УДК 544.77.03

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

© 2025 г. А. В. Лебедев[1, *], С.Н. Лысенко[2]

[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@icmm.ru*

Поступила в редакцию 10.04.2025 г.
После доработки 08.05.2025 г.
Принята к публикации 08.05.2025 г.

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°С и –50°С. При использовании в качестве базовой среды раствора хлорида кальция $CaCl_2$, пробный образец жидкости сохранял работоспособность до температуры –30°С.

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, стабилизированных ТВИН 20, делает возможным их применение в биологии и медицине.

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

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

© 2025 г. A.V. Lebedev, S.N. Lysenko

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

ВВЕДЕНИЕ

Проблема придания магнитных свойств обычной жидкости была решена в 60-ых 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 ПАВа 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, стабилизированных додецилсульфатом натрия. Основной особенностью указанных стабилизаторов является их диссоциация в воде на ионы.

В предлагаемой работе описываются свойства магнитных жидкостей, стабилизированных 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 полиэтиленгликолем. 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».

Рис. 1. Структурная схема молекулы полиоксиэтилена (20) сорбитана монолаурата (ТВИН 20).

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 реактивы, имеющиеся в любой лаборатории. Частицы магнетита выпадают практически мгновенно при доливании водного раствора аммиака к смеси солей двух- и трех- валентного железа:

$$2FeCl_3 + FeSO_4 + 8NH_4OH = Fe_3O_4 + 6NH_4Cl + (NH_4)_2SO_4 + 4H_2O$$

Реакция проводится обычно при нагреве раствора солей до кипения. Количество аммиачной воды берётся 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 моля 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 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 Рис. 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, стабилизированных двойным слоем ПАВ в воде с ионным стабилизатором додецилсульфатом натрия [6]. У жидкостей этого типа относительная вязкость увеличивалась с ростом температуры.

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

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

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 формуле Чонга [8], предложенной в работе [9] для описания относительной вязкости классических магнитных жидкостей:

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

Здесь η и η_0 – вязкости магнитной жидкости и базовой среды (воды), φ – объемная доля частиц вместе со стабилизирующими оболочками, φ_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 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]:

$$\varphi / \varphi_m = 1 + \frac{6(\delta + l)}{x_0(\alpha + 3)} + \frac{4(\delta + l)^2}{x_0^2(\alpha + 2)(\alpha + 3)}\left(3 + \frac{2(\delta + l)}{x_0(\alpha + 1)}\right).$$

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.

Таблица 1. Результаты магнитогранулометрического анализа образцов магнитных жидкостей.

Декановая кислота + ТВИН 20				Олеиновая кислота + ТВИН 20			
M_s, kA/m	χ	α	x_0, nm	M_s, kA/m	χ	α	x_0, nm
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

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 концентрированных керосиновых жидкостей типичные значения параметров составляют M_S~60 кА/м и α~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 $\langle m \rangle = 1.94 * 10^{-19}$ Ам^2. 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 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.

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). 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 nm соответственно. Указанное уменьшение происходит, по всей видимости, вследствие изменения гидрофильно-лиофильного баланса (ГЛБ) молекул ТВИН 20 в зависимости от температуры. В данном случае ГЛБ ТВИН 20 смещается в сторону первого, лиофильного слоя ПАВ на поверхности частиц.

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

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

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-лиофильного 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. 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°С.

Рис. 7. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного сочетанием ПАВов олеиновая кислота – ТВИН 20 в 50% водном растворе этиленгликоля.

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

Рис. 8. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного сочетанием ПАВов олеиновая кислота – ТВИН 20 в 50% водном растворе пропиленгликоля.

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°С.

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°С. 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 С – температуры максимальной плотности воды. Нижняя рабочая температура магнитной жидкости в этом случае составила –30°С.

Рис. 9. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного сочетанием ПАВов декановая кислота – ТВИН 20 в водном растворе хлорида кальция $CaCl_2$.

Магнитные жидкости с частицами, покрытыми двойным слоем ПАВ с ТВИН 20, могут быть синтезированы 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 стабилизаций 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 реактивов 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°С и –50°С). Образец, стабилизированный сочетанием декановая кислота – ТВИН 20 на основе раствора хлорида кальция, терял подвижность при температуре –30°С.

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.

