

ВИСКОЗИМЕТРИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ И СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ.

1. ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАГНИТНЫХ НАНОДИСПЕРСНЫХ ЖИДКИХ СРЕД

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/2021.13.044

Аннотация: Анализ литературных источников показывает, что существующие вискозиметры не всегда и не полностью могут обеспечить комплексные исследования магнитных наножидкостей для научных и практических целей. Разработана конструкция магнитного ротационного вискозиметра, на котором исследования могут проводиться в широком диапазоне значений индукции магнитного поля. Магнитное поле в приборе направлено ортогонально напряжению сдвига и может изменяться от нуля до $1,7 \cdot 10^5$ А/м. Прибор имеет два измерительных зазора заполненных жидкостью, что повышает точность результатов исследований маловязких жидкостей. Вискозиметр позволяет измерять стандартные характеристики магнитных наножидкостей (коэффициент вязкости, пластическая вязкость, предельное напряжение сдвига и др.), а также изучать структурные особенности жидкостей при сдвиговых напряжениях. Скорость сдвига в жидкости может стабильно поддерживаться в широком диапазоне $(1 \div 5) \cdot 10^3$ с⁻¹. Вязкость исследуемых жидкостей может изменяться от 10^{-3} Па·с до $\approx 10^2$ Па·с. Для исследований на вискозиметре требуется небольшое количество магнитной наножидкости объемом около 3,5 см³. Математическое описание процесса ламинарного течения жидкости в кольцевом зазоре вискозиметра позволило оптимизировать его геометрические размеры и получить формулы для расчета коэффициента вязкости, напряжения сдвига и скорости сдвига, используя экспериментальные данные.

Ключевые слова: магнитная наножидкость, реология, коаксиальный вискозиметр, напряжение сдвига, скорость сдвига, коэффициент вязкости, магнитное поле, внешнее и внутреннее трение.

1. Введение

В настоящее время большой научный и практический интерес проявляется к коллоидным системам, содержащим нанодисперсную магнитную фазу [1, 2]. Такие коллоидные системы принято называть магнитными нанодисперсными жидкостями или наножидкостями. Магнитные свойства жидкостям придают твердые ферри – или ферромагнитные частицы размером от 10 до 100 нм. Добавление в несущую жидкую основу магнитных частиц приводит к существенному изменению их физических свойств. Существуют различные методы исследования магнитных наножидкостей, которые позволяют глубже

раскрыть их свойства и на этой основе полноценно использовать в научных и практических целях.

Наиболее широко для исследований магнитных наножидкостей используют магнитометрические методы [3], которые позволяют раскрыть особенности процессов намагничивания и перемагничивания магнитных коллоидов, агрегации частиц, структурирования и т.д. Не менее часто используют методы реометрии для экспериментального определения реологического поведения магнитных наножидкостей. Экспериментальное изучение процессов течения магнитных наножидкостей позволяет получать новые результаты о механизме диссипативных процессов, структурной стабильности и определить такие параметры как, например, гидродинамический размер частиц и их геометрию. Измерение реологических свойств магнитных наножидкостей не менее важно в связи с необходимостью постоянного технологического контроля их производства. Существенные отклонения реологических свойств наножидкостей от принятых норм могут сказаться не только на снижении качества готовых технических устройств, но и привести их к выходу из строя.

К настоящему времени вполне апробированы такие технические устройства как магнитожидкостные узлы трения, а также управляемые магнитным полем муфты, тормоза, амортизаторы, демпферы, сепараторы, в которых магнитные наножидкости используются в качестве рабочего тела [4]. Для эффективной работы перечисленных устройств необходимо, чтобы реологические параметры магнитной наножидкости строго соответствовали номинальным значениям.

Для изучения реологических свойств ньютоновских и неньютоновских жидкостей разработано несколько типов вискозиметров, различающихся по принципу измерения параметров течения и конструктивному оформлению (ротационные, капиллярные, вибрационные, шариковые, поплавковые, пузырьковые и др.). Отсутствие универсального вискозиметра объясняется присущими им недостатками и ограниченной областью применения [5, 6]. В литературе можно найти применение всех типов вискозиметров для изучения течения магнитных наножидкостей, но только при отсутствии магнитного поля.

