

## О ЗАВИСИМОСТИ КОЛЛОИДНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТАБИЛИЗАТОРА И ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ

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

Александр Николаевич Болотов, Владислав Викторович Новиков, Ольга Олеговна Новикова \*

Кафедра прикладной физики, Тверской государственный технический университет, наб. Афанасия Никитина, д. 22, Тверь, Российская Федерация, 170026.

E-mail: alnikbltov@rambler.ru, vnvkv@ya.ru, onvk@mail.ru \*

*Цель данной работы заключалась в исследовании возможности использования значений диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды для формирования критерия коллоидной устойчивости магнитной жидкости. Изучалась коллоидная устойчивость магнитных жидкостей, содержащих слабополярную основу, неионогенный ПАВ-стабилизатор (олигоэфир) и наноразмерные частицы магнетита. Для оценки стабилизирующей способности ПАВ полученные магнитные коллоиды испытывали на устойчивость в гравитационном поле. Был предложен диэлектрический критериальный параметр, показывающий относительное различие диэлектрических проницаемостей дисперсионной среды и ПАВ-стабилизатора. Установлено, что с диэлектрическим критерием наилучшим образом коррелируют значения величины адсорбции ПАВ и устойчивости коллоида. Из результатов испытаний вытекает, что относительное уменьшение намагниченности из-за необратимых седиментационных процессов определяется величиной диэлектрической проницаемости дисперсионной среды и стабилизатора. В ряде экспериментов состав жидкости-носителя магнитных коллоидов не изменялся, а варьировался ПАВ-стабилизатор. Изучалась зависимость коллоидной устойчивости магнитной жидкости на основе диоктилсебацата стабилизированной ПАВ с различной диэлектрической проницаемостью. Результаты опытов так же свидетельствуют о справедливости закономерности повышения коллоидной устойчивости по мере снижения величины параметра. В работе подробно рассмотрено, через какие физико-химические механизмы может проявиться влияние диэлектрической проницаемости на коллоидную устойчивость магнитных жидкостей. Анализ результатов исследований показал, что диэлектрическая проницаемость компонентов магнитной жидкости влияет на многие физико-химические явления, протекающие при ее синтезе. Наиболее значимо от диэлектрической проницаемости зависит характер сорбционных процессов на поверхности дисперсных частиц. В результате исследования эмпирических данных по коллоидной стабильности магнитных жидкостей показано, что при возрастании диэлектрической проницаемости дисперсионной среды по отношению к диэлектрической проницаемости стабилизатора процессы десорбции молекул стабилизатора с поверхности магнитных частиц усиливаются. В результате адсорбционный слой вокруг частиц становится более рыхлый и менее прочный и, как следствие, понижается значение стерического фактора стабилизации коллоидной структуры магнитной жидкости. На практике это и приводит к ухудшению или даже потере магнитной жидкостью коллоидной устойчивости. Влияние диэлектрической проницаемости на коллоидную устойчивость через эффекты межчастичного взаимодействия менее значимо. Показано, что диэлектрическим критерием можно пользоваться при обосновании выбора ПАВ-стабилизатора для магнитных жидкостей. В соответствии с этим критерием диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды должна незначительно отличаться от аналогичной характеристики ПАВ-стабилизатора. В противном случае процессы десорбции молекул ПАВ с магнитных частиц способствуют снижению качества защитных адсорбционных слоев, и коллоидная устойчивость ухудшается.*

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, коллоидная устойчивость, диэлектрическая проницаемость

## ON DEPENDENCE OF COLLOIDAL STABILITY OF MAGNETIC LIQUID ON STABILIZER DIELECTRIC CAPACITIVITY AND DISPERSION MEDIUM

A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova

Alexander N. Bolotov, Vladislav V. Novikov, Olga O. Novikova \*

Department of the Applied Physics, Tver State Technical University, A. Nikitin Nab., 22, Tver, 170026, Russia  
E-mail: alnikbltov@rambler.ru, vnvkv@ya.ru, onvk@mail.ru \*