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.

ЛИТЕРАТУРА

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 [*Shliomis M. I.* Magnetic fluids // Sov. Phys. Usp. 1974. V. 17. № 2. P. 153–169.

https://doi.org/10.1070/PU1974v017n02ABEH004332]

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. *Shimoiizaka 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 [*Lebedev A. V.* Magnetic fluids stabilized with double layers of surfactants in water reject the known models of rheology and dipole–dipole interaction // Colloid Journal. 2024. V. 86. № 4. P. 538–546.

https://doi.org/10.1134/S1061933X24600362]

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 // Коллоидный журнал. 1997. Т. 59. № 3. С. 372–379. [*Pshenichnikov A.F., and Gilev V.G.* Rheology and magnetization of concentrated magnetite colloids // Colloid J. 1997. V. 59. № 3. P. 346–353.]

10. *Лебедев А.В.* Вязкость концентрированных коллоидных растворов магнетита // Коллоидный журнал. 2009. Т. 71. № 1. С. 78–83. [*Lebedev A.V.* Viscosity of concentrated colloidal solutions of magnetite // Colloid J. 2009. V. 71. № 1. P. 82–87.

https://doi.org/10.1134/S1061933X09010104]

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

13. *Пшеничников А. Ф., Лебедев А. В., Радионов А. В., Ефремов Д. В.* Магнитная жидкость для работы в сильных градиентных полях // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. № 2. С. 207–212. https://doi.org/10.7868/S0023291215020159 [*Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V., Radionov A.V., Efremov D.V.* A magnetic fluid for operation in strong gradient fields // Colloid journal. 2015. V. 77. № 2. P. 196–201.

https://doi.org/10.1134/S1061933X15020155]

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 [*Lebedev A.V.* Measuring magnetization curves of ferrofluids: comparison of the differential sweep method and a vibrating-sample magnetometer // Instruments and Experimental Techniques. 2024. V. 67. №. 5. P. 989–994.

https://doi.org/10.1134/S0020441224701574]

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Структурная схема молекулы полиоксиэтилена (20) сорбитана монолаурата (ТВИН 20).

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

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

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). Отдельно представлен увеличенный начальный участок.

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

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

Рис. 7. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного сочетанием ПАВов олеиновая кислота – ТВИН 20 в 50% водном растворе этиленгликоля.

Рис. 8. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного сочетанием ПАВов олеиновая кислота – ТВИН 20 в 50% водном растворе пропиленгликоля.

Рис. 9. Температурная зависимость относительной вязкости образца магнитной жидкости, стабилизированного сочетанием ПАВов декановая кислота – ТВИН 20 в водном растворе хлорида кальция $CaCl_2$.

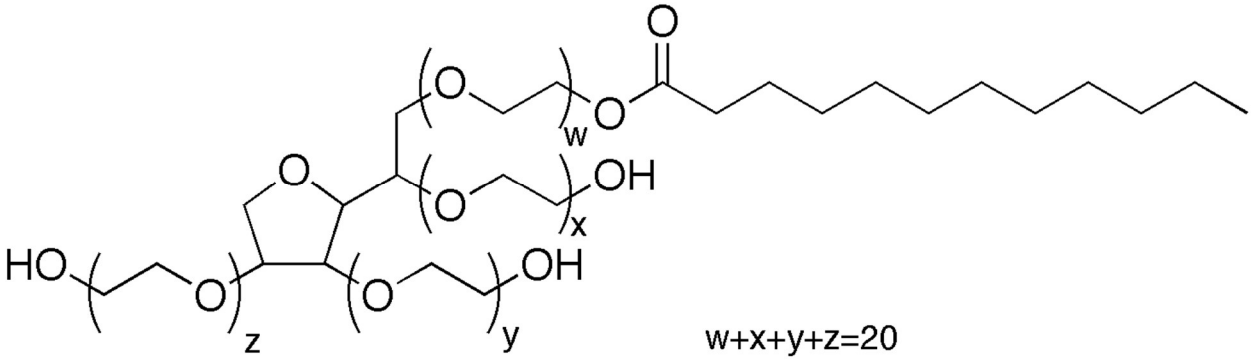

Рисунок 1. Лебедев А.В.

