

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С ОПТИМАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ МАГНИТНО-ЖИДКОСТНЫХ УПЛОТНИТЕЛЕЙ

Шешенин М.А.

г. Саров, ГБПОУ СПТ им. Б.Г. Музрукова, 2 курс

Научный руководитель: Столяров И.В., преподаватель, г. Саров, ГБПОУ СПТ им. Б.Г. Музрукова

Магнитная жидкость (МЖ) представляет собой коллоидный раствор мельчайших частиц магнитного материала – устойчивую и невыпадающую в осадок с течением времени взвесь твёрдых частиц в жидкости. Для предотвращения агломерации частиц используют поверхностно-активные вещества (ПАВ). Молекулы ПАВ «изолируют» частички магнетита друг от друга, не давая им соединиться в более крупные элементы, которые могут осаждаться на дно сосуда. В роли базовой жидкости могут использоваться вода, керосин, технические масла и различные типы органических жидкостей. Выбор базовой жидкости обуславливается оптимальным набором физических свойств получаемой жидкости, таких как: вязкость, плотность, теплопроводность, термостойкость и др. [1, 2].

Возможности применения магнитной жидкости неисчерпаемы. Она может служить в качестве заменителя элементов гидравлической техники, для преобразования энергии колебательного движения в электрическую энергию, для уничтожения раковых клеток, для очистки сточных вод, выделения углеводородов из нефтешламов, в автомобилестроении и др. [3].

Цели и задачи работы

Цель работы – исследовать физико-химические способы получения магнитных жидкостей с данными оптимальными свойствами: стабилизация или увеличение значения магнитной индукции в жидкости при наличии внешнего магнитного поля при увеличении температуры.

Задачи данной работы состояли в получении такой магнитной жидкости, которая обладала бы указанными оптимальными свойствами, в проведении анализа возможных способов изготовления такой жидкости и выбора оптимального способа ее изготовления в условиях школьной химической лаборатории, воспользовавшись минимальным набором доступных реактивов и химическим оборудованием.

Данные эксперименты могут быть повторены и в домашних условиях, с необходимым набором реактивов и оборудования при соблюдении техники безопасности.

Основные результаты

Все поставленные задачи исследовательской работы полностью выполнены. В ходе серии успешных экспериментов получена магнитная жидкость, обладающая оптимальными свойствами для решения исходной физической задачи.

Проведенные исследования показали, что наиболее стабильной по изменению магнитной индукции при увеличении температуры является жидкость на водной основе с объемным содержанием твердой фазы (c_T) 4%.

Практическая ценность

Практическая ценность работы – разработан технологический процесс синтеза магнитной жидкости на водной основе с $c_T = 4\%$, которая может быть применена в магнитножидкостных уплотнителях, работающих в неоднородном магнитном поле при температурных нагрузках в пределах от 30°C до 100°C . Этот выбор определяется вследствие лучших оптимальных характеристик изменения магнитной индукции (в сравнении с другими магнитными жидкостями на водной основе с объемной концентрацией твердой фазы c_T 2%, 6% и 8% и промышленной магнитной жидкости на основе керосина). После диспергирования на ультразвуковом диспергаторе были также исследованы размеры частиц порошка в жидкости и был произведен нагрев жидкостей до 100°C и также исследованы размеры частиц. Данное исследование также подтвердило этот выбор – магнитной жидкости на водной основе с $c_T = 4\%$.

Методика проведения экспериментов подробно изложена в исследовательской работе с большим количеством фотографического материала. В ходе работы рассмотрены случаи, отличающиеся от стандартной методики [4, 5].

Результаты данной исследовательской работы могут быть использованы для изготовления магнитной жидкости на водной основе с объемной концентрацией твердой фазы 2%, 4%, 6% и 8% в школьных или домашних условиях. Представленный в работе измерительный комплекс может быть использован для проведения различных

магнитометрических исследований разнообразных физических процессов.

Основная часть

Получение магнитных жидкостей

Магнитная жидкость представляет собой коллоидную систему однодоменных магнитных частиц (дисперсная фаза), диспергированных в жидкости-носителе (дисперсионная среда). При получении магнитной жидкости необходимо решить несколько задач:

- во-первых, необходимо получить мельчайшие частицы ферромагнетиков;
- во-вторых, необходимо покрыть эти частицы дисперсной фазы слоем молекул стабилизатора;
- в-третьих, стабилизатор должен не только предотвращать слипание частиц, но и обеспечивать образование устойчивой коллоидной системы однодоменных магнитных частиц, диспергированных в жидкости-носителе.

Универсального подхода к синтезу магнитных жидкостей на разных жидкостях-носителях нет. Разработчики магнитных жидкостей во всем мире используют собственные подходы к синтезу. Более того, каждый разработчик использует для синтеза магнитных жидкостей вещества, выпускаемые химической промышленностью той страны, в которой он работает. Эффективность технологий синтеза оценивается по достижению основных характеристик жидкостей: устойчивости, намагниченности насыщения, вязкости, диапазону рабочих температур.

В настоящее время выпускаются магнитные жидкости на основе:

- силоксановых жидкостей;
- углеводов;
- минеральных углеводородных масел;
- синтетических углеводородных масел;
- фторорганических жидкостей;
- воды и других полярных носителей.

Из-за частиц магнетита магнитные жидкости обычно представляют собой непрозрачные густые субстанции чёрного цвета. Для снижения вязкости можно уменьшить концентрацию магнетита, однако при этом, естественно, снижаются и магнитные свойства жидкости. Использование вместо магнетита других магнитных наполнителей может придать жидкости окраску, отличную от чёрной (обычно разные оттенки жёлто-коричневой гаммы), но кристалльной прозрачностью ни одна из таких жидкостей похвастаться не может.

