

УДК 544.77.03

DOI: 10.7868/S3034543X25050044

Оригинальная статья / Original Article

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЖИДКОСТИ НА БАЗЕ СПИРТОВЫХ И СОЛЕВЫХ РАСТВОРОВ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ДВОЙНЫМ СЛОЕМ С НЕИОНОГЕННЫМ ПАВ ТВИН 20

А. В. Лебедев^{1,*}, С. Н. Лысенко²

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН,
ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614018 Россия

² Институт технической химии УрО РАН,
ул. Академика Королева, 3, Пермь, 614018 Россия

*e-mail: lav@icmmt.ru

Аннотация. Синтезированы образцы магнитной жидкости, стабилизированных двойным слоем ПАВ в воде с использованием неионогенного стабилизатора ТВИН 20 (Полисорбат 20) в качестве второго слоя. Исследованы реологические свойства синтезированных образцов в зависимости от их концентрации. В отличие от жидкостей с диссоциируемым ПАВом, с ростом температуры вязкость магнитной жидкости убывает быстрее, чем вязкость базовой среды (воды). Главным преимуществом использования неионогенного ПАВа является возможность синтеза низкотемпературных магнитных жидкостей на основе водно-спиртовых смесей и водных растворов солей. Жидкости, стабилизированные ТВИН 20 в растворах этиленгликоля и пропиленгликоля, сохраняют подвижность вплоть до температур -40°C и -50°C . При использовании в качестве базовой среды раствора хлорида кальция CaCl_2 , пробный образец жидкости сохранял работоспособность до температуры -30°C . Магнитные жидкости на основе спиртовых и солевых растворов могут оказаться незаменимыми в областях техники, где предъявляются жесткие требования к их пожарной и экологической безопасности. Химическая пассивность частиц, стабилизованных ТВИН 20, делает возможным их применение в биологии и медицине.

Ключевые слова: магнитная жидкость, двойной слой ПАВ, ТВИН 20, низкие температуры

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Соблюдение этических стандартов. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.04.2025

После доработки 08.05.2025

Принята к публикации 08.05.2025

LOW-TEMPERATURE MAGNETIC FLUIDS BASED ON ALCOHOL AND SALT SOLUTIONS, STABILIZED BY A DOUBLE LAYER WITH A NON-IONOGENIC SURFACTANT TWEEN 20

A. V. Lebedev¹, *, S. N. Lysenko²

¹*Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, 614018 Russia*

²*Institute of Technical Chemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, 614018 Russia*

*e-mail: lav@icmm.ru

Abstract. The samples of magnetic liquid stabilized by a double layer of surfactant in water using non-ionogenic stabilizer TWEEN 20 (Polysorbate 20) as the second layer were synthesized. The rheological properties of the synthesized samples depending on their concentration were investigated. In contrast to liquids with dissociated surfactant, the viscosity of the magnetic liquid decreases faster with temperature increase than the viscosity of the base medium (water). The main advantage of using non-ionogenic surfactant is the possibility of synthesizing low-temperature magnetic liquids based on water-alcohol mixtures and aqueous salt solutions. Fluids stabilized by TWEEN 20 in ethylene glycol and propylene glycol solutions retain mobility up to temperatures –40°C and –50°C. When calcium chloride CaCl_2 solution was used as a base medium, the test sample of the fluid retained performance up to temperature –30°C. Magnetic liquids based on alcohol and salt solutions can be indispensable in the fields of engineering, where strict requirements are made to their fire and environmental safety. Chemical passivity of particles stabilized by TWEEN 20 makes their application in biology and medicine possible.

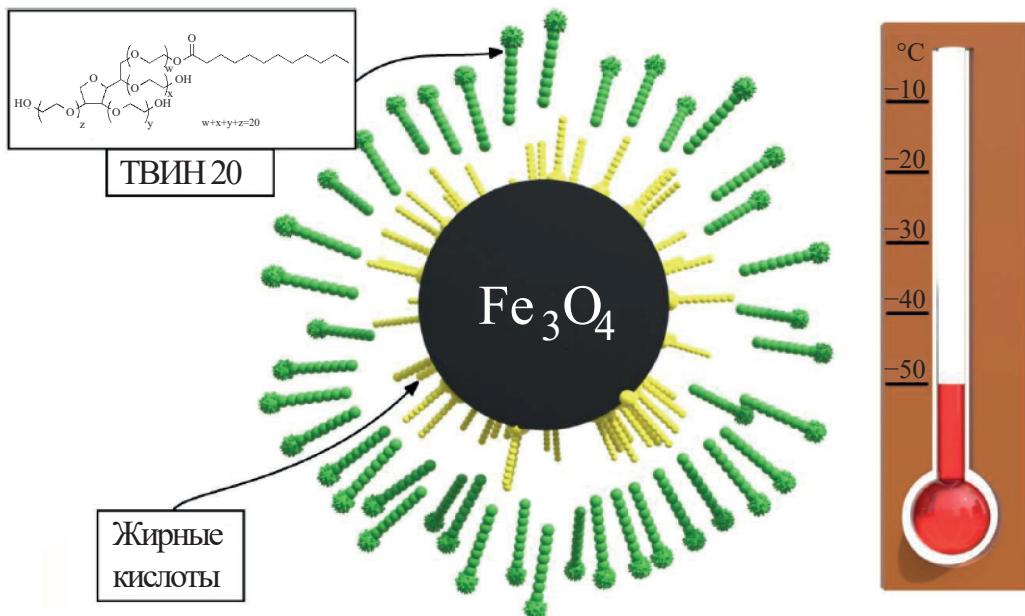
Keywords: magnetic fluid, double layer of surfactants, TWEEN 20, low temperatures

Funding. The work was carried out as part of a large scientific project with financial support from the Ministry of Education and Science of Russia (agreement No. 075 15-2024-535 dated April 23, 2024).

