Борисенко Олег Васильевич
Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры экспериментальной физики
Физико-технического факультета
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»



Применение нестандартных материалов в лабораторном практикуме по физике

Введение

Обычно в процессе выполнения лабораторной работы от ученика требуется определение какой-либо хорошо известной физической величины (ускорения свободного падения, удельного сопротивления меди, коэффициента динамической вязкости воздуха и пр.), сравнить полученный результат с табличным значением этой величины и вычислить относительную погрешность эксперимента. Это является не только чрезвычайно важным для углубленного понимания изучаемого материала, но и дает возможность ученику получить определенный навык работы с измерительными приборам.

Вместе с тем для учащихся лицеев с углубленным изучением физики этого явно недостаточно. Поскольку выпускники таких учебных заведений могут связать свою жизнь и деятельность с научной работой, очень важно уже со школьной скамьи приучать их к научно-исследовательской работе, когда не просто нужно что-то измерить, а исследовать процессы, протекающие в какой либо, желательно «экзотической» среде, когда заранее невозможно сделать каких-то предположений о конечном результате. При этом наиболее активно задействуется мыслительный процесс, воспитываются в человеке такие важные стороны, как пытливость, усидчивость, внимательность, азарт в самом хорошем смысле этого слова, и другие черты, крайне важные для будущего исследователя. Очень хорошо, если такой эксперимент предполагает использование оборудования, не предусмотренного школьной программой. В этом случае учащийся уже с юного возраста приобретает навыки работы со специализированным оборудованием, что может благотворно сказаться в его будущей деятельности.

В качестве одной из таких необычных для школьника сред можно рассматривать магнитную жидкость, синтезированную в 60-х годах прошлого столетия. В настоящей статье предлагается возможность исследования падения капли магнитной жидкости в водной среде при воздействии на каплю вращающегося магнитного поля.

Магнитная жидкость

Магнитные жидкости (МЖ) представляют собой высокоустойчивые коллоидные растворы ферро- и ферримагнитных частиц размером порядка 10 нм в жидкой немагнитной среде. В качестве жидкой основы таких растворов обычно используются керосин, вода, ртуть, толуол, минеральные и кремнийорганические масла. В качестве твёрдой фазы ферромагнитных коллоидов используется высокодисперсное железо, ферромагнитные окислы Fe_2O_3, Fe_3O_4 [1, 2], ферриты никеля, кобальта. Магнитные свойства МЖ определяются размерами, магнитной структурой ферромагнитных частиц, их взаимодействием, а также содержанием магнитной фазы, объем которой может достигать 25 процентов от объема МЖ. Такие МЖ в силу их ультрадисперсности способны сохранять однородность и стабильность магнитных свойств на протяжении нескольких десятков лет [1, 2].

Дисперсные частицы вследствие малости их размеров находятся в интенсивном броуновском движении. Агрегативная устойчивость коллоидных систем с магнитной дисперсной фазой обеспечивается адсорбционными слоями, препятствующими сближению частиц на такие расстояния, при которых энергия притяжения оказывается больше энергии теплового движения. С этой целью в коллоид вводится определенное количество стабилизатора — поверхностно-активного вещества (ПАВ), в качестве которого обычно используют вещества, состоящие из полярных органических молекул. Наиболее распространённым стабилизатором является олеиновая кислота. Одной из самых распространенных и устойчивых магнитных жидкостей является коллоид с магнетитовыми частицами и керосином в качестве дисперсионной среды. Намагниченность таких, сохраняющих текучесть, магнитных жидкостей может достигать величины 100 кА/м. Магнитная восприимчивость магнитных жидкостей существенно зависит не только от объемной концентрации дисперсной фазы и намагниченности насыщения ее вещества, но и от размера коллоидных частиц. Как правило, ее величина составляет 10-15 единиц для устойчивой МЖ со средним размером частиц около 10 нм и объемной концентрацией 25%. Вместе с тем ее значение может быть почти на порядок выше для коллоидов с большим диаметром частиц, в которых, кроме всего прочего, усиливается роль взаимодействия частиц.

Одним из наиболее интересных и важных в научном и прикладном плане свойств МЖ является их способность эффективно взаимодействовать с магнитными полями при сохранении текучести. При этом они способны сохранять однородность в течение многих лет, без изменения величин магнитной восприимчивости и намагниченности, что позволяет широко использовать их в технике и современных технологиях. Таким образом, основным средством управления магнитными жидкостями является магнитное поле. Так, с помощью воздействия на магнитную жидкость неоднородного магнитного поля можно достичь объемных пондеромоторных сил, на несколько порядков превышающих силу тяжести. Благодаря этому на основе магнит-

ных жидкостей разрабатываются магнитожидкостные сепараторы, амортизирующие элементы, датчики ускорения и другие устройства.