Трудоёмкость получения магнитных жидкостей впечатляет. Например, для механического измельчения частиц до нужного размера экспериментаторам требовалось около 1000 часов работы шаровой мельницы. Измель-

чение частиц электроконденсационным методом основано на создании вольтовой дуги в жидкости между погружёнными в неё электродами, промежуток между которыми заполнен измельчаемым материалом. Есть и чисто химические методы, однако и там не обходится без многократного центрифугирования продуктов реакции. Зато и результат того стоит: полученные таким образом жидкости могут сохранять свои свойства в течение многих лет.

Наиболее простой химический метод описан в [6]. Подробное рассмотрение проблемы со строгих научных позиций можно найти на сайте [7], механические способы получения магнитных жидкостей рассматриваются в [8].

Для получения магнитной жидкости нами был применен стандартный метод конденсации при осаждении магнетита щелочью из водных растворов солей двух- и трехвалентного железа [5,11] с нашими изменениями [9-10, 12]. Были получены жидкости на водной основе, отличающиеся не только размером частиц, но и объемной концентрацией: в 2 %, 4 %, 6 % и 8 %.

Получение жидкости на водной основе с объемным содержанием твердой фазы, превышающим 8 % достаточно затруднительно, кроме этого магнитная жидкость с объемным содержанием твердой фазы $c_T = 10 \%$, при получающейся плотности, не будет представлять интерес для нашей задачи – использование в качестве магнитоидкостного уплотнителя.

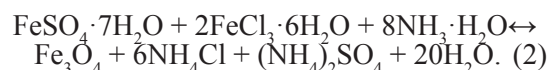
Обычно максимальная объемная концентрация твердой фазы в МЖ не превышает 25 %.

Объемная концентрация твердой фазы c_T [11]:

$$c_T = \frac{100(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{вф}})}{(\rho_T - \rho_{\text{вф}})}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{вф}}$, ρ_T – плотности жидкости, водной фазы и твердой фазы соответственно.

По формуле (1) были рассчитаны значения плотностей жидкостей (табл. 1), учитывая при этом, что наполнителем является магнетит с $\rho_T = 5,24 \text{ г/см}^3$ [11], которые изготовили методом конденсации; уравнение реакции [13]:



Для сравнения была использована промышленная магнитная жидкость Fe01 производства ООО «НПО Реалекс» (г. Москва) № 5 на основе керосина с дисперсными магнетитовыми частицами и олеиновой кислотой в качестве стабилизатора [14]. Для жидкости на основе керосина имеем $\rho_{\text{ж}} = 0,98 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{вф}} = \rho_{\text{к}} = 0,76 \text{ г/см}^3$ [11], откуда по формуле (1) получаем значение $c_T = 4,9 \sim 5 \%$.

Таблица 1
Исследуемые образцы жидкостей

Образцы жидкостей	Объемная концентрация твердой фазы c_T , в %	Плотность жидкости $\rho_{ж}$, г/см ³
1	2	1,09
2	4	1,17
3	6	1,25
4	8	1,34
5	5	0,98

Микроскопическое исследование дисперсной фазы магнитных жидкостей

Микроскопическому исследованию подвергались пять проб дисперсной фазы магнитных жидкостей:

– на водной основе, полученные нами [9-10, 12]:

№ 1 – магнитная жидкость с $c_T = 2\%$;

№ 2 – магнитная жидкость с $c_T = 4\%$;

№ 3 – магнитная жидкость с $c_T = 6\%$;

№ 4 – магнитная жидкость с $c_T = 8\%$;

– на основе керосина промышленного изготовления (№ 5) с $c_T = 5\%$.

Каждая магнитная жидкость исследовалась по следующей схеме:

1. Исследование исходного размера частиц дисперсной фазы.

2. Нагрев порошка до 100°C (скорость нагрева $5^\circ\text{C}/\text{мин.}$) и исследование размера частиц дисперсной фазы.

3. Диспергирование ультразвуковым диспергатором (в течение 3 мин.) и исследование размера частиц дисперсной фазы.

4. Нагрев порошка до 100°C и исследование размера частиц дисперсной фазы.

