

УДК 53.098; 532.612.4
PACS 47.65.Cb, 47.80.-v, 47.55.nb

Экспериментальное исследование поверхностного натяжения магнитной жидкости и ее основы в магнитном поле

К. А. Хохрякова^{1*}, И. А. Мизева¹, А. В. Шмыров¹, А. В. Лебедев¹, А. И. Шмырова²,
Е. В. Колесниченко^{1,2}

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

² Пермский национальный исследовательский университет, Пермь

* bca@icmm.ru

Влияние внешнего магнитного поля на поверхностное натяжение магнитной жидкости является актуальной задачей, неоднократно рассматривавшейся теоретически при сравнительно малом количестве экспериментальных исследований. Целью данной работы является систематическое экспериментальное исследование поверхностного натяжения магнитной жидкости и ее жидкой немагнитной основы статическим и динамическим методами. Для этого проведено детальное исследование физико-химических свойств магнитной жидкости с магнетитовыми частицами, стабилизированными олеиновой кислотой, на основе декана. Систематически изучаются зависимости поверхностного натяжения и вязкости немагнитной жидкой основы от концентрации в ней стабилизирующей жидкости и температуры. Для измерения поверхностного натяжения был использован авторский модифицированный метод капиллярных волн, результаты которого верифицировались, там, где это возможно, с данными, полученными с помощью коммерческого тензиометрического прибора высокого класса точности. Показано, что с увеличением концентрации олеиновой кислоты в декане увеличивается поверхностное натяжение раствора. С ростом напряженности внешнего вертикального магнитного поля поверхностное натяжение магнитной жидкости на основе декана уменьшается, что согласуется с теоретическими результатами других авторов. Полученные результаты подтверждают гипотезу о физическом механизме изменения поверхностного натяжения магнитной жидкости в магнитном поле вследствие перераспределения магнитных частиц в приповерхностном слое.

Ключевые слова: магнитная жидкость; поверхностное натяжение; интерферометрия; тензиометрия; магнитное поле; капиллярные волны

Поступила в редакцию 01.11.2022; после рецензии 10.01.2023; принята к опубликованию 10.01.2023

Experimental study of the surface tension of a magnetic fluid and its liquid base

С. А. Khokhryakova^{1*}, I. A. Mizeva¹, A. V. Shmyrov¹, A. V. Lebedev¹, A. I. Shmyrova²,
E.V. Kolesnichenko^{1,2}

¹Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

²Perm State University, Perm, Russia

* bca@icmm.ru

The action of an external magnetic field on a magnetic fluid surface tension is a topical problem

that has been repeatedly addressed theoretically, with a relatively small number of experimental studies conducted. The purpose of our work is systematic experimental research on the surface tension of a magnetic fluid and its non-magnetic liquid base by static and dynamic methods. We carried out a detailed study of the physicochemical properties of a decane-based magnetic fluid with magnetite particles stabilized by oleic acid. The dependences of the surface tension and viscosity of the non-magnetic liquid base on the concentration of the stabilizing liquid in it and temperature were systematically studied. A modified capillary waves method (CWM) was used to measure the surface tension; the results were verified with data obtained using a high-precision commercial tensiometric device. It is shown that with an increase in the concentration of oleic acid in decane, the surface tension of the solution increases. With an increase in the external vertical magnetic field strength, the surface tension of the decane-based magnetic fluid decreases, which is consistent with theoretical results of other authors. The obtained results confirm the hypothesis about the physical mechanism of the change in the surface tension of a magnetic fluid in a magnetic field due to the redistribution of magnetic particles in the near-surface layer.

Keywords: magnetic fluid; surface tension; interferometry; tensiometry; magnetic field; capillary waves

Received 01 November 2022; revised 10 January 2023; accepted 10 January 2023

doi: 10.17072/1994-3598-2023-1-47-56

1. Введение

Интерес к поверхностному натяжению (σ) магнитных жидкостей (МЖ) возник в 1980-е гг., начиная с работы по исследованию неустойчивости раздела магнитной и немагнитной жидкостей в однородном, тангенциальном к межфазной поверхности, поле [1]. Эта работа не выявила зависимости поверхностного натяжения от поля. Позднее было показано, что поверхностное натяжение МЖ, измеренное различными методами при комнатной температуре в отсутствие магнитного поля, в пределах погрешности оказывалось равно поверхностному натяжению жидкости-основы МЖ [2]. В то же время теоретически было установлено, что на границе раздела «магнитная – немагнитная жидкость» в нормальном к поверхности МЖ магнитном поле (H_{\perp}) существует скачок намагнитченности, физическая природа которого заключается в действии сил со стороны неоднородного в переходном слое магнитного поля на магнитные частицы [3]. Таким образом, при отсутствии магнитного поля поверхностное натяжение МЖ зависит от взаимодействия магнитных частиц и молекул жидкой фазы, а во внешнем поле поверхностное натяжение определяется взаимодействием магнитных частиц, а также изменением их концентрации в приповерхностном слое [2, 3].

В работе [4] была описана модель, в которой на поверхностное натяжение границы раздела «МЖ – немагнитная жидкость» влияют как нормальная, так и тангенциальная компоненты магнитного поля. Позднее на основе термодинамического и статистического подходов были получены приближенные согласующиеся между собой выражения для коэффициента поверхностного натяжения на границе раздела двух фаз ферроколлоида, отличавшихся концентрацией дисперсных частиц [5]. Дальнейшие теоретические исследования поверх-

ностного натяжения между слабо и сильно концентрированными фазами МЖ в приближении средне-сферической модели диполь-дипольного взаимодействия показали анизотропию свойств межфазной границы [6]: с ростом напряженности поля, продольного границе раздела, коэффициент поверхностного натяжения слабо увеличивался, а в перпендикулярном поверхности слоя – наблюдался спад порядка сотых долей процента.

