

УДК 544.77:537.622

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-81-91>

Об эффективной длине молекул эруковой и олеиновой кислот в составе защитной оболочки магнетитовых коллоидных частиц

А.С. Иванов^{1✉}

¹Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН») ул. Акад. Королева, д. 1, г. Пермь 614018, Российская Федерация

✉ e-mail: lesnichiy@icmm.ru

Резюме

Цель. Экспериментальная оценка толщины защитной оболочки магнетитовых коллоидных частиц, представляющей собой одиночный молекулярный слой олеиновой или эруковой жирных кислот.

Методы. Экспериментальные данные получены независимым измерением трёх объёмных концентраций (магнитной, твердой и гидродинамической) магнетитовых частиц в магнитной жидкости с применением магнитогранулометрического анализа, измерения плотности и титрования чистой жидкости-носителя при пептизации сухого осадка частиц. Обработка экспериментальных данных выполнена методом численного решения системы нелинейных уравнений, описывающих аддитивность объёмных, массовых и магнитных вкладов стабилизированных коллоидных частиц и жидкости-носителя в объём, плотность и намагниченность насыщения полидисперсной магнитной жидкости соответственно.

Результаты. Экспериментально исследованы четыре образца магнитной жидкости, отличающиеся дисперсным составом магнитных наночастиц, три из которых стабилизированы олеиновой, а четвёртый – эруковой жирными кислотами. Образцы готовились титрованием чистого носителя и пептизацией сухого осадка коллоидных частиц, предварительно промытого от свободных молекул ПАВ. Для каждого образца измерена плотность и кривая намагничивания, выполнен магнитогранулометрический анализ. Данные, полученные разными методами, согласуются между собой при условии, если толщина немагнитного слоя на поверхности магнетитовых частиц равна 0,76 нм, а эффективная длина молекулы олеиновой и эруковой кислот равняется их максимально возможным значениям в полностью распрямлённом состоянии.

Вывод. При стабилизации магнетитовых частиц ненасыщенными жирными кислотами двойная связь, обеспечивающая изгиб этих молекул в основном энергетическом состоянии, не играет существенной роли, так как толщина защитной оболочки, равная эффективной длине молекул ПАВ, равняется их максимально возможной длине в распрямлённом состоянии.

Ключевые слова: магнитная жидкость; стерическая стабилизация; эруковая кислота; олеиновая кислота.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № АААА-А20-120020690030-5.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Иванов А.С., 2024

Для цитирования: Иванов А.С. Об эффективной длине молекул эруковой и олеиновой кислот в составе защитной оболочки магнетитовых коллоидных частиц // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 81–91. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1528-2024-14-4-81-91](https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-81-91)

Поступила в редакцию 16.09.2024

Подписана в печать 30.10.2024

Опубликована 13.12.2024

On the effective length of erucic and oleic acid molecules as part of the protective shell of magnetite colloidal particles

Aleksey S. Ivanov¹✉

¹Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, the affiliate of the Perm Federal Scientific Research Center
1 Academician Korolev Str., Perm 614018, Russian Federation

✉ e-mail: lesnichiy@icmm.ru

Abstract

Purpose. Experimental evaluation of the thickness of the protective shell thickness of magnetite colloidal particles representing a single molecular layer of oleic or erucic fatty acids.

Methods. Experimental data were obtained by independent measurement of three volumetric concentrations (magnetic, solid and hydrodynamic) of magnetite particles in magnetic liquid using magneto-granulometric analysis, density measurement and titration of pure carrier liquid during peptization of dry sediment of particles. The experimental data were processed by numerical solution of the system of nonlinear equations describing the additivity of volume, mass and magnetic contributions of stabilized colloidal particles and carrier liquid to the volume, density and saturation magnetization of polydisperse magnetic liquid, respectively.

Results. Four samples of magnetic liquid differing in the disperse composition of magnetic nanoparticles, three of which were stabilized by oleic and the fourth by erucic fatty acids (surfactants), were experimentally investigated. The samples were prepared by titration of pure carrier and peptization of dry sediment of colloidal particles prewashed from free surfactant molecules. For each sample, the density and magnetization curve were measured and magneto-granulometric analysis was performed. The data obtained by different methods agree with each other provided that the thickness of the nonmagnetic layer on the surface of magnetite particles is equal to 0.76 nm and the effective length of the oleic and erucic acid molecules is equal to their maximum possible values in the fully straightened state.