*The purpose of this article is to research the possibility of using values of stabilizer dielectric capacitivity and dispersion medium to form a colloidal stability criterion of magnetic liquid. The authors researched colloidal stability of magnetic liquids with a low-polarity base, nonionogenic SAM-stabilizer (oligoester) and hydroximag nanoparticles. The received magnetic colloids were tested for stability in a gravity field to evaluate SAM stabilizing capacity. The authors propose E-criterion that shows a relative difference between dielectric capacitivities of a dispersion medium and SAM-stabilizer. It was determined that such combination of dielectric capacitivity of solution component parts correlates with the values of SAM adsorption and colloid stability in the best way. The test results show that relative reduction of magnetization correlates well with a value of dispersion medium dielectric capacitivity due to irreversible sedimentative processes. In the next set of experiments, the authors did not change the magnetic colloid liquid content, but SAM-stabilizer. They research the dependence of colloidal stability of magnetic liquids based on a dioctyl sebacate of a stabilized SAM with various dielectric capacitivities. The test results prove regularity of increasing colloidal stability with decreasing E- criterion. The paper considers in details the physical and chemical mechanisms that help to develop the influence of dielectric capacitivity on magnetic liquid colloidal stability. The analysis of testing results showed that dielectric capacitivity of magnetic liquid components affects many physical-chemical phenomena in the process of its synthesis. It is important that the behaviour of sorption processes on the surface of dispersed particles depends on dielectric capacitivity. The result of the empirical data research by magnetic liquid colloidal stability shows that with increasing dielectric capacitivity of dispersion medium in relation to stabilizer's dielectric capacitivity the desorption processes of stabilizer's molecules from a magnetic particles' surface increases. As a result, the adsorption layer around particles becomes more incoherent and less competent. It reduces the value of a steric stabilization factor of a magnetic liquid colloidal structure. In practice it leads to deterioration or even loss of colloidal stability of magnetic liquid. The influence of dielectric capacitivity on colloidal stability using the effects of interparticle interaction is less important. To summarize, the article proves a dielectric E-criterion that can be used to provide rationale for the choice of SAM-stabilizer for magnetic liquids. According to this criterion, dielectric capacitivity of a dispersion medium should be slightly different from the similar property of SAM-stabilizer. Otherwise, molecule desorption processes of SAM from magnetic particles encourage quality degradation of covering adsorption layers, so colloidal stability worsens.*

**Key words:** magnetic liquid, colloidal stability, dielectric capacitivity

**Для цитирования:**

Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. О зависимости коллоидной устойчивости магнитных жидкостей от диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды. *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 4. С. 75–81.

**For citation:**

Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. On dependence of colloidal stability of magnetic liquid on stabilizer dielectric capacitivity and dispersion medium. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 4. P. 75–81.

## ВВЕДЕНИЕ

Магнитные жидкости известны уже более 35 лет, и за это время с их помощью решены многие важные задачи в области машиностроения [1-3], приборостроения, биофизики, медицины и экологии. Однако появляются новые проблемы в научных и практических сферах деятельности человека, эффективно преодолеть которые можно только с помощью модернизации известных или создания принципиально новых магнитных жидкостей. Как правило, магнитная жидкость является трехкомпонентной коллоидной системой, две составляющие которой – дисперсную фазу и жидкость-носитель достаточно просто подобрать из теоретических соображений и с учетом контрольных опытов. Третью компоненту магнитных жидкостей – ПАВ-стабилизатор выбрать из большого количества вариантов зачастую бывает очень затруднительно из-за недостатка научно обоснованных критериев. Цель данной работы состояла в том, чтобы установить возможность использования значений диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды для формирования критерия коллоидной устойчивости магнитной жидкости.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучалась коллоидная устойчивость магнитных жидкостей на основе жидкостей-носителей, отличающихся химическими, электрическими, реологическими и другими свойствами. Рассматривались магнитные жидкости, содержащие только слабополярную основу, неионогенный ПАВ-стабилизатор и наноразмерные частицы магнетита. Некоторые физико-химические сведения об изучаемых жидкостях для дисперсионной среды приведены в табл. 1. Магнитные жидкости получали по общепринятой технологии, описанной, например, в [4]. В качестве ПАВ-стабилизатора для всех коллоидов использовался только олигоэфир ОЭ-3 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_p = 4,95$ . Исходная намагниченность коллоидов была около 30 кА/м, содержание магнетита составляло 6,5–7,0 об.%.

