

## ВИСКОЗИМЕТРИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ И СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ.

### 2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИБОРА ДЛЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАГНИТНЫХ НАНОДИСПЕРСНЫХ ЖИДКИХ СРЕД

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Мешков

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

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

[alnikbltov@rambler.ru](mailto:alnikbltov@rambler.ru)

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.056

**Аннотация:** Проведен анализ основных источников методических погрешностей магнитного ротационного вискозиметра, позволивший усовершенствовать конструкцию и исключить критические режимы исследований. Теоретическая оценка систематической погрешности прибора показала, что значение относительной ошибки измерений можно довести до значения менее 1%. Наибольший вклад в систематическую погрешность прибора вносит нестабильность температурного режима исследуемой наножидкости и неточность определения высоты слоя жидкости, контактирующего с измерительным цилиндром. Измерение вязкости эталонных жидкостей на магнитном вискозиметре показало, что экспериментальные значения незначительно, примерно на 0,9% завышены. Тарировка прибора на различных эталонных жидкостях позволила снизить суммарную ошибку измерений до десятых долей процента. Магнитный ротационный вискозиметр может найти применение при нестандартных научных исследованиях структуры и реологических характеристик наножидкостей, для оперативного контроля процессов синтеза магнитных жидкостей и аттестации магнитных наножидкостей, предназначенных для технического применения.

*Ключевые слова:* магнитная наножидкость, реология, вискозиметр, напряжение сдвига, скорость сдвига.

## 1. Введение

В области изучения современных наноматериалов остается важной проблема приборного обеспечения реологических исследований жидкостей с аномальной намагниченностью – магнитных наножидкостей [1-4]. 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 [5-9].

В первой части статьи [10] предлагается конструкция магнитного ротационного вискозиметра, на котором исследования могут проводиться в широком диапазоне скоростей сдвиговых деформаций и магнитных полей. 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, пластическую вязкость, предельное напряжение сдвига и др.), а также изучать структурные особенности жидкостей при сдвиговых напряжениях. Скорость сдвига в жидкости стабильно поддерживается в широком диапазоне  $(1 \div 5) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Вязкость изучаемых 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  $3,5 \text{ см}^3$ .

Однако для широкого практического применения магнитного вискозиметра необходимо провести детальный анализ всех источников методических погрешностей, чтобы их минимизировать и не допускать работу прибора в закритичных режимах. Необходимо проанализировать происхождение различных инструментальных погрешностей измерений на приборе и показать пути их уменьшения. Исследования вязкости градуировочных жидкостей позволят оценить правильность проведенного метрологического анализа прибора и установить поправочный коэффициент измерений.

Цель работы заключалась в метрологическом анализе прибора для исследования реологических свойств магнитных коллоидных систем и проведении апробации прибора на различных жидких средах.

## **2. Метрологический анализ магнитного вискозиметра**

Рассмотрим основные факторы, которые непосредственно или опосредованно влияют на точность измерения реологических параметров и их достоверность.

*2.1. Методические погрешности магнитного вискозиметра.* Методические погрешности относятся к систематическим погрешностям и обусловлены несовершенствами метода измерения, использованием необоснованных допущений, влиянием измерительного прибора на объект измерения и др.

Многие известные из литературы реологические исследования магнитных наножидкостей выполняются в магнитных полях и при этом указываются некоторые значения этого предположительно однородного магнитного поля. Однако техническая задача создания однородного поля чрезвычайно сложна и в большинстве опытов используется поле, имеющее градиент магнитной индукции. Соответственно, оценка влияния на экспериментальные результаты структуры поля не приводится. Одно из очевидных проявлений неоднородности магнитного поля это перераспределение магнитных частиц по объему магнитной наножидкости

(седиментационная неустойчивость среды), причем концентрация частиц выше по энергетическим причинам в области с большим полем.