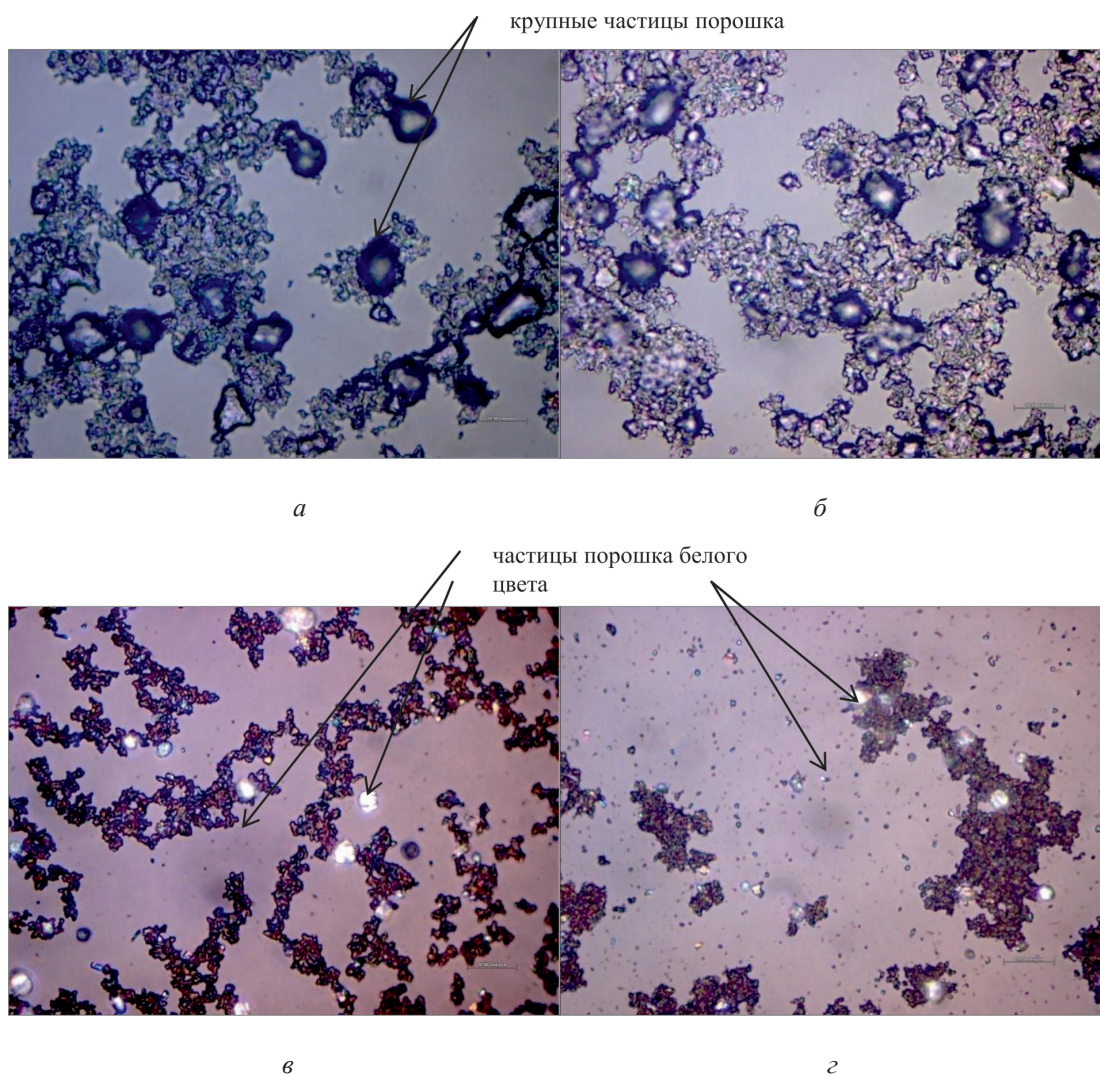


Рис. 1. Общий вид порошка № 1, $\times 1000$: а – в исходном состоянии; б – после первого нагрева; в – после диспергирования; г – после второго нагрева



2

На рис. 4 представлены фотографии общего вида порошка № 4.

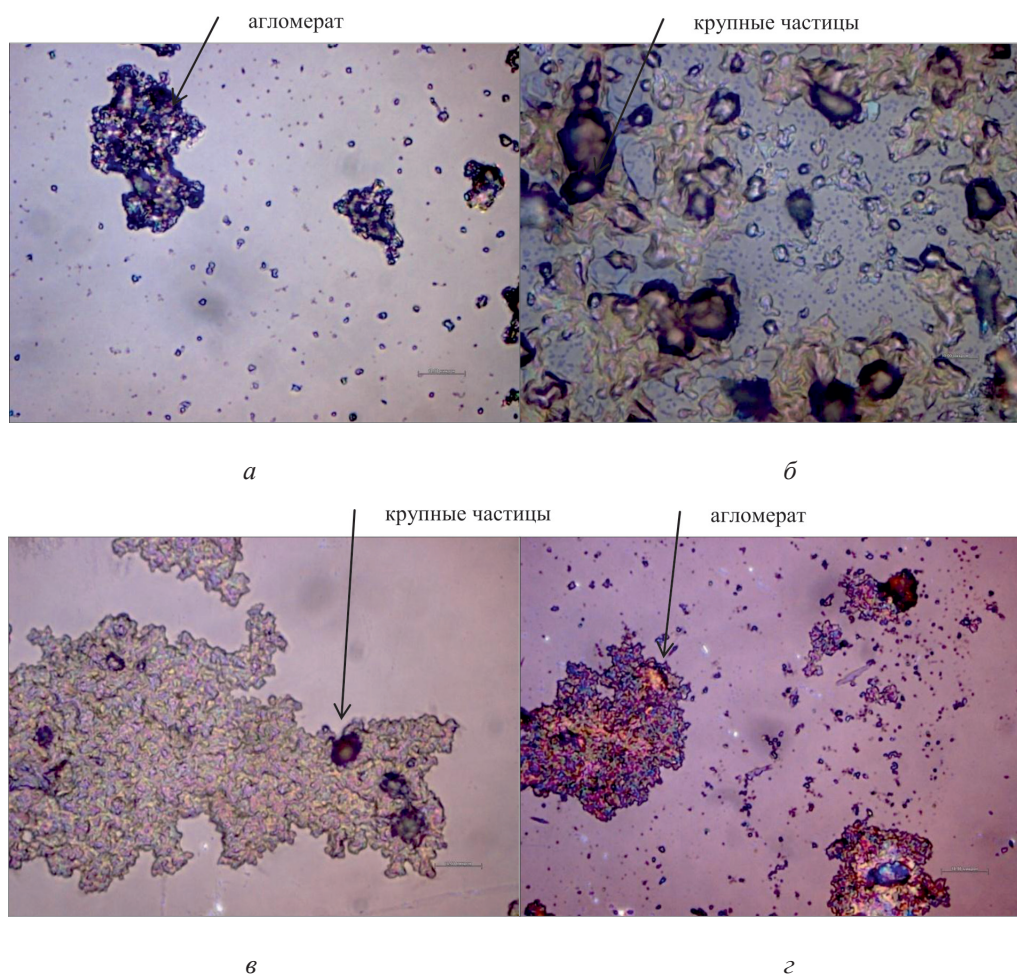


Рис. 3. Общий вид порошка № 3, $\times 1000$: а – в исходном состоянии; б – после первого нагрева; в – после диспергирования; г – после второго нагрева

