

01;03

Особенности движения взаимодействующих капель магнитной жидкости

© О.С. Копылова, Ю.И. Диканский, Р.Г. Закинян

Ставропольский государственный университет,
355009 Ставрополь, Россия
e-mail: zolterxp@list.ru

Рассмотрены особенности совместного движения двух одинаковых капель магнитной жидкости, обусловленные их гидродинамическим и магнитным взаимодействием. Экспериментально исследовано изменение траекторий первоначально параллельно движущихся капель в зависимости от направления и величины напряженности, приложенных постоянного и переменного магнитных полей, проведено теоретическое обоснование. Сделан вывод о возможности эффективного управления движением капель магнитной жидкости с помощью воздействия магнитных полей.

PACS: 47.55.D-, 47.65.Cb

Введение

Интерес к исследованию поведения капель жидкости в силовых полях связан как с широким применением эмульсий и аэрозолей в технике и быту, так и чисто научной проблемой изучения движения жидких масс, нередко ведущих себя в условиях невесомости, подобно каплям. Физическим свойствам эмульсий и механике аэрозолей посвящено достаточно большое количество работ [1–3], в которых рассмотрено движение капель с учетом влияния окружающей среды и внешних силовых полей. В связи с созданием в середине 1960-х гг. жидких намагничивающих сред — магнитных жидкостей (ферроколлоидов) — возникла идея создания магниточувствительных эмульсий и аэрозолей [4,5], в которых в роли дисперсной среды выступают капли магнитной жидкости. Действие даже слабых магнитных полей на капли такой среды может приводить к деформации, а также пульсации их формы (в случае переменного поля). Процессы деформации капель и микрокапель магнитных жидкостей в магнитном поле неоднократно исследовались в ряде работ. Вместе с тем особенности движения способных намагничиваться, а также испытывать деформации под воздействием магнитного поля капель магнитной жидкости остаются практически не изученными. В [6] нами были приведены результаты исследования движения одиночных капель магнитной жидкости в поле силы тяжести при дополнительном воздействии на них постоянных и переменных магнитных полей, направленных под различными углами к траектории движения. В настоящей работе изучены особенности совместного движения двух одинаковых капель магнитной жидкости, обусловленные их гидродинамическим и магнитным взаимодействием.

Объект исследования и методика эксперимента

Исследовалось движение капель магнитной жидкости диаметром от $0.5 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ м, для получения которых были использованы магнитные жидкости типа магнетит в керосине с олеиновой кислотой в качестве стабилизатора. Объемная концентрация дисперсной фазы исходной магнитной жидкости составляла 12%, намагниченность насыщения — $57.5 \cdot 10^3$ А/м.

Капли магнитной жидкости получали с помощью шприца с двумя параллельно расположенными на расстоянии $5 \cdot 10^{-3}$ м друг от друга тонкими иглами, который закреплялся вертикально на высоте 0.3 м над уровнем стола. Движение двух капель магнитной жидкости исследовалось в жидкой среде (воде), что более удобно, нежели в воздухе, вследствие меньших скоростей и более быстрого установления движения. Сосуд с водой помещался в однородное магнитное поле, создаваемое с помощью кубической пятисекционной катушки (сконструированной, согласно [7]), длина ребра которой составляла 0.35 м. Используемая намагничивающая система позволяла получать поля напряженностью до $13 \cdot 10^3$ А/м, с возможностью изменения их направления по отношению к траектории движения капли. При создании переменных полей для питания намагничивающей системы использовался генератор типа ГЗ-123 с усилителем мощности типа LV 103. Измерение времени падения капли проводилось при помощи электронного секундомера с точностью до 0.01 с. Параллельно проводилась съемка движения капли магнитной жидкости цифровой видеокамерой с последующим анализом его особенностей с помощью компьютера. Для обработки результатов видеосъемки использовались программы Pinnacle, Sony Vegas 5.0, Adobe Photoshop CS 2.