Для экспресс-оценки стабилизирующей способности ПАВ полученные магнитные коллоиды испытывали на устойчивость в поле центробежных сил при комнатной температуре 20–22 °С. Фиксированный объем магнитной жидкости – 40 мл загружали в лабораторную центрифугу Т-23 и выдерживали в течение 2 ч при центробежном ускорении около 5600 g. По окончании контролировали отделение дисперсионной среды и фиксировали

падение намагниченности из-за перехода магнетита в осадок. Для определения магнитных свойств коллоидной системы применялся магнетометр [5], реологические свойства жидкостей изучались на ротационном вискозиметре [6], для измерения диэлектрической проницаемости использовался промышленный измеритель электрической емкости Е8-4. Значения дипольного момента молекул (табл.1) были взяты из справочника [7]. Учитывая, что намагниченность коллоида линейно зависит от концентрации дисперсных частиц, количественную оценку устойчивости полученных коллоидов проводили по относительному изменению намагниченности в поле центробежных сил.

Таблица 1

**Физико-химические свойства дисперсионных сред и изменение намагниченности магнитных жидкостей после центрифугирования**

**Table 1. Physical and chemical properties of dispersive mediums and change in magnetization of magnetic liquids after centrifugation**

Жидкость-носитель	$\eta, 10^{-3}$ Па·с	$\epsilon_r$	$\mu, D$	$J_{от}, \%$	E
Толуол	0,55	2,37	0,31	100	0,51
2-Пиколин	8,1	4,28	1,17	30	0,13
Диоктилсебацат	19-23	4,4	4,28	10	0,11
Дибутилсебацат	7-11	4,46	3,96	21	0,10
Диоктилфталат	80-85	5,1	3,06	19	0,03
Бутилацетат	0,67	5,1	1,84	35	0,03
Дибутилфталат	19-20	6,1	2,87	55	0,23
Трикрезилфосфат	70-90	6,7	2,84	100	0,35

Примечания:  $\eta$  - вязкость жидкости,  $\epsilon_r$  - диэлектрическая проницаемость,  $\mu$  - дипольный момент,  $J_{от}$  – отношение намагниченности магнитной жидкости после центрифугирования к исходной намагниченности, E - критериальный параметр

Notes:  $\eta$  is liquid viscosity,  $\epsilon_r$  is dielectric capacitvity,  $\mu$  is a dipole moment,  $J_{от}$  is the relation of magnetization of magnetic liquid after centrifugation to initial magnetization, E is a criteria

Среди большого количества возможных комплексных параметров, учитывающих одновременно поляризуемость отдельных компонентов жидких бинарных растворов, выбран критериальный параметр, показывающий относительное различие их диэлектрических проницаемостей  $E = |\epsilon_p - \epsilon_r|/\epsilon_p$ . Как оказалось, именно с такой комбинацией из диэлектрических проницаемостей компонентов раствора наилучшим образом коррелируют значения величины адсорбции ПАВ и устойчивости коллоида.

Из результатов испытаний, представленных в табл. 1, вытекает, что относительное уменьшение намагниченности  $J_{от}$  из-за необратимых седиментационных процессов хорошо коррелирует с величиной диэлектрической проницаемости дисперсионной среды. Максимальная седиментационная устойчивость достигается для несущих сред с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 4,4-5,1$ . Снижение намагниченности в результате седиментации частиц зависит и от вязкости дисперсионной среды. В нашем случае, оценочные расчеты показывают, что сила Стокса, препятствующая перераспределению частиц, много меньше центробежной силы, и поэтому различную вязкость жидкостей в первом приближении можно не принимать во внимание.

Коэффициент корреляции Пирсона между величиной, характеризующей устойчивость коллоидов  $J_{от}$  и параметром  $E$ , составляет 0,93. Значит можно утверждать о существовании тенденции к повышению коллоидной стабильности магнитных масел по мере уменьшения параметра  $E$ .

В следующей серии экспериментов специально состав жидкости-носителя магнитных коллоидов не изменялся, а варьировался ПАВ-стабилизатор. Изучалась зависимость коллоидной устойчивости магнитной жидкости на основе диоктилсебацата стабилизированной ПАВ с различной диэлектрической проницаемостью. Результаты опытов, приведенные в табл. 2, так же свидетельствуют о справедливости закономерности повышения коллоидной устойчивости по мере снижения величины параметра  $E$  (коэффициент корреляции Пирсона для этого случая 0,95).