В рассматриваемом магнитном вискозиметре поле уменьшается по направлению от внутреннего радиуса зазора с магнитной жидкостью к внешнему радиусу, а также от дна зазора к поверхности жидкости. Радиальный градиент напряженности магнитного поля в зазоре составляет  $\approx 5,6 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, осевой градиент магнитного поля несколько меньше –  $\approx 1,1 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup>. В работе [11] показано, что указанная неоднородность поля не может существенно изменить исходное равновесное распределение магнитных частиц по объему зазора.

Существенное значение в процессе проведения реологических исследований при постоянной скорости вращения имеет жесткость динамометра. В переходных или нестационарных режимах течения жидкости, при исследовании, например, ползучести и пластической вязкости номинальная и фактическая скорость могут не совпадать. Несовпадение тем больше, чем менее жесткий динамометр.

В ряде случаев в механической системе: измерительный цилиндр вискозиметра – тензобалка могут наблюдаться автоколебания, негативно влияющие на структуру исследуемых материалов и результаты реологических измерений. Ранее автоколебания измерительной системы ротационного вискозиметра были отражены в работе [12]. Автор отмечал, что автоколебания связаны с наличием упругих деформаций структуры, тиксотропией и особенностями пластично-вязкого течения. По современным представлениям первопричина автоколебаний при трении заключается в падающей зависимости силы трения от скорости. Для магнитных наножидкостей не характерны вязко-упругие свойства и поэтому автоколебания зависят в основном от жесткости динамометра и скорости течения жидкости. Увеличение жесткости динамометра приводит к уменьшению амплитуды автоколебаний, и процесс течения становится квазинепрерывным. В описанном приборе в качестве динамометрического устройства используется тензобалка, угловую жесткость  $f$ , которой можно выразить следующим образом:

$$f = Ec^3dR/4l^3 \quad (1)$$

где  $l$ ,  $c$ ,  $d$  – длина, толщина и ширина балки,  $E$  – модуль упругости. Угловая жесткость численно равна силе (трения) необходимой для поворота измерительного цилиндра на один радиан. Угловая жесткость тензобалки для магнитного вискозиметра достаточно высокая  $\approx 10^6$  Н/рад. Даже при относительно большой силе трения равной 10 Н, амплитудное значение угла поворота измерительного цилиндра не будет превышать всего лишь  $5 \cdot 10^{-4}$  угловых градусов. Соответствующее этой силе линейное перемещение поверхности измерительного цилиндра будет сравнимо с

расстоянием между дисперсными частицами в магнитной наножидкости. Поэтому, установленная в описанном приборе тензобалка с указанными механическими свойствами не может существенно исказить результаты исследований материалов со сложной реологией.

Вышеприведенные рассуждения о влиянии упругих элементов прибора на процесс измерений относятся и к ремню, служащему для передачи вращения на коаксиальные цилиндры вискозиметра. Для исключения влияния механических и кинематических свойств электропривода прибора на результаты реологических измерений применялся кожаный приводной ремень с высокой угловой жесткостью  $\approx 10^4$  Н/рад.

Градиент скорости сдвига не постоянен по ширине кольцевого зазора, а для неньютоновских жидкостей это становится еще более выражено. При уменьшении относительного зазора градиент скорости сдвига уменьшается и поэтому рекомендуется [13] соблюдать условие, при котором отношение радиусов поверхностей, ограничивающих зазор с жидкостью, не превышал 1,1. В описанном приборе это отношение существенно меньше – 1,015.