Таблица 2

Измеренные значения размеров частиц порошков

№ порошка	Исходный размер, мкм	После 1 нагрева, мкм	После диспергирования, мкм	После 2 нагрева, мкм
1	от 0,5 до 3 мкм, крупные частицы до 8 мкм	от 0,5 до 2,5 мкм, крупные частицы до 8 мкм	от 0,3 до 1,5 мкм	от 0,3 до 1,2 мкм
2	от 0,4 до 2 мкм, крупные частицы до 2,8 мкм	от 0,4 до 1,7 мкм, отдельные частицы до 2,55 мкм	от 0,4 до 1,5 мкм	от 0,3 до 1,2 мкм
3	от 0,2 до 2 мкм	от 0,2 до 2 мкм, отдельные частицы до 7 мкм	от 0,4 до 1 мкм, отдельные частицы до 3,9 мкм	от 0,2 до 1,6 мкм
4	от 0,3 до 1,8 мкм, отдельные частицы до 4 мкм	от 0,3 до 1,5 мкм, отдельные частицы до 4 мкм	от 0,3 до 1,5 мкм	от 0,3 до 1,8 мкм
5	от 10 до 30 нм		от 10 до 30 нм	

На оптическом микроскопе «Axiovert 200 MAT» не удалось изучить частицы порошка магнитной жидкости промышленного изготовления, т.к. капля образца покрывалась пленкой и не давала полной картины. Поэтому было проведено дополнительное исследование данной жидкости на скани-

рующем электронном микроскопе MIRA\\LMU с автоэмиссионным катодом. Для этого, каплю жидкости растворили в бензине, подсушили. Полученную пленку размером 3x3 мм исследовали на микроскопе в сканирующем режиме при различном увеличении (рис. 5).

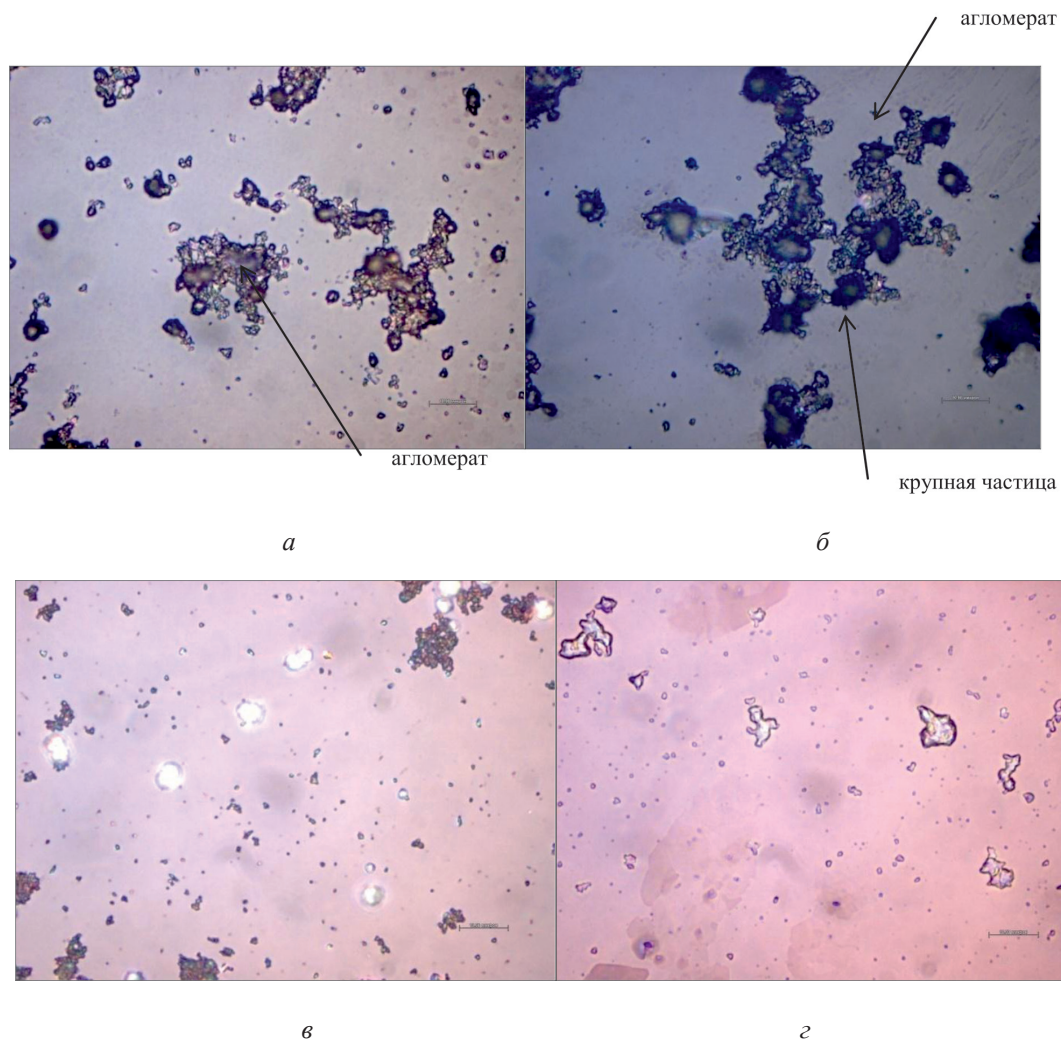


Рис. 4. Общий вид порошка № 4, $\times 1000$: а – в исходном состоянии; б – после первого нагрева; в – после диспергирования; г – после второго нагрева