Ethics declarations. This work does not contain any studies involving human and animal subjects.

Conflict of interests. The authors of this work declare that they have no conflicts of interest.

Received April 10, 2025
Revised May 08, 2025
Accepted May 08, 2025



ВВЕДЕНИЕ

Проблема придания магнитных свойств обычной жидкости была решена в 60-х годах прошлого столетия. Задача возникла вследствие технической необходимости удержания объема жидкости в невесомости. Решение было найдено путем диспергирования частиц магнетика. Хотя идея в дальнейшем и не нашла своего развития в той области, где ее предполагалось использовать, тем не менее в результате был создан новый интересный объект для исследований на стыке механики жидкости и магнетизма. Раздел науки, посвященный новому объекту, получил название феррогидродинамика [1], а за самим объектом закрепилось устойчивое наименование магнитные жидкости [2]. Постепенно технологии синтеза магнитных жидкостей совершенствовались. Соответственно улучшались их параметры, и расширялся диапазон базовых сред. На сегодняшний день классической магнитной жидкостью называют дисперсию частиц магнетита в керосине. Для предупреждения коагуляции (слипания) частиц, их покрывают слоем поверхностно-активного вещества. Чаще всего для этой цели используется олеиновая кислота. Стабилизация частиц с помощью жирных кислот позволяет получать магнитные жидкости на основе углеводородов.

Применение других стабилизаторов дает возможность существенно расширить класс базовых сред. В частности, частицы, покрытые полипропиленгликолем, прекрасно диспергируются не только в углеводородах, но и в спиртах, альдегидах, кетонах и т. д. [3]. Единственным исключением среди всех базовых сред является самая распространенная в природе жидкость – вода. В принципе, можно представить себе частицы

магнетика, покрытые каким-нибудь водорастворимым полимером. Например, поливиниловым спиртом или полиэтиленгликолем. Однако на практике получить такое покрытие частиц не представляется возможным. Молекулы водорастворимого полимера предпочитают быть растворенными в воде, а не прикрепляться к поверхности частиц.

Проблема синтеза магнитной жидкости на базе воды была решена заметно позже создания классических магнитных жидкостей [4, 5]. Решение было найдено в покрытии частиц двойным слоем ПАВ. Первый слой обычно образуют молекулы жирных кислот, прикрепленные к поверхности частиц карбоксильными группами. Молекулы во втором слое ПАВ ориентированы своими гидрофобными хвостами внутрь слоя – к жирным кислотам, а гидрофильными группами наружу – к воде. Первоначально для создания второго слоя ПАВ использовались соли жирных кислот или попросту говоря мыла. В недавней работе [6] описан синтез жидкостей, стабилизованных додецилсульфатом натрия. Основной особенностью указанных стабилизаторов является их диссоциация в воде на ионы.

В предлагаемой работе описываются свойства магнитных жидкостей, стабилизованных двойным слоем ПАВ в воде с использованием неионогенного стабилизатора ТВИН 20. В отличие от додецилсульфата натрия, ТВИН 20 не диссоциирует в воде на ионы. Его гидрофильная голова сформирована из четырех олигомеров полиэтиленгликоля, сгруппированных вокруг пятизвенного цикла. Гидрофобный хвост образован присоединенной к одному из олигомеров молекулой лауриновой кислоты. Таким образом, стабилизируя частицы

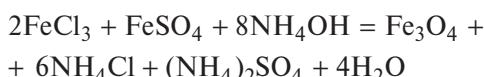
двойным слоем ПАВ с использованием ТВИН 20, мы получаем магнитную жидкость с частицами, покрытыми водорастворимым полимером полиэтилен-гликолем. Идея стабилизировать магнитные частицы в воде водорастворимым полимером реализуется, пусть и немного в усеченном виде.

На Рис. 1 представлено схематическое изображение молекулы стабилизатора ТВИН 20. Строгое название стабилизатора – «Полиоксиэтилен (20) сорбитан монолаурат».

СИНТЕЗ ОБРАЗЦОВ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ТВИН 20

Эмульгатор ТВИН 20 легко и органично включается в процесс синтеза магнитных жидкостей на основе воды. Фактически, технология стабилизации магнитных частиц в воде с помощью ТВИН 20 не отличается от синтеза магнитных жидкостей со стабилизацией двойным слоем с диссоциируемым ПАВом.

На первом этапе производится синтез частиц мелкодисперсного магнетита. Магнетит в качестве материала частиц получил широкое распространение благодаря простоте синтеза частиц путем химического осаждения [7]. Для проведения реакции требуются самые простые реагенты, имеющиеся в любой лаборатории. Частицы магнетита выпадают практически мгновенно при доливании водного раствора аммиака к смеси солей двух- и трехвалентного железа:



Реакция проводится обычно при нагреве раствора солей до кипения. Количество аммиачной воды берется со значительным избытком. Полученные частицы отстаиваются и затем несколько раз промываются проточной водой от остатков солей. Избыток воды после оседания частиц сливают, оставляя объем, примерно равный осадку.

На следующем шаге производят покрытие частиц первым слоем ПАВ – какой-либо жирной кислотой.