Кроме того, способность магнитных сил удерживать такие среды в определенных участках пространства способствовала разработке на их основе магнитожидкостных сепараторов, управляемых смазочных материалов, магниточувствительных сред для дефектоскопии.

Описание экспериментальной установки и суть эксперимента

Исследование особенностей движения капли магнитной жидкости во вращающемся магнитном поле осуществляется с помощью экспериментальной установки, схема которой показана на рисунке 1.

Вращающееся магнитное поле создается при помощи двух пар катушек Гельмгольца, расположенных взаимно перпендикулярно. На обмотки катушек подается переменное напряжение одинаковой частоты в диапазоне от 1 до 30 Гц, со сдвигом фаз 90° от низкочастотного звукового генератора WW506 и двух усилителей мощности LV 103 с возможностью плавной регулировки коэффициента усиления. При этом необходимо заранее провести градуировку катушек (зависимость индукции магнитного поля от силы тока в обмотке) с помощью измерителя магнитной индукции и амперметра. Для расчета напряженности вращающегося магнитного поля определяются амплитудные значения напряжённостей H_1 и H_2 магнитных полей каждой пары катушек. Для этого последовательно с обмотками следует включить постоянные резисторы сопротивлением по 1 Ом и мощностью 10 Вт. Падение напряжения с каждого из них подается на входы цифрового осциллографа DS5062CA, что позволяет измерять амплитуды силы тока I_1 и I_2 в обмотках, после чего определить результирующую величину напряжённости вращающегося магнитного поля, используя градуировочные данные катушек.

При воспроизведении эксперимента допустимо, естественно, использование отличного от указанного выше оборудования, характеризующегося аналогичными параметрами.

В области однородности магнитного поля катушек Гельмгольца располагается стеклянная кювета 1, наполненная водой. В кювету с помощью медицинского шприца вводится капля 2 магнитной жидкости типа магнетит в керосине с олеиновой кислотой в качестве стабилизатора. Диаметр капли рекомендуется варьировать в диапазоне от 1 мм до 3 мм. Движение капли регистрируется с помощью видеокамеры при частоте съёмки не менее 300 кадров в секунду, что позволяет при изучении видеозаписей в замедленном режиме анализировалось поведение падающей капли.

В отсутствии магнитного поля капля МЖ в воде принимает сферическую форму и падает равномерно прямолинейно. При этом на нее действуют сила тяжести, сила сопротивления среды и архимедова сила, которые при установившемся движении компенсируют друг друга (эффект Стокса), в результате чего капля движется равномерно.