Теоретическая модель плоской межфазной поверхности на границе магнитной и несмешивающейся с ней немагнитной жидкостью [7, 8] показала, что собственные значения тензора поверхностного натяжения монотонно возрастают с ростом тангенциальной составляющей магнитного поля и монотонно убывают с увеличением его нормальной компоненты.

Прямых экспериментальных исследований, посвященных измерению межфазного натяжения МЖ в магнитном поле, крайне мало. На сегодняшний день можно выделить два основных подхода, позволяющих определить σ опосредованно. Исторически первые исследования заключались в расчете межфазного натяжения на границе магнитной и немагнитной жидкостей по степени деформации (удлинения) взвешенной капли МЖ в тангенциальном магнитном поле [9], а также в процессе сопоставления формы вытягивающейся в продольном поле капли МЖ с модельной [10]. Однако особенность этих экспериментов состоит в том, что граница раздела фаз является сферической, или эллипсоидальной, что накладывает свои особенности на результат [6].

Качественно иной способ экспериментального измерения натяжения заключается в определении длины волны зарождающейся пиковой неустойчивости свободной и межфазной поверхностей в ортогональном магнитном поле [11]. Данный подход отличается тем, что магнитное поле должно достигать критического значения для возникновения

неустойчивости поверхности, тогда как для полей меньшей напряженности метод уже не работает.

Следует отметить, что интерес к данному вопросу на сегодняшний день не угасает в связи с широким применением МЖ в микрофлюидике [12], исследованием процессов образования кластеров в МЖ при достаточно длительном воздействии магнитного поля на МЖ [13], а также изучением влияния сурфактанта, используемого при приготовлении МЖ, на реологические свойства получаемых образцов [14].

В работе [15] экспериментально были получены первые оценки влияния нормального и тангенциального к плоской свободной поверхности магнитной жидкости магнитных полей. Влияние тангенциального магнитного поля исследовалось методом отрыва кольца, где сила отрыва оценивалась по показаниям лабораторных весов с точностью измерений до 0,001 г. При этом отсутствовало термостатирование установки, а измерения температуры в течение опыта производились с помощью термометра, показания которого достаточно инертны к изменениям температуры окружающей среды и исследуемых жидкостей. Влияние вертикального поля исследовалось только для МЖ на основе керосина на одной рабочей частоте. Поскольку керосин представляет собой смесь жидких углеводородов (молекул разной длины), то даже при отсутствии поля и качественном термостатировании установки значения поверхностного натяжения тем не менее испытывают флуктуации.

Поскольку МЖ изготовлены на немагнитной основе, чаще всего керосина или декана, а сами частицы покрыты молекулами вещества-стабилизатора, олеиновой кислоты, то определенный интерес вызывает исследование как самих жидких немагнитных основ для МЖ, в частности декана, так и их растворов с добавлением вещества-стабилизатора.

Цель данной работы – провести систематическое экспериментальное исследование поверхностного натяжения магнитной жидкости и ее немагнитной основы, установить зависимости натяжения от температуры, концентрации жидкости-стабилизатора и напряженности внешнего нормального к поверхности магнитного поля.

2. Методика эксперимента

Измерение поверхностного натяжения МЖ в ортогонально направленном магнитном поле H_z осуществлялось с помощью модифицированного МКВ [16, 17], который ранее не применялся к непрозрачным средам. Значимой особенностью модифицированного МКВ является возможность проведения измерения во внешних полях. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. МЖ помещалась в кювету 1 с внутренним диаметром 6 см, находящуюся в магнитном поле, создаваемом катушками Гельмгольца 2. На сво-

бодной поверхности МЖ среднечастотными акустическими колебаниями (150–800 Гц) от миниатюрного динамика 3, который был подключен к генератору гармонических колебаний, создавались капиллярные волны. Для локализации воздействия акустических волн от механически колеблющейся мембраны динамика использовалась медная трубка-волновод 4 с керамическим наконечником, который подводился к границе раздела на расстояние порядка 0.1 мм. Длина волновода 4, которая подбиралась таким образом, чтобы динамик можно было расположить за пределами катушек Гельмгольца, составила 10 см.

Регистрация мгновенного рельефа профиля капиллярных волн на межфазной поверхности проводилась методом оптической интерференции. Луч от He-Ne лазера 5 при помощи системы линз был преобразован в плоскопараллельный пучок радиусом ~1 см. Опорный пучок, имеющий плоский волновой фронт, формировался при отражении исходного пучка от плоскопараллельной стеклянной пластины 6. Предметный пучок проходил через делитель светового пучка 7, отражался от свободной поверхности МЖ 8 и интерферировал с опорным на матрице видеокамеры 9 Ваumer TXG50 (Ваumer, Германия). Полученное изображение передавалось на персональный компьютер, на котором с помощью программного пакета IntelliWave (Mahr GmbH, Германия) осуществлялись расшифровка интерферограмм и восстановление формы волнового фронта. Вся интерференционная система располагалась на весовом антивибрационном столике 10 для минимизации возможных посторонних возмущений на поверхности исследуемого слоя жидкости.

Видеокамера и акустический динамик питались от двухканального генератора сигналов специальной формы Rigol DG 1022 одновременно, что позволяло синхронизировать работу обоих приборов по частоте и амплитуде с задаваемым сдвигом фаз.