Для реологических исследований магнитных наножидкостей именно в магнитных полях широко используется капиллярный вискозиметр, который помещают в поперечное или продольное магнитное поле [7-9]. Многие важные научные результаты были получены на таком вискозиметре, но он имеет существенно ограниченную область применения. Прибор обладает недостаточно широким диапазоном измерений вязкости (возможность, измерять вязкость только у

легкотекучих однородных сред), на нем невозможно проводить непрерывные измерения, затруднительно создать магнитное поле, направленное поперек скорости сдвига.

В работе [10] для исследования магнитореологических эффектов использовали модифицированный вискозиметр марки РВ-8. Для создания магнитного поля в области течения магнитной жидкости внешний и внутренний цилиндры вискозиметра помещали в соленоид, заключенный в магнитопровод. Однако из-за большой величины рабочего зазора в намагничивающей системе получить однородное магнитное поле индукцией более 0,1 Тл таким образом затруднительно. Диапазон скорости сдвига небольшой $1 \div 10^3 \text{ с}^{-1}$. Близкий, по конструкции и области применения ротационный вискозиметр описан в [11].

Из патентной литературы и научных статей известны оригинальные способы измерения вязкости магнитных коллоидов [12-17]. Например, в патенте [12] предлагается определять вязкость магнитной жидкости и магнитного коллоида с использованием колебательной системы, в которой инерционно-вязким элементом служит магнитная жидкость (МЖ), заполняющая U-образную стеклянную трубку, а вязкость рассчитывается сложным образом по коэффициенту затухания колебаний. В статье [13] отмечается, что выстраивание магнитных коллоидных частиц вдоль магнитного поля вызывает двойное лучепреломление коллоида. Когда магнитное поле выключается, этот уровень двойного лучепреломления релаксирует до нуля с характерным временем, пропорциональным вязкости раствора. Приведенные и многие подобные креативные способы определения вязкости не апробированы и поэтому не нашли применения на практике из-за отсутствия убедительных достоинств.

Наиболее универсальным и широко распространенным вискозиметром является ротационный вискозиметр, в котором исследуемая среда заключается между двумя коаксиально расположенными цилиндрами, один из которых вращается. Измеряя момент сил внутреннего трения, действующий на неподвижный цилиндр, можно по его значению определить многие реологические свойства среды. Достоинства ротационного вискозиметра заключаются в следующем. Исследуемое вещество находится в строго контролируемых термодинамических и механических условиях, что упрощает физическую трактовку результатов исследований. Прибор позволяет получать абсолютные значения реологических параметров, которые хорошо согласуются с аналогичными параметрами, полученными на других абсолютных вискозиметрах. Конструкция ротационных вискозиметров не отличается избыточной сложностью и поэтому, технология их изготовления не вызывает затруднений. Исследования могут проводиться в

широком диапазоне скоростей сдвига и температур; процесс измерений не занимает много времени. В литературе указывается, что недостатком ротационных вискозиметров является невозможность проводить исследования при скоростях сдвига свыше $10^3 \div 10^4 \text{ с}^{-1}$, но это ограничение в ряде случаев можно обойти.

Учитывая положительные свойства ротационного вискозиметра, именно этот тип вискозиметров был выбран в качестве прототипа прибора для реологических исследований магнитных нанодисперсных коллоидов.

Цель работы заключалась в разработке принципиальной конструкции магнитного ротационного вискозиметра и научном обосновании технических решений, геометрических параметров и расчетных формул.

2. Конструкция магнитного коаксиального вискозиметра

Для исследования реологических свойств магнитных наножидкостей разработана конструкция ротационного вискозиметра, схема измерительного узла которого приведена на рис. 1. За основу конструкции взят ротационный вискозиметр, состоящий из двух вращающихся коаксиальных цилиндров, в зазор между которыми вставлен колоколообразный тонкостенный измерительный цилиндр (такие вискозиметры обычно называют вискозиметрами колоколообразного типа).