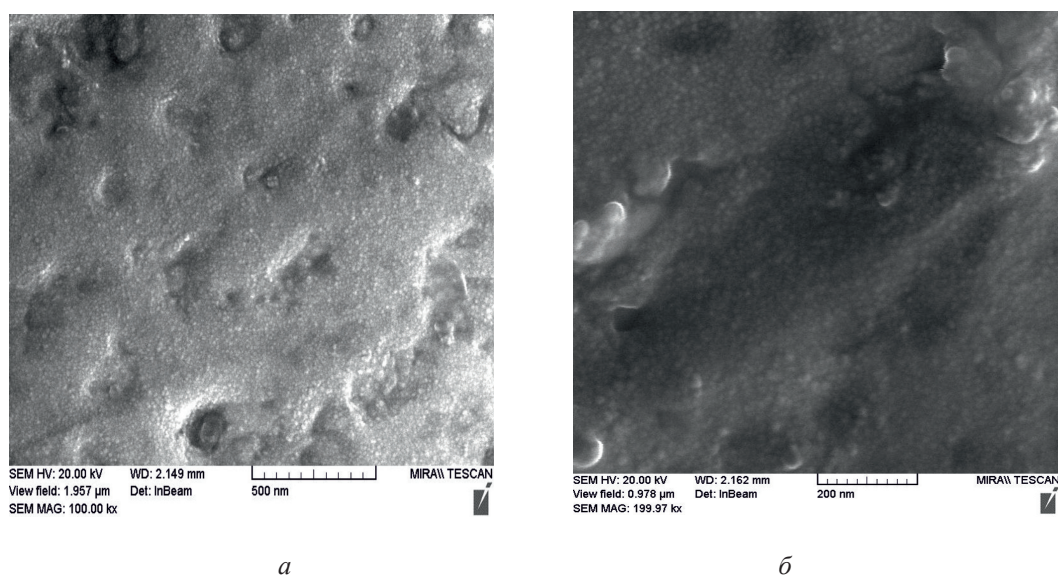


Рис. 5. Вид пленки в сканирующем режиме при увеличении: а – $\times 100000$; б – $\times 200000$

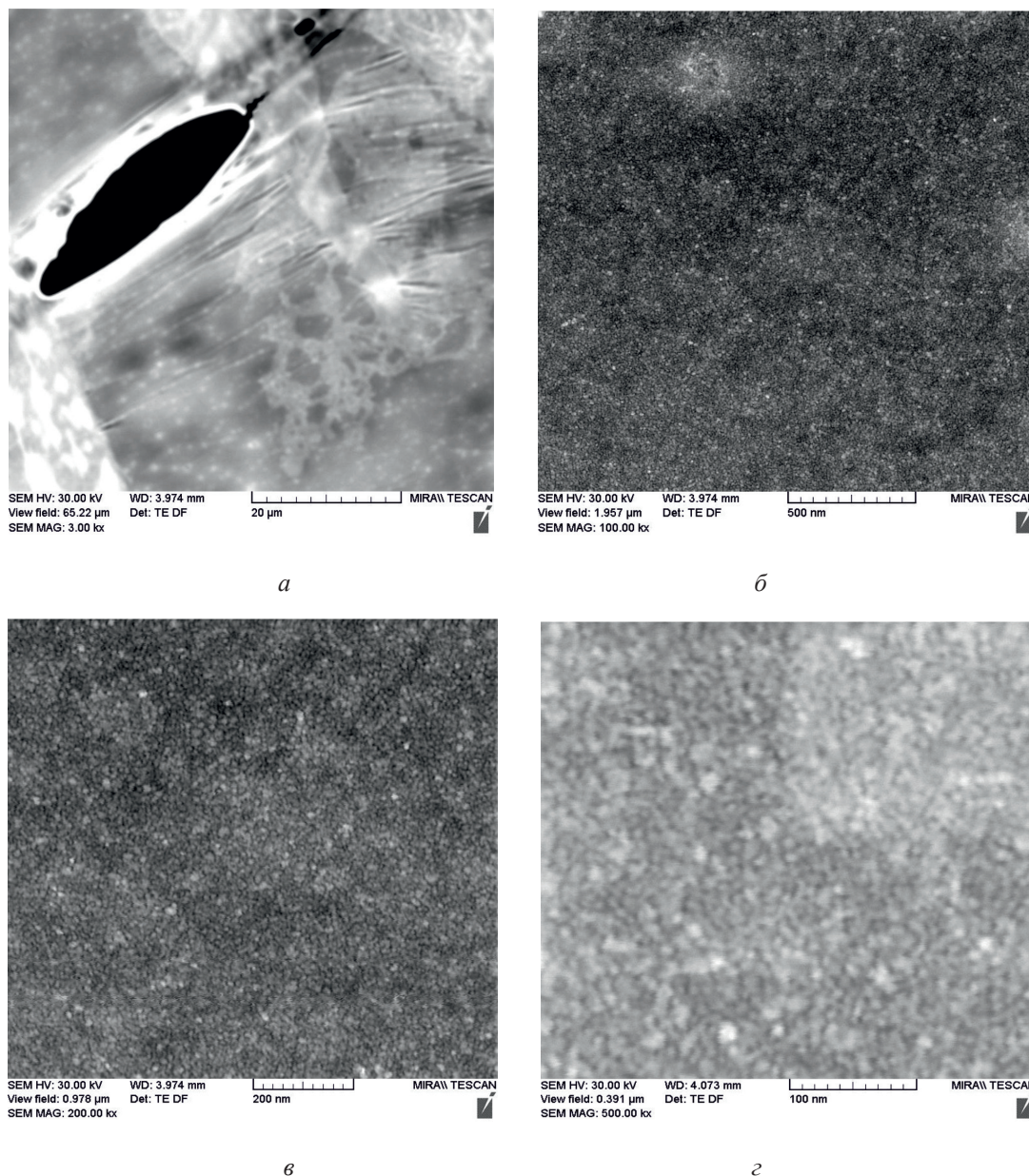


Рис. 6. Вид пленки в сканирующем режиме на просвет при увеличении:
а – $\times 3000$ (с дыркой в пленке); б – $\times 100000$; в – $\times 200000$; г – $\times 500000$

Из рис. 5 видно, что исследуемая пленка содержит частицы твердого вещества. При дальнейшем увеличении наблюдалось коробление пленки. Поэтому, далее магнитную жидкость № 5 исследовали на просвет. Для этого на воду нанесли коллоидный раствор целлюлозы, который растекся по ее поверхности атомарным слоем. На этот слой фиксировали магнитную жидкость. Дали подсохнуть. Аккуратно брали кусочек и смотрели при помощи микроскопа в сканирующем режиме на просвет при различных увеличениях (рис. 6).

