

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТЕКУЧЕСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.Н. Болотов, О.О. Новикова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

170026, Россия, Тверь, наб. А. Никитина, 22

alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.692

Аннотация: На основе магнитных жидкостей реализованы новые эффективные технические устройства, такие как магнитожидкостные подшипники, уплотнения, демпферы. Магнитовязкий эффект присущий магнитным жидкостям может не только улучшить свойства магнитожидкостных узлов, но значительно усложнить их эксплуатацию после продолжительной остановки. Имеется в виду так называемый «стоп-эффект», который возникает из-за аномально высокого предельного напряжения сдвига в наноструктурированной жидкости. Экспериментально изучены пластические свойства магнитной жидкости в зависимости от таких параметров: напряжение сдвига, температура, время структурообразования. Разрушение наноструктуры магнитной жидкости начинается после того, как напряжение сдвига превысит некоторое критическое значение. При напряжениях ниже критического, но выше предельного напряжения сдвига смещение твердой поверхности происходит путем преодоления граничного трения магнитной жидкости по твердой поверхности. Установленный экспериментально экспоненциальный ход температурной зависимости скорости сдвига отражает характер сил, определяющих внутреннее трение в магнитной жидкости.

Ключевые слова: магнитная жидкость, предел текучести, нанодисперсные частицы, магнитное взаимодействие, цепочечная модель.

1. Введение

Магнитные жидкости (МЖ) благодаря своим уникальным физическим свойствам перспективны для применения в новых машинах и механизмах. Однако этому препятствуют недостатки присущие в большей или меньшей мере всем магнитным жидкостям. Следует отметить склонность магнитных жидкостей к потере коллоидной устойчивости, недостаточно широкий температурный диапазон функционирования, разрушение при контакте со многими жидкими средами и другое. Например, применению магнитных жидкостей в узлах трения и герметизаторах препятствует их склонность к структурообразованию в сильных магнитных полях [1-3].

Повышение эффективности магнитожидкостных подшипников и герметизаторов связано с уменьшением момента сил внутреннего трения при страгивании после останова, который может на несколько десятичных порядков превышать момент трения в рабочем режиме. Причина этого явления заключается в образовании тиксотропнообратимой наноструктуры магнитной жидкости под воздействием сильного неоднородного магнитного поля. Избежать структурирования устойчивого коллоида МЖ

можно путем уменьшения размера дисперсных частиц. Однако в этом случае возникает проблема сохранения высоких магнитных свойств МЖ, поскольку в соответствии с соотношением неопределённостей Гейзенберга физические условия сохранения ферромагнитного состояния не выполняются при размерах частиц менее 1 нм [4].

Магнитная жидкость в наноструктурированном состоянии, как правило, выполняет свои функциональные задачи (например, герметизацию подшипников), однако, силы трения в таких жидкостях из-за магнитовязкого эффекта имеют очень высокие значения [5]. Это существенно сужает область применения подшипников и уплотнений, в которых МЖ по условиям эксплуатации может структурироваться под влиянием сильного магнитного поля. Для разработки технологических и физико-химических подходов к снижению момента трения при страгивании необходимо изучение механизма внутреннего трения в структурированной магнитной жидкости.

С реологических позиций трение в технических устройствах при пуске определяется предельным напряжением сдвига (начальным напряжением текучести). Существующие теории начального напряжения течения реальных магнитных жидкостей предполагают, что их переход от квазитвердого к текучему режиму поведения обусловлен разрушением цепочечных или объемных колончатых агрегатов, которые зачастую связывают противоположные границы области, содержащей МЖ [6-8]. При этом обычно предполагается, что агрегаты жестко сцеплены с ограничивающими стенками. Однако в экспериментах часто наблюдалось скольжение агрегатов на стенках [9].

Поэтому определение величины начального напряжения течения, его природы, зависимости от свойств и концентрации частиц, а также от напряженности приложенного магнитного поля важно для практического применения магнитных жидкостей.

Цель работы заключалась в исследовании закономерностей процесса внутреннего трения в магнитных жидкостях с сильно развитой тиксотропной наноструктурой для поиска направлений снижения трения в магнитожидкостных технических устройствах.

2. Методические вопросы проведения экспериментальных исследований

Исследования внутреннего трения в структурированной МЖ проводились на приборе МТ-3 предназначенном для триботехнических испытаний подшипников и уплотнений с магнитной жидкостью. Прибор позволяет определять силу трения в различных трибоузлах: нескольких конструкций подшипников и уплотнений с нанодисперсными магнитными

жидкостями, в зависимости от величины скорости вращения или вращающего момента в узле. Также предусмотрена возможность определения зависимости скорости вращения от величины вращающего момента, которая достаточно информативна. По конструкции прибор близок к ротационному вискозиметру с вращающимся полым цилиндром.