Большую ошибку совершают исследователи, которые проектируют магнитные вискозиметры с вращающимся в магнитном поле электропроводящим ротором [10]. Такой вискозиметр, по существу, будет представлять униполярный генератор постоянного тока. Возникающая на концах ротора ЭДС в несколько вольт будет создавать электрический ток, проходящий через исследуемое вещество, и дополнительно на ротор будет действовать тормозящий момент пропорциональный скорости вращения. Ионный (электронный) ток, проходящий через магнитную наножидкость, окажет влияние на ее структуру, а тормозящий момент исказит показания динамометра, измеряющего силу внутреннего трения.

По существу, в предложенной конструкции вискозиметра объединены два вискозиметра – вискозиметр типа Сирла (Searle) с вращающимся внутренним цилиндром и вискозиметр типа Куэтта (Couette) с вращающимся внешним цилиндром. Магнитный вискозиметр предназначен для реологических исследований в режиме, когда скорость вращения (градиент скорости сдвига) остается постоянной, а момент сил внутреннего трения может изменяться.

Коаксиальные цилиндры 1 закреплены на едином основании и выполнены из магнитомягкой стали (Сталь 3). Внутри корпуса установлен

цилиндрический постоянный магнит 2 выполненный из сплава $SmCo_5$ и обладающий хорошей температурной стабильностью вплоть до 200 °С. К одной из полярных поверхностей магнита примыкает цилиндрический магнитопровод 3 с осевым отверстием. Магнит 2 и цилиндр 3 центрируются немагнитным кольцом 4. На магнитопровод 3 одета немагнитная втулка 5 определяющая рабочий зазор прибора, заполняемого исследуемой жидкостью.

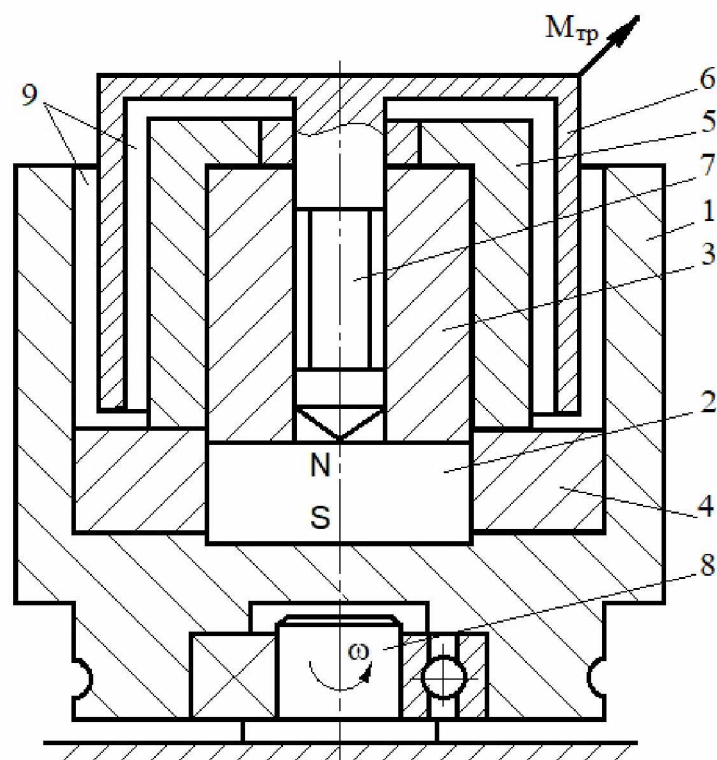


Рис. 1. Схема измерительного узла магнитного коаксиального вискозиметра.

Магнитная система, образованная магнитом 2, корпусом 1, цилиндром 3, втулкой 5 создает радиальное поле в рабочем зазоре 9 между коаксиальными магнитными цилиндрами. Для дискретного уменьшения магнитного поля в рабочем зазоре, заполненном жидкостью, на дно зазора помещаются магнитопроводящие кольца различной толщины, выполняющие роль магнитных шунтов. Эффект достигается за счет того, что часть магнитного потока, создаваемого постоянным магнитом, проходит через кольцо и не попадает в зазор. Таким образом, индукция магнитного поля в зазоре регулируется практически от нуля до 0,26 Тл. Расчеты магнитного поля в зазоре, подтвержденные экспериментами, показали, что индукция в средней части зазора следующим образом зависит от толщины шунтирующего кольца:

$$B = \alpha \exp(-bH), \quad (1)$$

где B – индукция магнитного поля, Тл; H – толщина кольца, мм;

$a = 0,26$ Тл, $b = -0,34$ мм⁻¹. Используя набор колец различной толщины, легко получить необходимое по величине магнитное поле. Небольшая относительная величина зазора позволяет создать достаточно однородное магнитное поле в изучаемой жидкости.