Conclusion. At stabilization of magnetite particles by unsaturated fatty acids, the double bond, providing bending of these molecules in the basic energy state, does not play an essential role, since the thickness of the protective shell, equal to the effective length of surfactant molecules, is equal to their maximum possible length in the straightened state.

Keywords: magnetic fluid; steric stabilization; erucic acid; oleic acid.

Funding: The work was carried out within the framework of the state budget topic No. AAAA-A20-120020690030-5.

Conflict of interest: The author declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ivanov A.S. On the effective length of erucic and oleic acid molecules as part of the protective shell of magnetite colloidal particles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(4):81–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-81-91>

Received 16.09.2024

Accepted 30.10.2024

Published 13.12.2024

Введение

Магнитные жидкости – коллоидные растворы нанодисперсных магнитных материалов [1], применяющиеся в технике [2] и демонстрирующие значительный потенциал применимости [3] в биомедицинских приложениях доставки лекарств [4], лечении опухолевых заболеваний [5]. Различные сферы применения предъявляют к магнитным жидкостям различные требования. Так, медицинское требование биологической совместимости предполагает использование воды в качестве жидкостного носителя, что можно обеспечить либо ионной стабилизацией частиц в водном растворе электролита [6], либо стабилизацией двойным слоем [7] поверхностно-активного вещества (ПАВ). Технические приложения предъявляют к магнитным жидкостям требование повышенной коллоидной стабильности в градиентных магнитных полях [8] на протяжении длительного времени (до 10 лет) [9], чего невозможно добиться только стерической стабилизацией частиц посредством ПАВ, прикреплённого к поверхности частиц прочной химической связью [10].

Выбор ферро- или ферритмагнитного материала для коллоидных частиц определяет их физические (плотность) и магнитные свойства, например, намагниченность насыщения M_s и тип механизма релаксации намагниченности (Броуновский или Неелевский) [11]. Удивительным совпадением можно считать тот факт, что ферритмагнитный природный материал магнетит, использовавшийся для синтеза самых первых образцов магнитных жидкостей в 1960-х гг. [12], на сегодняшний день признан самым наилучшим биосовместимым материалом для медицинских приложений [13], несмотря на то, что перспектива адресной доставки лекарств до сих пор остаётся дискуссионной [14]. Другим преимуществом магнетита в сравнении с альтернативными материалами является его

дешевизна и простота получения методом химического осаждения [15].

В свою очередь, выбор ПАВ является ключевым решением в производстве магнитной жидкости, потому что он определяет коллоидную стабильность, возможность внедрения частиц в полимерные матрицы [16], а также основные технико-эксплуатационные характеристики [17]. Нередко ПАВ является коммерческим секретом, однако получивший наибольшее распространение ПАВ известен с момента производства первых феррожидкостей – олеиновой кислоты [18]. Эта ненасыщенная жирная кислота (формула $C_{17}H_{33}COOH$) успешно стабилизирует магнетитовые наночастицы в большом количестве практически полезных носителей: трансформаторное и вакуумное масло, кремнийорганические жидкости, керосин, петролейный эфир и другие жидкие углеводороды [15]. Олеиновая кислота полностью удовлетворяет двум требованиям, предъявляемым к ПАВ, которые были отмечены и сформулированы ещё основателем науки о магнитных жидкостях Р. Розенцвейгом [12]: молекула ПАВ должна быть в длину более 1 нм и должна иметь изгиб. Первое требование обосновано тем, что меньшая длина ПАВ не предотвращает агрегирование частиц под действием сил Ван-дер-Ваальса, а второе требование необходимо для предотвращения кристаллизации (соединения с такими же молекулами). Классический пример, демонстрирующий важность второго условия, – стеариновая кислота, непригодная для стабилизации магнитной жидкости. Несмотря на то, что у стеариновой кислоты такое же количество атомов углерода (формула $C_{17}H_{35}COOH$), у неё отсутствует двойная связь в середине молекулы (насыщенная кислота), поэтому при комнатной температуре магнетитовые частицы, стабилизированные ею, коагулируют и выпадают в осадок.