Количество кислоты берется из расчета 0.25 моль на моль магнетита. Для облегчения прохождения реакции предварительно к дисперсии частиц доливают немного аммиачной воды – примерно моль на моль по магнетиту. Щелочная среда необходима для формирования эмульсии жирной кислоты. Затем в раствор доливается выбранная кислота. Если она является жидкостью в нормальных условиях, то вливается непосредственно. Твердые кислоты, например, лауриновую, необходимо нагревать. После добавления кислоты раствор доводится до кипения и выдерживается несколько минут. Затем необходимо нейтрализовать избыток щелочи соляной кислотой. Нейтральность раствора контролируется с помощью индикаторной бумаги. В результате частицы магнетита, покрытые слоем жирной кислоты, собираются в комок на дне сосуда. Избыток аммиака и непрореагировавшие остатки кислоты промывают, оставляя некоторое количество воды.

Последняя операция состоит в нанесении второго слоя ПАВ и диспергировании частиц в воде. Выбранный ПАВ – в данном случае ТВИН 20, добавляется изначально в количестве, равном по массе жирной кислоте. Раствор нагревается до кипения и непрерывно помешивается. Диспергирование частиц контролируется визуально. По мере уменьшения осадка добавляют еще порции ТВИН 20. Процесс прекращают после исчезновения осадка. К сожалению, точное значение пропорции ТВИН 20 по отношению к магнетиту пока не установлено.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ТВИН 20 В ВОДЕ

Были синтезированы два образца магнитной жидкости, стабилизированные двойным слоем ПАВ в сочетаниях декановая кислота–ТВИН 20 и олеиновая кислота–ТВИН 20. Измерялась их динамическая вязкость в зависимости от температуры при различных концентрациях. Измерения вязкости выполнялись на ротационном вискозиметре Brookfield DV-II+Pro. Использовалась измерительная схема коаксиальных

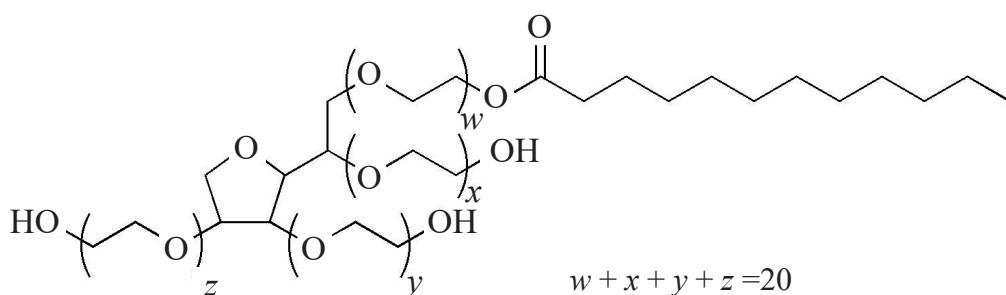


Рис. 1. Структурная схема молекулы полиоксиэтилена (20) сорбитана монолаурата (ТВИН 20).
Fig. 1. Structural scheme of polyoxyethylene (20) sorbitan monolaurate (TWEEN 20) molecule.

цилиндров. Температура образцов стабилизировалась с помощью струйного термостата в диапазоне от 3 до 80°C.

Результаты измерения вязкости образцов магнитных жидкостей в зависимости от температуры при различных концентрациях представлены на Рис. 2 и 3. На рисунках отображена вязкость жидкостей, взятой по отношению к вязкости базовой среды (воды). Представленные зависимости выглядят однотипно и представляют собой систему наклонных прямых. С ростом температуры происходит уменьшение относительной вязкости образцов. Наиболее сильно меняется вязкость у концентрированных образцов жидкостей. Наблюдаемая зависимость противоречит полученным ранее результатам для жидкостей, стабилизованных двойным слоем ПАВ в воде с ионным стабилизатором додецилсульфатом натрия [6]. У жидкостей этого типа относительная вязкость увеличивалась с ростом температуры.

Уменьшение относительной вязкости магнитной жидкости, стабилизированной ТВИН 20, объясняется уменьшением эффективной толщины оболочки ПАВа с ростом температуры. Именно поэтому наиболее сильный эффект наблюдается в концентрированных образцах. Эффективная толщина оболочки может быть найдена из сопоставления результатов реологических измерений и анализа кривой намагничивания образцов. По величине вязкости жидкости находится относительная доля, занимаемая частицами в жидкости вместе со стабилизирующими оболочками. Полидисперсность частиц в данном случае является несущественной.

Объемную долю частиц с учетом толщины стабилизирующей оболочки можно рассчитать по модификации формулы Чонга [8], предложенной в работе [9] для описания относительной вязкости классических магнитных жидкостей:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(1 + 2.25 \frac{\Phi}{1 - \Phi/\Phi_p} \right)^2.$$

Здесь η и η_0 – вязкости магнитной жидкости и базовой среды (воды), Φ – объемная доля частиц вместе со стабилизирующими оболочками, $\Phi_p = 0.605$ – концентрация предельно плотной упаковки частиц. Как было показано в [10], формула описывает относительную вязкость коллоидного раствора с приемлемой точностью во всем возможном диапазоне концентраций.

Из магнитных измерений определяется доля магнитной фазы в образцах или концентрация магнетита. Тогда толщина оболочки находится как параметр, с помощью которого можно объемную долю частиц и долю магнитной фазы согласовать между собой. При этом необходимо учитывать полидисперсность частиц.