Таблица 2

**Устойчивость магнитных коллоидов на основе диоктилсебацата, стабилизированного различными ПАВ**  
**Table 2. Magnetic colloids' stability based on dioctyl sebacate stabilized by various SAM**

ПАВ-стабилизатор	$\epsilon_r$	$J_{от}, \%$	$V_{от}, \text{мл}$	$E$
Олеиновая кислота	2,43	100	> 30	0,81
МСДА-амид*	3,4	57	10	0,32
ОЭ-3	4,95	4,8	0	0,11
Жирная кислота	4,91	5,6	0	0,10
«Альфонокс»**	6,3	69	11	0,3

Примечания:  $V_{от}$  - объем отделившейся дисперсионной среды, \*МСДА – алкидная производная oleиновой кислоты. \*\*Альфонокс – олигоэфир на основе этилена с фосфорсодержащей полярной группой

Notes:  $V_{от}$  is the volume of a separated dispersion medium, \*MCDA is the alkyl derivative of oleic acid. \*\*Alphonox is oligoester based on ethylene with a phosphoric polar group

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим на качественном уровне, через какие элементарные физико-химические механизмы может проявиться влияние диэлектрической проницаемости на коллоидную устойчивость магнитных жидкостей.

Агрегация магнитных частиц (без лиофилизующего поверхностного слоя) начинается под действием сил притяжения Ван-дер-Ваальса и магнитных сил и заканчивается, когда борновская сила отталкивания скомпенсирует их. Расстояние между частицами соответствует положению минимума потенциальной энергии и по порядку величины равно атомарному размеру. Сила Стокса лишь замедляет процесс коагуляции, а тепловое броуновское движение может даже его ускорить.

Из всех составляющих силу Ван-дер-Ваальса слагаемых, при агрегации определяющую роль играют дисперсионные силы, которые приближенно описываются уравнением Гамакера [8]. Величина силы, в частности, зависит от квадрата поляризуемости молекул дисперсионной среды. В свою очередь поляризуемость молекул выражается из уравнения Клаузиуса-Моссотти через диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r$  среды. При этом, из сложной константы Гамакера вытекает, что жидкая прослойка между частицами может значительно изменить силу их взаимодействия.

Для стабилизации магнитного коллоида используют так называемый структурно-механический барьер, проявление которого возможно только после образования на поверхности магнитных частиц адсорбционного (защитного) слоя из молекул ПАВ, лиофилизующего поверхность. Механическая упругость такого межфазного слоя не позволяет частицам при сближении образовывать устойчивые конгломераты, которые не смогут самопроизвольно разрушаться за счет броуновского движения. Такой эффект, называемый стерическим фактором стабилизации, может быть эффективно реализован, только когда молекулы адсорбционного слоя прочно связаны с поверхностью частиц и между собой, в противном случае защитный слой может разрушаться при столкновении частиц, и они смогут слипаться.

При физической адсорбции взаимодействие молекул с поверхностью определяется электростатической составляющей силы Ван-дер-Ваальса, и диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды и адсорбата в этом процессе большой роли не играет. Однако, взаимодействие молекул между собой происходит за счет индуцированных и дисперсионных сил, каждая из которых зависит

от поляризуемости молекул, а значит и от диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  ПАВ-стабилизатора.

Защитный слой на частицах может разрушаться не только за счет механических воздействий, но и при термоактивированной десорбции молекул с поверхности в жидкость-носитель. С молекулярной точки зрения, вероятность перехода адсорбированных молекул в раствор тем выше, чем выше их абсолютное значение энергии в сольватной оболочке, состоящей из частиц дисперсионной среды. Другими словами, чем лучше растворяются молекулы адсорбата в жидкости-носителе, тем активнее они десорбируются. Взаимодействие молекул в растворе ПАВ определяется, в частности, ориентационными силами для молекул, имеющих ненулевой дипольный момент и одновременно индукционными и дисперсионными силами. Все эти силы зависят от диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  дисперсионной среды и ПАВ-стабилизатора  $\epsilon_r$ .

При высокой поляризуемости молекул жидкости носителя и наличии у них дипольного момента возможна конкуренция между ними и молекулами ПАВ-стабилизатора при адсорбции на активных центрах на поверхности дисперсных частиц. Адсорбированные молекулы жидкости-носителя несомненно менее надежно препятствуют сближению дисперсных частиц.

Приведем эмпирические сведения, подтверждающие влияние диэлектрической проницаемости жидкости-носителя и ПАВ-стабилизатора на отдельные описанные эффекты, отвечающие за устойчивость магнитных коллоидов.