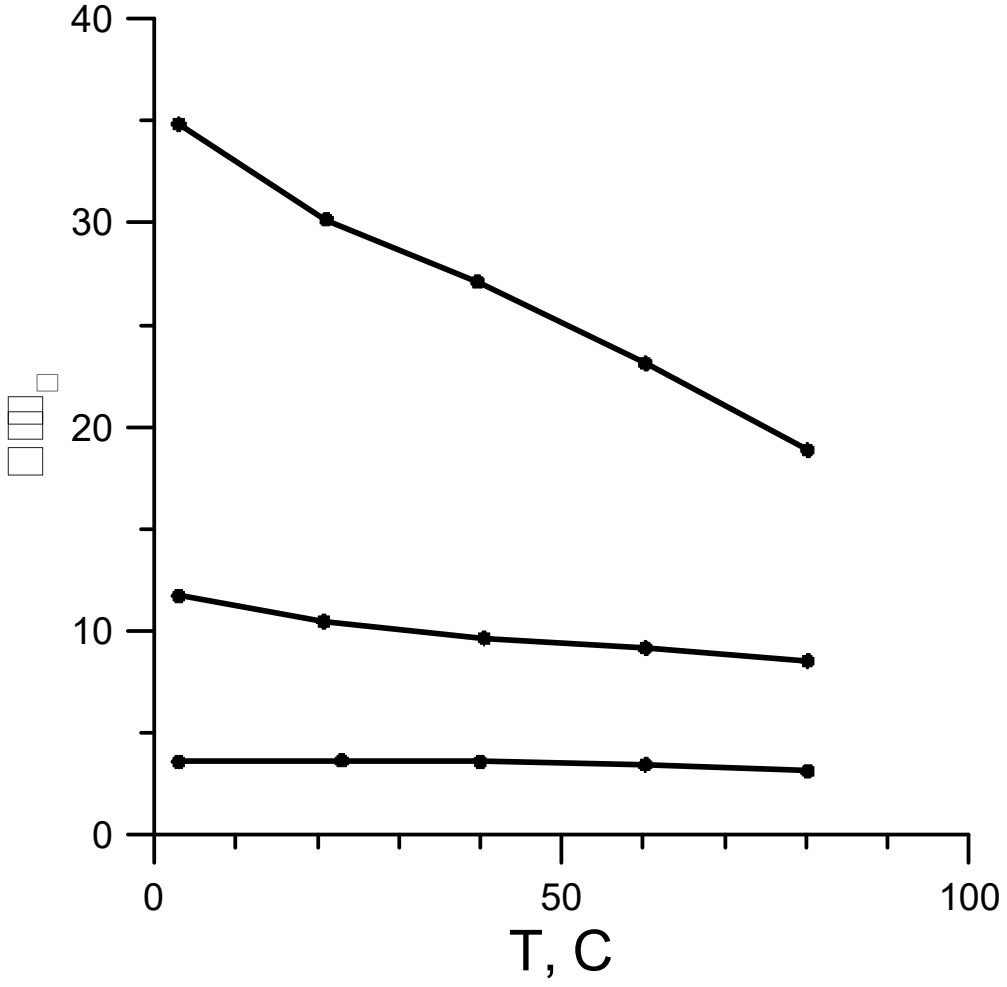

Рисунок 2. Лебедев А.В.