Общепринятым способом учета полидисперсности магнитных жидкостей является аппроксимация распределения частиц по размерам какой-либо колоколо-образной функцией. В работе [11] для этого использовалось лог-нормальное распределение. В работе [12] нами

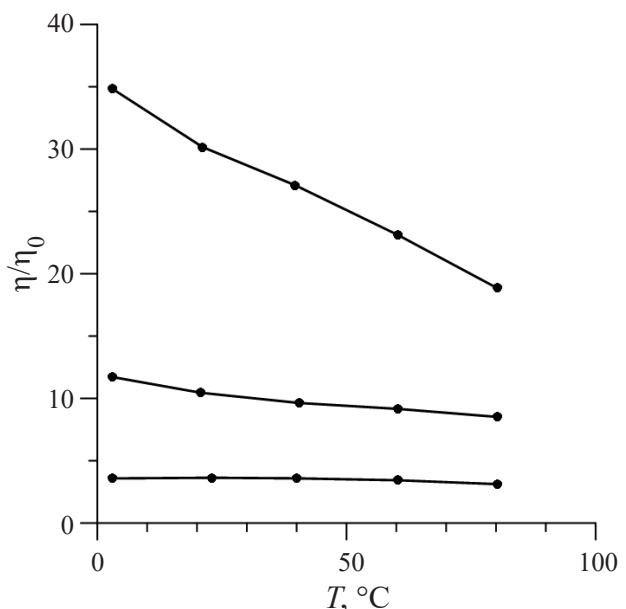


Рис. 2. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного двойным слоем декановая кислота–ТВИН 20 в воде.

Fig. 2. Temperature dependence of relative viscosity for sample of magnetic fluid stabilized with decanoic acid–TWEEN 20 double layer in water.

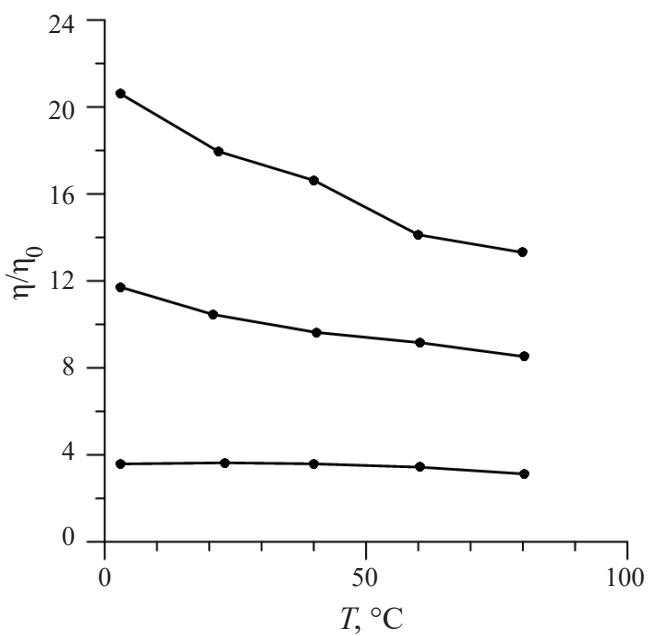


Рис. 3. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного двойным слоем, олеиновая кислота–ТВИН 20 в воде.

Fig. 3. Temperature dependence of relative viscosity for sample of magnetic fluid stabilized with oleic acid–TWEEN 20 double layer in water.

было предложено при анализе кривых намагничивания использовать Г-распределение:

$$f(x) = \frac{x^\alpha \exp(-x/x_0)}{x_0^{\alpha+1} \Gamma(\alpha+1)}.$$

Здесь α – безразмерный параметр, определяющий относительную ширину распределения $\Delta = (\alpha+1)^{-1/2}$, x_0 – размерный параметр. Г-распределение является двух параметрической функцией и имеет форму несимметричного колокола с максимумом при $x = \alpha x_0$ и экспоненциальным затуханием асимптотик. Параметры распределения α и x_0 определяются из анализа либо полной кривой намагничивания жидкости [12], либо из анализа ее асимптотик [13].

Тогда при известных параметрах α и x_0 объемная доля частиц ϕ и концентрация магнитной фазы Φ_m связаны следующим соотношением [9]:

$$\begin{aligned} \phi/\Phi_m = 1 + & \frac{6(\delta+l)}{x_0(\alpha+3)} + \\ & + \frac{4(\delta+l)^2}{x_0^2(\alpha+2)(\alpha+3)} \left(3 + \frac{2(\delta+l)}{x_0(\alpha+1)} \right). \end{aligned}$$

Здесь $\delta+l$ – суммарная толщина слоя ПАВ l и немагнитного слоя магнетита на поверхности частиц. Обычно полагают, что на поверхности частиц образуется немагнитный слой толщиной δ – порядка одного периода кристаллической решетки (~ 0.8 нм) [14].

Результаты магнитных измерений и гранулометрического анализа образцов приведены в Таблице 1.

В таблице представлены намагниченность насыщения образцов M_s , начальная восприимчивость χ , параметры Г-распределения частиц по размерам α и x_0 .