В рабочую область между коаксиальными цилиндрами вставлен колоколообразный тонкостенный цилиндр 6 из немагнитного алюминиевого сплава Д16, который для центрирования насажен на ось 7. Для снижения трения оси колоколообразного цилиндра и электрической изоляции его от корпуса на поверхность оси наносили антифрикционное полимерное покрытие толщиной около 5 мкм с хорошими диэлектрическими свойствами. Приведенная конструкция прибора отличается простотой достижения концентрического расположения цилиндрических измерительных поверхностей.

Образовавшиеся после установки колоколообразного цилиндра кольцевые зазоры 9 заполняются исследуемой жидкостью. Высота слоя жидкости, находящейся в контакте с полым цилиндром 6 может изменяться от 0 до 30 мм; точное значение высоты слоя жидкости легко определяется по следу, оставленному ей на поверхности цилиндра 6.

Корпус прибора 1 базируется на наружном кольце подшипника качения 8. Внутреннее кольцо подшипника неподвижно закреплено на станине. В нижней части корпуса прибора имеется шкив для осуществления его вращения приводным ремнем.

Для придания вращения коаксиальным цилиндрам использовали высокоскоростной коллекторный двигатель постоянного тока, подключенный к многоступенчатому редуктору для снижения скорости вращения и повышения вращающего момента. Вращение от редуктора к корпусу прибора передавалось с помощью ременной передачи. Изменяя скорость вращения электродвигателя, добивались необходимого градиента скорости сдвига в исследуемой жидкости. Для сохранения вращающего момента электродвигателя при изменении скорости вращения, управление его работой осуществлялось с помощью ШИМ-контроллера. Скорость вращения корпуса прибора изменялась в диапазоне от 0,1 об/мин до 600 об/мин. Для установления заданной скорости вращения коаксиальных цилиндров бесконтактно измеряли скорость вращения электродвигателя с помощью лазерного тахометра АТ-6. Прибор позволяет измерять частоту вращающихся тел в диапазоне $2 \div 10^4$ об/мин с точностью до 0,05% и разрешением 0,1 об/мин.

Для измерения вращающего момента, действующего на колоколообразный цилиндр, применяли тензорезисторный датчик (тензобалку) с упругим элементом в виде консольной балки. Сила, действующая на измерительный цилиндр, передавалась на тензобалку

через тонкую нерастяжимую нить. Балка изготавливалась из рессорно-пружинной стали 50ХГ, отличающейся увеличенным пределом текучести. Результирующая сила, действующая на тензобалку, складывается из силы внутреннего трения в магнитной наножидкости и силы внешнего трения, возникающей на оси измерительного цилиндра.

Повышение температуры исследуемой жидкости в результате тепловыделения при внутреннем трении контролировалось косвенно по температуре поверхности неподвижного цилиндра 6. Температура поверхности измерялась бесконтактно с помощью пирометра. Относительная ошибка измерения температуры не превышает 1%, разрешающая способность прибора 0,1 °С. Пирометр был настроен для измерения температуры поверхности с коэффициентом излучения равным 0,95. Для соблюдения этого условия нерабочая поверхность измерительного цилиндра покрывалась белой краской, содержащей окись цинка.

Измерительная часть магнитного вискозиметра может быть помещена в компактный жидкостный термостат для проведения реологических исследований при температурах отличных от нормальной температуры. В общих чертах методика проведения исследований на магнитном вискозиметре следующая. Вначале вынимаются цилиндр 6 и втулка 5, и в образовавшийся достаточно большой зазор с помощью шприца подается определенный объем жидкости. Снятые элементы прибора устанавливаются обратно и удаляются излишки жидкости. Наличие съемной втулки позволяет упростить заправку вискозиметра и исключить образование пустот. После включения электродвигателя с заданной скоростью вращения и переходу к стационарному режиму течения жидкости в зазоре фиксируется момент трения, действующий на поверхность цилиндра 6. При дискретном изменении скорости вращения снимается зависимость момента трения от частоты вращения и затем рассчитывается зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига. Измерения прекращались, если температура внешнего вращающего цилиндра повышалась более чем на 1,5 °С.