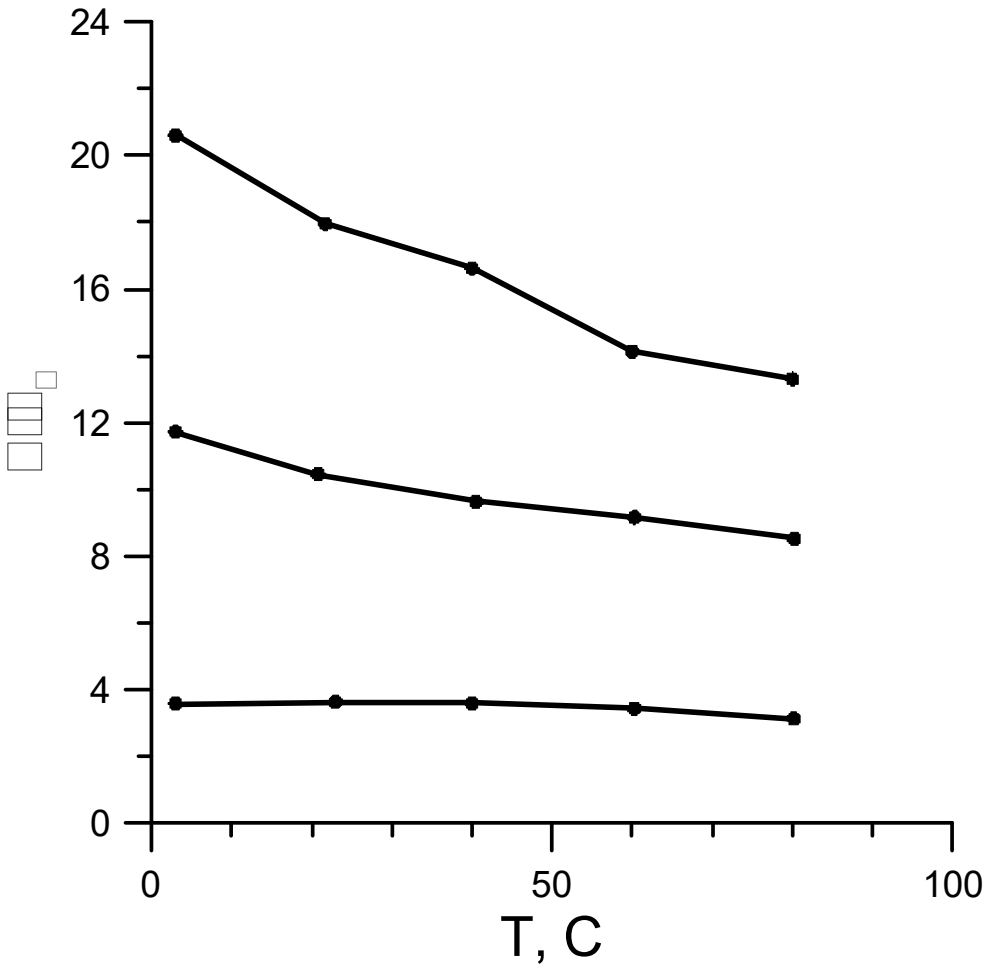

Рисунок 3. Лебедев А.В.