Полученные 3D профили $z(\mathbf{r})$ поверхности были аппроксимированы при помощи уравнения затухающей цилиндрической волны [18, 19]:

$$z(\mathbf{r}) = \frac{A}{\sqrt{r}} e^{-\beta r} \Re \left\{ e^{-i(\omega t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \right\} + z_0, \quad (1)$$

где A – амплитуда волны, \mathbf{r} – радиус вектор точки, z_0 – константа, характеризующая высоту невозмущенной поверхности, ω – частота вынуждающих колебаний, \mathbf{k} – волновой вектор. При обработке изображения впервые выполнена интерполяция полного трехмерного волнового профиля волны на поверхности жидкости, что обеспечивает высокую точность метода. В программном пакете для обработки профиля капиллярных волн реализованы алгоритмы исключения из расчета крупномасштабных паразитных полей, автоматического поиска центра цилиндрической волны. Реализованный подход позволяет определять волновой вектор \mathbf{k} с

точностью до 0.1 % и коэффициент затухания пространственных возмущений границы раздела β с точностью до 0.5 %.

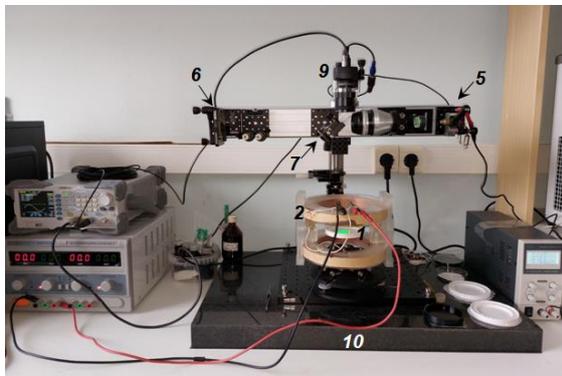
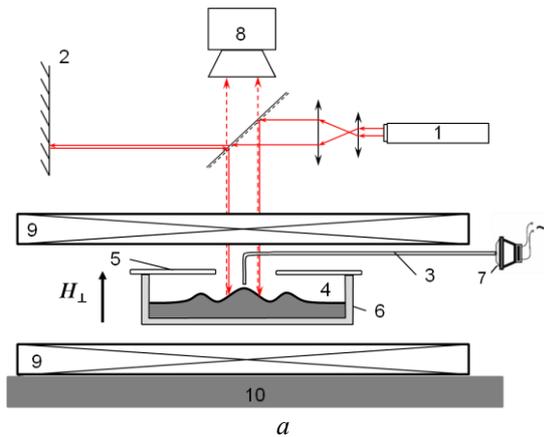


Рис. 1. Схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки: 1 – рабочая ячейка, 2 – катушки Гельмгольца, 3 – динамик, 4 – волновод, 5 – лазер, 6 – опорная поверхность, 7 – делитель светового пучка, 8 – свободная поверхность МЖ, 9 – цифровая видеокамера, 10 – весовой антивибрационный стол

Для создания однородного вертикального магнитного поля использовались катушки Гельмгольца радиусом 6.26 см и числом витков 298, напряженность поля которых в зависимости от тока подчиняется следующему закону $H = 1.37 I$. Данные катушки питались от стабилизированного источника постоянного напряжения Mastech DC Power Supply (HY3003D-2, Китай) током I до 4 А и с однородностью поля не менее 98 % в центральной части кюветы.

В ходе эксперимента по возбуждению на свободной поверхности слоя жидкости капиллярных волн отсутствовало принудительное термостатирование установки ввиду сложности измерительной интерференционной части в целом, а также с целью минимизации возможных посторонних осцилляций, способных вносить дополнительные возмущения в общую волновую картину. Чтобы контролировать возможные температурные флук-

туации в данной системе, в ходе каждого отдельного измерения с поверхности исследуемой жидкости осуществлялось считывание температуры при помощи инфракрасного термометра. В пределах одного опыта, в том числе с включенным питанием обмоток катушек Гельмгольца, перепады температуры составляли не более 0.5 °С. По этой причине для более точного анализа данных далее были получены температурные зависимости поверхностного натяжения.

3. Свойства исследуемых жидкостей

Наиболее часто используемые МЖ как в научных исследованиях, так и в технических устройствах созданы на основе керосина и декана. В данной работе в качестве исследуемой жидкости были выбраны декан и созданная на его основе МЖ, стабилизированная олеиновой кислотой. Физико-химические свойства использованных в эксперименте жидкостей представлены в таблице. Здесь плотность ρ определялась путем взвешивания жидкости в пикнометре известного объема на аналитических весах модели ВесТа АВ(1) (Россия); динамическая вязкость жидкости η определялась с помощью ротационного вискозиметра Брукфильда DV-II+Pro (США). Поверхностное натяжение жидкостей σ измерялось статическим методом отрыва кольца на коммерческом силовом тензиометре Kruss K100 (Kruss, Германия). Погрешность метода составляла не более 0.2% при условии термостатирования рабочей ячейки с точностью поддержания температуры в ней до 0,05 °С. Магнитные свойства жидкости, такие как начальная магнитная восприимчивость χ_0 , намагниченность насыщения M_S , концентрация магнитной фазы в МЖ φ , определялись с помощью магнитогранулометрического анализа по кривой намагничивания, измеренной методом дифференциальной прогонки, подробно описанном в [20]. Все вышеперечисленные свойства жидкостей измерялись при комнатной температуре (25±1) °С.

Физико-химические параметры жидкости основы и магнитной жидкости

Величина	МЖ декан	Декан
ρ , г/см ³	1.108 ± 0.005	0.730 ± 0.005
η , мПа·с	2.63 ± 0.02	0.92 ± 0.04
σ , мН/м	23.25 ± 0.02	23.67 ± 0.02
χ_0	0.69	
M_S , кА/м	21.25	
φ	0.26	

Известно, что физико-химические параметры растворов (вязкость, поверхностное натяжение [21, 22] и др.) сложно прогнозируемы в силу возможной неаддитивности вкладов каждого из компонент растворов в исследуемую величину. Поэтому нами были предприняты дополнительные исследования поверхностного натяжения σ раство-

ров олеиновой кислоты в декане при помощи метода отрыва кольца.