На приборе изучались фрикционные характеристики магнитогидростатических подшипников, схема одного из которых показана на рис. 1. Принципиальная конструкция осевого подшипника включает подпятник содержащий магнитопроводы 1, 2, постоянный магнит 3 и пяту подшипника, состоящую из немагнитного тонкостенного цилиндра 4, закрытого с одной стороны и вставленного в рабочий зазор заполненный магнитной жидкостью 5. Неоднородное магнитное поле в зазоре формируется зубчатой структурой магнитопроводов. Магнитная жидкость герметизирует газовый резервуар внутри куполообразной пяты 4. Поэтому полученные на приборе результаты характеризуют не только свойства подшипника, но и магнитожидкостного уплотнения.

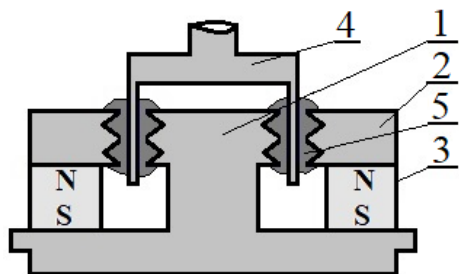


Рис.1. Схема упорного магнитогидростатического подшипника.

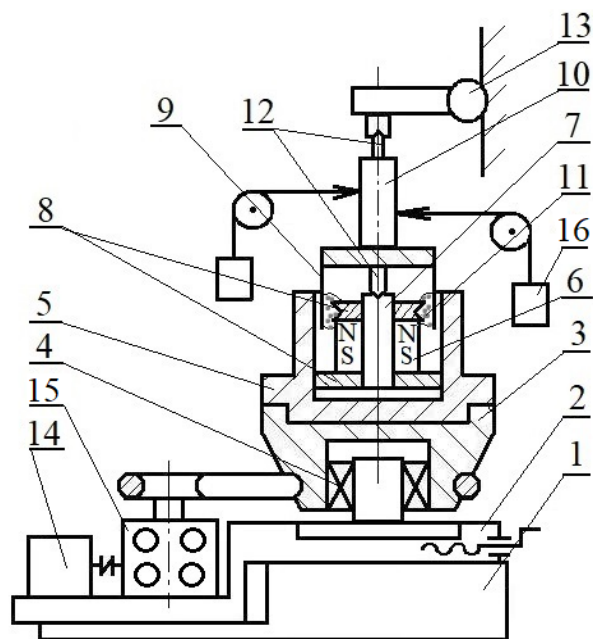


Рис. 2. Прибор для определения эффективных реологических свойств магнитной жидкости и фрикционных свойств подшипников

Магнитогидростатический подшипник работает следующим образом. При действии на подшипник внешней осевой нагрузки вал с цилиндром 4 аксиально смещается до тех пор, пока в объеме внутри него не создастся избыточное давление, достаточное для компенсации внешней нагрузки. Кроме того, в подшипнике магнитная жидкость центрирует вал в

радиальном направлении за счет эффекта магнитного выталкивания, проявляющегося при неравномерном зазоре между корпусом и полым цилиндром.

Грузоподъемность и жесткость подшипника зависят от величины пробивного давления магнитожидкостного уплотнения и рода рабочей среды [10]. В свою очередь пробивное давление пропорционально числу отдельных ступеней магнитожидкостного уплотнения, которых в показанном на рис. 1 подшипнике три.

Прибор (см. рис. 2) состоит из массивной станины 1, на которой в шариковых направляющих установлена платформа 2. Платформу можно перемещать во взаимно перпендикулярных направлениях микрометрическими винтами и позиционировать с точностью до 0,01 мм. На платформе имеется подставка 3, которая закреплена на внешней обойме радиально-упорных шарикоподшипников 4 и может вращаться вокруг вертикальной оси. На подставке соосно с ней крепится корпус испытываемого подшипника 5 (подпятник подшипника). Подпятник 5 подшипника представляет собой цилиндр из магнитного материала, внутри которого установлен кольцевой постоянный магнит 6. Магнит центрируется немагнитной Т-образной в сечении втулкой 7, к полюсам магнита примыкают два кольцевых магнитопровода 8, один из которых выполнен с зазором по отношению к корпусу и имеет различные по форме зубцы. В зазор вставляется цилиндрическая пята 9 подшипника, закреплённая на валу 10. Зазор заполняется магнитной жидкостью 11 для герметизации подшипника.