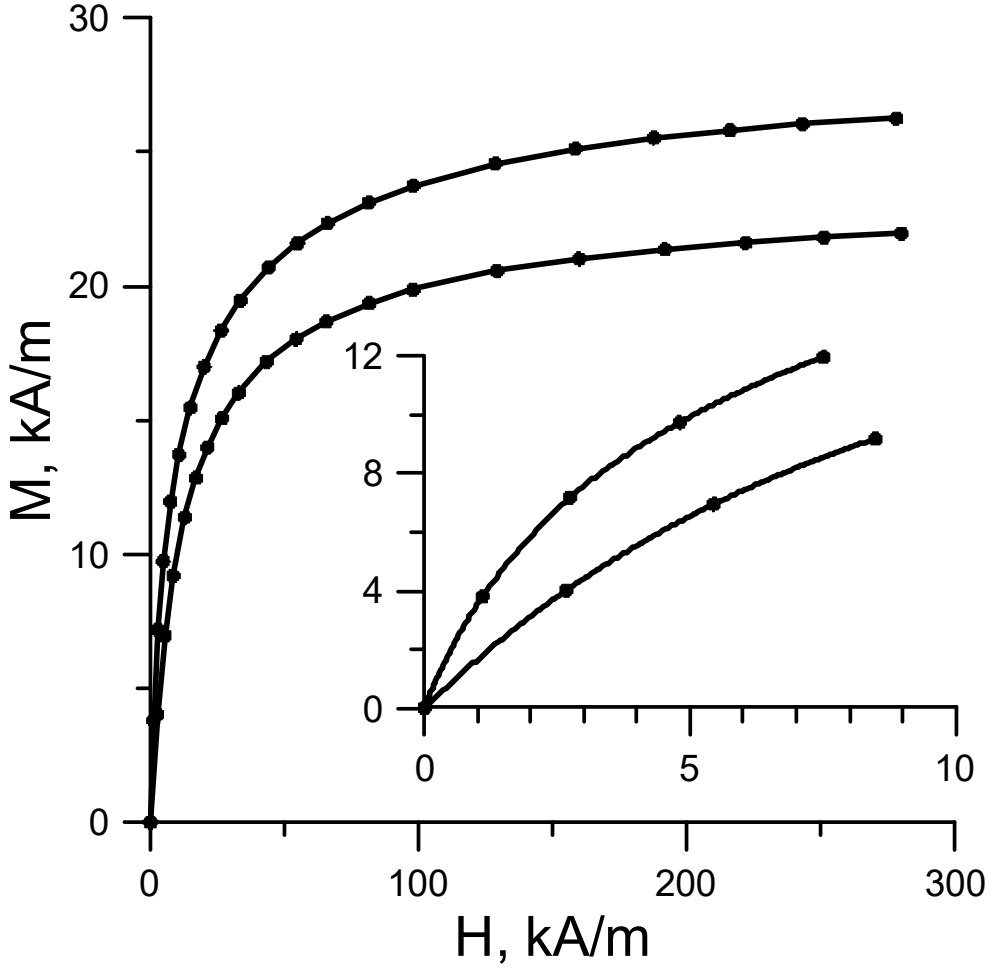

Рисунок 4. Лебедев А.В.

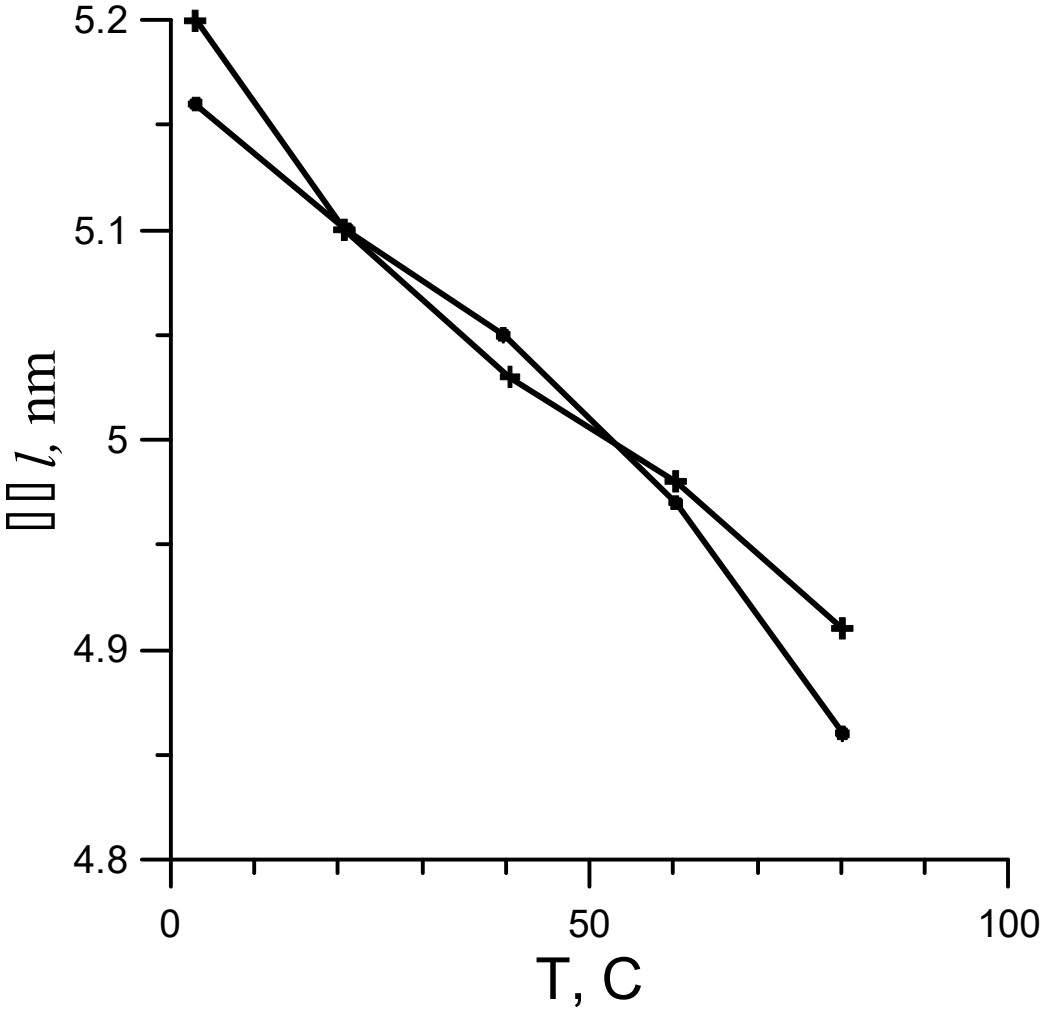

Рисунок 5. Лебедев А.В.