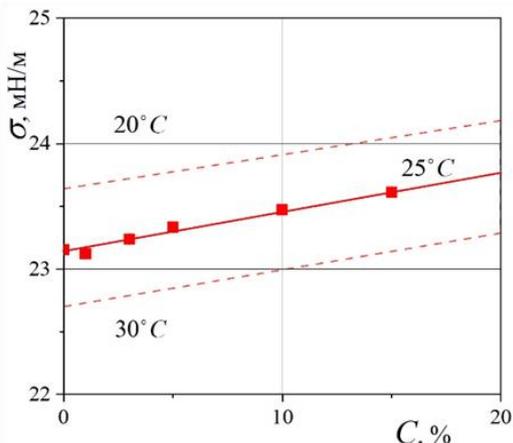


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения σ от концентрации раствора олеиновой кислоты в декане: точками обозначены измерения, выполненные при температуре $(24,82 \pm 0,02)$ °С, штриховыми линиями обозначен температурный коридор, соответствующий изменению температуры от 20 до 30 °С

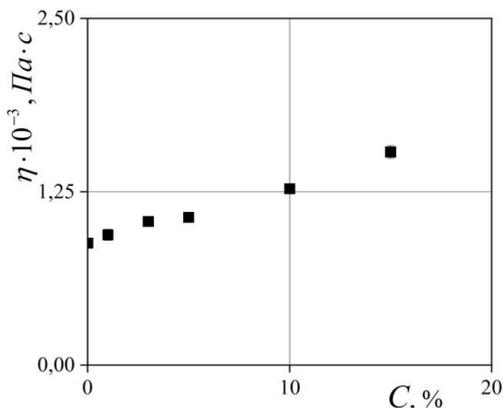


Рис. 3. Зависимость динамической вязкости η от концентрации раствора олеиновой кислоты в декане

На рис. 2 точками показано изменение поверхностного натяжения от концентрации, при фиксированной температуре 25 °С. Видно, что σ линейно растет с увеличением концентрации олеиновой кислоты в растворе. Согласно правилу Этвёша поверхностное натяжение σ для моножидкостей есть линейная функция от температуры [21, 22]. Данный подход использован для получения коридора температурной зависимости исследуемых растворов декана с различным процентным содержанием в нем олеиновой кислоты. На том же графике показан диапазон изменения поверхностного натяжения растворов при вариации температуры от 20 до 30 °С.

Следующий этап исследования состоял в измерении зависимости вязкости раствора олеиновой кислоты в декане. Измерения вязкости растворов

проведены с помощью вискозиметра Брукфильда при термостатировании исследуемого образца до комнатной температуры $(24,82 \pm 0,02)$ °С; результаты представлены на рис. 3. Погрешность измерения вязкости составляет от 0.02 до 0.05 сПз и лежит в пределах размеров экспериментальных точек. Таким образом, вязкость возрастает с увеличением концентрации олеиновой кислоты в декане.

4. Обработка результатов эксперимента, выполненного методом капиллярных волн

Модифицированный МКВ позволяет определить волновой вектор k и коэффициент затухания капиллярной волны β , характеризующий вязкость исследуемой среды [23]. Расчет поверхностного натяжения производится из дисперсионного соотношения для плоских волн, которое можно использовать также и в случае цилиндрических волн, как было показано в [23–24]. Поскольку амплитуда колебаний межфазной поверхности МЖ мала, ее поверхность можно рассматривать как линейную систему, для которой выполняется принцип суперпозиции. В этом случае вязкие, магнитные и гравитационно-капиллярные эффекты алгебраически складываются как независимые друг от друга:

$$\sigma = \frac{\rho}{k^2}(\omega^2 - gk) + \sqrt{\frac{8\omega\eta^2}{\rho} - \frac{4k\eta^2}{\rho}} + \frac{\mu_0 H}{k} \frac{\chi^2}{(1 + \chi_0)(1 + 2\chi_0)}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi\nu$ – угловая частота акустических колебаний; g – ускорение свободного падения, μ_0 – магнитная постоянная $\approx 1,25 \cdot 10^{-6}$ Н/А².

В данном выражении для поверхностного натяжения первое слагаемое – это формула Кельвина для гравитационно-капиллярных волн [18], второе и третье – учитывают влияние динамической вязкости η [23], последнее учитывает влияние однородного магнитного поля (H_{\perp}) [25–26]. В итоге получаем сумму независимых друг от друга слагаемых в дисперсионном соотношении.

5. Результаты эксперимента

При использовании МКВ важным подготовительным этапом является выбор диапазона возбуждаемых частот. С одной стороны, для надежной статистики необходимо получить как можно большее число волн, с другой – их число ограничено вязкостью среды. Исследование влияния частоты генерации капиллярных волн на значения поверхностного натяжения декана в отсутствие магнитного поля (рис. 4) показало, что σ среды, которое рассчитано по формуле (2), в пределах диапазона частот от 300 Гц до 700 Гц не зависит от

ν генерации сигнала (как при синхронизированной по частоте съемке, так и при рассинхронизированной) и в пределах погрешности сопоставимо со значением σ , полученном на тензиометре Kruss K100 (прямая линия). В работе показано, что приемлемый частотный диапазон для декана составляет от 300 до 700 Гц.

Наличие в объеме МЖ дополнительных веществ, в частности вещества-стабилизатора (олеиновой кислоты) в свободном, не связанном непосредственно с магнетитовыми частицами состоянии, влияет на поверхностное натяжение. Ввиду большего значения поверхностного натяжения вещества-стабилизатора молекулам олеиновой кислоты энергетически выгоднее находиться в объеме жидкости с меньшим поверхностным натяжением. Благодаря тепловому движению некоторое количество ее молекул всегда оказывается близ поверхности, что в совокупности может изменять поверхностное натяжение σ .