Вал 10 вместе с пятой подшипника при необходимости может центрироваться с помощью конических подшипников часового типа 12. Верхний из центрирующих подшипников 12 располагается на балке 13, которая для удобства работы на приборе может перемещаться по вертикальным направляющим, а нижний закреплён в корпусе испытываемого подшипника. По результатам проводимых испытаний установлено, что момент трения, возникающий в центрирующих подшипниках, составлял менее 10^{-6} Н·м, что во много раз меньше, чем измеряемый момент.

Привод вращения подставки вместе с подпятником подшипника состоит из электродвигателя постоянного тока 14 с центробежным стабилизатором скорости и редуктора 15, позволяющего задавать 27 скоростей вращения в широком диапазоне. От редуктора 15 к подставке 3 вращение передается с помощью клиноременной передачи.

При проведении экспериментов по определению зависимости скорости вращения от величины вращающего момента к валу подшипника прикладывается вращающий момент, создаваемый с помощью намотанных

на вал гибких нитей и дискретных наборов грузов 16. Чтобы уменьшить вредное воздействие на вал момента сил, вращающих его вокруг горизонтальной оси, на нем намотаны рядом две расходящиеся в разные стороны нити, на концы которых подвешиваются всегда равные по весу грузы. В данном случае скорость вращения вала определяется бесконтактно, с помощью неподвижных герконов, которые срабатывали от вращающегося постоянного магнита. Площадь контакта МЖ с поверхностью цилиндра 9, необходимая для вычисления сдвиговых напряжений, определялась по ее следу на поверхности цилиндра. При работе на приборе в режиме заданной скорости вращения момент трения действующий на пяту фиксируется тензометрическим методом с точностью до 0,5 %.

Источником магнитного поля служили магниты марки КС-37 из сплава $SmCo_5$ с размерами $\varnothing 37 \times \varnothing 26 \times 8$ (мм). Неоднородное магнитное поле в рабочем зазоре вискозиметра формировалось с помощью треугольных зубцов, выполненных на полюсном наконечнике. Зубцы получены токарной обработкой магнитопроводов толщиной 6 мм резцом с углом заточки в 60° . Распределение радиальной составляющей индукции в зазоре показано на рис. 3.

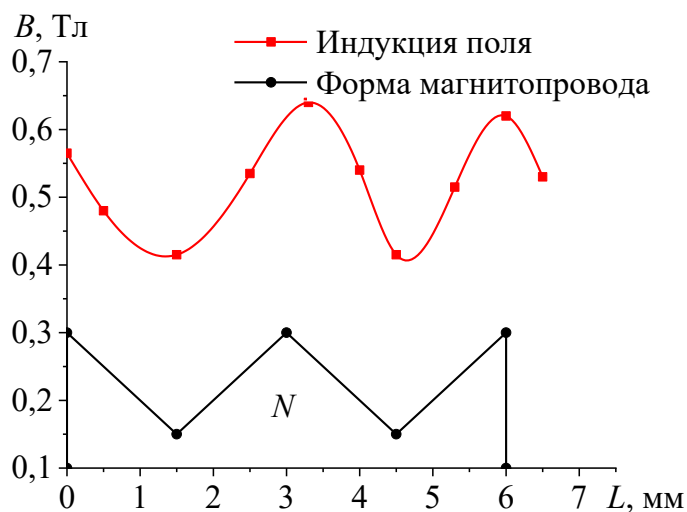


Рис. 3. Радиальная составляющая индукции магнитного поля в зазоре напротив магнитного полюса S.

Исследовалась магнитная жидкость марки ММ-ПЭС, представляющая собой коллоидную систему с дисперсной фазой из частиц магнетита (10 об.%) и дисперсионной средой из кремнийорганической жидкости ПЭСВ-2. Динамическая вязкость магнитной жидкости была около 0,05 Па·с при 20°C .

3. Результаты экспериментов

Для изучения динамики разрушения коллоидной структуры

магнитной жидкости экспериментально определялась зависимость линейной скорости движения поверхности цилиндра 9 на рис. 4 в зависимости от напряжения сдвига. Такая зависимость в данном случае более информативна, чем обратная зависимость, поскольку позволяет детально проследить динамику разрушения структуры и реологию процессов, предшествующих разрушению. Линейная скорость скольжения вместо традиционной скорости сдвига выбрана потому, что вторая величина при тиксотропных переходах и тем более в условиях проявления эффектов ползучести и пристенного скольжения, предшествующих этому переходу, не имеет строгого физического смысла [10].