3. Математическая обработка эмпирических результатов, полученных на вискозиметре

Приведем формулы расчета напряжения сдвига τ , скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и коэффициента вязкости η . Согласно уравнению Ньютона, напряжение сдвига линейно зависит от градиента скорости сдвига:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = \eta r \frac{\partial \omega}{\partial r}, \quad (2)$$

где ω угловая скорость на расстоянии r от оси вращения. Для решения

дифференциального уравнение (1) рассмотрим установившееся движение жидкости между внешним цилиндром радиусом R_1 и неподвижным измерительным цилиндром с наружным радиусом R . Внешний цилиндр вращается с угловой скоростью Ω . Момент сил внутреннего трения M , действующий на произвольную цилиндрическую поверхность радиуса r , равен:

$$M = Fr = 2\pi r h \tau = 2\pi \eta r^2 h \frac{\partial \omega}{\partial r}, \quad (3)$$

где h – высота слоя жидкости, F – сила внутреннего трения.

При стационарном движении жидкости момент сил трения, действующих на любой тонкий слой жидкости между любыми концентрическими поверхностями должен равняться нулю. Это вытекает из закона сохранения момента импульса для жидкости в кольцевом зазоре. Тогда

$$r(\partial \omega / \partial r) = \text{const}. \quad (4)$$

Проинтегрировав это выражение, получим уравнение, содержащее две константы, которые определяются из граничных условий: $\omega(R_1) = \Omega$, $\omega(R) = 0$. После всех преобразований найдем выражение для угловой скорости вращения слоя жидкости, удаленного на расстояние r от оси:

$$\omega_r = \frac{\Omega}{R_1^2 - R^2} \left(R_1^2 - \frac{R^2 R_1^2}{r^2} \right). \quad (5)$$

Используя формулу (3), можно выразить скорость сдвига $\dot{\gamma}_1$ на границе жидкость – наружная поверхность измерительного цилиндра и скорость сдвига $\dot{\gamma}_2$ на границе соответственно жидкость – внутренняя поверхность:

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{2\Omega R_1^2}{R_1^2 - R^2}, \quad \dot{\gamma}_2 = \frac{2\Omega R^2}{(R - \Delta)^2 - R_2^2}, \quad (6)$$

где Δ – толщина стенки измерительного цилиндра.

На измерительный цилиндр рассматриваемого вискозиметра действуют две силы трения, приложенные к внутренней и внешней поверхностям и которые зависят от градиента скорости сдвига. Для создания одинаковых условий течения жидкости внутри и снаружи измерительного цилиндра и упрощения трактовки экспериментальных реологических зависимостей радиус внутреннего коаксиального цилиндра R_2 был выбран таким, чтобы $\dot{\gamma}_1 = \dot{\gamma}_2$. Тогда, общее выражение для радиуса R_2 будет иметь вид:

$$R_2 = \sqrt{\frac{R_1^2 (R - \Delta)^2}{2R_1^2 - R^2}}. \quad (7)$$

С учетом выражения (7), характерные размеры вискозиметра был приняты следующие: $R = 34,5$ мм, $R_1 = 35$ мм, $R_2 = 33,53$ мм, $\Delta = 0,5$ мм.

Используя уравнение (6) можно получить основные расчетные формулы для определения напряжения сдвига в жидкости τ , и коэффициента вязкости η ньютоновской жидкости:

$$\tau = \frac{FR - M_f}{4\pi h(R^2 - R\Delta)}. \quad (8)$$

$$\eta = \frac{\tau(R_1^2 - R^2)}{2\Omega R^2}. \quad (9)$$

где M_f – момент сил внешнего трения на оси измерительного цилиндра. Заметим, что экспериментально определенная сила внутреннего трения F , которая входит в формулу (8) для напряжения сдвига в два раза выше, чем в вискозиметре с одним кольцевым зазором. Это положительно сказывается на точности измерений малых сил трения.