В работе [9] изучалась адсорбционная способность олеиновой кислоты, которая широко используется для стабилизации магнетита, на полярных адсорбентах из растворов различных жидкостей, имеющих широкий разброс диэлектрической проницаемости. Численно адсорбционная способность определялась как объемная доля адсорбированного вещества ко всему взятому. Адсорбция проводилась из 3 см<sup>3</sup> раствора содержащего 0,1 об.% олеиновой кислоты на порошке полярного адсорбента общим объемом 1 см<sup>3</sup>.

Значения адсорбционной способности олеиновой кислоты из различных растворов на двух полярных адсорбентах приведены в табл. 3. Из таблицы на качественном уровне видно, что по мере сближения диэлектрических проницаемостей ПАВ и растворителя адсорбция возрастает. Наиболее активно адсорбция протекает при значении параметра  $E \approx 0 - 0,3$ . Коэффициент корреляции Пирсона между величиной адсорбции и параметром  $E$

равен 0,88 для алюмосиликатного и 0,71 для силикагелиевого адсорбента. Понятно, что здесь имеется в виду лишь только тенденция изменения степени адсорбции при изменении параметра  $E$ ; строгая математическая зависимость должна учитывать и другие характеристики веществ, но значимость их возможно меньше, чем параметра  $E$ .

Таблица 3

Доля адсорбированной олеиновой кислоты (в об.%) из различных растворителей [9], значение параметра  $E$   
Table 3. Fraction of adsorbed oleic acid (in vol.%) from different solvents [9], value of parameter  $E$

Растворитель	$\epsilon_r$	$E$	Адсорбент	
			Алюмо-силикат	Силикагель
Метиловый спирт	31,0	11,4	0	0
Этиловый спирт	26,0	9,4	32	0
Пропиловый спирт	22,0	7,8	44	0
Ацетон	21,0	7,4	47	0
Этилацетат	6,1	1,44	81	0
Этиловый эфир	4,3	0,72	81	0
Хлороформ	5,2	1,08	89	70
Бензол	2,29	0,08	98	88
Толуол	2,37	0,06	99	90
Тетрахлорметан	2,24	0,1	99	98
Циклогексан	2,0	0,2	100	100
Петролейный эфир	1,8	0,28	100	100

Интересно отметить, что приведенная в табл. 3 последовательность расположения растворителей напоминает порядок расположения жидкостей элюотропного ряда. Элюент – это жидкость (растворитель), предназначенная для вымывания адсорбата с поверхности адсорбента. Элюирование широко используется в процессе жидкостной хроматографии и достаточно хорошо изучено.

Адсорбат одновременно взаимодействует с адсорбентом и элюентом. Если взаимодействие адсорбата с элюентом доминирует, то происходит постепенный переход его в состояние адсорбтива. По существу, с помощью элюентов регулируют десорбционную активность молекул адсорбата без изменения температуры, как в случае десорбции в газовую фазу. В табл. 4. указаны жидкости в порядке убывания элюирующей «силы» (данные взяты из работы [10]). Порядок расположения жидкостей в табл.3 такой же, но соответствует повышенной адсорбционной активности жирной кислоты из соответствующего раствора. Отсюда становится понятно, что от диэлектрической проницаемости зависит скорость десорбции молекул адсорбата.

Из данных, приведенных в табл. 3, 4, следует предположить, что от диэлектрической проницаемости среды растворителя сильно зависит скорость (интенсивность) десорбции молекул с поверхности адсорбента и менее существенно зависит скорость адсорбции. Поэтому, при повышении диэлектрической проницаемости растворителя равновесное состояние между адсорбцией и десорбцией наступает при меньшем количестве адсорбата, а при снижении наоборот, смещается в сторону большего количества адсорбата.

Таблица 4

Элюотропный ряд растворителей для окиси алюминия и подобных полярных сорбентов (20 °С) [10]  
**Table 4. Eluotropic series of solvents for aluminium oxide and similar polar sorbents (20 °С) [10]**

Растворитель	$\epsilon_r$	Растворитель	$\epsilon_r$
Метанол	32	Хлороформ	5,1
Этанол	25	Бензол	2,3
Пропанол	20	Толуол	2,4
Ацетон	21	Четыреххлористый углерод	2,2
Пиридин	12,5	Циклогексан	2,0
Этилацетат	6,2	Гептан	1,9
Диэтиловый эфир	4,3	Гексан	1,9

#### ВЫВОДЫ

Рассматривая эмпирические данные по коллоидной стабильности магнитных жидкостей с

учетом описанных закономерностей, можно предложить следующую их трактовку. При возрастании диэлектрической проницаемости дисперсионной среды по отношению к диэлектрической проницаемости стабилизатора, процессы десорбции молекул стабилизатора с поверхности магнитных частиц усиливаются. В результате адсорбционный слой вокруг частиц становится более рыхлым и менее прочным и, как следствие, понижается значение стерического фактора стабилизации коллоидной структуры магнитной жидкости. На практике это и приводит к ухудшению или даже потере магнитной жидкостью коллоидной устойчивости. Влияние диэлектрической проницаемости на коллоидную устойчивость через эффекты межчастичного взаимодействия, вероятно, менее значимо.