Исследования показали, что движение цилиндра с конечной скоростью начинается только при напряжениях сдвига, превышающих так называемое предельное статическое напряжение сдвига τ_s и протекает с постоянной скоростью (см. рис. 4). При небольшом дальнейшем увеличении напряжения сдвига скорость увеличивается линейно, что объясняется ползучестью и пристенным скольжением [10]. Определяется τ_s простым экстраполированием полученной зависимости на ось абсцисс.

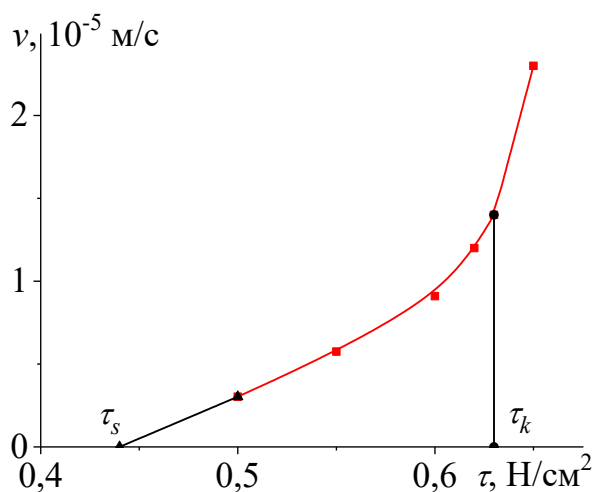


Рис. 4. Изменение линейной скорости от напряжения сдвига.

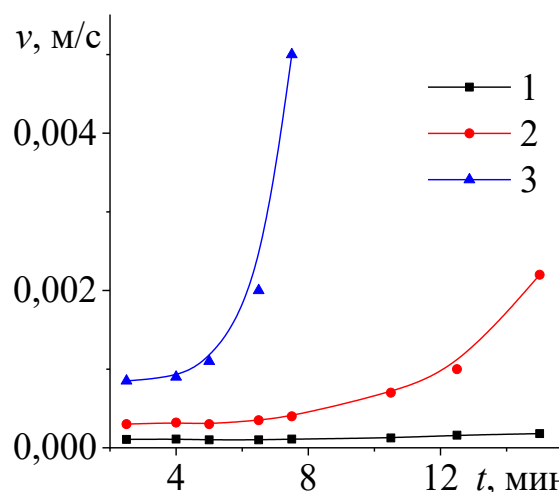


Рис. 5. Зависимость скорости от времени при различных значениях напряжения сдвига: 1 – 0,7 Н/см²; 2 – 0,7 Н/см²; 3 – 0,6 Н/см².

В рассмотренном диапазоне скоростей структурных изменений МЖ не происходит. В процессе дальнейшего увеличения напряжения после перехода через некоторое критическое τ_k значение напряжения, равновесная скорость начинает нелинейно возрастать в результате разрушения структуры.

Критическое напряжение τ_k было введено для сравнения прочности структуры различных жидкостей. Значение критического напряжения

определялось с точностью до 50 Па путем анализа кривых изменения скорости скольжения от времени. По сравнению с предельным напряжением сдвига критическое напряжение имеет более ясный физический смысл и определяется однозначно.