4. Заключение

В области изучения современных наноматериалов остается важной проблема приборного обеспечения реологических исследований жидкостей с аномальной намагниченностью – магнитных наножидкостей. Существующие вискозиметры для научных и практических целей не в полной мере удовлетворяют всем предъявляемым к ним требованиям. Многие приборы не позволяют проводить исследования в магнитном поле заданной величины и определенной топографии. Зачастую приборы имеют ограничения по скорости сдвига и не позволяют получать физически ясные результаты.

Предлагается конструкция магнитного ротационного вискозиметра, на котором исследования могут проводиться в широком диапазоне значений индукции магнитного поля. Магнитное поле направлено ортогонально напряжению сдвига. Прибор укомплектован современными высокоточными средствами измерения силы, температуры, скорости вращения и магнитного поля. Вискозиметр позволяет измерять стандартные характеристики магнитных наножидкостей (коэффициент вязкости, пластическая вязкость, предельное напряжение сдвига и др.), а также изучать структурные особенности жидкостей при сдвиговых напряжениях. Скорость сдвига в жидкости может стабильно поддерживаться в широком диапазоне $(1 \div 5) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Вязкость исследуемых жидкостей может изменяться от $10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ до $\approx 10^2 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Для исследований на вискозиметре требуется небольшое количество магнитной наножидкости объемом около $3,5 \text{ см}^3$.

Математическое описание процесса ламинарного течения жидкости

в кольцевом зазоре вискозиметра позволило оптимизировать его геометрические размеры и получить формулы для расчета коэффициента вязкости, напряжения сдвига и скорости сдвига, используя экспериментальные данные.

Библиографический список:

1. **Фертман, В.Е.** Магнитные жидкости: Справочное пособие / В.Е. Фертман. – Минск: Высшая школа, 1988. – 184 с.
2. **Болотов, А.Н.** Магнитные силоксановые наножидкости адаптированные для условий граничного трения / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 546-556. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.546.
3. **Болотов, А.Н.** Мобильный магнитометр для экспресс-теста намагниченности насыщения магнитных наножидкостей / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 557-570. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.557.
4. **Uhlmann, E.** Application of magnetic fluids in tribotechnical systems / E. Uhlmann, G. Spur, N. Bayat, R. Patzwald // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2002. – V. 252. – P. 336-340. DOI: 10.1016/S0304-8853(02)00724-2.
5. **Белкин, И.М.** Ротационные приборы: Измерение вязкости и физ.-механ. характеристик материалов / И.М. Белкин, Г.В. Виноградов, А.И. Леонов; под ред. Г.В. Виноградова. – М.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
6. **Шрамм, Г.** Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм; пер. с англ. И.А. Лавыгина; под ред. В.Г. Куличихина. – М.: КолосС, 2003. – 311 с.
7. **Колчанов, Н.В.** Вязкость магнитных жидкостей при различных концентрациях коллоидных частиц и температурах / Н.В. Колчанов, Е.В. Колесниченко // Вестник Пермского университета. Физика. – 2017. – № 4 (38). – С. 37-44. DOI: 10.17072/1994-3598-2017-4-37-44.
8. **Patel, R.** Viscosity measurements of a ferrofluid: comparison with various hydrodynamic equations / R. Patel, R.V. Upadhyay, R.V. Mehta // Journal of Colloid and Interface Science. – 2003. – V. 263. – I. 2. – P. 661-664. DOI: 10.1016/S0021-9797(03)00325-4.
9. **Allebrandi, S.M.** Capillary rheometer for magnetic fluids / S.M. Allebrandi, R.A.J. van Ostayen, S.G.E. Lampaert // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2020. – V. 30. – № 1. – Art. № 015002. – 14 p. DOI: 10.1088/1361-6439/ab3f4c.
10. **Сизов, А.П.** Разработка конструкции вискозиметра для исследования магнитных жидкостей / А.П. Сизов, О.Ю. Балашов, Е.В. Сергеев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2012. – № 6. – С. 37-40.
11. **Laun, H.M.** Rheometry on magnetorheological (MR) fluids / H.M. Laun, C. Kormann, N. Willenbacher // Rheol. Acta. – 1996. – V. 35. – I. 5. – P. 417-432. DOI: 10.1007/BF00368993.
12. **Пат. 2416089, Российская Федерация МПК G01N 11/16.** Способ определения вязкости магнитной жидкости или магнитного коллоида / Емельянов С.Г., Полунин В.М., Кобелев Н.С., Ряполов П.А., Шабанова И.А.: заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет». – № 2010112571/28; заявл. 31.03.2010; опубл. 10.04.2011, Бюл. № 10. – 6 с.
13. **Bacri, J.-C.** Ferrofluid viscometer / J.-C. Bacri, J. Dumas, D. Gorse, R. Perzynski, D. Salin // Journal de Physique Lettres. – 1985. – V. 46. – № 24. – P. 1199-1205. DOI: 10.1051/jphyslet:0198500460240119900.
14. **Пашнин, С.В.** Измерение динамической вязкости непрозрачной жидкости методом Стокса / С.В. Пашнин, Е.Э. Суходоев // Евразийское Научное Объединение. – 2019. – № 6-2 (52). – С. 98-101.
15. **Wang, S.** Magnetoviscous properties of Fe_3O_4 silicon oil based ferrofluid / S. Wang, C. Yang, X. Bian // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2012. – V. 324. – I. 20. – P. 3361-3365. DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.05.055.
16. **Pat. US 8,132,445 B2, United States.** Rheometer / Laun M., Pfister J., Lochtmann R., Oetter G., Gabriel C.: assignee BASF SE, Ludwigshafen (DE), current assignee Anton Paar GmbH. – № WO2008/022960; Prior Publication Data Feb. 10, 2011; Date of Patent Mar. 13, 2012. – 8 p.
17. **Полунин, В.М.** Вязкость магнитной жидкости при колебаниях в сильном магнитном поле / В.М. Полунин, П.А. Ряполов, А.И. Жакин, Е.В. Шельдешова // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65. – № 4. – С. 477-483. DOI: 10.1134/S0320791919040142.