От классических магнитных жидкостей типа «магнетит, стабилизированный олеиновой кислотой в керосине» жидкости, стабилизированные двойным слоем ПАВ, отличаются, как правило, меньшей намагниченностью насыщения и более широким распределением частиц по размерам. Это различие объясняется существенно большей толщиной стабилизирующей оболочки. Более толстая оболочка ПАВ позволяет диспергировать в коллоидный раствор значительную долю крупных частиц, отсутствующих в классических магнитных жидкостях. Для

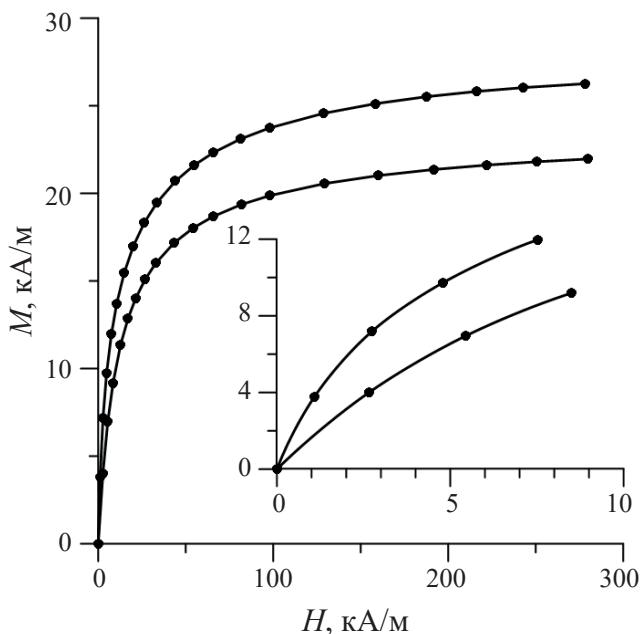


Рис. 4. Сравнение кривых намагничивания жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ декановая кислота–ТВИН 20 (верхняя кривая), со стандартной магнитной жидкостью типа магнетит в керосине, стабилизированной олеиновой кислотой (нижняя кривая).

Fig. 4. Comparison between magnetization curves for fluid stabilized with decanoic acid–TWEEN 20 (upper curve) and standard magnetite-in-kerosene magnetic fluid stabilized with oleic acid (lower curve). Inset shows magnified initial region.

концентрированных керосиновых жидкостей типичные значения параметров составляют $M_s \sim 60$ кА/м и $\alpha \sim 5-6$.

На Рис. 4 представлены для сравнения кривые намагничивания жидкости с двойным слоем ПАВ декановая кислота–ТВИН 20 и классической магнитной жидкости. Жидкости имеют одинаковые значения среднего магнитного момента $\langle m \rangle = 1.94 \cdot 10^{-19}$ Ам². Намагниченность насыщения классической жидкости имеет немного меньшую величину – 23.27 кА/м. Кривые намагничивания выглядят подобными за исключением начального участка. Начальная восприимчивость классической магнитной жидкости существенно

Таблица 1. Результаты магнитогранулометрического анализа образцов магнитных жидкостей.

Table 1. Results of magnetogranulometric analysis of magnetic fluid samples.

Декановая кислота + ТВИН 20				Олеиновая кислота + ТВИН 20			
M_s , кА/м	χ	α	x_0 , нм	M_s , кА/м	χ	α	x_0 , нм
27.86	4.41	2.54	2.06	28.49	4.229	2.60	2.00
22.59	3.397	2.57	2.05	22.36	3.19	2.63	2.00
16.84	2.382	2.58	2.05	16.47	2.206	2.62	2.01

меньше – 1.745. Это различие говорит о меньшем количестве крупных частиц в классических керосиновых жидкостях. Именно они вносят основной вклад в начальную восприимчивость магнитной жидкости.

Отдельно представлен увеличенный начальный участок.

Измерение кривых намагничивания производилось методом дифференциальной развертки. Основным измеряемым параметром являлась дифференциальная восприимчивость в зависимости от внешнего постоянного поля. Полная кривая намагничивания затем восстанавливалась путем численного интегрирования с поправками на небаланс измерительных катушек и размагничивающий фактор. Подробное описание установки и методики обработки результатов приведено в работе [15].

Вычисленные на основе реологических и магнитных измерений суммарные толщины оболочек, покрывающих магнитные частицы, в зависимости от температуры представлены на Рис. 5 и 6. Из рисунков следует, что с ростом температуры эффективная толщина стабилизирующих оболочек ПАВ уменьшается на 0.3 и 0.25 нм соответственно. Указанное уменьшение происходит, по всей видимости, вследствие изменения гидрофильно-липофильного баланса (ГЛБ) молекул ТВИН 20 в зависимости от температуры. В данном случае ГЛБ ТВИН 20 смещается в сторону первого, липофильного слоя ПАВ на поверхности частиц.

Как уже было указано в начале статьи, в случае стабилизации жидкостей додецилсульфатом натрия во втором слое ПАВ, наблюдается рост относительной вязкости с температурой. Очевидно, что в этом случае происходит смещение гидрофильно-липофильного баланса в сторону воды и, соответственно, увеличение эффективной толщины оболочки ПАВ.

Для классических магнитных жидкостей типа магнетит в керосине характерно убывание относительной вязкости с ростом температуры [10]. Также, как и для описываемых жидкостей со стабилизацией ТВИН 20, эффект наиболее выражен для концентрированных растворов. В данном случае происходит уменьшение эффективной толщины оболочки из молекул олеиновой кислоты, закрепленных на поверхности частиц.

МАГНИТНЫЕ ЖИДКОСТИ НА БАЗЕ НИЗКОЗАМЕРЗАЮЩИХ РАСТВОРОВ

Использование ТВИН 20 во втором слое стабилизирующей оболочки позволяет диспергировать магнитные частицы не только в воде. В частности, с помощью ТВИН 20 можно стабилизировать частицы с таких средах, как водно-спиртовые смеси и растворы электролитов. Использование додецилсульфата натрия также возможно для этих целей, но с большими ограничениями. Например, с помощью ДДС можно стабилизировать магнитные частицы двойным слоем в растворе этиленгликоля. Но при этом жидкость будет сохранять устойчивость только при положительных температурах.