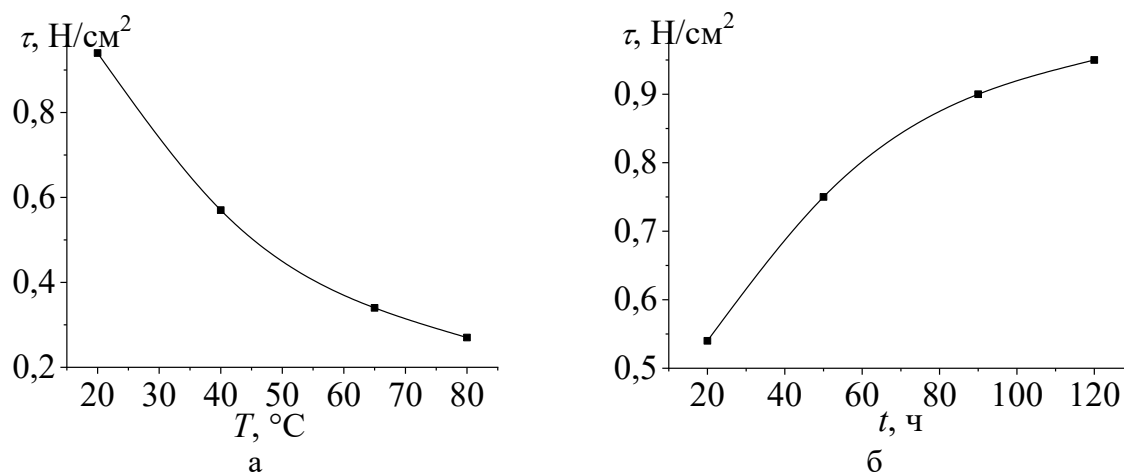


Рис. 6. Зависимость критического напряжения сдвига от температуры (а) и времени (б) структурирования жидкости.

На рис. 5 приведены графики зависимости линейной скорости скольжения от времени при различных значениях сдвиговых напряжений. Если напряжение не превышает критического, то скорость не изменяется в течение времени. Когда напряжение сдвига превышает τ_k незначительно, скорость вращения вначале возрастает за счет разрушения связей между слабо взаимодействующими частицами, в той области жидкости, где поле меньше, а затем, когда наступает баланс между процессами разрушения и восстановления межчастичных связей, скорость стабилизируется. Дальнейшее увеличение сдвигового напряжения постепенно приводит к разрушению структуры по всему объему МЖ. Время, затраченное на разрушение структуры, может изменяться более чем на порядок, в зависимости от величины напряжения (см. рис. 5). Отметим, что даже для рассматриваемых коллоидных систем, отличающихся широким спектром сил межчастичного взаимодействия, минимальное напряжение разрушения структуры не существенно отличается от критического.

Величина критического напряжения изменяется в зависимости от времени структурирования и температуры (см. рис. 6). Для жидкостей рассматриваемого класса формирование термодинамически устойчивой структуры может продолжаться сотни часов, но наиболее интенсивно процесс протекает в первые часы после помещения МЖ в поле. Следует отметить, что температурная зависимость критического напряжения весьма резкая и близка к экспоненциальной.

4. Заключение

На приборе, моделирующем работу магнитогидростатического подшипника, исследованы такие реологические характеристики наноструктурированной магнитным полем жидкости как статический предел текучести и критическое напряжение сдвига. Процесс структурирования магнитной жидкости во внешнем поле может продолжаться сотни часов и зависит, по нашему опыту, в основном от вязкости дисперсионной среды и концентрации магнетита. Разрушение структуры МЖ начинается после того, как напряжение сдвига превысит критическое значение. При напряжениях ниже критического, но выше предельного напряжения сдвига смещение измерительного полого цилиндра происходит путем преодоления граничного трения МЖ по твердой поверхности.

Установленный близкий к экспоненциальному ход температурной зависимости скорости сдвига отражает характер сил, определяющих внутреннее трение в магнитной жидкости.

Библиографический список:

1. Орлов, Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
2. Odenbach, S. Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids / S. Odenbach // In series: Lecture Notes in Physics. – Springer: Berlin, Heidelberg, 2009. – V. 763. – X, 430 p. DOI: 10.1007/978-3-540-85387-9.
3. Болотов, А.Н. Магнитные свойства магнитных нанодисперсных смазочных масел / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 564-573. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.564.
4. Непийко, С.А. Физические свойства малых металлических частиц / С.А. Непийко. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 246 с.
5. Тюкавин, Р.Н. Магнитожидкостные герметизаторы для космической техники / Р.Н. Тюкавин. – Режим доступа: [www.url:http://magneticliquid.narod.ru/authority/023.htm](http://magneticliquid.narod.ru/authority/023.htm). – 15.02.2023.
6. Rozynek, Z. Structuring from nanoparticles in oil-based ferrofluids/ Z. Rozynek, A. Józefczak, K.D. Knudsen et al. // The European Physical Journal. – 2011. – V. 34. – I. 3. – P. 1-8. DOI: 10.1140/epje/i2011-11028-5.
7. Shahnazian, H. Yield stress in ferrofluids? / H. Shahnazian, S. Odenbach // International Journal of Modern Physics B. – 2007. – V. 21. – I. 28n29. – P. 4806-4812. DOI: 10.1142/S0217979207045694.
8. Зубарев, А.Ю. К нелинейной реологии магнитных жидкостей / А. Ю. Зубарев, Л. Ю. Исакова, Д.Н. Чириков // Коллоидный журнал. – 2011. – Т. 73. – № 3. – С. 320-333.
9. Болотов, А.Н. Трение структурированной магнитной жидкости при скольжении по твердой поверхности / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Трение и износ. – 2006. – Т. 27. – № 4. – С. 409-416.
10. Болотов, А.Н. Исследование триботехнических свойств пьезомагнитожидкостных подшипников / А.Н. Болотов, В. В. Новиков, О. О. Новикова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 10. – С. 23-29.