References:

1. Fertman V.E. *Magnitnye zhidkosti: Spravochnoe posobie* [Magnetic liquids: A reference guide]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1988, 184 p. (In Russian).
2. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Magnitnye siloksanovye nanozhidkosti adaptirovannye dlya uslovij granichnogo treniya [Silicone magnetic nanofluids adapted for the conditions of boundary friction], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2020, issue 12, pp. 546-556. DOI: 10.26456/pcascnm/2020.12.546. (In Russian).
3. Bolotov A.N., Novikova O.O. Mobil'nyj magnetometr dlya ekspress-testa namagnichennosti nasyscheniya magnitnykh nanozhidkostej [Mobile magnetometer for rapid test of saturation magnetization of magnetic nanofluids], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2020, issue 12, pp. 557-570. DOI: 10.26456/pcascnm/2020.12.557. (In Russian).
4. Uhlmann E., Spur G., Bayat N., Patzwald R. Application of magnetic fluids in tribotechnical systems, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, vol. 252, pp. 336-340. DOI: 10.1016/S0304-8853(02)00724-2.
5. Belkin I.M., Vinogradov G.V., Leonov A.I. *Rotatsionnye pribory: Izmerenie vyazkosti i fiz.-mekhan. kharakteristik materialov* [Rotary instruments: Viscosity, physical and mechanical characteristics measurement of materials]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1968, 272 p. (In Russian).
6. Schramm G. *A practical approach to rheology and rheometry*. Karlsruhe, Gebrueder HAAKE GmbH, 1994, 290 p.
7. Kolchanov N.V., Kolesnichenko E.V. Vyazkost' magnitnykh zhidkostej pri razlichnykh koncentraciyah kolloidnykh chastic i temperaturah [Viscosity of magnetic fluids at various concentrations of colloidal particles and temperatures], *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika* [Bulletin of the Perm University. Physics], 2017, no. 4 (38), pp. 37-44. DOI: 10.17072/1994-3598-2017-4-37-44. (In Russian).
8. Patel R., Upadhyay R.V., Mehta R.V. Viscosity measurements of a ferrofluid: comparison with various hydrodynamic equations, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, vol. 263, issue 2, pp. 661-664. DOI: 10.1016/S0021-9797(03)00325-4.
9. Allebrandi S.M., van Ostayen R.A.J., Lampaert S.G.E. Capillary rheometer for magnetic fluids, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2020, vol. 30, no. 1, art. no. 015002, 14 p. DOI: 10.1088/1361-6439/ab3f4c.
10. Sizov A.P., Balashov O.Yu., Sergeev E.V. Razrabotka konstrukcii viskozimetra dlya issledovaniya magnitnykh zhidkostej [Viscometer design for magnetic liquids research], *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2012, issue 6, pp. 37-40. (In Russian).
11. Laun H.M., Kormann C., Willenbacher N. Rheometry on magnetorheological (MR) fluids, *Rheola Acta*, 1996, vol. 35, issue 5, pp. 417-432. DOI: 10.1007/BF00368993.
12. Emelyanov S.G., Polunin V.M., Kobelev N.S., Ryapolov P.A., Shabanova I.A. *Sposob opredeleniya vyazkosti magnitnoj zhidkosti ili magnitnogo kolloida* [Method for determining the viscosity of a magnetic liquid or magnetic colloid]. Patent RF, no. 2416089, 2011. (In Russian).
13. Bacri J.-C., Dumas J., Gorse D., Perzynski R., Salin D. Ferrofluid viscometer, *Journal de Physique Lettres*, 1985, vol. 46, no. 24, pp. 1199-1205. DOI: 10.1051/jphyslet:0198500460240119900.
14. Pashnin S.V., Sukhodoev E.E. Izmerenie dinamicheskoi vyazkosti neprozrachnoi zhidkosti metodom Stoksa [Measurement of the dynamic viscosity of an opaque liquid by the Stokes method], *Evrasijskoe Nauchnoe Ob"edinenie* [Eurasian Scientific Association], 2019, no. 6-2 (52), pp. 98-101. (In Russian).
15. Wang S., Yang C., Bian X. Magnetoviscous properties of Fe_3O_4 silicon oil based ferrofluid, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, vol. 324, issue 20, pp. 3361-3365. DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.05.055.
16. Laun M., Pfister J., Lochtmann R., Oetter G., Gabriel C. *Rheometer*. Patent United States, no. US 8,132,445 B2, 2012.
17. Polunin V.M., Ryapolov P.A., Zhakin A.I., Sheldeshova E.V. Izmerenie dinamicheskoi vyazkosti neprozrachnoj zhidkosti metodom Stoksa [Viscosity of a magnetic fluid in a strong magnetic field], *Akusticheskij zhurnal* [Acoustical Physics], 2019, vol. 65, no. 4, pp. 477-483. DOI: 10.1134/S0320791919040142. (In Russian).