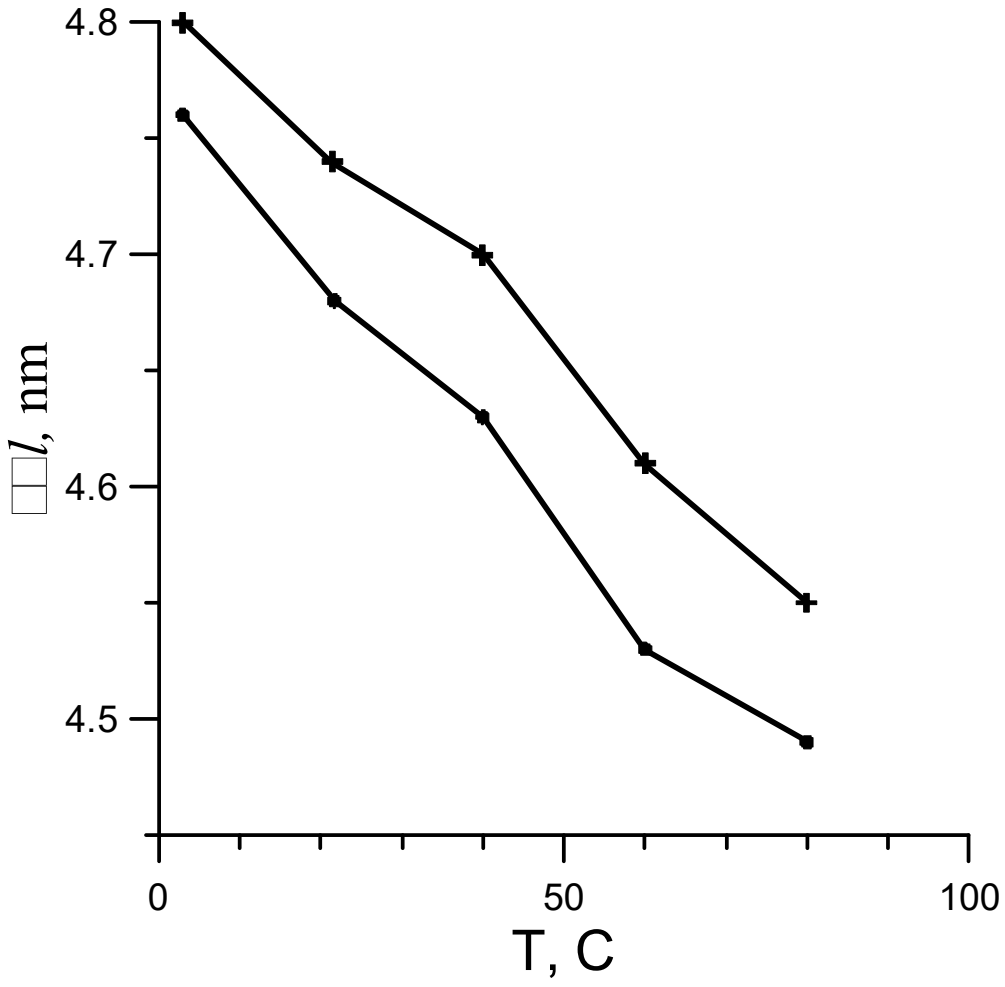

Рисунок 6. Лебедев А.В.