References:

1. Orlov D.V., Mikhalev Yu.O., Myshkin N.K. *Magnitnye zhidkosti v mashinostroenii* [Magnetic fluids in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993, 272 p. (In Russian).
2. Odenbach S. Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids, *Lecture Notes in Physics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, vol. 763, X, 430 p. DOI: 10.1007/978-3-540-85387-9.
3. Bolotov A.N., Novikova O.O. Magnitnye svoystva magnitnykh nanodispersnykh smazochnykh masel [Magnetic properties of the magnetic nanodispersed lubricant oils], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya*

- klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 564-573. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.564. (In Russian).
4. Nepiyko S.A. *Fizicheskie svoystva malyykh metallicheskih chastits* [Physical properties of small metal particles]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1985, 246 p. (In Russian).
5. Tyukavin R.N. Magnitohidkostnye germetizatory dlya kosmicheskoy tekhniki [Magnetofluidic sealants for space technology]. Available at: [www.url:http://magneticliquid.narod.ru/authority/023.htm](http://magneticliquid.narod.ru/authority/023.htm) (accessed 15.02.2023). (In Russian).
6. Rozynek Z., Józefczak A., Knudsen K.D. et al. Structuring from nanoparticles in oil-based ferrofluids, *The European Physical Journal*, 2011, vol. 34, issue 3, pp. 1-8. DOI: 10.1140/epje/i2011-11028-5.
7. Shahnazian H., Odenbach S. Yield stress in ferrofluids?, *International Journal of Modern Physics B*, 2007, vol. 21, issue 28n29, pp. 4806-4812. DOI: 10.1142/S0217979207045694.
8. Zubarev A.Yu., Iskakova L.Yu., Chirikov D.N. On the nonlinear rheology of magnetic fluids, *Colloid Journal*, 2011, vol. 73, issue 3. pp. 327-339. DOI: 10.1134/S1061933X11030203.
9. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Trenie strukturirovannoy magnitnoy zhidkosti pri skol'zhenii po tverdoj poverkhnosti [Friction of structured magnetic fluid sliding over solid surface], *Trenie i iznos [Journal of Friction and Wear]*, 2006, vol. 27, issue 4, pp. 409-416. (In Russian).
10. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Issledovanie tribotekhnicheskikh svoystv p'ezomagnitohidkostnykh podshipnikov [Investigation of tribotechnical properties of piezo-magnetic-liquid bearings], *Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah [Friction and lubrication in machines and mechanisms]*, 2010, issue 10, pp. 23-29. (In Russian).

Original paper

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLUIDITY OF NANOSTRUCTURED MAGNETIC FLUID IN A STRONG MAGNETIC FIELD

A.N. Bolotov, O.O. Novikova

Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.692

Abstract: Based on magnetic fluids, new effective technical devices have been implemented, such as magnetic fluid bearings, seals, and dampers. The magnetic-viscous effect inherent to magnetic fluids can not only improve the properties of magnetic fluid units, but significantly complicate their operation after a long stop. This refers to the so-called «stop effect», which occurs due to an abnormally high limiting shear stress in a nanostructured liquid. The plastic properties of the magnetic fluid are experimentally studied depending on the following parameters: shear stress, temperature, structure formation time. The destruction of the nanostructure of the magnetic fluid begins after the shear stress exceeds a certain critical value. At stresses below the critical, but above the limiting shear stress, the displacement of the solid surface occurs by overcoming the boundary friction of the magnetic fluid on the solid surface. The experimentally established exponential course of the temperature dependence of the shear rate reflects the nature of the forces that determine the internal friction in the magnetic fluid.

Keywords: magnetic fluid, yield strength, nanodispersed particles, magnetic interaction, chain model.

Болотов Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Новикова Ольга Олеговна – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Alexander N. Bolotov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University

Olga O. Novikova – Ph. D., Full Docent, Applied Physics Department, Tver State Technical University

Поступила в редакцию/received: 15.06.2023; после рецензирования/revision: 07.07.2023; принята/accepted: 10.07.2023.