Анализ литературы показывает, что во всех теоретических, численных и экспериментальных работах длина молекулы олеиновой кислоты предполагается равной 2,0 – 2,1 нм [12]. На рисунке 1 демонстрируется молекула олеиновой кислоты. В основном состоянии (см. рис. 1, А) её эффективная длина (максимальное расстояние от 1-го до 17-го атома углерода) составляет лишь 1,6 нм, в то время как повсеместно используемая величина в 2,0 нм соответствует энергетически невыгодному состоянию, когда молекула полностью выпрямлена (рис. 1, В). Возникает парадоксальная ситуация, когда, с одной

стороны, экспериментально доказана важность загиба молекулы ПАВ, неизбежно приводящего к сокращению эффективной длины молекулы, а с другой стороны, все пользуются в своих расчётах величиной, равной максимально возможной длине этой же молекулы, как будто существованием двойной связи можно пренебречь. Судить о правомерности такого допущения априори невозможно, т. к. энергетическое отличие молекул органических соединений при их изгибе по межуглеродным связям С–С имеет порядок величины 10 кДж/моль [19], что сопоставимо с энергией теплового движения идеального газа.

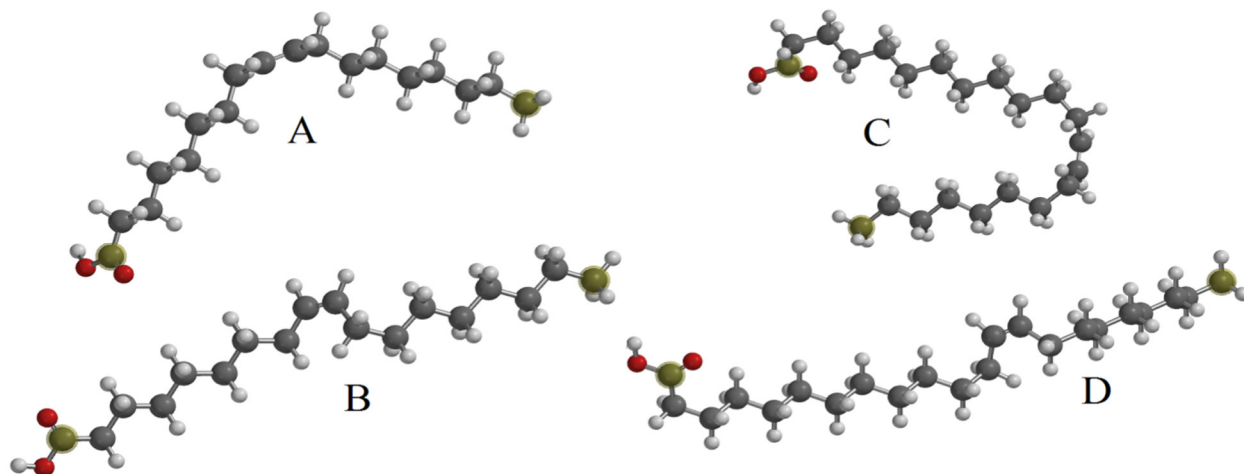


Рис. 1. Молекулы олеиновой (слева) и эруковой (справа) кислот в основном А, С и распрямлённом В, D состоянии соответственно. Изображения получены в программе Spartan

Fig. 1. Oleic (left) and erucic (right) acid molecules in the ground A, C and straightened B, D states, respectively. The images were obtained in Spartan

Цель предлагаемой работы – экспериментально определить эффективную (т.е. проявляющуюся в эксперименте) длину молекул двух ПАВ: олеиновой и эруковой кислот, пригодных для стабилизации магнетитовых коллоидных частиц. Выбор олеиновой кислоты обусловлен её повсеместным использованием и доступностью. Выбор эруковой кислоты объясняется тем, что в базовом энергетическом состоянии её молекула $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_7\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_{11}\text{-COOH}$ характеризуется

расстоянием между 1-м и 22-м атомом углерода (см. рис. 1, С), равным лишь 0,87 нм. В распрямлённом состоянии это расстояние превышает 2,5 нм, т. е. эффективная длина молекулы может изменяться более чем вдвое (см. рис. 1, D).

Следует отметить, что предлагаемая работа – это не первая попытка экспериментально определить эффективную длину молекул олеиновой кислоты, однако реализованный здесь подход отличается от ранних работ [20] тем, что обе не-

известные величины: толщина немагнитного слоя δ и эффективная длина ПАВ l считаются неизвестными [21]. Напротив, в [20] и [21] длина ПАВ постулируется равной $l = 2,0$ нм, а толщина δ декларируется искомой величиной. Другим отличием предлагаемого метода является то, что авторы [20] и [21] определяли объёмную долю коллоидных частиц с ПАВ путём высушивания исходного образца (измерялась остаточная масса подсыхающего осадка частиц). При таком подходе не гарантируется удаление свободного ПАВ, который зачастую специально добавляется в магнитную жидкость для повышения её стабильности. В свою очередь, в работе [22] обе величины l , δ считались неизвестными, но обе они определялись косвенным методом (по измерению вязкости). Поэтому прямое измерение указанных величин всё же остаётся актуальной задачей.