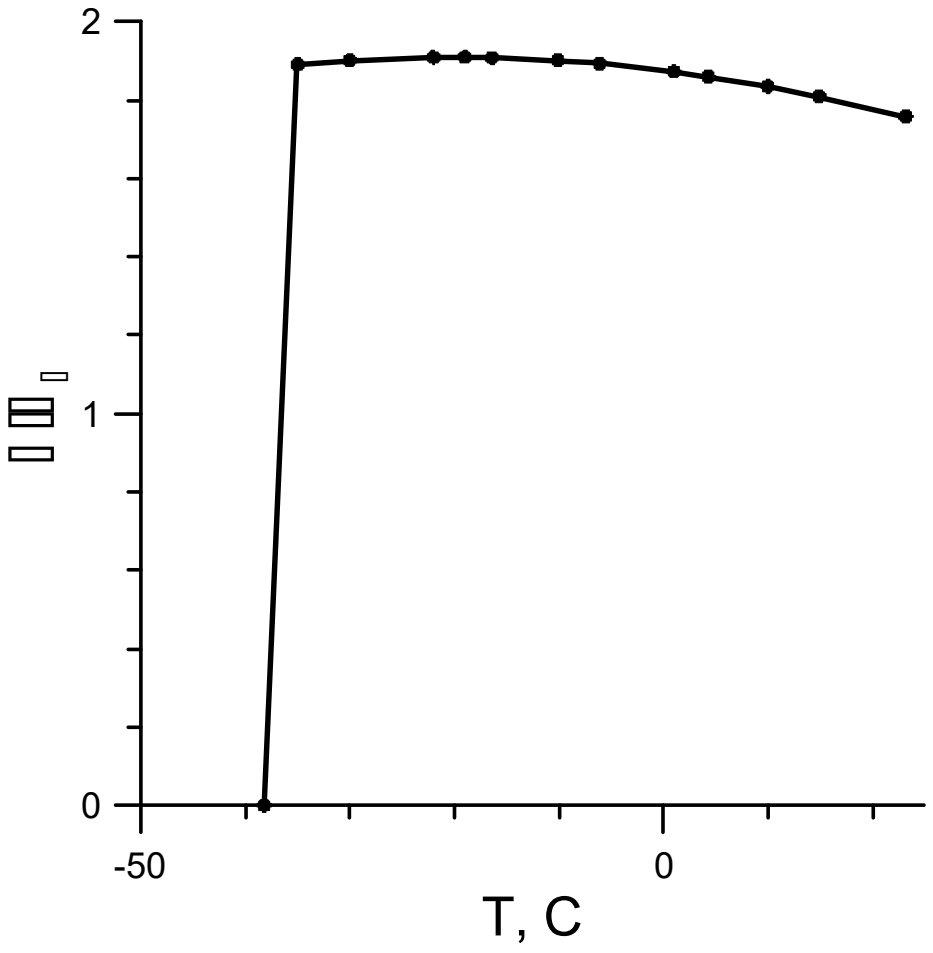

Рисунок 7. Лебедев А.В.