Если на каплю дополнительно воздействовать однородным враща-

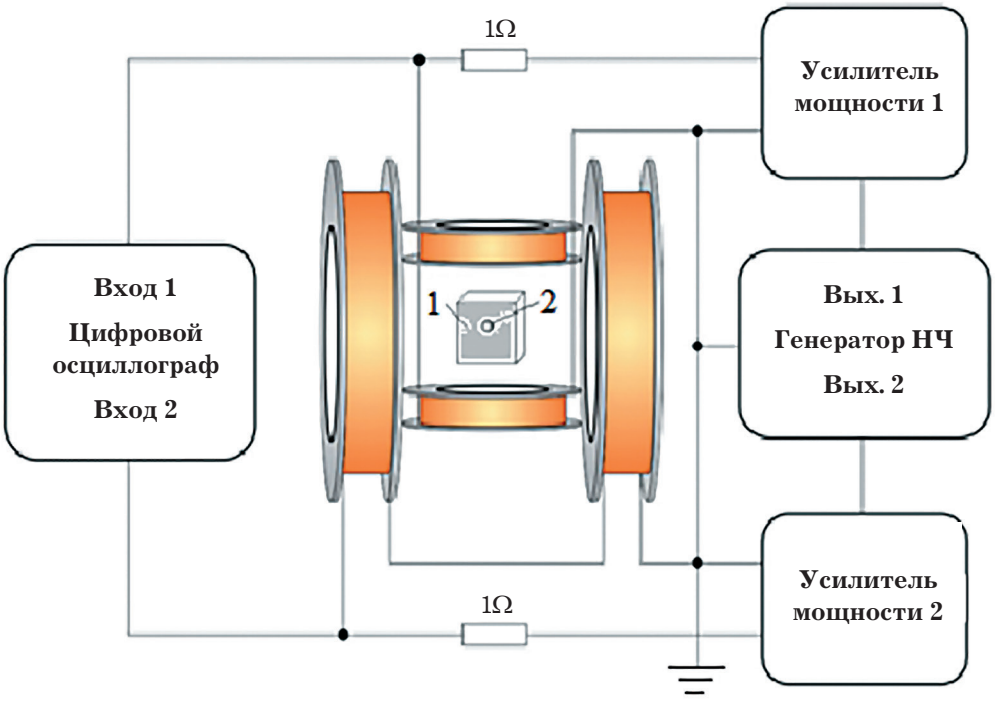

Рис. 1. Схема эксперементальной установки

ющимся в вертикальной плоскости магнитным полем, то она принимает форму эллипсоида, который начинает вращаться и изменять траекторию движения, отклоняясь влево или вправо в зависимости от направления вращения вектора магнитной индукции поля. Такое поведение можно объяснить проявлением эффекта Магнуса. Скорость набегающего потока совпадает по направлению со скоростью слоев воды, увлекаемых вращающейся поверхностью капли, с одной стороны и противоположна с другой. При этом возникает разность давлений по разные стороны эллипсоидальной капли. В результате появляется действующая в плоскости падения капли сила, направленная горизонтально и отклоняющая каплю от прямолинейного движения. Чем больше величина магнитного поля и скорость его вращения, тем больше угол отклонения от прямолинейного движения.

Таким образом может быть легко описано движение сферического тела. Но в условиях данного эксперимента капля имеет эллипсоидальную форму, и при этом вращается, в результате чего изменяется лобовое сопротивление среды как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Решить такую задачу оказалось возможным численно, что было сделано в работе [3].

Ожидаемые результаты эксперимента

1. На рисунке 2 графически представлены результаты исследования зависимости величины отклонения падающей капли в горизонтальной плоскости от напряжённости магнитного поля в диапазоне от 0 до 5000 А/м, соответствующие частотам вращения вектора напряжённости магнитного поля 8, 13 и 18 $с^{-1}$. Анализ полученных кривых позволяет делать вывод о том, что *начальные отклонения капли от вертикали наблюдаются при воздействии на неё полей величиной около 1600 А/м. По мере дальнейшего увеличения напряжённости магнитного поля наблюдается монотонный рост величины отклонения капли от вертикали. Как следует из анализа видеозаписей, в полях напряжённостью менее 1600 А/м капля сохраняет сферическую форму, а в полях величиной порядка 1600 А/м, наблюдается трансформация сферической формы капли в форму слабо вытянутого эллипсоида вращения. Таким образом, можно сделать вывод, что вращение капли исследованной магнитной жидкости возникает только в случае ее деформации.*

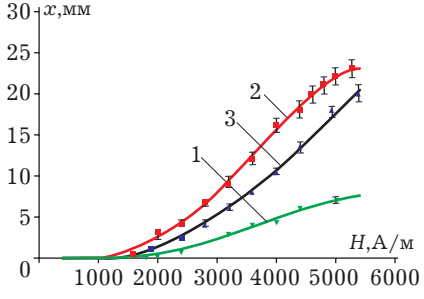

Рис. 2. Зависимость величины горизонтального смещения капли от напряжённости поля при движении капли в воде при частотах вращения поля: 1 — f =8 $с^{-1}$; 2 — f = 18 $с^{-1}$; 3 — f =13 $с^{-1}$.

2. На рисунке 3 представлены результаты исследования зависимости величины отклонения капли от частоты вращения вектора напряжённости магнитного поля в диапазоне частот от 8 до 30 $с^{-1}$, соответствующие полям напряжённостью 3,98, 4,62 и 5,1 кА/м. *Полученные кривые имеют ярко выраженный максимум в диапазоне частот 10 - 15 $с^{-1}$.*

Природа наблюдаемого экстремума может быть объяснена тем, что с ростом частоты вращения магнитного поля возрастает скорость вращения капли, в результате чего возрастает величина поперечной силы, обусловленной проявлением эффекта Магнуса. При вращении капли, в результате действия вязких сил окружающей среды, большая ось капли отстаёт в своём вращении на некоторый угол от вектора напряжённости магнитного поля [3, 4]. Однако при малых скоростях вращения капли этот угол пренебрежимо мал, в результате чего с ростом частоты вращения магнитного поля возрастает и величина силы Магнуса, действующей на каплю. Дальнейшее увеличение частоты вращающегося поля приводит к увеличению угла отставания. При этом составляющая магнитного поля вдоль большой оси капли уменьшается, и эксцентриситет капли убывает, стремясь к нулю на частотах порядка (20-30) $с^{-1}$, о чём свидетельствует анализ полученных видеозаписей. При обретении в этом случае каплей сферической формы, ее вращение прекращается, сила