Материалы и методы

Для достижения цели работы лабораторному исследованию подверглись четыре магнитные жидкости. Первые три образца (MF1 – MF3) были стабилизированы олеиновой кислотой, а последний образец (MF4) – эруковой. Образцы MF1, MF2 были изготовлены автором в лаборатории Динамики дисперсных систем ИМСС УрО РАН (г. Пермь), а MF3 был

изготовлен в Проблемной научно-исследовательской лаборатории прикладной феррогидродинамики ИГЭУ (г. Иваново). Образец MF4 был синтезирован в ИТХ УрО РАН (г. Пермь). Все образцы изучались согласно следующему протоколу.

Первым этапом была подготовка образца. Вначале осуществлялся отбор тестируемой пробы объёмом 5–10 мл в чашке Петри с последующим осаждением коллоидных частиц избытком изопропилового спирта и его декантацией с помощью постоянного магнита. Далее следовала промывка полученного осадка частиц с целью удаления свободных молекул ПАВ в исходном образце. Промывка спиртом осуществлялась двукратно для образцов MF1 – MF3. Образец MF4 вообще не подвергался этой процедуре, поскольку этот образец был единственным, но априори было неизвестно, как поведёт себя эруковая кислота при промыве. Были опасения, что этот ПАВ будет менее стойким, чем олеиновая кислота, поэтому MF4 лишь однократно осаждался избытком спирта без промывки осадка. Далее полученный осадок частиц просушивался с помощью небольшого воздушного вентилятора с диаметром диффузора порядка диаметра чашки Петри до состояния, когда сухой осадок начинал самопроизвольно растрескиваться (рис. 2, А), а его масса переставала изменяться существенно (в пределах 0,01 г на 50 г).

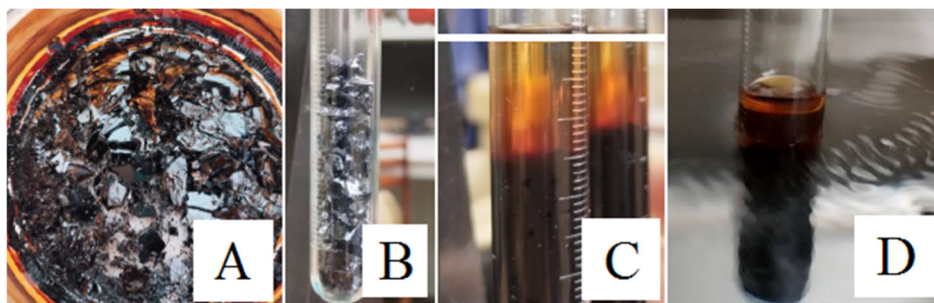


Рис. 2. Некоторые этапы подготовки образцов: А – высушивание промытого осадка коллоидных частиц; В, С – титрование чистой жидкости-носителя; D – ускорение пептизации сухого осадка в ультразвуковой ванне

Fig. 2. Some sample preparation steps: A – drying of washed sediment of colloidal particles; B, C – titration of pure carrier liquid; D – accelerated peptization of dry sediment in ultrasonic bath

Второй этап подразумевал измерение гидродинамической объёмной концентрации частиц в новом коллоидном растворе. Для этой цели просушенный осадок частиц помещался в тарированную колбу известного объёма (рис. 2, В). Измерялся вес использованного сухого осадка, после чего титровалась жидкость-носитель (керосин) известной плотности по точно отмеренному объёму (рис. 2, С). Точность и повторяемость титрования жидкости-носителя обеспечивалась благодаря расположению зеркала за тарированной пробиркой (рис. 2, С). С точностью до 1-2 капель (5–10 мкл), дозируемых медицинским шприцем, удавалось добиться точности расположения мениска по отметочной риске пробирки. Повторное измерение веса позволяло определить объём носителя, добавленного к сухому осадку. Разность объёмов пробирки и добавленного носителя позволяла найти соотношение объёма частиц к общему объёму полученного коллоида – гидродинамическую концентрацию частиц φ_h . Далее пробирка с образцом подвергалась воздействию ультразвуком в водяной бане с целью ускорения пептизации частиц (рис. 2, D).

Третий этап включал в себя измерение плотности ρ_{mf} и кривой намагничивания $M(H)$ у получившейся магнитной жидкости. Магнитогранулометрический анализ кривой $M(H)$ позволял получить параметры Γ -распределения (α, x_0) частиц по диаметрам x_m магнитных ядер и значение намагниченности насыщения M_s жидкости. Отношение M_s к намагниченности насыщения магнетита 480 кА/м равняется объёмному содержанию магнитной фазы:

$$\varphi_m = M_s / (480 \text{ кА/м}). \quad (1)$$

Известное значение плотности ρ_{mf} магнитной жидкости позволяет связать между собой объёмную долю твёрдой φ_s фазы (кристаллического магнетита) и измеренную гидродинамическую концентрацию частиц φ_h :

$$\rho_{mf} = \rho_c + \varphi_s(\rho_m - \rho_{sa}) + \varphi_h(\rho_{sa} - \rho_c), \quad (2)$$

где ρ_c , ρ_m и ρ_{sa} – плотность носителя, материала частиц и ПАВ соответственно. В случае образцов MF1 – MF3 эти величины равны: $\rho_c = 0,78 \text{ г/см}^3$; $\rho_m = 5,21 \text{ г/см}^3$ и $\rho_{sa} = 0,89 \text{ г/см}^3$. У образца MF4 было другое значение: $\rho_{sa} = 0,86 \text{ г/см}^3$. Формула (2) является уточнённой по отношению к часто используемой формуле

$$\varphi_s = \frac{(\rho_{mf} - \rho_c)}{(\rho_m - \rho_c)},$$

где предполагается равенство плотностей жидкости-носителя и ПАВ.

Последний этап представляет собой численную обработку экспериментальных данных. Величина φ_s удовлетворяет соотношению [21]

$$\varphi_s = \varphi_m g(\delta). \quad (3)$$

Функция $g(\delta)$ в явном виде зависит от параметров Γ -распределения полидисперсной магнитной жидкости

$$g(\delta) = 1 + \frac{6\delta}{x_0(\alpha + 3)} + \frac{4\delta^2}{x_0^2(\alpha + 2)(\alpha + 3)} \left(3 + \frac{2\delta}{x_0(\alpha + 1)} \right). \quad (4)$$

Аналогично (3) записывается соотношение между магнитной φ_m и гидродинамической φ_h концентрациями частиц:

$$\varphi_h = \varphi_m g(\delta + l). \quad (5)$$

Решая (3) и (5) численно, можно найти толщину немагнитного слоя δ и искомую толщину l защитной оболочки. Вычисления проводились в оригинальной программе на языке C++, т. к. в выражении (4) всегда $g(\delta) > 1$, а положительный действительный корень в (3) и в (5) обнаруживается простым перебором с требованием минимальной квадратичной невязки вида $\Delta = (\varphi_s - \varphi_m g(\delta))^2$.

Результаты и их обсуждение

Четыре образца магнитной жидкости были исследованы согласно описанному

выше лабораторному протоколу. Физические параметры образцов и результаты их численной обработки представлены в таблице 1.

Табл. 1. Физические параметры магнитных жидкостей, определённые экспериментально (ρ_{mf} , M_S , φ_h), магнитогранулометрическим анализом (α , x_0) и численно (φ_s , φ_m , δ , l)

Table 1. Physical parameters of magnetic fluids determined experimentally (ρ_{mf} , M_S , φ_h), by magneto-granulometric analysis (α , x_0) and numerically (φ_s , φ_m , δ , l)

Параметр	Образец			
	MF1	MF2	MF3	MF4
ρ_{mf} , г/см ³	1,07	1,18	1,17	0,88
M_S , кА/м	20,2	26,8	26,9	6,3
α	5,7	4,0	8,6	6,7
x_0 , нм	1,1	1,4	1,0	0,9
φ_h	0,165	0,237	0,198	0,081
φ_s	0,063	0,085	0,085	0,021
φ_m	0,042	0,056	0,056	0,013
δ , нм	0,76	0,73	0,79	0,75
l , нм	2,2	2,1	2,0	2,7

По данным таблицы 1 видно, что образцы MF1 – MF3 с олеиновой кислотой в качестве стабилизатора были умеренно концентрированными, в то время как MF4 был сильно разбавленным. Это обусловлено тем, что объём образца MF4 имел изначальные ограничения, что, в свою очередь, не позволило провести повторные опыты с ним.

Данные по образцам MF1 – MF3 можно считать достаточно надёжными и повторяющимися. При этом результаты по δ согласуются для всех четырёх образцов, т. к. для них общим материалом частиц являлся магнетит. Толщина немагнитного слоя $\delta = (0,76 \pm 0,03)$ нм по порядку величины равна одному периоду кристаллической решетки магнетита (0,84 нм) и находится в хорошем согласии с данными [21] $\delta = (0,74 \pm 0,05)$ нм. Эффективная длина молекул олеиновой кислоты также оказалась равной $l = (2,1 \pm 0,1)$ нм, т. е. равной своей максимально возможной длине, которую

можно рассчитать по конститутивным свойствам молекулы (т. е. по её строению) [23]. Согласно данным рентгенографии кристаллических парафинов длина сегмента молекулы, приходящегося на 1 атом углерода в цепи -С-С- органической молекулы, равна 0,127 нм, поэтому для олеиновой кислоты с 17 атомами углерода максимальная оценка длины равняется $l = 2,16$ нм. Этот результат косвенно подтверждается данными других работ, например, [12] и [22] (при комнатной температуре). Интересно сравнить наш результат с данными Лэнгмюра [24], полученными при исследовании мономолекулярных слоёв ПАВ на поверхности воды. Согласно [24] толщина мономолекулярного слоя (при максимальном растяжении плёнки), равная эффективной длине молекулы, равна 1,12 нм при площади поперечного сечения (поверхность, занимаемая одной молекулой) 0,46 нм². Если же такую плёнку привести в контакт с избытком олеиновой кислоты,

то толщина плёнки увеличивается почти вдвое (а площадь пропорционально уменьшается), что соответствует параметрам стеариновой кислоты [24] (длина 2,5 нм, площадь 0,22 нм²).

Эффективная длина $l = 2,7$ нм молекулы эруковой кислоты, представляет собой одиночное измерение, т. к. исходный образец MF4 был в единственном экземпляре и небольшого объёма. Подсчёт длины молекулы с 22 атомами углерода (эруковая кислота) предсказывает её максимальное значение $l = 2,79$ нм. Значит, измеренная величина коррелирует с теоретическими предсказаниями, что повышает доверие к этому результату.

Выводы

Выполнено экспериментальное исследование, целью которого было измерение эффективной длины молекул двух поверхностно-активных веществ: олеино-

вой и эруковой кислот. Несмотря на наличие двойной связи в центральной части молекул (обе кислоты ненасыщенные), приводящей к изгибу молекулы в свободном состоянии, их эффективные длины равны максимально возможным значениям, соответствующим полностью распрямлённому состоянию. Так, измеренное значение эффективной длины молекулы олеиновой кислоты равняется $l = (2,1 \pm 0,1)$ нм, а теоретическое предсказание $l = 2,16$ нм. Для эруковой кислоты измеренные и расчетные значения равняются $l = 2,7$ нм и $l = 2,79$ нм соответственно. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что для всего гомологического ряда ненасыщенных жирных кислот, применяемых в качестве ПАВ для стабилизации коллоидных частиц магнетита, эффективная длина молекул (и следовательно, толщина защитной оболочки) может быть предсказана по числу атомов углерода, входящих в состав молекул.

Список литературы

1. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости // Успехи физических наук. 1974. Т. 112, вып. 3. С. 435–458. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0112.197403b.0427>
2. Kazakov Y.B., Filippov V.A. Calculation of the performance of the electromagnetic magnetic fluid separator non-magnetic materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 950. P. 012003-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/950/1/012003>
3. Демпфирование колебательной системы с неполной герметизацией воздушной полости магнитной жидкостью / Е.В. Шельдешова, А.А. Чураев, Н.М. Игнатенко, Ю.А. Неручев, П.А. Ряполов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 128–145. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-128-145>
4. Torrice M. Does nanomedicine have a delivery problem? // ACS Central Science. 2016. Vol. 2, no. 7. P. 434–437. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.6b00190>
5. Analysis of nanoparticle delivery to tumours / S. Wilhelm, A. Tavares, Q. Dai [et al.] // Nature Review Materials. 2016. Vol. 1. Art. no. 16014. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.14>
6. Ionic ferrofluids: a crossing of chemistry and physics / J.-C. Bacri, R. Perzynski, D. Salin, V. Cabuil, R. Massart // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1990. Vol. 85, no. 1-3. P. 27–32. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(90\)90010-N](https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90010-N)
7. Лебедев А.В. Аномалии вязкости магнитной жидкости, стабилизированной двойным слоем ПАВ в воде // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 4. С. 88–97. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-88-97>
8. Влияние структуры и параметров магнитной жидкости на магнитофорез в тонком слое / П.А. Ряполов, В.М. Полунин, В.Г. Баштовой, Е.А. Соколов, Е.В. Шельдешова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11, № 1. С. 77–92.

9. Arefyev I.M., Demidenko O.V., Saikin M.S. Assessment of magnetic fluid stability in non-homogeneous magnetic field of a single-tooth magnetic fluid sealer // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. Vol. 431. P. 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.017>
10. Иванов А.С. О причинах обратимого агрегирования магнетитовых феррожидкостей при их разбавлении чистым носителем в нулевом магнитном поле // *Коллоидный журнал*. 2022. Т. 84, № 6. С. 732–739. <https://doi.org/10.31857/S0023291222600274>
11. Ionic magnetic fluid based on cobalt ferrite nanoparticles: Influence of hydrothermal treatment on the nanoparticle size / V. Cabuil, V. Dupuis, D. Talbot, S. Neveu // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2011. Vol. 323, is. 10, P. 1238–1241. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.11.013>
12. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика / пер. с англ. под ред. В. В. Гогосова. М.: Изд-во Мир, 1989. 356 с.
13. Petrov K.D., Chubarov A.S. Magnetite nanoparticles for biomedical applications // *Encyclopedia*. 2022. Vol. 2, no 4. P. 1811–1828. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2040125>
14. Park K. The beginning of the end of the nanomedicine hype // *J. Controlled Release*. 2019. Vol. 305. P. 221–222. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.05.044>
15. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 240 с.
16. Хардина А.С., Меленев П.В. Модель малого образца феррогеля с имитацией полимерной матрицы на основе жидкости Леннарда – Джонса с упругими связями // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2022. Т. 12, № 4. С. 124–139. <https://doi.org/10.21869/2223-15282022-12-4-124-139>
17. Arefyev I.M., Arefyeva T.A. Stability of magnetic fluids in magnetic fields // *Journal of nano- and electronic physics*. 2014. Vol. 6, is. 3. P. 03055.
18. Бирик Е.Е. Приготовление феррожидкости // *Коллоидный журнал*. 1973. Т. 35, № 6. С. 1141–1142.
19. Hehre W.J. A guide to molecular mechanics and quantum chemical calculations. Irvin, CA: Wavefunction, Inc., 2003. 796 p.
20. Богатырев Г.П., Гилев В.Г. Исследование концентрационной зависимости вязкости магнитной жидкости во внешнем поле // *Магнитная гидродинамика*. 1984. Т. 20, вып. 3. С. 33–38. <https://doi.org/10.22364/mhd>
21. Пшеничников А.Ф., Гилев В.Г. Реология и намагниченность концентрированных магнетитовых коллоидов // *Коллоидный журнал*. 1997. Т. 59, № 3. С. 372–379.
22. Лебедев А.В. Вязкость концентрированных коллоидных растворов магнетита // *Коллоидный журнал*. 2009. Т. 71, № 1. С. 78–83. <https://doi.org/10.1134/S1061933X09010104>
23. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчёта. М.: Химия, 1966. 536 с.
24. Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. II. Liquids // *Journal of the American Chemical Society*. 1917. Vol. 39, is. 9. P. 1848–1906. <https://doi.org/10.1021/ja02254a006>

References

1. Shliomis M.I. Magnetic fluids. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*. 1974;17:435–458. (In Russ.) <https://doi.org/10.1070/PU1974v017n02ABEH004332>
2. Kazakov Y.B., Filippov V.A. Calculation of the performance of the electromagnetic magnetic fluid separator non-magnetic materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;950:012003-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/950/1/012003>
3. Shel'deshova E.V., Churaev A.A., Ignatenko N.M., Neruchev Yu.A., Rjapolov P.A. Damping of an oscillatory system with incomplete sealing of the air cavity by a magnetic fluid. *Izvestiya Yugo-*

Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tehnika i tehnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies. 2023;13(3):128-145. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-128-145>

4. Torrice M. Does nanomedicine have a delivery problem? *ACS Central Science.* 2016;2(7):434–437. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.6b00190>

5. Wilhelm S., Tavares A., Dai Q., et al. Analysis of nanoparticle delivery to tumours. *Nature Review Materials.* 2016;(1):16014. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.14>

6. Bacri J.-C., Perzynski R., Salin D., Cabuil V., Massart R. Ionic ferrofluids: a crossing of chemistry and physics. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 1990;85(1-3):27–32. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(90\)90010-N](https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90010-N)

7. Lebedev A.V. Viscosity Anomalies of magnetic fluid stabilized by a double layer of surfactant in water. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tehnika i tehnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2023;13(4): 88-97. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-88-97>

8. Ryapolov P.A., Polunin V.M., Bashtovoi V.G., Sokolov E.A., Shel'deshova E.V. Influence of the structure and parameters of a magnetic fluid on magnetophoresis in a thin layer. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tehnika i tehnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2021;11(1):77-92. (In Russ.)

9. Arefyev I.M., Demidenko O.V., Saikin M.S. Assessment of magnetic fluid stability in non-homogeneous magnetic field of a single-tooth magnetic fluid sealer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2017;431:20–23. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.017>

10. Ivanov A.S. On the reasons for reversible aggregation of magnetite ferrofluids during their dilution with a pure carrier in zero magnetic field. *Colloid Journal.* 2022;84:696–703. <https://doi.org/10.1134/S1061933X22600257>

11. Cabuil V., Dupuis V., Talbot D., Neveu S. Ionic magnetic fluid based on cobalt ferrite nanoparticles: Influence of hydrothermal treatment on the nanoparticle size. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials = Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2011;323(10):1238-1241. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.11.013>

12. Rozensweig R.E. *Ferrohydrodynamics.* Cambridge: Cambridge university press; 1985. 344 p.

13. Petrov K.D., Chubarov A.S. Magnetite nanoparticles for biomedical applications. *Encyclopedia.* 2022;2(4):1811-1828. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2040125>

14. Park K. The beginning of the end of the nanomedicine hype. *J. Controlled Release.* 2019;305:221-222. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.05.044>

15. Berkovsky B., Medvedev V., Krakov M. *Magnetic fluids: engineering applications.* Oxford: Oxford University Press; 1993. 243 p.

16. Khardina A.S., Melenev P.V. The model of the small ferrogel sample with representation of polymer matrix as lennard-jones fluid with elastic cross-links. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tehnika i tehnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2022;12(4):124-139. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-15282022-12-4-124-139>

17. Arefyev I.M., Arefyeva T.A. Stability of magnetic fluids in magnetic fields. *Journal of nano and electronic physics.* 2014;6(3):03055.

18. Bibik E.E. Preparation of ferroliquid. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal.* 1972;35:1141–1142.

19. Hehre W.J. *A guide to molecular mechanics and quantum chemical calculations.* Irvin, CA: Wavefunction, Inc. 2003. 796 p.

20. Bogatyrev G.P., Gilev V.G. Concentration dependence of the viscosity of a magnetic liquid in an external field. *Magnitnaya gidrodinamika = Magnetohydrodynamics.* 1984;20(3):249–252. (In Russ.) <https://doi.org/10.22364/mhd>

21. Pshenichnikov A.F., Gilev V.G. Rheology and magnetization of concentrated magnetic colloids. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal.* 1997;59(3):372–379. (In Russ.)

22. Lebedev A.V. Viscosity of concentrated colloidal solutions of magnetite. *Colloid Journal*. 2009;71:82–87. <https://doi.org/10.1134/S1061933X09010104>
23. Bretschneider S. Properties of gases and liquids. Engineering methods of calculation. Moscow: Khimiya; 1966. 536 p. (In Russ.)
24. Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. II. Liquids. *Journal of the American Chemical Society*. 1917;39(9):1848–1906. <https://doi.org/10.1021/ja02254a006>
-

Информация об авторе / Information about the Author

Иванов Алексей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Динамики дисперсных систем, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация, e-mail: lesnichiy@icmm.ru, ORCID: 0000-0003-1743-3526

Aleksey S. Ivanov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory «Dynamics of dispersed systems», Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, the affiliate of the Perm Federal Scientific Research Center, Perm, Russian Federation, e-mail: lesnichiy@icmm.ru, ORCID: 0000-0003-1743-3526