VISCOMETRY OF NANODISPERSE MAGNETIC LIQUIDS AND LUBRICATING OILS.

**1. INSTRUMENTATION FOR RHEOLOGICAL STUDIES OF MAGNETIC
NANODISPERSE LIQUID MEDIA**

A.N. Bolotov, O.O. Novikova

Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.044

Abstract: Analysis of the literature sources shows that the existing viscometers are not always and not completely able to provide comprehensive studies of magnetic nanofluids for scientific and practical purposes. Design has been developed of a magnetic rotary viscometer which makes it possible to carry out investigations in a wide range of the magnetic field induction. The magnetic field in the device is directed orthogonally to the shear stress and can vary from zero to $1,7 \cdot 10^5$ A/m. The device has two measuring gaps filled with liquid, that increases the accuracy of the results of studies of low-viscosity liquids. The viscometer allows you to measure the standard characteristics of magnetic nanofluids (viscosity coefficient, plastic viscosity, ultimate shear stress, etc.), as well as to study the structural features of liquids under shear stresses. The shear rate in the liquid can be stably maintained in a wide range of $(1 \div 5) \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$. The viscosity of the studied liquids can vary from $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ to $\approx 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. For studies on a viscometer, a small amount of magnetic nanofluid with a volume of about $3,5 \text{ cm}^3$ is required. Using experimental data, the mathematical description of the process of laminar fluid flow in the annular gap of the viscometer made it possible to optimize its geometric dimensions and obtain formulas for calculating the viscosity coefficient, shear stress and shear rate.

Keywords: *magnetic nanofluid, rheology, coaxial viscometer, shear stress, shear rate, coefficient of viscosity, magnetic field, external and internal friction.*

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: 15.02.2021; после рецензирования/revised: 4.03.2021; принята/accepted 15.03.2021.