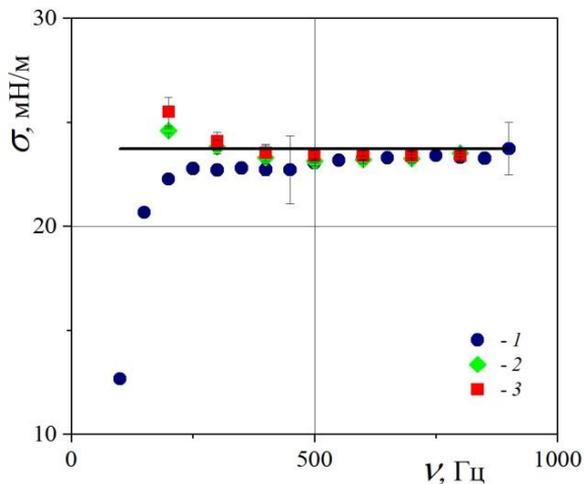


Рис. 4. Зависимость поверхностного натяжения декана от частоты возбуждения капиллярных волн при: 1 – синхронизированной съёмке; 2, 3 – съёмке со сдвигом фаз; прямой линией обозначены данные по измерению поверхностного натяжения на коммерческом тензиометре Kruss K100

Для подтверждения этой гипотезы было исследовано влияние концентрации олеиновой кислоты на поверхностное натяжение раствора декана. Для этого были приготовлены растворы 1, 3, 5, 10 и 15%-ным объемным содержанием олеиновой кислоты в декане. Выбор данного набора концентраций обусловлен имеющимися в литературе сведениями о содержании в готовых магнитных жидкостях свободных (несвязанных с магнетитовой частицей) молекул жидкости-стабилизатора [2].

Представленную на рис. 2 зависимость поверхностного натяжения σ от концентрации олеиновой кислоты в декане, полученную с помощью коммерческого тензиометра при температуре 25 °С, можно аппроксимировать уравнением вида

$$\sigma = 0.03 C + 23.14 \text{ (мН/м)}.$$

Следующим этапом было экспериментальное исследование поверхностного натяжения σ МЖ в нормальном к ее поверхности однородном магнитном поле H_{\perp} . Измерение $\sigma(H_{\perp})$ проводилось непосредственно в поле методом МКВ с использованием различной частоты ν . Поскольку вязкость МЖ существенно отличается от вязкости жидкости основы, то и диапазон рабочих частот возбуждения цилиндрической волны был сдвинут в область 200–250 Гц. На рис. 5 показаны зависимости поверхностного натяжения σ МЖ от напряженности внешнего магнитного поля для нескольких реализаций. Качественно все зависимости демонстрируют уменьшение σ с ростом магнитного поля на 5–6 %. Разные значения σ при нулевом поле свидетельствуют о различном температурном режиме при реализации каждого отдельного опыта в эксперименте, что связано с техническими трудностями по термостатированию данной установки в магнитном поле. В ходе каждой отдельной реализации эксперимента на той или иной частоте возбуждающих колебаний контроль температуры свободной поверхности с помощью инфракрасного термометра показывал максимальный перепад в 0.5 °С. Таким образом, изменение натяжения в 0.5 мН/м определенно не было связано с ростом температуры окружающей среды из-за нагрева катушек при увеличении тока в них. При этом стоит отметить, что пересчет внешнего магнитного поля во внутреннее с учетом размагничивающего фактора формы исследуемого слоя, близкого к 1, очевидно, уменьшит количественный спад $\sigma(H_{\perp})$, однако качественно зависимость сохранится.

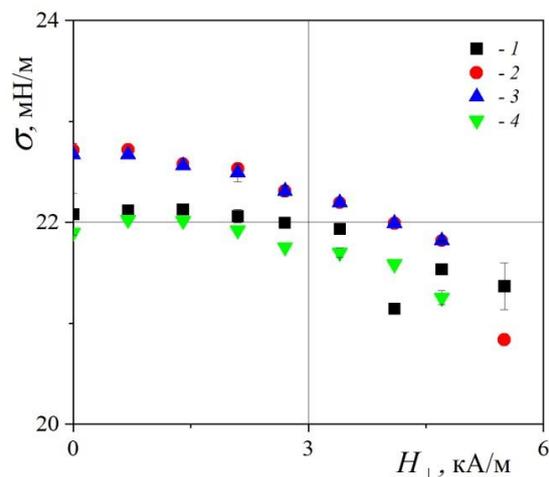


Рис. 5. Зависимость поверхностного натяжения МЖ в поперечном магнитном поле, полученная МКВ при ν , Гц: 1 – 180, 2 – 200, 3 – 235, 4 – 250

На рис. 6 представлена зависимость пространственного коэффициента затухания волн на поверхности β от концентрации жидкости-стабилизатора в жидкости-основе. Показано, что

при низкой частоте возбуждения (300 Гц), когда в поле зрения прибора укладывается небольшое количество волн, коэффициент β находится на пределе разрешающей способности метода, что не позволяет выявить зависимость от концентрации. При частотах 500 и 600 Гц значение величины β уверенно определяется, т.е. показано нарастание коэффициента β с концентрацией.