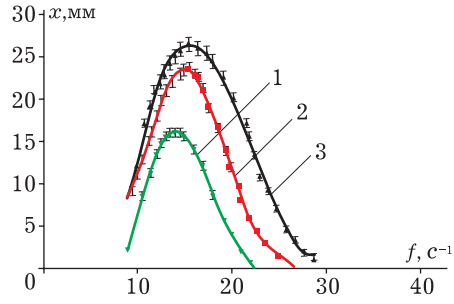

Рис. 3. Зависимость величины горизонтального смещения капли, движущейся во воде, от частоты вращения поля напряженностью: 1 — H=3,98 кА/м; 2 — H=4,62 кА/м; 3 — H=5,1 кА/м

Магнуса быстро убывает, и величина отклонения от вертикали движущейся капли уменьшается до нуля.

3. С целью исследования влияния сил межфазного натяжения на величину отклонения капли от вертикали была проведена серия аналогичных экспериментов с добавлением в воду некоторого количества поверхностно-активного вещества (ПАВ).

На рисунках 4 и 5 представлены полевые и частотные зависимости величины отклонения капли. На рисунках 6 и 7 приведены кривые полевых и частотных зависимостей величины отклонения капли, полученные при падении капли в чистой воде (нижние кривые) и при её падении в воде с добавлением ПАВ (верхние кривые).

Сравнительный анализ представленных графиков позволяет делать вывод о том, что характер исследуемых зависимостей при добавлении в воду поверхностно-активного вещества сохраняется. Однако минимальные отклонения капли от вертикали в этом случае наблюдаются в полях величиной уже порядка 800 А/м, т.е. при значениях напряженности внешнего магнитного поля вдвое меньшем. Кроме того, величина отклонения капли от вертикали во второй серии исследований оказывается значительно большей. Также наблюдается смещение положения максимума частотной зависимости в область меньших частот.

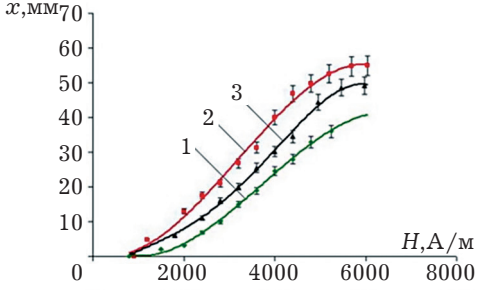

Рис. 4. Зависимость величины горизонтального смещения капли от напряжённости поля при движении капли в воде с добавлением ПАВ при частотах вращения поля: 1 — f =5 c^{-1}; 2 — f = 15 cc^{-1}; 3 — f = 10 c^{-1}

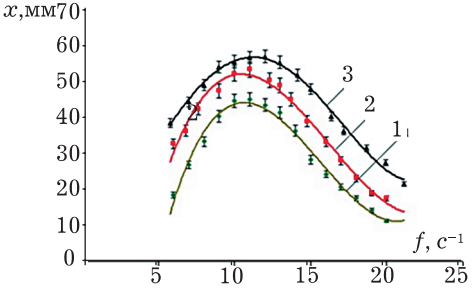

Рис. 5. Зависимость величины горизонтального смещения капли, движущейся в воде с добавлением ПАВ. от частоты вращения поля напряжённостью 1 — H = 3,98 кА/м; 2 — H = 4,62 кА/м; 3 — H = 5,1 кА/м

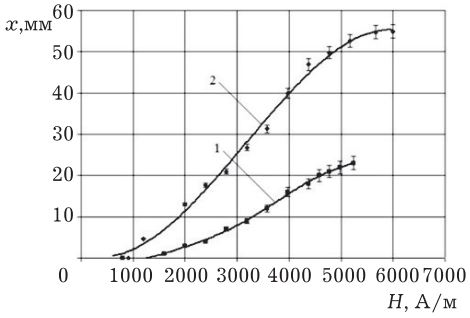

Рис. 6. Зависимость величины отклонения капли от напряжённости поля при движении капли в воде (кривая 1) и в воде с добавлением ПАВ (кривая 2) при частоте вращения поля 10 $с^{-1}$.