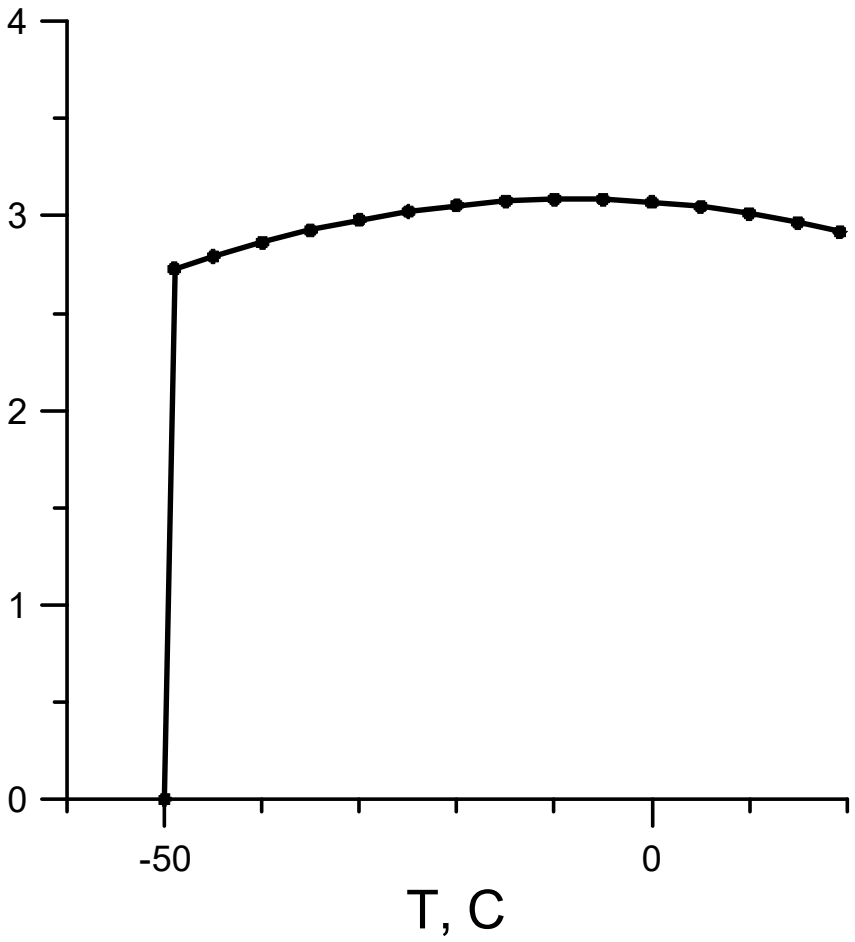

Рисунок 8. Лебедев А.В.

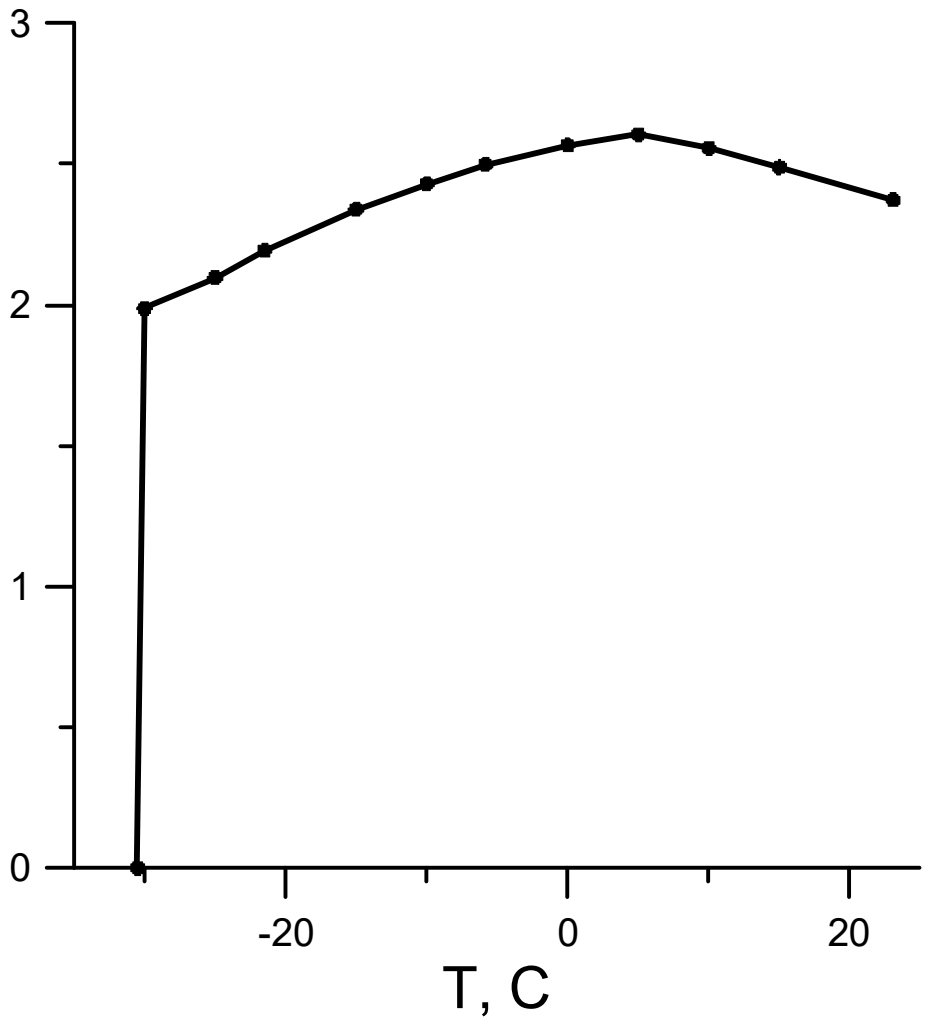

Рисунок 9. Лебедев А.В.