На представленных рисунках наблюдается зернистость твердой фазы размерами 10-30 нм.

Кроме этого, был определен химический состав магнитной жидкости № 5. Исследование проводилось на электронно-зондовом рентгеновском микроанализаторе MIRA-INCA X-Max сфокусированным пучком электронов при следующих условиях: напряжение на аноде 15 кВ, ток $0,2 \cdot 10^{-9}$ А. Анализ и обработка результатов осуществлялась по программе INCA X-Max. Результаты исследования представлены в табл. 3.

Измерительный комплекс для измерения магнитной индукции магнитной жидкости

Для измерения магнитной индукции синтезируемой жидкости, был создан комплекс, который позволил нам произвести необходимые измерения и обработку полученных данных. Исследуемый образец – около 50 мл жидкости помещался в химический стакан и устанавливался на песчаную баню: полностью окруженный специально подобранным мелкозернистым речным песком в алюминиевой таре, ставился на лабораторную электроплитку мощностью 300 Вт. В жидкость опускался датчик магнитного поля, собранный нами на микросхеме AD22151YRZ – биполярный датчик Холла [14]. Для возможности работы датчика в погруженном состоянии в жидкости и воздействии температур в пределах до 150 °С, он был залит универсальным термостойким силиконом Soudal.

Питание датчика осуществлялось от автономного источника питания, собранного на микросхеме KP142EH5A [15] и размещенного в корпусе для РЭА. Один такой датчик погружался в исследуемую жидкость полностью, другой для коррекции показаний зажимался в штативе с таким же расположением. В жидкость погружались на разную глубину две термопары типа К (хромель-алюмель) для более точного измерения температуры (данные усреднялись). Для измерения ТЭДС использовался бытовой мультиметр DT838. Все датчики магнитного поля

и термопары с помощью коммутирующего блока в корпусе для РЭА G1011 65*38*22 через разъем DB-37 подключались к цифровому многоканальному самописцу «S-Recorder-E» для снятия показаний, которые передавались по USB-порту на персональный компьютер. При этом с каждого датчика на «S-Recorder-E» поступали $U_{вх}$ и $U_{вых}$ каждого датчика. Далее по выше приведенной формуле вычислялось значение магнитной индукции B в Гауссах; с каждой из термопар получали значение ТЭДС, и с помощью аппроксимирующих таблиц [17] переводили в градусы °С.

На комплексе было подтверждено поведение магнитной жидкости с образованием ячеистых и «ежиковых» (по Фертману [11]) структур, которые порождаются силовыми линиями магнитного поля (использован неодимовый NdFeB магнит Ш-70-20 производства ООО «НПО Реалекс» [14] с намагничиванием N40 и сцеплением приблизительно 115 кг).

Основные результаты экспериментов

Эксперименты по измерению магнитной индукции исследуемых магнитных жидкостей проводились в два этапа:

1 – определение зависимости магнитной индукции от температуры МЖ в исходном состоянии;

2 – определение зависимости магнитной индукции от температуры МЖ после диспергирования. Диспергирование проводилось в ультразвуковой ванне в течение 5 минут.

Таблица 3

Химический состав образца жидкости № 5 (нормализован)

Химический элемент	C	O	S	Cl	Fe	Итог
в %	15,89	26,55	0,22	0,40	56,94	100,00

Таблица 4

Изменение магнитной индукции B от температуры t до диспергирования

$t, ^\circ\text{C}$	Магнитная индукция жидкости в Гс ($1\text{Гс} = 10^{-4}\text{Тл}$) с объемной концентрацией твердой фазы				
	2%	4%	6%	8%	Fe01 (5%)
30	64,06	80,81	84,27	85,25	89,01
40	65,43	82,16	82,22	82,82	90,23
50	67,62	81,72	82,74	84,52	91,53
60	74,02	84,12	80,46	85,70	89,16
70	75,40	83,62	81,41	87,26	83,32
80	73,92	86,20	79,35	76,69	82,03
90	75,97	85,94	80,00	79,11	81,60
100	76,10	86,12	81,18	81,85	82,03

**Изменение магнитной индукции при нагревании магнитной
жидкости при различных значениях объемного содержания
твердой фазы (до диспергирования)**

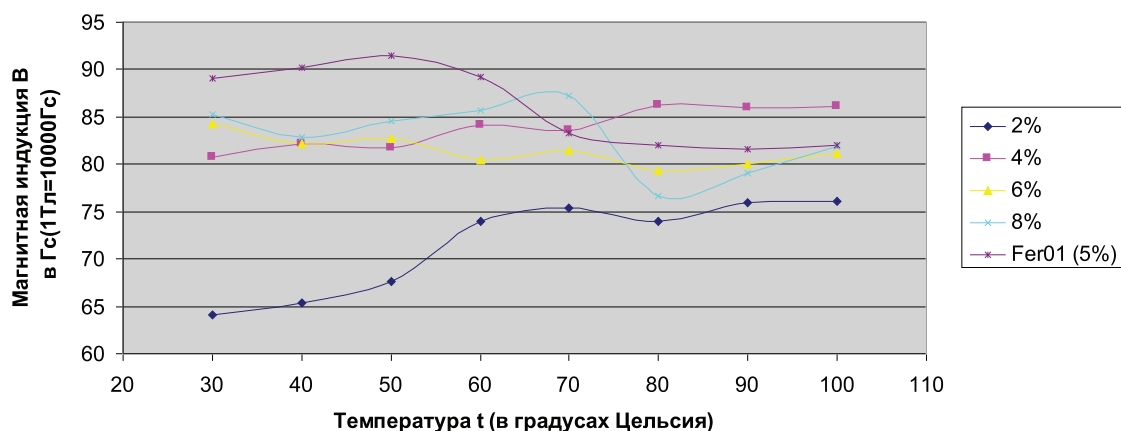


Рис. 7. Изменение магнитной индукции до диспергирования

Для этого каждый образец МЖ нагревался в диапазоне температур от 30 °С до 100 °С, и через каждые 10 °С измерялась величина магнитной индукции. Измерения проводились 3 раза. Получены средние значения магнитной индукции, по которым и были построены графики зависимости изменения магнитной индукции от температуры в исследуемых жидкостях (до и после диспергирования). В работе используется единица измерения значения магнитной индукции в гауссах (1 Гаусс = 10^{-4} Тл) ввиду диапазона изменения измерений магнитной индукции. Результаты измерения магнитной индукции МЖ до диспергирования представлены в табл. 4 и рис. 7.