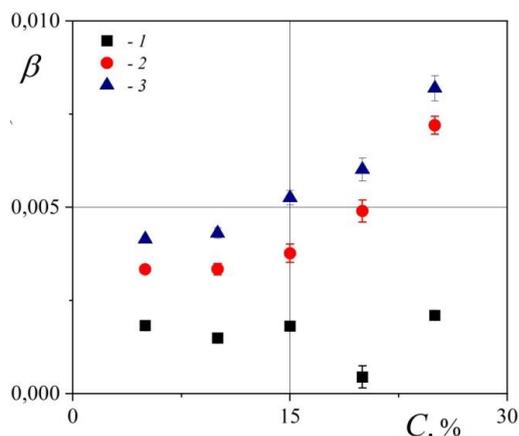


Рис. 6. Зависимость пространственного коэффициента затухания β от концентрации олеиновой кислоты в растворах декана, полученные МКВ при ν , Гц: 1 – 300, 2 – 500, 3 – 600

6. Обсуждение и заключение

Несмотря на множество теоретических и численных работ [3–8], посвященных решению вопросов о зависимости поверхностного и межфазного натяжения МЖ от величины и ориентации магнитного поля, на сегодняшний день известно крайне мало экспериментальных исследований. Возможность проведения таких экспериментов осложняется несколькими факторами. Во-первых, наличие внешнего магнитного поля делает невозможным использование существующих коммерческих тензиометров в магнитных полях, поскольку в них содержится множество деталей из ферро- и парамагнитных материалов, что исказит результаты измерений и скажется на последующей работе самого прибора. Во-вторых, существенно осложняет экспериментальное исследование неоднородный состав ферроколлоида.

Перечисленные выше осложняющие факторы привели к необходимости создания оригинальной исследовательской методики модифицированного МКВ, позволяющей проводить измерения во внешних полях. Особенность МКВ заключается в бесконтактном наложении периодических малоамплитудных возмущений межфазной поверхности и их регистрации с помощью цифровой интерферометрии, что дает преимущество при использовании этого метода во внешних силовых полях.

В случае использования МКВ угол колебаний плоской межфазной границы не превосходит по величине 0.1° . Поэтому в процессе измерения не нарушается взаимная ориентация вектора напряженности магнитного поля и вектора нормали. Такие колебания не приводят к преждевременному наступлению неустойчивости свободной поверхности магнитной жидкости при докритических магнитных полях, что позволяет использовать МКВ в ортогональном магнитном поле.

В работе также проведено систематическое исследование физико-химических и реологических свойств изучаемых жидкостей на высокоточном коммерческом оборудовании.

Показано, что наличие в жидкости вещества-стабилизатора (олеиновой кислоты) приводит к изменению объемной вязкости жидкости-основы, которую необходимо учитывать в дисперсионном соотношении.

В магнитной жидкости в зависимости от качества ее приготовления вещество-стабилизатор в свободном, не связанном с магнетитовыми частицами, виде может достигать от 5 до 15 %. Такое характерное для МЖ количество олеиновой кислоты в исследуемой жидкости-основе способно оказывать влияние на поверхностное натяжение раствора в целом. Методом отрыва кольца исследовано поверхностное натяжение растворов декана с олеиновой кислотой, в том числе получена температурная зависимость σ . Целесообразность проведения температурных измерений обусловлена тем, что работа с растворами жидкостей связана со сложностью прогнозирования значения физико-химических величин, таких как поверхностное натяжение, вязкость и т.д., при изменении температуры в силу возможной неаддитивности вкладов каждого из компонент растворов в исследуемую величину.

Проведено сравнение результатов, полученных МКВ, с данными, измеренными на коммерческом тензиометре Kruss K100. Показано, что в диапазоне применяемых частот возбуждения капиллярных волн результаты, полученные обоими методами, хорошо согласуются.

В работе получены зависимости поверхностного натяжения σ МЖ от напряженности внешнего нормального к поверхности магнитного поля. Качественно все зависимости демонстрируют уменьшение σ с ростом магнитного поля на 5–6 %. Мы полагаем, что зависимость поверхностного натяжения от внутреннего магнитного поля, полученного с учетом размагничивающего фактора тонкого слоя, приведет к количественному, но не качественному изменению кривой. Полученный в эксперименте результат согласуется с предсказаниями теоретических исследований [5, 6].

Физическое объяснение механизма изменения поверхностного натяжения МЖ в магнитном поле на основе теоретических моделей [5, 6] может заключаться в перераспределении концентрации

магнитных частиц в приповерхностном слое, где существует градиент напряженности поля [3], в результате которого молекулы жидкости-основы оттесняются от межфазной поверхности. В пользу данной гипотезы говорит также измеренное с высокой степенью точности поверхностное натяжение чистого декана и МЖ на его основе (см. таблицу), т.е. присутствие магнитных частиц при тех же термодинамических условиях ведет к слабому снижению поверхностного натяжения коллоида.

Определенный с помощью МКВ параметр β может быть использован для расчета вязкости магнитной жидкости из соотношения (2) при условии заранее известного значения величины σ . Для слабо концентрированных растворов МЖ, вязкость которых близка к значениям вязкости керосина (т.е. в районе 1 сПз), подобный метод позволяет заменить довольно дорогостоящие вискозиметры, не уступая им в точности.

Таким образом, в данной работе проведено систематическое исследование поверхностного натяжения магнитной жидкости на основе декана, стабилизированного олеиновой кислотой во внешнем постоянном ортогональном к поверхности слоя магнитном поле. Наличие в жидкости частиц магнитного вещества приводит к тому, что внешние магнитные поля влияют не только на объемные, но и на поверхностные свойства материала. Предложенный модифицированный метод капиллярных волн позволяет изучить свойства МЖ в магнитном поле, избегая трудностей, связанных с использованием коммерческого тензиометра.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-01-00648_a.