Экспериментальные результаты

Проведенные наблюдения показали, что две одновременно начавшие двигаться под действием силы тяжести капли магнитной жидкости в отсутствие магнитного поля начинают притягиваться друг к другу. Очевидно, причиной этого является возникновение гидродинамического взаимодействия между движущимися в среде каплями [1]. В результате этого расстояние между параллельно падающими каплями с течением времени уменьшается. На рис. 1 для этого случая представлена схематическая картина падения капель, построенная на основании полученных фотографий и видеосъемки.

Далее исследования были продолжены при дополнительном воздействии постоянного однородного магнитного поля, направленного параллельно и перпендикулярно скорости движения капель. Обнаружено, что, как и следовало ожидать, наложение магнитного поля по направлению движения двух капель магнитной жидкости приводит к изменению траекторий их движения вследствие появления сил отталкивания за счет приобретения каплями магнитных моментов, направленных параллельно друг другу. В этом случае возможна компенсация сил притяжения гидродинамической природы и магнитных сил отталкивания. В результате этого капли могут двигаться без изменения расстояния между ними.

При увеличении напряженности магнитного поля магнитные силы начинают преобладать над гидродинамическими силами притяжения и, прежде параллельные траектории движения капель, начинают расходиться (рис. 2).

В случае воздействия магнитного поля, перпендикулярного направлению движения капель, они начинают сближаться, а при некотором значении напряженности магнитного поля могут слиться в одну каплю (рис. 3). Очевидно, что при таких условиях силы взаимодействия и гидродинамического, и магнитного происхождения

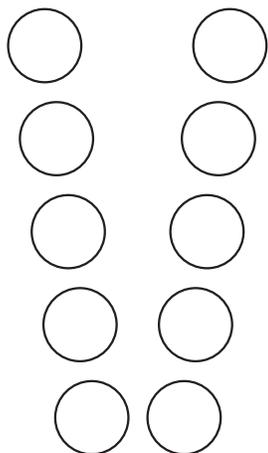


Рис. 1. Схематическая картина движения двух капель магнитной жидкости в отсутствие магнитного поля (первоначальное расстояние между каплями $5 \cdot 10^{-3}$ м, радиус капель — $0.8 \cdot 10^{-3}$ м).

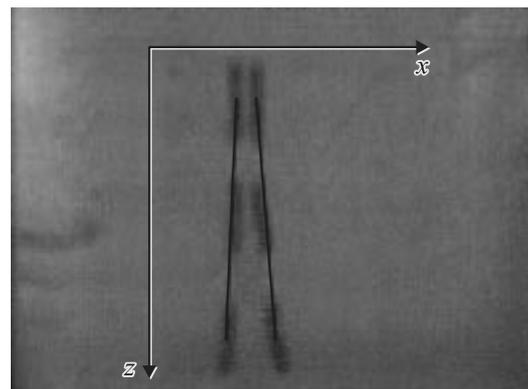


Рис. 2. Траектория движения двух капель магнитной жидкости в однородном постоянном магнитном поле, когда направление движения капель совпадает с направлением напряженности магнитного поля.

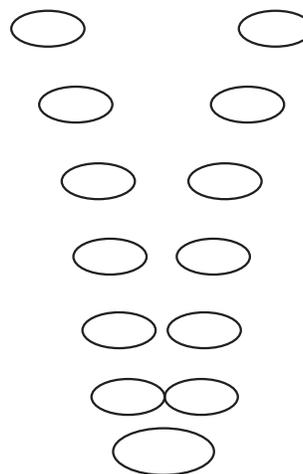


Рис. 3. Схематическое изображение движения двух капель магнитной жидкости в однородном постоянном магнитном поле, когда направление движения капель перпендикулярно направлению напряженности магнитного поля.

имеют характер притяжения и способствуют уменьшению расстояния между каплями вплоть до их слияния.

Следует заметить, что при воздействии как параллельно, так и перпендикулярно направленному по отношению к направлению движения капель поля при его достаточной величине происходила деформация капель. Характер и величина деформации капель несомненно оказывает влияние как на коэффициент сопротивления при их движении, так и на величину магнитных и гидродинамических сил взаимодействия. Отметим, что вышеописанные исследования проводились при малых деформациях капель, позволяющих считать их форму близкой к эллипсоидам вращения.