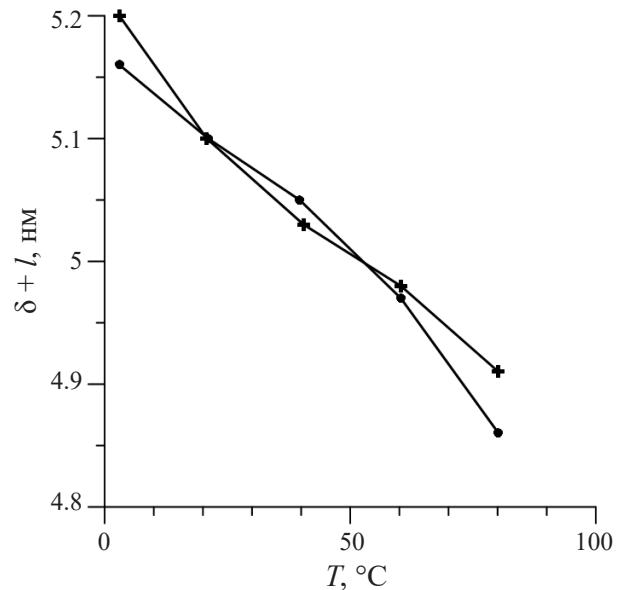


Рис. 5. Изменение эффективной толщины суммарной оболочки на частицах, стабилизованных парой ПАВ декановая кислота–ТВИН 20. Точки – намагниченность насыщения образца жидкости 27.86 кА/м, кресты – 22.59 кА/м.

Fig. 5. Variations in effective thickness of the total shell on particles stabilized with decanoic acid–TWEEN 20 pair. Dots and crosses correspond to samples with saturation magnetizations of 27.86 and 22.59 kA/m, respectively.

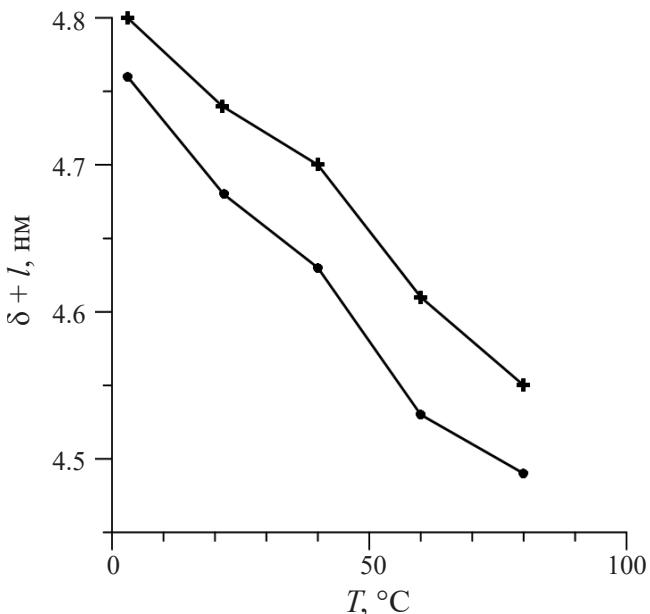


Рис. 6. Изменение эффективной толщины суммарной оболочки на частицах, стабилизованных парой ПАВ олеиновая кислота–ТВИН 20. Точки – намагниченность насыщения образца жидкости 28.49 кА/м, кресты – 22.36 кА/м.

Fig. 6. Variations in effective thicknesses of total shells on particles stabilized with oleic acid–TWEEN 20 pair. Dots and crosses correspond to samples with saturation magnetizations of 28.49 and 22.36 kA/m, respectively.

При отрицательных температурах растворимость ДДС в воде падает практически до нуля и происходит коагуляция частиц. ТВИН 20, как стабилизатор, сохраняет свою работоспособность и при низких отрицательных температурах. Таким образом, использование ТВИН 20 для стабилизации магнитных жидкостей позволяет получить низкозамерзающие жидкости на основе водного-спиртовых растворов.

На Рис. 7 представлены результаты измерения вязкости образца жидкости, стабилизированной сочетанием ПАВов олеиновая кислота–ТВИН 20 в водном растворе этиленгликоля концентрацией 50%. Данные представлены по отношению к вязкости базовой среды. Из рисунка следует, что образец жидкости сохраняет подвижность до температуры -38°C , то есть практически до температуры замерзания базовой среды (-43.8°C). Аналогично ведет себя жидкость на основе раствора пропиленгликоля. Результаты измерения ее относительной вязкости представлены на Рис. 8. Жидкость теряет подвижность при температуре -50°C .

Следует отметить одну примечательную особенность графиков на Рис. 7 и 8. Обе представленные зависимости слабо меняются с температурой и имеют максимум в районе -20°C и -15°C . Это говорит о том, что для ТВИН 20 в растворах этилен и пропилен гликолей гидрофильно-липофильный баланс слабо зависит от температуры.

Возможна также стабилизация частиц с помощью ТВИН 20 в растворах одноатомных спиртов, таких, как метанол, этанол и т.д. Но, к сожалению, в данном случае не представляется возможным получение более низких рабочих температур магнитной жидкости. Например, предельная допустимая концентрация метанола, при которой начинается коагуляция жидкости, составляет 50%. Растворы меньшей концентрации имеют такую же температуру замерзания – около -40°C .