Список литературы

1. *Rosensweig R. E., Zahn M.* Stability of magnetic fluid penetration through a porous medium with uniform magnetic field oblique to the interface // IEEE Trans. Magnetics. 1980. N. 2. P. 275–282. DOI: 10.1109/TMAG.1980.1060586
2. *Фертман В. Е.* Магнитные жидкости: справочное пособие. Минск: Вышэйшая школа, 1988. 184 с.
3. *Bashtovoi V. G., Taitz E. M.* Some effects associated with the discontinuity of magnetization at the interface between magnetic liquids // Magnetohydrodynamics. 1985. V. 21. N. 2. P. 148–153.
4. *Golubyatnikov A. N., Subkhankulov G. I.* Surface tension of a magnetic liquid // Magnetohydrodynamics. 1986. V. 22. N. 1. P. 62–66.
5. *Бувевич Ю. А., Зубарев А. Ю., Иванов А. О.* Теория агрегирования в коллоидах. Поверхностное натяжение двух фаз коллоида // Коллоидный журнал. 1992. Т. 54, № 2. С. 54–59.
6. *Shilov V. P.* Interfacial tension of magnetic fluids in the mean spherical approximation // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2006. V. 302. P. 495–502.
7. *Жуков А. В.* Структура и устойчивость границы раздела магнитной и обычной жидкостей. Модель трехкомпонентной среды // Известия РАН. МЖГ. 2013. № 5. С. 37–51.
8. *Жуков А. В.* Структура границы раздела магнитной и обычной жидкостей. Модель несмешивающихся фаз // Известия РАН. МЖГ. 2016. № 1. С. 18–28.
9. *Sudo S., Hashimoto H., Ikeda A.* Measurements of the surface tension of a magnetic fluid and interfacial phenomena // JSME Int. J. 1989. V. 32. Is. 1. P. 47–51. DOI: 10.1299/jsmeb1988.32.1_47
10. *Afkhami S., Tyler A. J., Renardy Y., et al.* Deformation of a hydrophobic ferrofluid droplet suspended in a viscous medium under uniform magnetic fields // J. Fluid Mech. 2010. V. 663. P. 358–384. DOI: 10.1017/S0022112010003551
11. *Amin M. S., Elborai S., Lee S.-H., et al.* Surface tension measurement techniques of magnetic fluids at an interface between different fluids using perpendicular field instability // J. Appl. Phys. 2005. V. 97, 10R308. DOI: 10.1063/1.1861374
12. *Latikka M., Backholm M., Timonen J., et al.* Wetting of ferrofluids: Phenomena and control // Current Opinion in Colloid and Interface Science. 2018. V. 36. P. 118–129. DOI: 10.1016/j.cocis.2018.04.003
13. *Motozawa M., Ishii S., Fukuta M.* Experimental study on contribution of clustering structure to surface tension change of magnetic fluid under magnetic field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2020. V. 499, 166285.
14. *Chen Q., et al.* Investigation of the surface tension of water-based Fe₃O₄ magnetic fluids under magnetic field: the effect of surfactants // Physics of Fluids. 2021. V. 33. N. 12, 122013.
15. *Хохрякова К. А., Шмырова А. И., Мизёва И. А., Шмыров А. В.* Экспериментальное исследование поверхностного натяжения ферроколлоида в магнитном поле // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. Вып. 3. С. 56–64. doi: 10.17072/1994-3598-2020-3-56-64
16. *Шмырова А. И., Мизёва И. А., Артамонова П. А.* Модификация метода капиллярных волн // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. № 3 (41). С. 32–38. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-3-32-38
17. *Shmyrov A., Mizev A., Shmyrova A., Mizeva I.* Capillary wave method: An alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction // Physics of Fluids. 2019. V. 31, 012101. DOI: 10.1063/1.5060666
18. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
19. *Mizeva I.* Capillary wave-detection algorithm based on cylindrical solitary waves // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1945, 012037.

20. Lebedev A. V. Calculating the magnetization curves of concentrated magnetic fluids // *Magneto-hydrodynamics*. 1989. V. 25. N. 4. P. 520–523.
21. Lielmezs J., Herrick T. A. New surface tension correlation for liquids // *The Chemical Engineering Journal*. 1986. V. 32. N. 3. P. 165–169.
22. Хайдаров Г. Г. О связи поверхностного натяжения жидкости с теплотой парообразования // *Журнал физической химии*. 1983. Т. 57. № 10. С. 2528–2530.
23. Behroozi F., Smith J., Even W. Stokes' dream: Measurement of fluid viscosity from the attenuation of capillary waves // *American Journal of Physics*. 2010. V. 78. N. 11. P. 1165–1169. DOI: 10.1119/1.3467887
24. Jiang Q., Chiew Y. C., Valentini J. E. Damping of cylindrical propagating capillary waves on monolayer-covered surfaces // *Langmuir*. 1992. V. 8(11). P. 2747–2752.
25. Browaeys J., Bacri J. C., Flament C., et al. Surface waves in ferrofluids under vertical magnetic field // *The European Physical Journal B*. 1999. V. 9. N. 2. P. 335–341.
26. Browaeys J., Perzynski R., Bacri J.-C., et al. Surface waves and wave resistance in magnetic fluids // *Brazilian Journal of Physics*. 2001. V. 31, N. 3. P. 446–455.
8. Zhukov A. V. Structure of the interface between magnetic and conventional fluids: Model of immiscible phases. *Fluid Dynamics*, 2016, vol. 51, pp. 18–28.
9. Sudo S., Hashimoto H., Ikeda A. Measurements of the surface tension of a magnetic fluid and interfacial phenomena. *JSME International Journal*, 1989, vol. 32, no. 1, pp. 47–51. DOI: 10.1299/jsmeb1988.32.1_47
10. Afkhami S., Tyler A. J., Renardy Y., et al. Deformation of a hydrophobic ferrofluid droplet suspended in a viscous medium under uniform magnetic fields. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, vol. 663, pp. 358–384.
11. Amin M. S., Elborai S., Lee S.-H., et al. Surface tension measurement techniques of magnetic fluids at an interface between different fluids using perpendicular field instability. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, 10R308. DOI: 10.1063/1.1861374
12. Latikka M., Backholm M., Timonen J., et al. Wetting of ferrofluids: phenomena and control. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2018, vol. 36, pp. 118–129. DOI: 10.1016/j.cocis.2018.04.003
13. Motozawa M., Ishii S., Fukuta M. Experimental study on contribution of clustering structure to surface tension change of magnetic fluid under magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 499, 166285.
14. Chen Q. et al. Investigation of the surface tension of water-based Fe₃O₄ magnetic fluids under magnetic field: the effect of surfactants. *Physics of Fluids*, 2021, vol. 33, no. 12, 122013.
15. Khokhryakova C. A. Shmyrova A. I., Mizeva I. A., Shmyrov A. V. The experimental study of ferrocolloid surface tension in a magnetic field. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2020, no. 3. pp. 56–64. DOI: 10.17072/1994-3598-2020-3-56-64
16. Shmyrova A. I., Mizeva I. A., Artamonova P. A. Capillary waves modified technique. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2018, no. 3 (41), pp. 32–38. DOI: 10.17072/1994-3598-2018-3-32-38
17. Shmyrov A., Mizev A., Shmyrova A., Mizeva I. Capillary wave method: An alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction. *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31, 012101. DOI: 10.1063/1.5060666
18. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Fluid Mechanics*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1987. 554 p.
19. Mizeva I. Capillary wave-detection algorithm based on cylindrical solitary waves. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1945, 012037.