Магнитный вискозиметр имеет физически ограниченный верхний предел допустимой в исследованиях скорости сдвига. При описании движения жидкости в кольцевых зазорах вискозиметра предполагалось, что движение имеет устойчивый, упорядоченный ламинарный характер течения, при котором линии тока представляют собой концентрические окружности. Однако при достаточно больших скоростях ламинарное течение оказывается неустойчивым и переходит в течение с вихрями или в турбулентное течение. Для оценки режима течения жидкости обычно используют безразмерные величины – число Рейнольдса  $Re$  (зазор с внешним вращающимся цилиндром) и числом Тейлора  $Ta$  (зазор с внутренним вращающимся цилиндром). В принятых обозначениях эти числа можно выразить следующим образом:

$$Re = \Omega R_1 (R_1 - R) / \nu, \quad (2)$$

$$Ta = \frac{\Omega}{\nu} \sqrt{R_2 (R - \Delta - R_2)^3}, \quad (3)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $R_1, R_2$  – внешний и внутренний радиусы кольцевого зазора, заполненного жидкостью,  $R, \Delta$  – внешний радиус измерительного цилиндра и толщина его стенки,  $\Omega$  – угловая скорость. Критическое значение угловой скорости, при которой ламинарное течение становится неустойчивым, наблюдается при числе Рейнольдса  $Re = 1900$  и числе Тейлора  $Ta = 41,3$ . Заметим, что при указанном значении числа  $Ta$  начинают развиваться упорядоченные микровихри Тейлора, турбулентный

характер движения наступает при  $Ta = 400$ . Отношение критической скорости  $\Omega_R$  для внешнего зазора к критической скорости  $\Omega_T$  для внутреннего цилиндра равно:

$$\Omega_R/\Omega_T = 46\sqrt{R-\Delta-R_2/R_1}. \quad (4)$$

Отсюда видно, что для внешнего зазора критическая скорость примерно в шесть раз выше, чем для внутреннего зазора из-за различного характера проявления сил инерции, действующих на вращающуюся в зазорах жидкость. Значит, магнитный вискозиметр можно применять для исследований при скоростях вращения, не превышающих  $\Omega_T$ , причем, чем ниже вязкость жидкости, тем меньше  $\Omega_T$ . Например, для маловязкой смазочной наножидкости на основе диэфиров карбоновых кислот [14] предельное значение частоты вращения коаксиальных цилиндров не может превышать примерно  $10^2 \text{ с}^{-1}$ .

В результате диссипативных процессов, протекающих в кольцевых зазорах вискозиметра, выделяется тепло, которое изменяет температурный режим исследуемой жидкости и приводит к уменьшению ее вязкости. Предположим, что процесс нагревания происходит в адиабатических условиях. Тогда время  $t$  за которое жидкость нагревается на  $\Delta T$  можно оценить по следующей формуле:

$$t = \frac{2C\rho}{\eta\dot{\gamma}^2} \frac{R_1^2}{R^2} \Delta T, \quad (5)$$

где  $C$  – теплоемкость жидкости,  $\rho$  – плотность жидкости. Время, за которое магнитная наножидкость с вязкостью  $\eta = (0,1 \div 1) \text{ Па}\cdot\text{с}$  и скорости сдвига  $10^2 \text{ с}^{-1}$  нагревается на  $1^\circ\text{C}$  составляет несколько минут, при повышении скорости сдвига до  $10^3 \text{ с}^{-1}$  время нагрева сокращается до нескольких секунд. Для того, чтобы уменьшить влияние на результаты опытов тепловыделения от трения измерения реологических свойств проводили в дискретном режиме. Измерения прекращались после повышения температуры корпуса прибора на  $\approx 1,5^\circ\text{C}$  и повторялось после нормализации температуры жидкости.

Для многих вискозиметров ротационного типа необходимо учитывать погрешность, обусловленную концевым (донным) эффектом. Этот эффект объясняется трением, возникающим между торцевой поверхностью колоколообразного цилиндра и дном кольцевого зазора. В рассматриваемой конструкции вискозиметра толщина стенок измерительного цилиндра незначительна и поэтому влиянием на результаты измерений концевого эффекта можно пренебречь.