Другим возможным путем понижения рабочих температур магнитных жидкостей является использование в качестве несущей среды низкозамерзающих растворов электролитов. В частности, 30% раствор хлористого кальция имеет температуру замерзания -51°C . Магнитные частицы, покрытые двойным слоем ПАВ с ТВИН 20 прекрасно диспергируются в этом растворе. Использование додецилсульфата натрия для стабилизации частиц в растворе хлористого кальция невозможно в принципе. Частицы очень быстро будут коагулировать по причине образования нерастворимого додецилсульфата кальция.

На Рис. 9 представлены результаты измерения вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированной слоями ПАВ декановая кислота–ТВИН 20 в водном растворе CaCl_2 . Представленный график выглядит как два состыкованных под некоторым углом отрезка. Причем точка излома находится в районе 5°C – температуры максимальной плотности воды. Нижняя рабочая температура магнитной жидкости в этом случае составила -30°C .

Магнитные жидкости с частицами, покрытыми двойным слоем ПАВ с ТВИН 20, могут быть синтезированы

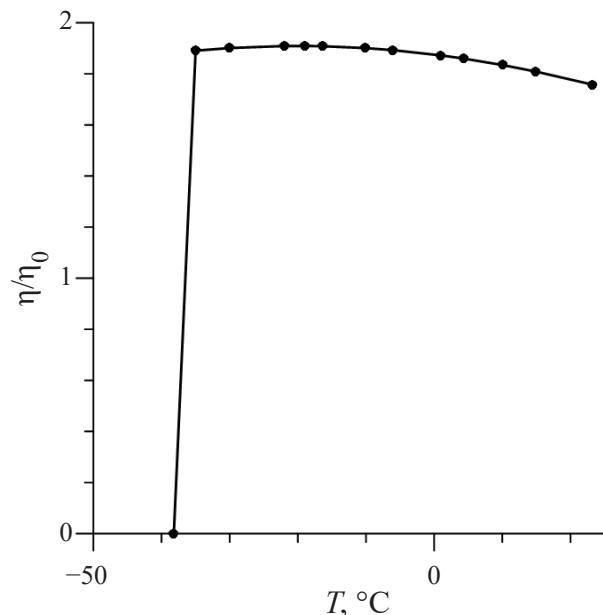


Рис. 7. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного сочетанием ПАВов олеиновая кислота–ТВИН 20 в 50% водном растворе этиленгликоля.
Fig. 7. Temperature dependence of relative viscosity for sample of magnetic fluid stabilized with oleic acid–TWEEN 20 in aqueous 50% ethylene glycol solution.

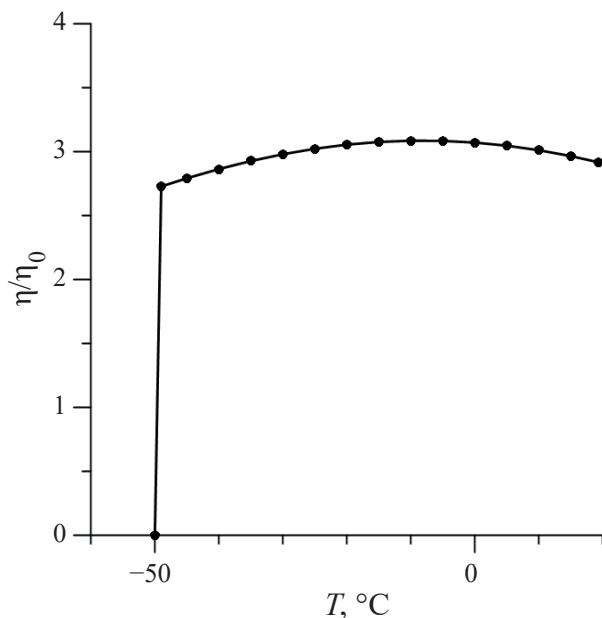


Рис. 8. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного сочетанием ПАВов олеиновая кислота–ТВИН 20 в 50% водном растворе пропиленгликоля.
Fig. 8. Temperature dependence of relative viscosity for sample of magnetic fluid stabilized with oleic acid–TWEEN 20 in aqueous 50% propylene glycol solution.

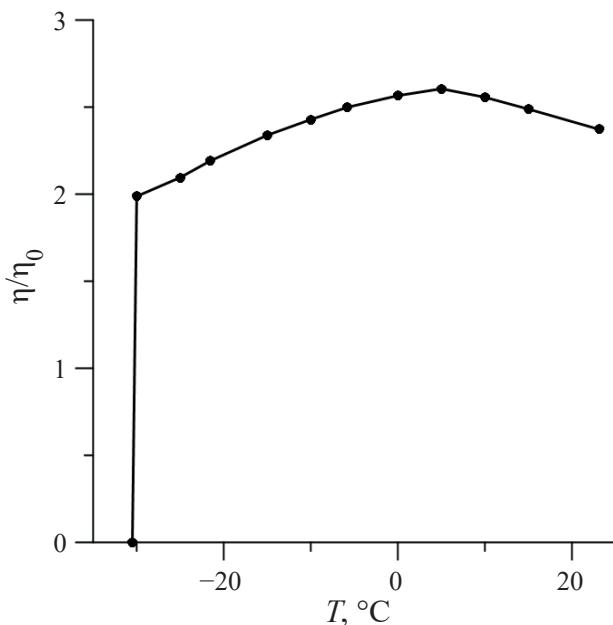


Рис. 9. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного сочетанием ПАВов декановая кислота–ТВИН 20 в водном растворе хлорида кальция CaCl_2 .
Fig. 9. Temperature dependence of relative viscosity for sample of magnetic fluid stabilized with decanoic acid–TWEEN 20 pair in aqueous CaCl_2 solution.