Полученные зависимости (табл. 4, рис. 7) качественно показывают увеличение магнитной индукции с увеличением температуры в данном диапазоне для образцов магнитной жидкости с малым c_T : 2% и 4%. Однако у

жидкости с содержанием твердой фазы 2% абсолютные значения магнитной индукции невелики (от 64,06 Гс до 76,1 Гс), вследствие малого количества частиц магнетита. Для магнитной жидкости с большей концентрацией твердой фазы в жидкости — при 6% и 8% и жидкости Fe01[4] характерно уменьшение значения магнитной индукции: от 84,2 Гс до 81,8 Гс — при c_T 6%, от 85,25 Гс до 81,85 Гс — при c_T 8%, от 89,01 Гс до 82,3 Гс — для жидкости Fe01.

Из табл. 4 и рис. 7 легко заметить, что в изученном диапазоне температур оптимальной (стабильной, и даже с увеличени-

ем значения магнитной индукции) является магнитная жидкость с объемным содержанием твердой фазы 4% (увеличение B от 80,81 Гс до 86,12 Гс).

Полученные зависимости хорошо согласуются и с результатами микроскопических исследований. На рис. 1а и 1б и из таблицы 3 видно, что при $c_T = 2\%$ средний размер частиц после нагрева уменьшился незначительно, следовательно, увеличение магнитной индукции происходит из-за большего количества частиц. Также легко заметить, что большой объем жидкой фазы ведет к образованию агломератов.

Жидкости с $c_T = 6\%$ (рис. 3а, 3б) и $c_T = 8\%$ (рис. 4, а, б) показывают, что при таком объемном содержании твердой фазы, что определяется и их плотностями 1,25 г/см³ и 1,34 г/см³ соответственно, крупные частицы находятся как и в исходном состоянии, так и после нагрева. Для них характерно уменьшение (без скачка) значения магнитной индукции жидкости, что также наблюдаем и для жидкости Fe01.

Используя рис. 5, 6 и табл. 3, легко объяснить такие высокие первоначальные значения магнитной индукции (89,01 Гс), которые возможно получаются вследствие равномерно распределенных наночастиц (свободного их заполнения и меньшей осаждаемости) и применяемой основы — керосина и ПАВ — олеиновой кислоты. Поэтому такие жидкости и им подобные, разбавленные керосином, чаще всего и применяются для демонстрации «красивых» свойств магнитных жидкостей.

Магнитная жидкость с $c_T = 4\%$ на рис. 2, а и б наиболее однородна из МЖ на водной основе, как по размерам частиц, так и по равномерной степени заполнения, что и определяет ее оптимальные свойства по значению магнитной индукции.

Конечно, надо заметить, что при дальнейшем нагревании во всех образцах будет происходить уменьшение значения магнитной индукции, что хорошо согласуется с теорией магнитных жидкостей [1]. Однако в заданном температурном интервале магнитная жидкость на водной основе с $c_T = 4\%$ является оптимальной в рамках поставленной физической задачи.

Рассмотрим, что происходит с образцами жидкостей после диспергирования. Из данных табл. 5 и рис. 8, легко заметить, что диспергирование приводит к увеличению магнитной индукции только для жидкостей с $c_T = 2\%$ (от 79,16 Гс до 84,07 Гс) и $c_T = 4\%$ (от 77,26 Гс до 92,76 Гс), для остальных жидкостей диспергирование не приводит к лучшим результатам. При 6%

и 8%, а также для жидкости Fe01 мы наблюдаем уменьшение значений величины магнитной индукции, что характеризует эти жидкости как достаточно нестабильные системы.

Полученные данные подтверждают правильность выбора оптимальной жидкости – магнитной жидкости на водной основе при $c_T = 4\%$.

Результаты микроскопических исследований диспергированных жидкостей хорошо согласуются с теорией получения зольей методом диспергирования в коллоидной химии [18, 19].

Из рис. 1 в и г и табл. 2 видно, что для жидкости с $c_T = 2\%$ произошло уменьшение среднего размера частиц почти в 2 раза (что примерно соответствует жидкости с $c_T = 4\%$ до диспергирования), что и определяет достаточно высокие значения величины магнитной индукции. На рис. 2, в и г отмечаем жидкость с $c_T = 4\%$ как самую однородную по размерам частиц, так и по равномерной степени заполнения.

Таблица 5

Изменение магнитной индукции В от температуры t после диспергирования

t, °C	Магнитная индукция жидкости в Гс (1Гс = 10 ⁻⁴ Тл) с объемной концентрацией твердой фазы				
	2%	4%	6%	8%	Fer01 (5%)
30	79,16	77,26	75,83	69,52	63,75
40	85,85	97,88	83,61	86,95	77,34
50	92,14	94,49	85,92	85,94	82,21
60	88,82	96,57	87,21	81,14	80,42
70	93,13	89,76	76,04	78,64	79,27
80	94,69	91,20	81,76	75,26	71,34
90	86,59	91,10	79,35	69,28	70,09
100	84,07	92,76	76,25	61,55	65,12

Изменение магнитной индукции при нагревании магнитной жидкости при различных значениях объемного содержания твердой фазы (после диспергирования)