*2.2. Инструментальные погрешности магнитного ротационного вискозиметра.* Инструментальная погрешность обусловлена

несовершенством применяемых средств измерений и является составной частью систематической погрешности. Относительную инструментальную погрешность рассматриваемого прибора можно приблизительно определить по следующей формуле:

$$\delta\eta/\eta = \delta F/F + 5\delta R/R + \delta h/h + \delta\Omega/\Omega + E\delta T/(R_g T^2), \quad (6)$$

где  $\delta F$ ,  $\delta R$ ,  $\delta h$ ,  $\delta\Omega$ ,  $\delta T$  – соответственно абсолютная ошибка определения силы трения, радиальных размеров цилиндров, высоты слоя жидкости в зазоре, угловой скорости, температуры;  $E$  – энергия активации течения,  $R_g$  – универсальная газовая постоянная. В формуле (6) принята экспоненциальная зависимость коэффициента вязкости жидкости от температуры, предложенная Я.И. Френкелем. Оценим значение верхней границы погрешности, полагая, что  $\delta F = 10^{-2}$  Н,  $\delta R = 10^{-4}$  м,  $\delta h = 5 \cdot 10^{-4}$  м,  $\delta\Omega = \Omega \cdot 5 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>,  $\delta T = 10^{-1}$  К,  $E \approx 10^4$  Дж/моль. При комнатной температуре проведения опытов и силе трения около 10 Н относительная погрешность  $\delta\eta/\eta \approx 3\%$ . Погрешность легко можно уменьшить до 1% если измерять геометрические размеры с точностью до  $10^{-5}$  м. Из формулы (10) следует, что для дальнейшего повышения точности измерений коэффициента вязкости следует стремиться к уменьшению ошибки измерения высоты слоя жидкости, примыкающего к цилиндру и не допускать неконтролируемого изменения температуры жидкости.

*2.3. Калибровка магнитного ротационного вискозиметра.* Калибровка прибора направлена на устранение большей части систематической погрешности прибора путём задания коэффициентов коррекции экспериментальных данных. Для калибровки прибора для реологических исследований жидкостей использовали две эталонные жидкости: эфир карбоновой кислоты – диоктилсебагинат ДОС и полиэтилсилоксан ПЭС–5, которые используют в качестве дисперсионной среды для многих магнитных смазочных наножидкостей [14]. Динамическая вязкость при 20 °С жидкости ДОС – 0,021 Па·с, жидкости ПЭС–5 – 0,29 Па·с. Вязкость жидкостей измерена на магнитном ротационном вискозиметре при скорости сдвига  $6 \cdot 10^2$  с<sup>-1</sup> и температуре 20 °С. Сравнение экспериментальных и эталонных значений вязкости показало, что экспериментальные значения двух жидкостей в среднем незначительно завышены на 0,9% и это значение учитывалось при коррекции экспериментальных данных. Результат сравнительных испытаний различных жидкостей свидетельствует о хорошей точности и достоверности опытных данных, полученных на вискозиметре.

### **3. Заключение**

Предложена 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.

Проанализированы основные источники методических погрешностей в приборе для усовершенствования конструкции и исключения критических режимов исследований.

Теоретическая оценка систематической погрешности прибора показала, что значение относительной погрешности измерений можно довести до значения менее 1%. Наибольший вклад в систематическую погрешность прибора вносит нестабильность температурного режима исследуемой наножидкости и неточность определения высоты слоя жидкости, контактирующего с тонким измерительным цилиндром.

Измерение вязкости эталонных жидкостей на магнитном вискозиметре показало, что экспериментальные значения незначительно примерно на 0,9% завышены. Калибровка прибора позволяет значительно уменьшить суммарную погрешность измерений на приборе.

Магнитный ротационный вискозиметр может найти применение при нестандартных научных исследованиях структуры и физико-химических свойств, магнитных наножидкостей, для оперативного контроля синтеза магнитных жидкостей и аттестации промышленных магнитных наножидкостей для технического применения.

### **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. **Орлов, Д.В.** Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
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. **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.
6. **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.

