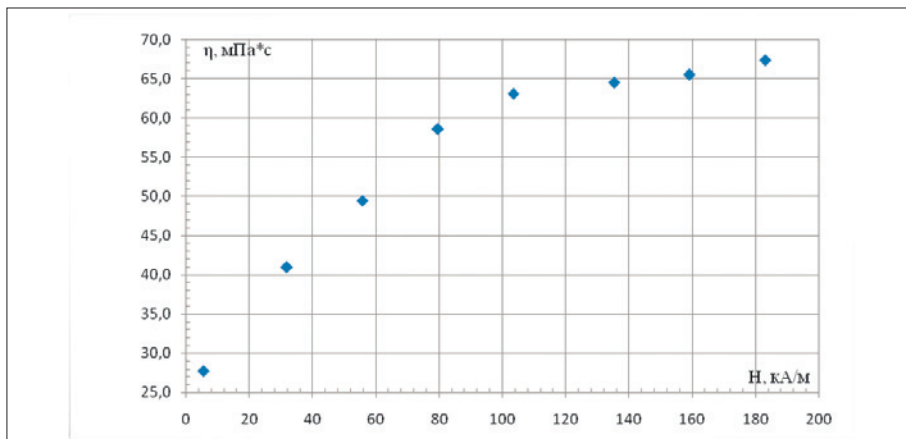


Рис 5. Зависимость вязкости МЖ на основе «рабочей жидкости» от внешнего магнитного поля

нитного момента дисперсных частиц в магнитной жидкости [Текст]/Д.В.Гладких, Ю. И. Диканский, К. А. Балабанов, А. В. Радионон//ЖТФ. –2005. – т. 75, вып.10. – С. 139–145.

государственного университета. – 2012. – Вып.2(25). – С. 21–24.

10. Радионон А. В. Повышение техногенной безопасности эксплуатации оборудования с увеличенными радиальными зазорами

14. Полунин В. М. Акустические свойства нанодисперсных магнитных жидкостей [Текст]/ В.М. Полунин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. –384 с.

15. Радионон А. В. Влияние испаряемости магнитной жидкости на работоспособность и техногенную безопасность магнитожидкостных герметизирующих комплексов [Текст]/А.В.Радионон//Компрессорное и энергетическое машиностроение. –2016. – № 1(43). – С. 25–31.

16. Майоров М. М. Измерения вязкости феррожидкости в магнитном поле [Текст]/М.М.Майоров//Магнитная гидродинамика. –1980. –№ 4. – С. 11–18.

17. Диканский Ю. И. Эффекты взаимодействия частиц и структурно-кинетические процессы в магнитных коллоидах: дис...доктора физ. – мат. наук: 01.04.14/ Ю. И. Диканский. – Ставрополь, 1999. –305 с.