Таким образом, в результате выполненных исследований предложен и обоснован диэлектрический критерий  $E$ , которым можно пользоваться при обосновании выбора ПАВ-стабилизатора для магнитных жидкостей. В соответствии с этим критерием диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды должна незначительно отличаться от аналогичной характеристики ПАВ-стабилизатора. В противном случае процессы десорбции молекул ПАВ с магнитных частиц способствуют снижению качества защитных адсорбционных слоев, и коллоидная устойчивость ухудшается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Магнитное масло для узлов трения, работающих при граничной смазке. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2011. № 9. С. 38 - 41.
2. Болотов А.Н., Хренов В.Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения. Тверь: ТГТУ. 2008. 124 с.
3. Болотов А.Н., Новиков В.В., Павлов В.Г. Магнитожидкостные подшипники скольжения. *Трение и износ*. 2004. Т. 25. № 3. С. 286 - 291.
4. Фертман В.Е. Магнитные жидкости. Справочное пособие. Минск: Вышэйшая школа. 1988. 284 с.
5. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 2. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. Межвуз. Сб. науч. тр. Вып. 7. Тверь: ТвГТУ. 2014. С. 85-89.

#### REFERENCES

1. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Ferrofluid oil for boundary lubrication friction units. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh*. 2011. N 9. P. 38-41 (in Russian).
2. Bolotov A.N., Khrenov V.L. Triboengineering in magnetopassive sliding supports. Tver: TSTU. 2008. 124 p. (in Russian).
3. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magnetic fluid slide bearings. *Trenie i iznos*. 2004. V. 25. N 3. P. 286-291 (in Russian).
4. Fertman V.E. Magnetic fluids. Resource Book. Minsk: Vysheyshaya shkola. 1988. 284 p. (in Russian).
5. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. An equipment package for the research of physical and chemical properties of nanodisperse magnetic environments. Part 2. Mechanics and physics of processes on the surface and in contact of solids, details of technological and energy equipments. Collection of scientific works. Tver: TSTU. 2014. P. 85-89 (in Russian).

6. **Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.** Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 1. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. Межвуз. Сб. науч. тр. Вып. 6. Тверь: ТвГТУ. 2013. С. 68-74.
7. **Осипов О.А., Минкин В.И., Гарновский А.Д.** Справочник по дипольным моментам. М.: Высшая школа. 1971. 416 с.
8. **Зонтаг Г., Штрэнге К.** Коагуляция и устойчивость дисперсных систем. Л.: Химия. 1973. 152 с.
9. **Берлин А.Я.** Техника лабораторной работы в органической химии. М.-Л.: ГХИ. 1952. 287 с.
10. **Лазарев М.И., Харламов И.П.** Справочник химика-аналитика. М.: Metallurgiya. 1976. 183 с.
6. **Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O.** An equipment package for the research of physical and chemical properties of nanodisperse magnetic environments. Part 1. Mechanics and physics of processes on the surface and in contact of solids, details of technological and energy equipments. Collection of scientific works. N 6. Tver: TSTU. 2013. P. 68–74 (in Russian).
7. **Osipov O.A., Minkin V.I., Garnovsky A.D.** A reference book on the dipolar moments. M.: Vysh. Shkola. 1971. 416 p. (in Russian).
8. **Zontag G., Streng K.** Coagulation and stability of dispersed systems. L.: Khimiya. 1973. 152 p. (in Russian).
9. **Berlin A.Ya.** A laboratory work procedure in organic chemistry. M.-L.: GKHI. 1952. 287 p. (in Russian).
10. **Lazarev M.I., Kharlamov I.P.** A reference book for an analytical chemist. M.: Metallurgiya. 1976. 183 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 14.11.2016  
Принята к опубликованию 09.02.2017*

*Received 14.11.2016  
Accepted 09.02.2017*