References

1. Rosensweig R. E., Zahn M. Stability of magnetic fluid penetration through a porous medium with uniform magnetic field oblique to the interface. *IEEE Trans. Magnetics*, 1980, no. 2, pp. 275–282. DOI: 10.1109/TMAG.1980.1060586
2. Fertman V. E. *Magnetic Fluids Guidebook*. CRC Press, 1990. 146 p.
3. Bashtovoi V. G., Taitis E. M. Some effects associated with the discontinuity of magnetization at the interface between magnetic liquids. *Magneto-hydrodynamics*, 1985, vol. 21, no. 2, pp. 148–153.
4. Golubyatnikov A. N., Subkhankulov G. I. Surface tension of a magnetic liquid. *Magneto-hydrodynamics*, 1986, vol. 22, no. 1, pp. 62–66.
5. Buyevich Yu. A., Zubarev A. Yu., Ivanov A. O. Teoriia agregirovaniia v kolloidakh. Poverkhnostnoe natiiazhenie dvukh faz kolloida [Theory of aggregation in colloids. Surface tension on the boundary between two colloid phases]. *Kolloidnyi zhurnal* [Colloid Journal], 1992. vol. 54, no. 2. pp. 54–59. (In Russian).
6. Shilov V. P. Interfacial tension of magnetic fluids in the mean spherical approximation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, vol. 302, pp. 495–502.
7. Zhukov A. V. Structure and stability of the interface between magnetic and conventional fluids. Model of a three-component medium. *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 5, pp. 599–611. DOI: 10.1134/S0015462813050049
20. Lebedev A. V. Calculating the magnetization curves of concentrated magnetic fluids. *Magneto-hydrodynamics*, 1989, vol. 25, no. 4, pp. 520–523.
21. Lielmezs J., Herrick T. A. New surface tension correlation for liquids. *The Chemical Engineering Journal*, 1986, vol. 32, no. 3, pp. 165–169.

22. Khaidarov G. G. O sviazi poverkhnostnogo natiasheniia zhidkosti s teplotoi paroobrazovaniia [On the connection between the surface tension of a liquid and the heat of vaporization]. *Zhurnal fizicheskoi khimii* [Russian Journal of Physical Chemistry A], 1983, vol. 57, no. 10, pp. 2528–2530. (In Russian).
23. Behrooz F., Smith J., Even W. Stokes' dream: Measurement of fluid viscosity from the attenuation of capillary waves. *American Journal of Physics*, 2010, vol. 78, no. 11, pp. 1165–1169. DOI: 10.1119/1.3467887
24. Jiang Q., Chiew Y. C., Valentini J. E. Damping of cylindrical propagating capillary waves on monolayer-covered surfaces. *Langmuir*, 1992, vol. 8 (11), pp. 2747–2752.
25. Browaeys J., Bacri J. C., Flament C., et al. Surface waves in ferrofluids under vertical magnetic field. *The European Physical Journal B*, 1999, vol. 9, no. 2, pp. 335–341.
26. Browaeys J., Perzynski R., Bacri J.-C., et al. Surface waves and wave resistance in magnetic fluids. *Brazilian Journal of Physics*, 2001, vol. 31, no. 3, pp. 446–455.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Хохрякова К. А., Мизева И. А., Шмыров А. В., Лебедев А. В., Шмырова А. И., Колесниченко Е. В. Экспериментальное исследование поверхностного натяжения магнитной жидкости и ее основы в магнитном поле // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 1. С. 47–56. doi: 10.17072/1994-3598-2023-1-47-56

Please cite this article in English as:

Khokhryakova C. A. Mizeva I. A., Shmyrov A. V. Lebedev A. V., Shmyrova A. I., Kolesnichenko E. V. Experimental study of the surface tension of a magnetic fluid and its liquid base. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 1, pp. 47–56. doi: 10.17072/1994-3598-2023-1-47-56

Сведения об авторах

1. Хохрякова Кристина Андреевна, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013.
2. Мизева Ирина Андреевна, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013.
3. Шмыров Андрей Викторович, научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013.
4. Лебедев Александр Владимирович, д-р. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013.
5. Шмырова Анастасия Ивановна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990.
6. Колесниченко Екатерина Владимировна, инженер, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Ак. Королева, 1, Пермь, 614013; аспирант, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990.

Author information

1. Christina A. Khokhryakova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
2. Irina A. Mizeva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
3. Andrey V. Shmyrov, Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
4. Alexander V. Lebedev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia.
5. Anastasia I. Shmyrova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia.
6. Ekaterina V. Kolesnichenko, Engineer, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia; Postgraduate Student, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia.