

УДК 541.48-143:542.97

СИНТЕЗ ПАРАМАГНИТНЫХ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ДИАМАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ

Д. В. Друина¹, О. Е. Журавлёв², А. И. Иванова¹

Тверской государственный университет,

¹*кафедра прикладной физики*

²*кафедра органической химии*

Изучены условия пассивной диамагнитной левитации слабомагнитных тел. Синтезированы ионные жидкости с высокой парамагнитной восприимчивостью и предложено их применение в качестве буферной среды, значительно повышающей эффективность магнитного подвеса. Осуществлены демонстрационные эксперименты, иллюстрирующие воздействие магнитного поля на ионные жидкости. С применением буферных растворов осуществлён свободный подвес слабомагнитных тел, левитация которых в обычных условиях (в вакууме или в воздушной атмосфере) невозможна. Указанный метод существенно расширяет функциональные возможности магнитной левитации для манипуляции разными типами объектов. Предложена и экспериментально подтверждена концепция использования магнитной доменной структуры в качестве магнитных ловушек для микрообъектов с перспективой создания на их основе магнитоуправляемых микроманипуляторов.

Ключевые слова: *парамагнитная ионная жидкость, буферный раствор, магнитная левитация*

1. Введение. В последние годы значительно возрос интерес к такому классу соединений, как ионные жидкости (ИЖ). ИЖ – это соли, жидкие при температурах, близких к комнатной. Главные характеристики ИЖ – это высокая термическая стабильность, низкое давление паров, хорошая растворяющая способность, нетоксичность, негорючесть. ИЖ применяются как растворители, катализаторы, экстрагенты, в получении полимеров, наноматериалов и др. [1–3].

В [4, 5] был обнаружен значительный отклик ИЖ на внешнее магнитное поле, если в составе ИЖ в качестве противоиона выступает тетрахлорферрат анион. Известно, что физико-химические свойства ионных жидкостей и, в частности, парамагнитных ионных жидкостей зависят от природы как катиона, так и аниона, и при варьировании их структуры возможно изменение физико-химических свойств соединений. Очевидно, что установление зависимости между структурой парамагнитной ионной жидкости и физико-химическими свойствами является важной задачей, поскольку ее решение позволит

проводить направленный синтез ионных жидкостей с заданными свойствами и применять их в конкретных целях.

Целью данной работы явилось изучение возможности использования синтезированных парамагнитных ионных жидкостей в качестве сред для левитации диамагнитных макро- и микрообъектов. Для достижения поставленной цели необходимо было синтезировать новые ионные жидкости, различающиеся природой и структурой катиона и содержащие одноименный парамагнитный $[\text{FeCl}_4]^-$ анион.

2. Синтез ИЖ. В качестве базовых соединений для синтеза ИЖ были использованы хлориды четвертичного аммония, пиридиния и имидазолия. Исходные третичные амины, которые были использованы для синтеза четвертичных солей, получены из вторичных аминов - диэтиламина и имидазола реакцией нуклеофильного присоединения. В качестве субстратов использовались производные акриловой кислоты с различной природой заместителей. Четвертичные соли получены кватернизацией третичных аминов различными алкилхлоридами. Схема синтеза хлоридов четвертичного пиридиния, имидазолия и аммония представлена на рис. 1. Выход хлоридов составлял от 45 до 95 % в зависимости от строения как субстрата, так и кватернизирующего агента. Синтезированные соли представляют собой белые кристаллические вещества или прозрачные вязкие массы.

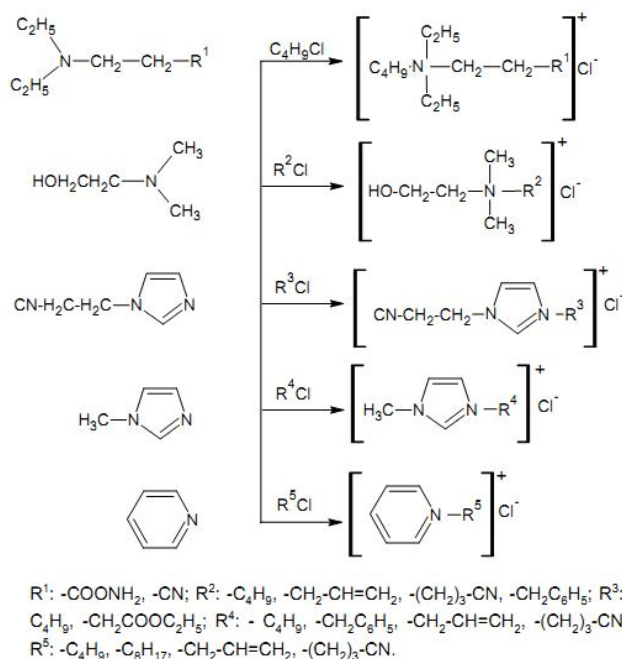


Рис. 1. Схемы синтеза хлоридов четвертичного имидазолия, пиридиния и аммония

Тетрахлорферраты аммония, имидазолия и пиридиния были получены взаимодействием соответствующих солей с хлоридом железа (III) в абсолютном этаноле (рис. 2). Реакция протекает легко с количественным выходом. Полученные тетрахлорферраты представляют собой жидкости или кристаллические низкоплавкие вещества зеленого или коричневого цветов. Все синтезированные парамагнитные ионные жидкости – полярные гидрофильные соединения.

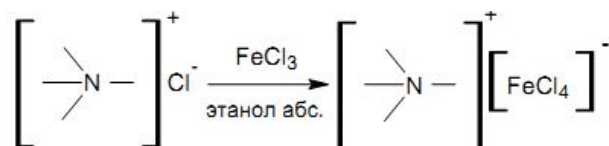


Рис. 2. Общая схема получения тетрахлорферратов. N_4^+Cl^- – соли аммония, имидазолия и пиридиния

Методы получения ионных жидкостей достаточно просты. В настоящей работе были синтезированы новые магнитные ионные жидкости (МИЖ) на основе алкилпиридиний хлоридов и FeCl_3 . Выбор этого типа МИЖ связан с недавно появившимися в печати сообщениями японских исследователей об обнаружении сильных магнитных свойств [4, 5]. Работы по синтезу МИЖ были проведены на кафедре органической химии ТвГУ.

Одной из проблем, возникших при проведении твердофазном синтезе тетрахлорферратов алкилпиридиния, явилось выделение значительного количества тепла, а также возможность разложения исходной четвертичной соли, что приводит к уменьшению выхода магнитной ионной жидкости. С целью смягчения условий процесса приготовления магнитных ионных жидкостей и устранения возможности образования примесей, ухудшающих свойства целевого продукта, мы проводили реакции в растворителе. По окончании реакции растворитель упаривали, и продукт высушивали в вакууме; в условиях твердофазного синтеза продукт также высушивали в вакууме.

Твердофазный синтез МИЖ:

смесь 0,005 моль $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ с 0,005 моль четвертичной соли нагревали при постоянном перемешивании, до тех пор, пока смесь не превращалась в однородную вязкую массу темно зеленого или темно-коричневого цвета.

Синтез МИЖ в растворителе:

смесь 0,005 моль $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ с 0,005 моль четвертичной соли и растворяли в 3 мл ацетона. Раствор нагревали с обратным

холодильником на водяной бане в течение 10...15 мин. Ацетон выпаривали.

Состав и магнитные свойства синтезированных МИЖ приведены на рис. 3 и в таблице 1. Магнитная восприимчивость измерялась на вибрационном магнитометре Oxford Instruments в Институте Нееля в Гренобле (Франция).

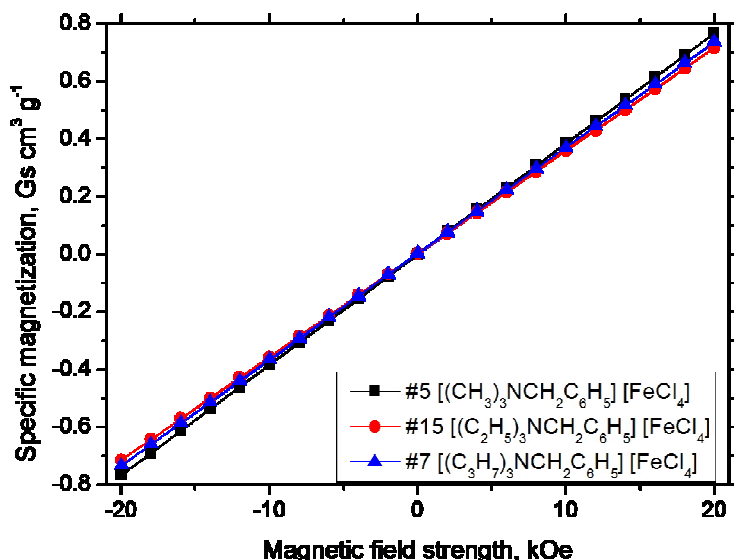


Рис. 3. Кривые намагничивания трёх синтезированных образцов МИЖ (измерено на вибрационном магнитометре Oxford Instruments)

Таблица 1. Магнитная восприимчивость ионных жидкостей, исследованных в настоящей работе

Ионная жидкость	Удельная магнитная восприимчивость, $\text{см}^3 \cdot \text{Г}^{-1} \cdot 10^{-6}$
#5. $[(\text{CH}_3)_3\text{NCH}_2\text{C}_6\text{H}_5] [\text{FeCl}_4]$	38,4
#15. $[(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{NCH}_2\text{C}_6\text{H}_5] [\text{FeCl}_4]$	35,8

Ниже описываются опыты, проведённые с полученными МИЖ.

3. Опыты с парамагнитной буферной жидкостью. В качестве одной из областей применения ионных жидкостей предлагается использовать их в качестве сред для магнитной левитации различных объектов диамагнитной природы.

Диамагнитное вещество, помещённое в магнитное поле, намагничивается в направлении, противоположном полю. Вследствие этого появляются силы, выталкивающие диамагнетик из магнитного поля. Сила F , действующая в магнитном поле с индукцией B на диамагнитное тело единичного объёма с относительной магнитной проницаемостью μ_r и восприимчивостью $\chi = \mu_r - 1$, равна [6-10].

$$F = \frac{1}{2\mu_0} \chi V \nabla B^2.$$

Для реализации стабильной левитации на воздухе восприимчивость χ должна быть отрицательной, магнитная и гравитационная силы должны уравновесить друг друга, т.е.

$$\frac{1}{\mu_0} \chi B \nabla_z B = \rho g.$$

Отсюда условие вертикальной левитации запишется в виде

$$B \nabla_z B = \frac{\mu_0 \rho g}{\chi}.$$

Приведённая формула удобна для оценки возможности левитации конкретных материалов в поле заданной конфигурации.

При учёте свойств окружающей среды (при погружении тела в жидкость) предыдущая формула приобретёт вид

$$B \nabla_z B = \frac{(\rho - \rho_{\text{ж}})}{(\chi - \chi_{\text{ж}})} \mu_0 g.$$

где ρ и $\rho_{\text{ж}}$ – плотности тела и жидкости, χ и $\chi_{\text{ж}}$ – магнитные восприимчивости тела и окружающей среды.

В табл. 1 приведены оценки условий левитации некоторых веществ на воздухе и в парамагнитной жидкости с парамагнитной восприимчивостью $\chi_{\text{ж}} = 1,4 \times 10^{-3}$ (азотнокислый диспрозий).

Как видно из табл. 2, буферная жидкость резко снижает требования к параметрам магнитного поля, необходимого для свободного подвеса. Так, для подвеса чистой меди на воздухе требуется поле $B \nabla B = -11396 \text{ T}^2 \text{ м}^{-1}$, а в буферном растворе для подвеса достаточно значения $B \nabla B = -61,7 \text{ T}^2 \text{ м}^{-1}$, т.е. почти в 200 раз меньше. Это говорит о значительных резервах в осуществлении левитации таких материалов, подвес которых в обычных условиях оказывался трудно достижимым или невозможным. Более того, поскольку для левитации играет роль множитель $(\chi - \chi_{\text{ж}})$, т.е. разность восприимчивостей объекта и буфера,

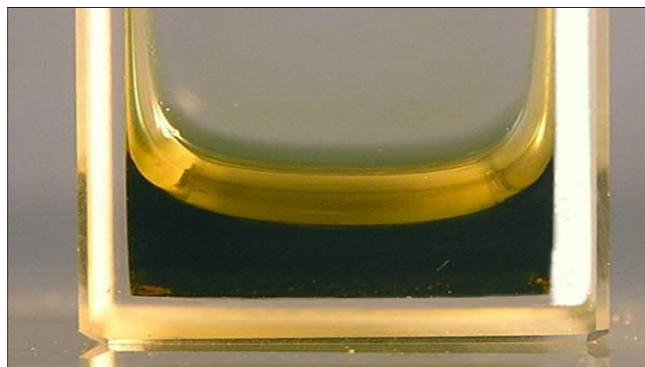
то не является обязательным требование диамagnetного характера объекта, который может иметь очень малую или нулевую диамagnetную восприимчивость, или даже некоторую положительную парамагнетную восприимчивость, важно лишь ненулевое значение разности ($\chi - \chi_{ж}$). Другими словами, парамагнетный буфер может обуславливать диамagnetный характер поведения объекта, который сам по себе не обязательно является диамagnetиком. К этому следует добавить, что выбор веществ парамагнетного буфера является значительно более богатым, чем у диамagnetиков, и имеется достаточно большой выбор парамагнетиков со сравнительно высокими значениями парамагнетной восприимчивости. К таким парамагнетикам относятся в первую очередь соли железа, марганца и ряда редкоземельных элементов (диспрозия, гадолиния, тербия) с большими атомными магнетными моментами.

Т а б л и ц а 2. Условия левитации некоторых веществ на воздухе и в буферной жидкости

Материал	Молекулярная масса, г	$\chi \times 10^{-6}$, СИ	Плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	$B \nabla B$ (2,67 М), $\text{T}^2 \text{м}^{-1}$	$B \nabla B$ (воздух), $\text{T}^2 \text{м}^{-1}$
C_{\perp}	16,011	-885,3	2270	-3,6	-32
C_{\parallel}	16,011	-15,7	2270	-5,7	-1785
В	10,811	-18,3	2340	-6,3	-1579
Si	28,086	-4,2	2329	-6,3	-6844
Al_2O_3	101,961	-18,1	3970	-19,9	-2701
Ti	47,887	182,1	4540	-28,4	307
Zn	65,39	-15,7	7133	-46,2	-5599
Sn	118,71	-29,2	7310	-47,3	-3080
Cu	63,546	-9,7	8960	-61,7	-11396
Bi	208,98	-164,1	9747	-61,8	-732
Ag	107,87	-23,8	10500	-73,9	-5427
Pb	207,2	-15,8	11350	-81,4	-8862
Au	196,97	-34,4	19320	-145,9	-6921
H_2O	17,999	-9,1	1000	—	-1361

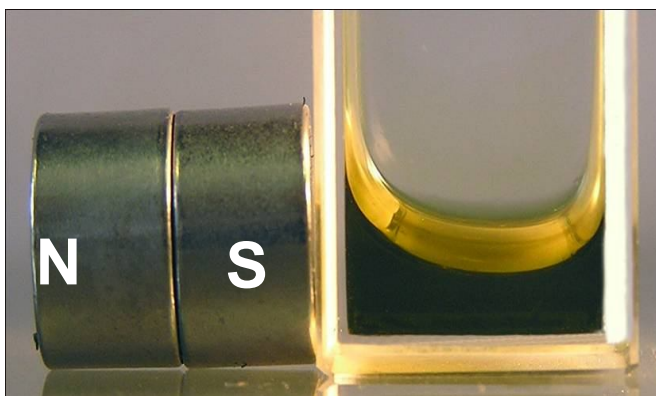
Переходя к выбору наиболее подходящих буферных парамагнитных жидкостей, в первую очередь можно выделить ряд водных растворов солей железа и марганца. Однако проведённые опыты показали, что несмотря на удовлетворительные значения парамагнитной восприимчивости, эти соли не обладают биологической совместимостью. По этой причине выбор падает на новые типы химических соединений - ионные жидкости, которые благодаря своим свойствам прочно заняли место в «зелёной химии» как альтернативные среды для замены токсичных, взрывоопасных и агрессивных реакционных веществ.

На рис. 4 представлено изображение небольшого количества (около 3 мл) МИЖ #5 в оптической кювете. Образец характеризуется тёмнокоричневой окраской. По форме мениска видно, что МИЖ хорошо смачивает стекло.



Р и с . 4. Ионная жидкость в оптической кювете

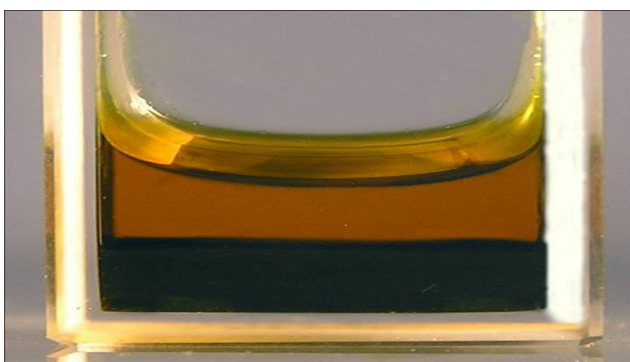
На рис. 5 представлено изображение того же образца при наложении внешнего магнитного поля постоянных магнитов. Эти магниты создают неоднородное поле, значение которого на левой стенке кюветы составляет около 200 мТ и спадает до 20 мТ на правой стенке кюветы. Видно некоторое искривление формы мениска под действием магнитного поля и смещение центра тяжести столба жидкости влево в область больших значений поля. Это обстоятельство указывает на то, что синтезированная ИЖ является парамагнитной или ферромагнитной. Вместе с тем при сравнении с аналогичным опытом S. Hayashi [4, 5] видно, что подъём жидкости в нашем эксперименте выражен заметно слабее.



Р и с . 5. Ионная жидкость в оптической кювете под воздействием постоянного магнита

Для выяснения этого различия были проведены дальнейшие опыты. На рис. 6 представлено изображение распределения ИЖ и слоя растительного масла. Эти две жидкости не смешиваются друг с другом. Плотность растительного масла меньше плотности МИЖ, поэтому слой МИЖ находится внизу. Характерно, что граница раздела между жидкостями становится плоской.

Если теперь воздействовать на эту смесь тем же магнитным полем, что и ранее, то налицо значительное усиление эффекта притягивания МИЖ к левой стенке кюветы (рис. 7).



Р и с . 6. Растительное масло (светло-коричневого цвета) на поверхности ИЖ

Эти результаты демонстрируют важную роль второго слоя жидкости на наблюдаемый эффект, о чём умалчивали авторы работ [4, 5]. Дальнейшие опыты показали, что эффект может быть ещё усилен, если подбирать плотность второй жидкости по возможности ближе к плотности ИЖ (рис. 8).

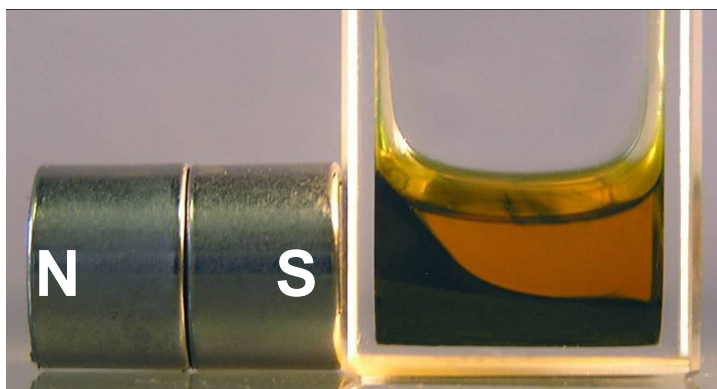


Рис. 7. Изменение формы поверхности ИЖ под воздействием системы постоянных магнитов при наличии растительного масла



Рис. 8. Деформация формы поверхности парамагнитного слоя ИЖ в нитробензоле

Точные количественные данные измерений парамагнитной восприимчивости МИЖ, представленные ранее на рис. 3 и в табл. 1, подтверждают сделанные качественные рассуждения: синтезированные МИЖ являются чистыми парамагнетиками (кривая намагничивания линейна) со значительной (но не экстраординарной, как это пытались представить авторы [4, 5]) удельной парамагнитной восприимчивостью $(35...38) \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$.

На рис. 9 представлены изображения фигур растекания капель МИЖ на гидрофобной подложке, установленной на градиентной системе из четырёх прямоугольных магнитов. Как и следовало ожидать, исходя из учёта парамагнитных свойств МИЖ, процесс растекания капли происходит под влиянием градиентного поля. Градиенты поля

максимальны вдоль линий соединения магнитов разной полярности, поэтому именно вдоль этих линий и происходит растекание. Характерная деталь относится к полю в центре системы, в котором значения полей невелики. Это может приводить к образованию некоей труднодоступной зоны в центре, что проявляется в виде незалитого центрального пятна.

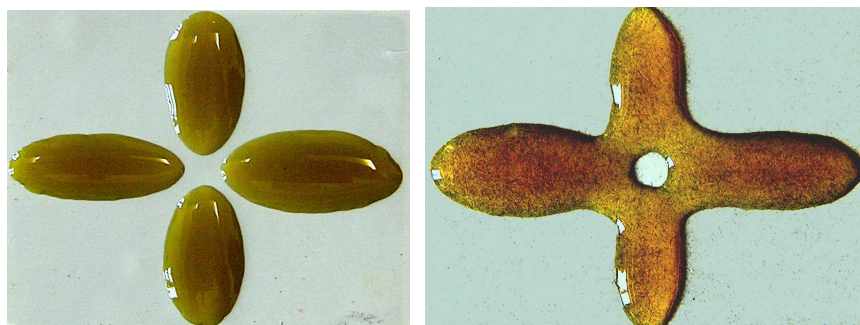


Рис. 9. Образование крестовидных фигур из капель парамагнитной ИЖ на гидрофобной поверхности под действием градиентной системы квадрупольных постоянных магнитов

4. Левитация слабомагнитных объектов в буферной жидкости. На рис. 10 представлены примеры успешного подвеса ряда объектов, погружённых в ИЖ (зёрна риса, чечевицы и пластинки монокристаллического кремния). Все эти объекты обладают малой магнитной восприимчивостью. Оценки значений $B \nabla B$ для этих веществ свидетельствуют о том, что в обычных лабораторных условиях (исключая применение уникальных сверхпроводящих источников сверхсильных полей) свободный подвес этих материалов невозможен.

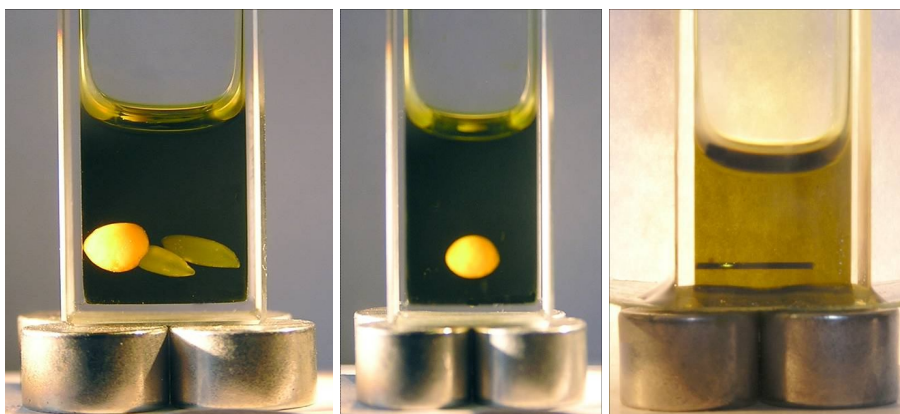
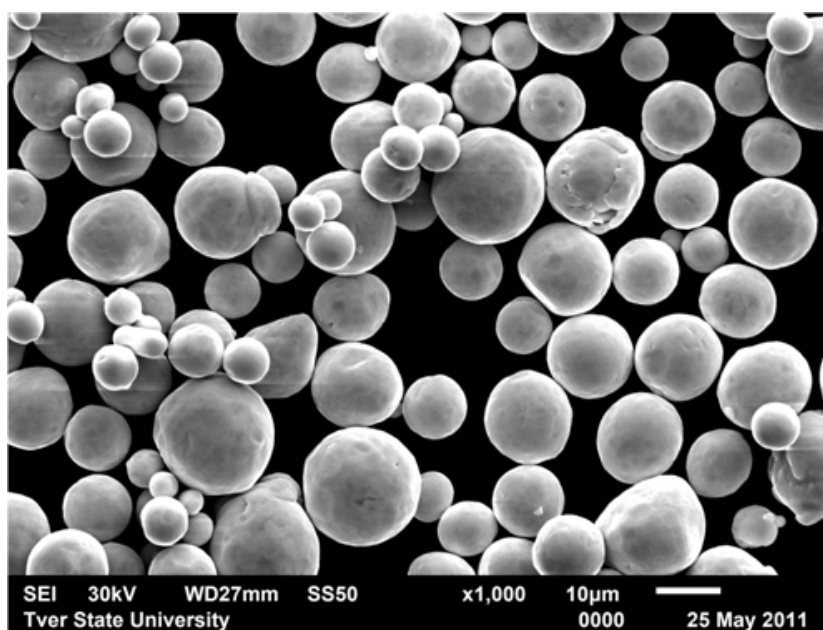


Рис. 10. Подвес зерен риса, чечевицы и кремниевой пластины в парамагнитной ИЖ жидкости над системой постоянных магнитов. Система составлена из четырех цилиндров ($d = 8$ мм, $h = 5$ мм) с чередующейся полярностью

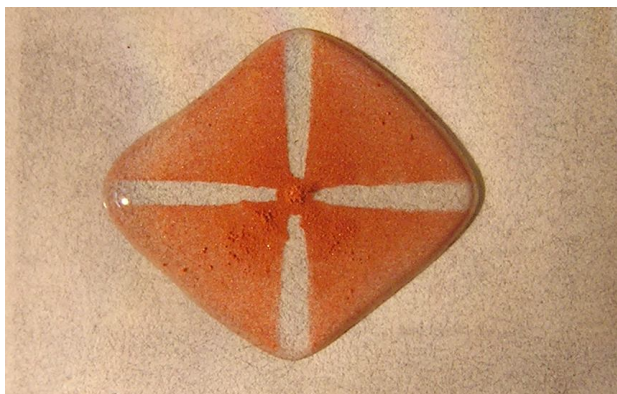
Представленные данные показывают, что с использованием ИЖ эта задача успешно решается. При переходе к объектам меньшего размера следует исходить из того положения, что при уменьшении линейных размеров магнита в k раз значение поля в сходственных точках не изменится, следовательно, градиент поля увеличится в k раз.

При выполнении экспериментов в качестве одного из тестовых объектов были выбраны сферические частицы чистой меди диаметром 2...15 мкм (рис. 11). Из представленного снимка видно, что форма частиц порошка весьма близка к сферической, а разброс размеров находится в удобном для наблюдений диапазоне 2...15 мкм.

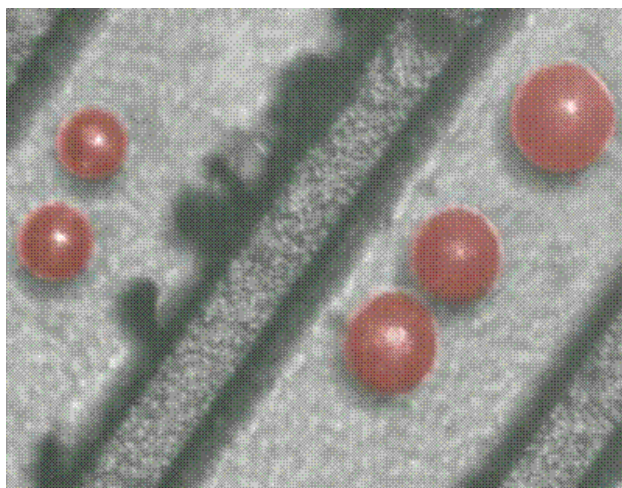


Р и с. 11. Тестовые микросферы меди \varnothing 2...15 мкм

На рис. 12 показана картина осадка порошка меди в ИЖ на поверхности ранее рассмотренной градиентной системы из 4-х магнитов. Медь является слабым диамагнетиком; её погружение в парамагнитную жидкость приводит к усилению диамагнитного эффекта, что выражается в образовании крестообразной фигуры, свободной от меди, что легко регистрируется на оптическом микроскопе. Следует обратить внимание на то, что данное поведение типично именно для диамагнитных веществ (выталкивание из области большого поля), и оно прямо противоположно поведению парамагнитной МИЖ при образовании креста, показанного на рис. 9, т.к. парамагнитные вещества втягиваются в зоны больших полей с высоким градиентом.



Р и с . 12. Порошковый осадок частиц меди в парамагнитной ИЖ. Диамангнитные частички меди выталкиваются из областей с сильным магнитным полем, образуя белый мальтийский крест



Р и с . 13. Левитация шариков меди (\varnothing 4...8 мкм) в буферной ИЖ в градиентном поле микропрофилированной магнитной плёнки

Дальнейшие опыты подтвердили повышение эффективности дивамагнитного подвеса при уменьшении размеров постоянных магнитов. На рис. 13 частицы меди диаметром \varnothing 2..10 мкм левитируют в градиентном магнитном поле, созданном микропрофилированной плёнкой постоянного магнита с периодической полосовой структурой, создающей знакопеременное поле с большим градиентом в направлении, перпендикулярном полосам.

Дальнейшая работа привела к выработке новой концепции в технологии магнитного управления (манипуляцией) диамангнитными частицами. Эта концепция состоит в использовании магнитных полей, создаваемых 180-градусными границами магнитных доменов одноосных материалов (в данном случае монокристалла SmCo_5) в

качестве магнитной ловушки (рис. 14 и 15). Достоинствами подобной схемы управления по сравнению с известными прототипами [11–16] является образование высокоградиентных полей на поверхности кристалла (благодаря малой толщине доменных границ порядка десятков нм) и возможность бесконтактного управления движением доменных границ (следовательно, перемещением захваченных в ловушку микрочастиц) с помощью внешних магнитных полей соответствующей конфигурации.

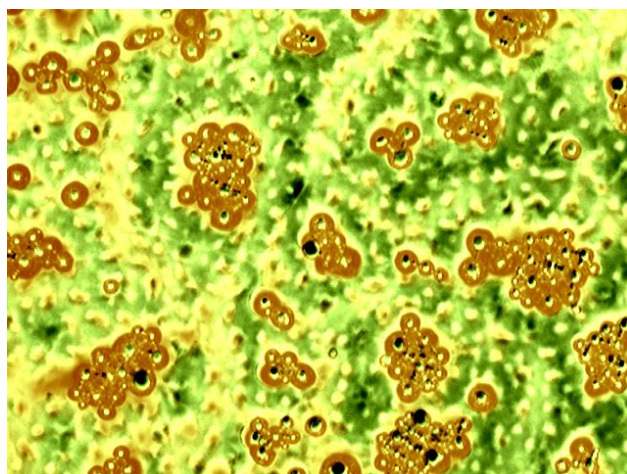


Рис. 14. Левитация ансамблей частиц меди на поверхности монокристалла SmCo_5 . Ансамбли частиц, напоминающие по внешнему виду красную икру – медные микросферы, зелёные контуры – 180-градусные границы монокристалла

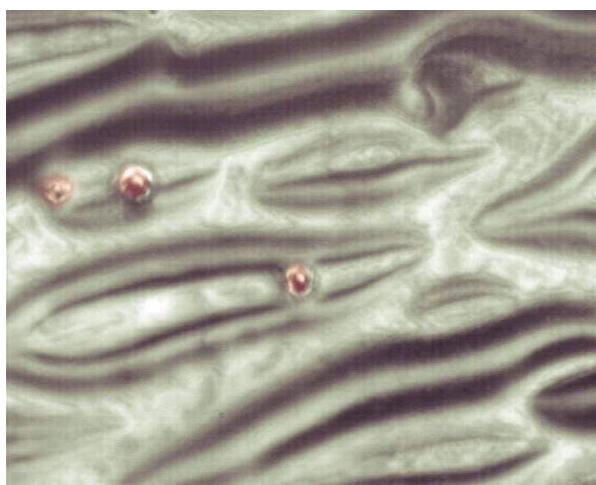


Рис. 15. Медные микросферы ($\varnothing 4 \dots 8$ мкм) в магнитных микроловушках, образованных границами доменов на поверхности монокристалла SmCo_5

5. Заключение. Синтезированы новые парамагнитные ионные жидкости (ИЖ), различающиеся природой и структурой катиона и содержащие одноименный парамагнитный тетрахлорферрат анион. Дана количественная оценка значений их магнитной восприимчивости $(35.8...38.4) \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$. Показано, что синтезированные ИЖ могут быть использованы в качестве буферных сред для магнитного манипулирования различными микро- и макрообъектами. С применением буферных ИЖ осуществлён свободный подвес слабомагнитных тел, левитация которых в обычных условиях (в вакууме или в воздушной атмосфере) невозможна. Указанный метод существенно расширяет функциональные возможности магнитной левитации для манипуляции разными типами объектов. Предложена и экспериментально подтверждена концепция использования магнитной доменной структуры в качестве магнитных ловушек для микрообъектов с перспективой создания на их основе магнитоуправляемых микроманипуляторов.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и с использованием оборудования Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Список литературы

1. Seddon K.R. Ionic Liquids for Clean Technology // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 1997. V. 68. I. 4. P. 351–356.
2. Welton T. Room-Temperature Ionic Liquids. Solvents for Synthesis and Catalysis // *Department of Chemistry, Imperial College of Science Technology and Medicine, London*. 1999. V. 99 (8). P. 2071–2084.
3. Huddleston J.G., Visser A.E., Reichert W.M., Willauer H.D., Broker G.A., Rogers R.D. Characterization and comparison of hydrophilic and hydrophobic room temperature ionic liquids incorporating the imidazolium cation // *Green Chem*. 2001. V. 3. P. 156–164.
4. Hayashi S. and Hamaguchi H. *Chem. Letters*. 2004. V. 33. P. 1590.
5. Hayashi S., Saha S., Hamaguchi H. A new class of magnetic fluids: bmim[FeCl₄] and nbmim[FeCl₄] ionic liquids // *IEEE Trans Magn*. 2006. V. 42. P. 12-14. 2006. V. 42. P. 12-14.
6. Braunbeck W. Frei schwebende Körper im elektrischen und magnetischen Feld // *Z. Phys*. 1939. B. 112. S. 753.
7. Понизовский В.М. Свободный подвес диамагнитных тел в постоянном магнитном поле // *Успехи физических наук*. 1970. Т. 100, вып. 3. С. 511.

8. Boerdijk A.H. Levitation by static magnetic fields // Philips Research Repts. 1956. V. 11, № 1. P. 45.
9. Boerdijk A.H. Technical aspects of levitation // Philips Technical Rev. 1956/57. V. 18, № 4/5. P. 125.
10. Küstler G. Diamagnetic Levitation – Historical Milestones // Rev. Roum. Sci. Techn. 2007. V. 52, № 3. P. 265–282.
11. Profijt H.B. Stable diamagnetic self-levitation of a micro-magnet by improvement of its magnetic gradients // J. Magn. Magn. Mater. 2009. V. 321. P. 259–262.
12. Kokorian J. Traineeship report. Diamagnetic levitation of sputtered Nd-Fe-B thick films above polished Highly Oriented Pyrolytic Graphite. 2009.
13. Lyuksyutov I.F., Naugle D.G., Rathnayaka K.D.D. On-chip manipulation of levitated femtodroplets // Applied Physics Letters. 2004. V. 85. P. 1817–1819.
14. Chetouani H., Haguët V., Jeandey C., Pigot C., Walther A., Dempsey N.M., Chatelain F., Delinchant B., Reyne G. Diamagnetic levitation of beads and cells above permanent magnets // IEEE Transducers Eurosensors 2007. V. 715.
15. Pigot C. Diamagnetic Levitation of Solids at Microscale // IEEE Trans. on Magnetics. 2008. V. 44, № 11. P. 4521–5524.

SYNTHESIS OF PARAMAGNETIC IONIC LIQUIDS AND THEIR APPLICATION FOR DIAMAGNETIC LEVITATION

D. V. Druina¹, O.E. Zhuravlyov², A.I. Ivanova¹

Tver State University

¹*Chair of Applied Physics,*

²*Chair of Organic Chemistry*

Conditions of passive diamagnetic levitation of weakly magnetic substances are studied. Highly paramagnetic ionic liquids were synthesized and their application as a buffer medium considerably increasing the efficiency of magnetic suspension is proposed. Demonstration experiments illustrating the effect of magnetic field on ionic liquids are performed. Making use of buffer liquids weakly magnetic bodies which levitation was impossible in ordinary conditions (in vacuum or air) were suspended successfully. This method considerably expands the functional possibilities of magnetic levitation for manipulation of different objects. A concept of employing magnetic domain structures as magnetic traps for microobjects is proposed and confirmed experimentally thus opening perspectives of their application in magnetically controlled micromanipulators.

Keywords: *paramagnetic ionic liquid, buffer solution, magnetic levitation*

Об авторах:

ДРУИНА Дарья Викторовна – аспирант кафедры прикладной физики ТвГУ, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33;
e-mail: sabiooon@mail.ru;

ЖУРАВЛЁВ Олег Евгеньевич – к.х.н., доцент кафедры органической химии ТвГУ; *e-mail:* pischem@mail.ru;

ИВАНОВА Александра Ивановна – соискатель, ведущий программист, ассистент кафедры прикладной физики ТвГУ.