7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Болотов, А.Н. Вискозиметрия нанодispersных магнитных жидкостей и смазочных масел. 1. Приборное обеспечение реологических исследований магнитных нанодispersных жидких сред / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 44-55. DOI: 10.26456/pcascnm/2021.13.044.
11. Болотов, А.Н. Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения // А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, И.В. Горлов // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2014. – Т. 4. – № 2 (20). – С. 15-17.
12. Кистер, Э.Г. Химическая обработка буровых растворов / Э.Г. Кистер. – М.: Недра, 1972. – 392 с.
13. 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.
14. Болотов, А.Н. Разработка модифицированной технологии получения наноструктурного магнитного масла / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2016. – Вып. 8. – С. 69-75.

### 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. 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).
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. 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).
6. 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.
7. 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.
8. 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).
9. 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.
10. Bolotov A.N., Novikova O.O. Viskozimetriya nanodispersnykh magnitnykh zhidkostej i smazochnykh masel. 1. Pribornoe obespechenie reologicheskikh issledovanij magnitnykh nanodispersnykh zhidkikh sred [Viscometry of nanodisperse magnetic liquids and lubricating oils. 1. Instrumentation for rheological studies of magnetic nanodisperse liquid media], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2021, issue 13, pp. 44-55. DOI: 10.26456/pcascnm/2021.13.044. (In Russian).
11. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O., Gorlov I.V. Issledovanie strukturnoi stabil'nosti magnitnykh masel dlya uzlov treniya [Investigation of the structural stability of magnetic oils for friction units], *Izvestiya MGTU «MAAMI»*, 2014, vol. 4, no. 2 (20), pp. 15-17. (In Russian).

12. Kister E.G. *Khimicheskaya obrabotka burovykh rastvorov* [Chemical treatment of drilling fluids]. Moscow, Nedra Publ., 1972, 392 p. (In Russian).
13. Schramm G. *A practical approach to rheology and rheometry*. Karlsruhe, Gebrueder HAAKE GmbH, 1994, 290 p.
14. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Razrabotka modifitsirovannoi tekhnologii polucheniya nanostrukturnogo magnitnogo masla [Development of modified technology of producing nanostructural magnetic oil], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2016, issue 8, pp. 69-75. (In Russian).

*Original paper*

**VISCOMETRY OF NANODISPERSE MAGNETIC LIQUIDS AND LUBRICATING OILS.  
2. METROLOGICAL ANALYSIS OF A DEVICE FOR RHEOLOGICAL STUDIES OF  
MAGNETIC NANODISPERSE LIQUID MEDIA**

A.N. Bolotov, O.O. Novikova, V.V. Meshkov  
*Tver State Technical University, Tver, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.056

**Abstract:** An analysis is carried out of the main sources of methodological errors of the magnetic rotary viscometer. The analysis allowed to improve design and to eliminate critical modes of the research. Theoretical evaluations of the systematic error of the device showed that the value of the relative measurement error can be brought to a value of less than 1%. The greatest contribution to the systematic error of the device is made by the instability of the temperature regime of the nanofluid under study and by the inaccuracy of determining the height of the liquid layer in contact with the measuring cylinder. The measurement of the viscosity of the reference liquids on the magnetic viscometer showed that experimental values are slightly, by about 0.9% overestimated. Calibration of the device on various reference liquids allowed reducing the total measurement error down to tenths of a percent. The magnetic rotary viscometer can be used in non-standard scientific studies of the structure and rheological characteristics of nanofluids, for operational control of the processes of synthesis of magnetic liquids and certification of magnetic nanofluids intended for technical use.

**Keywords:** *magnetic nanofluid, rheology, viscometer, shear stress, shear rate.*

*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»*

*Мешков Владимир Валентинович – д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии и автоматизации машиностроения 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*

*Vladimir V. Meshkov – Dr. Sc., Full Professor, Technology and Mechanical Engineering Department, Tver State Technical University*

Поступила в редакцию/received: 15.02.2021; после рецензирования/revised: 4.03.2021; принята/accepted 15.03.2021.