не только на базе растворов солей. Также возможна их реализация на базе щелочной среды. В частности, на базе аммиачной воды или нашатырного спирта. В растворе концентрацией 10 моль/л частицы с оболочкой декановая кислота–ТВИН 20 диспергируются и сохраняют стабильность. Наоборот, в кислой среде (например, в соляной кислоте) частицы диспергируются, но со временем растворяются.

С точки зрения практических приложений новых синтезированных жидкостей первое, что можно сказать – это их дешевизна и безопасность, как в противопожарном смысле, так и в смысле экологии. Вряд ли можно найти более дешевую и безопасную среду, чем

водный раствор хлорида кальция. Его дают даже грудным детям. Вторая возможная область применения магнитных жидкостей со стабилизацией ТВИН 20 – биология и медицина. Частицы, покрытые ТВИН 20, могут стабильно существовать в биоорганических жидкостях, не оказывая патогенного воздействия в силу химической инертности неиногенной оболочки. И последняя гипотетическая область применения новой магнитной жидкости – химическая технология. Поскольку наши частицы благополучно существуют в растворах электролитов, можно их диспергировать в растворах реагентов и управлять химическими реакциями с помощью магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ТВИН 20 в качестве второй (внешней оболочки) для стабилизации магнитных частиц двойным слоем ПАВ позволяет синтезировать магнитные жидкости не только на основе воды, а также на основе низкозамерзающих растворов спиртов и солей. Образцы, стабилизированные парой ПАВов олеиновая кислота–ТВИН 20, на основе растворов этиленгликоля и пропиленгликоля сохраняли подвижность вплоть до замерзания базовых сред (-38°C и -50°C). Образец, стабилизированный сочетанием декановая кислота–ТВИН 20 на основе раствора хлорида кальция, терял подвижность при температуре -30°C .

Измерена температурная зависимость вязкости для различных концентраций образцов на базе воды. Обнаружено уменьшение вязкости с ростом температуры по отношению к вязкости воды. Эффект объясняется уменьшением эффективной толщины оболочки ПАВ вследствие смещения гидрофильно-лиофильного баланса ТВИН 20. Обнаруженный эффект может использоваться как метод качественного наблюдения за изменением ГЛБ.

Синтезированные магнитные жидкости могут быть использованы в областях техники с жесткими требованиями к пожарной и экологической безопасности. Также возможно их применение в биологии, медицине и химической технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosensweig R.E., Ferrohydrodynamics, Cambridge university press, Cambridge, 1985.
2. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости // УФН. 1974. Т. 112. С.435–458.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0112.197403b.0427>
3. Lebedev A.V., Lysenko S.N. Magnetic fluids stabilized by polypropylene glycol // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2011. V. 323. № 10. P. 1198–1202.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.11.005>
4. Shimoizaka J. Method of preparing a water-base magnetic fluid. Pat. 4094804 (USA). 1978.
5. Khalafalla S.E., Reimers G.W., Rholl S.A. Dilution stable water based magnetic fluids. Pat. 4208294 (USA). 1979.
6. Лебедев А.В. Магнитная жидкость, стабилизированная двойным слоем пав в воде, отвергает известные модели реологии и диполь–дипольного взаимодействия // Коллоидный журнал. 2024. Т. 86. № 4. С. 458–468.
<https://doi.org/10.31857/S0023291224040054>

7. *Elmore W.C.* On preparation of the magnetite high dispersed // Phys. Rev. 1938. V. 54. P. 309–310.
8. *Chong J.S., Christiansen E.B., Baer A.D.* Rheological properties of concentration suspensions // J. Appl. Polym. Sci. 1971. V. 15. № 8. P. 2007–2021.
<https://doi.org/10.1002/app.1971.070150818>
9. *Пшеничников А.Ф., Гилев В.Г.* Реология и намагниченность концентрированных магнетитовых коллоидов // Колloidный журнал. 1997. Т. 59. № 3. С. 372–379.
10. *Лебедев А.В.* Вязкость концентрированных коллоидных растворов магнетита // Колloidный журнал. 2009. Т. 71. № 1. С. 78–83.
11. *Chantrell R.W., Popplewell J., Charles S.R.* Measurements of particle size distribution parameters in ferrofluids // IEEE Trans. on Magnetics, MAG-14. 1978. V. 14. № 5. P. 975–977.
<https://doi.org/10.1109/TMAG.1978.1059918>
12. *Pshenichnikov A.F., Mekhonoshin V.V., Lebedev A.V.* Magneto-granulometric analizis of concentrated ferrocolloids // Journal on magnetism and magnetic materials. 1996. V. 161. P. 94–102.
[https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(96\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(96)00067-4)
13. *Пшеничников А.Ф., Лебедев А.В., Радионов А.В., Ефремов Д.В.* Магнитная жидкость для работы в сильных градиентных полях // Колloidный журнал. 2015. Т. 77. № 2. С. 207–212.
<https://doi.org/10.7868/S0023291215020159>
14. *Kaiser R., Mishkolczy G.* Magnetic properties of stable dispersions of subdomain magnetite particles // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. № 3. P. 1064–1072.
<https://doi.org/10.1063/1.1658812>
15. *Лебедев А.В.* Измерение кривых намагничивания магнитных жидкостей: сравнение метода дифференциальной развертки и вибрационного магнитометра // Приборы и техника эксперимента. 2024. № 5. С. 148–153.
<https://doi.org/10.31857/S0032816224050167>