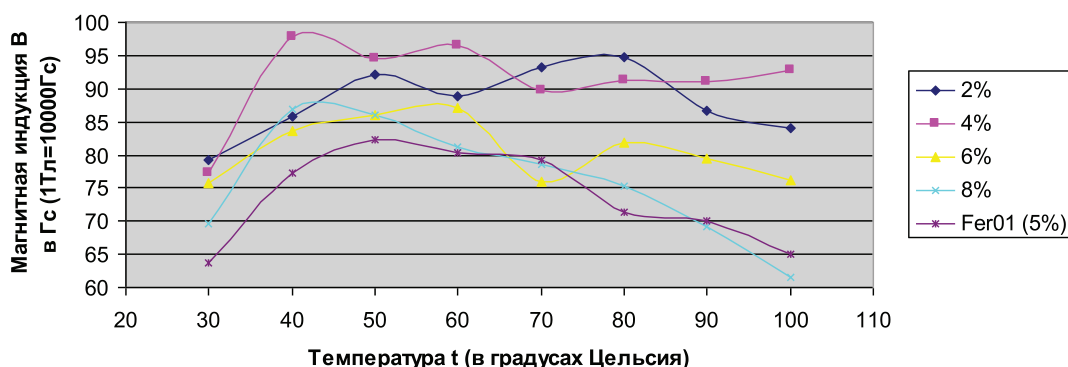


Рис. 8. Изменение магнитной индукции после диспергирования

Для жидкостей с $c_T = 6\%$ и $c_T = 8\%$ наблюдаем уменьшение размера частиц и образование агломератов. Под влиянием ультразвуковых колебаний в системе возникают местные, быстро чередующиеся сжатия и расширения вещества, приводящие к образованию мельчайших полостей – каверн (кавитационных пузырьков), сейчас же исчезающих под влиянием внешнего давления. Возникающие при захлопывании каверн ударные волны разрушают твердую фазу, т.е. диспергируют ее.

Ультразвуковые волны, согласно [19, с. 251] могут вызывать не только диспергирование, но и коагуляцию, которая происходит в результате скопления частиц в узлах колебаний и движения меньших частиц по направлению к большим. В результате такой коагуляции при диспергировании быстро достигается равновесие, при котором диспергируется столько же вещества, сколько его выпадает из золя в виде осадка.

Надо отметить, что во всех образцах на водной основе после диспергирования происходит коагуляция полимерных образований (частицы белого порошка на рис. 1, в, г – рис. 4 в, г), что объясняется примененным ПАВ для получения данных жидкостей.

Для магнитной жидкости промышленного изготовления с низким содержанием твердой фазы (5%) диспергирование привело к уменьшению намагниченности.

Вывод: проведенные исследования и их анализ показал, что наиболее стабильной по изменению магнитной индукции с температурой является жидкость на водной основе с объемным содержанием твердой фазы 4% как до, так и после ультразвукового диспергирования.

Заключение

Все поставленные задачи исследовательской работы полностью выполнены. В ходе серии успешных экспериментов получена магнитная жидкость, обладающая оптимальными свойствами для решения исходной физической задачи. Методика проведения экспериментов подробно изложена в исследовательской работе с большим количеством фотографического материала.

Проведенные исследования показали, что наиболее стабильной по изменению магнитной индукции является жидкость на водной основе с объемным содержанием твердой фазы 4%.

Результаты данной исследовательской работы могут быть использованы при изготовлении магнитной жидкости для ее применения в магнитножидкостных уплотнителях, работающих в неоднородном магнитном поле при температурных нагрузках в пределах от 30 °С до 100 °С.

Список литературы

1. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. – Рига: Зинатне, 1986. – 386с.
2. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Крипов Н.С. Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. – 240с.
3. Магнитные жидкости в машиностроении /Д.В. Орлов и др.: Под общей ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгорнова. – М.: Машиностроение. 1993. – 272с.
4. Бибик Е.Е. Приготовление феррожидкостей. // Коллоидный журнал. – 1973. – Т.35, № 6. – с. 1141.
5. Бибик Е.Е., Бузунов О.В. Достижения в области получения и применения ферромагнитных жидкостей /ЦНИИ «Электроник». – М., 1979. – 60с.
6. <http://nauka.relis.ru/34/0211/34211036.htm>
7. <http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm%20TARGET>
8. <http://khd2.narod.ru/technol/magliq.htm#MECHANICAL>
9. Морозова Е. Исследование физических свойств магнитных жидкостей, полученных химическими и механическими способами. XIII Школьные Харитоновские чтения. Межрегиональная олимпиада школьников «Будущие исследователи – будущее науки». Тезисы. Саратов: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013, с.65-67.
10. Морозова Е. Исследование физических свойств магнитных жидкостей, полученных химическими и механическими способами. – Лицейский вестник. Сборник научно-исследовательских и проектных работ учащихся. Саратов: МБОУ ДПОС «Методический центр», 2013, с. 40-45.
11. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: Справ. пособие. Минск: Выш. шк., 1988. – 184 с.
12. Морозова Е., Глушкова Н. Получение магнитной жидкости в условиях школьной лаборатории. – Лицейский вестник. Сборник научно-исследовательских и проектных работ учащихся. Саратов: МБОУ ДПОС «Методический центр», 2012, с. 48-52.
13. Алексашкин И.В., Першина Е.Д., Каздобин К.А. Оптимизация условий синтеза магнитной жидкости. // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия», 2010, Том 23 (62), № 3, с. 227-235.
14. <http://www.magnitos.ru>
15. Даташит на AD22151YRZ.
16. Аналоговые и цифровые интегральные микросхемы: Справочное пособие. / С.В.Якубовский, Н.А.Барканов, Л.И.Ниссельсон и др. Под ред. С.В.Якубовского. – М.: Радио и связь, 1984. – 432 с.
17. Термопары. Номинальные статистические характеристики преобразования. ГОСТ Р 8.585-2001. Госстандарт России, ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 78 с.
18. Щукин Е.Д., Перцов А.В. Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Высш. шк., 2004. – 445с.
19. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1975. – 512 с.