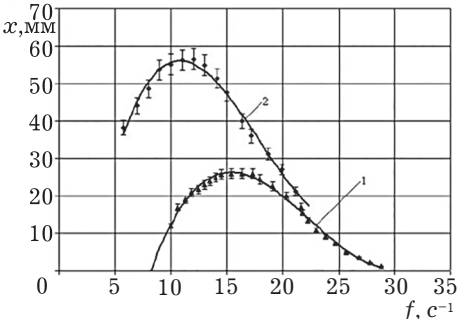

Рис. 7. Зависимость величины отклонения капли от частоты вращения поля при движении капли в воде (кривая 1) и в воде с добавлением ПАВ (кривая 2) в полях величиной 5,1 кА/м.

Наблюдаемые явления объясняются тем, что добавление ПАВ во внешнюю среду приводит к уменьшению поверхностно натяжения капли, а это ведет к большей деформации капли при одном и том же значении напряженности магнитного поля. В свою очередь, это приводит к увеличению скорости вращения капли, а значит и к увеличению силы Магнуса.

Таким образом, выше приведенные результаты исследований позволяют утверждать, что вращение капли осуществляется не за счет внутренних вращений коллоидных частиц в результате воздействия внешнего вращающегося поля, а в результате трансформации сферической капли в эллипсоид вращения. В такой ситуации эллипсоид приходит во вращение при изменении направления напряженности поля вследствие вращения последнего. Очевидно, что движение магнитной жидкости, обусловленное вращениями коллоидных частиц, либо отсутствует, либо его интенсивность настолько мала, что не приводит к существенному изменению скорости окружающей каплю жидкости.

Рекомендуемый вариант хода выполнения работы

1. Провести наблюдения за поведением магнитной капли, движущейся в водной среде без воздействия магнитного поля.

На этом этапе работы рекомендуется снять эксперимент на видео при частоте сьемки не менее 300 кадров в секунду, что позволит воспроизвести на компьютере процесс движения капли в замедленном режиме. На видео при помощи какого-либо видео-редактора (например, *CyberLink PowerDirector*) следует «наложить» заранее подготовленное изображение миллиметровой сетки, что позволит с достаточной степенью точности определять линейные размеры капли и координаты ее центра масс в каждый момент времени. Полученные результаты позволяют построить гра-

фик зависимости вертикальной координаты центра капли от времени, из которого можно делать вывод о том, что движение капли в вязкой среде является равномерным (проявление эффекта Стокса).

2. Провести наблюдения за поведением капли магнитной жидкости, движущейся в водной среде при воздействии на нее постоянного однородного стационарного магнитного поля.

На этом этапе эксперимента достаточно ограничиться только визуальным наблюдением падающей капли, обращая внимание на процесс трансформации под действием поля сферической формы капли в эллипсоидальную.

3. Повторить эксперимент при действии на каплю однородного вращающегося в вертикальной плоскости магнитного поля. Исследовать зависимость величины горизонтального смещения x капли от напряжённости H магнитного поля при движении капли в воде при различных частотах вращения поля. Построить соответствующие кривые $x(H)$.

4. Исследовать зависимость величины горизонтального смещения x капли, движущейся в воде, от частоты f вращения поля при различной его напряжённости H. Построить соответствующие кривые зависимости $x(f)$.

5. Повторить исследования, описанные в пунктах 3 и 4 с добавлением в воду некоторого количества поверхностно-активного вещества, в качестве которого может быть использовано небольшое количество любого жидкого мыла.

6. Провести анализ результатов, полученных в пунктах 3-5, который должен позволить сделать выводы, аналогичные приведенным выше в разделе «Ожидаемые результаты эксперимента».

В результате выполнения работы не следует ожидать полного соответствия полученных результатов приведенным выше кривым, т. к. числовые параметры, определяемые в эксперименте, сильно зависят от характеристик используемых образцов (объемная концентрация магнитной фазы, вязкость жидкой основы и др.). Успех проведения учащимися эксперимента должен определяться получением результатов, качественно соответствующих приведенным в статье кривым, что уже позволит при соответствующей теоретической подготовке сделать адекватные выводы и получить необходимые знания и навыки проведения научных исследований.

Литература

1. Фертман, Е.Е. Магнитные жидкости / Е.Е. Фертман. — Минск: Вышейшая школа, 1988. — 184 с.
2. Розенцвейг, Р. Феррогидродинамика / Р. Розенцвейг. — М. : Мир, 1989. — 356 с.
3. Борисенко О.В. Эффекты взаимодействия капель и струй магнитной жидкости с магнитным и электрическим полями: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Борисенко Олег Васильевич. — Ставрополь, 2015. — 139 с.
4. Борисенко О.В., Диканский, Ю.И., Беджанян М. А. Падение капли магнитной жидкости во вращающемся магнитном поле. Современная наука и инновации. 2013. № 1. С. 7–11.