Воздействие переменного магнитного поля на движущиеся капли приводит к пульсации их формы и периодическому изменению коэффициента сопротивления движению. Кроме того, величина магнитного момента

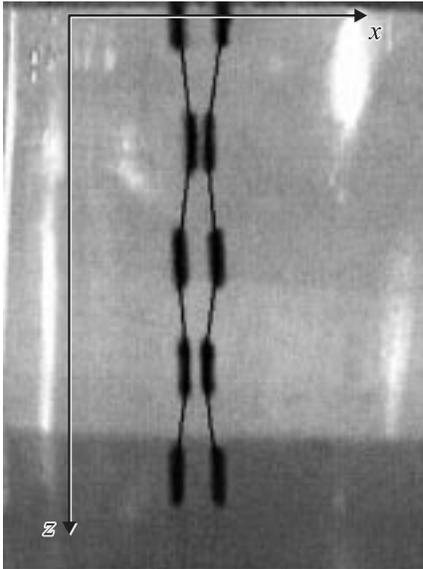


Рис. 4. Траектория движения двух капель магнитной жидкости в переменном магнитном поле, когда направление движения капель параллельно направлению напряженности магнитного поля.

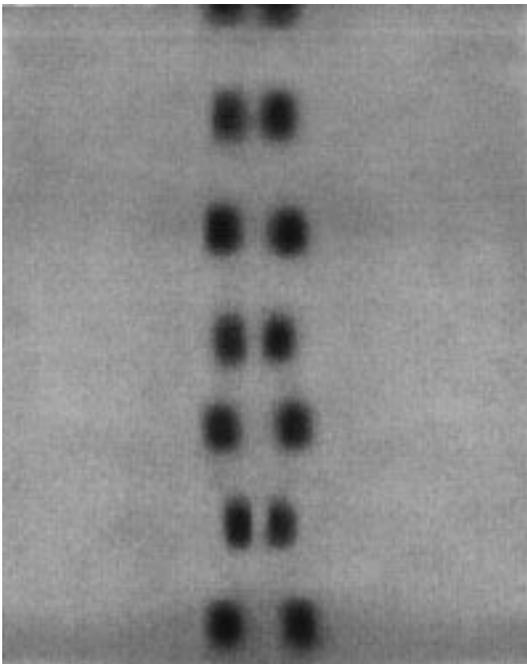


Рис. 5. Траектория движения двух капель магнитной жидкости в переменном магнитном поле, когда направление движения капель перпендикулярно направлению напряженности магнитного поля.

капли также изменяется в соответствии с периодическим изменением намагничивающего поля. Это приводит к ряду особенностей совместного движения взаимодействующих капель, определяемых соотношением сил отталкивания и притяжения. На рис. 4 приведены траектории

падения двух капель магнитной жидкости в переменном магнитном поле, направленном вдоль вертикали. Как видно из рисунка, траектории движения имеют извилистый вид, обусловленный периодически изменяющейся силой магнитного взаимодействия. Аналогичный вид имеют траектории движения капель магнитной жидкости в случае направления магнитного поля перпендикулярно движению (рис. 5). Однако в этом случае магнитные силы взаимодействия капель могут приводить к их периодическому столкновению (в соответствии с частотой поля) с последующим отталкиванием, связанным, по видимому, с наличием сил поверхностного натяжения.

Обсуждение экспериментальных результатов

Движение двух одинаковых капель в однородном постоянном магнитном поле. Рассмотрим случай, когда направление движения капель совпадает с направлением напряженности магнитного поля. Капля радиусом R , падающая со скоростью v_z , действует на другую каплю с таким же радиусом с силой, не зависящей от движения второй капли.

Если расстояние между каплями $r > R$, то гидродинамическая сила взаимодействия направлена вдоль линии центров и равна, согласно [1]

$$F_h = \frac{3\pi\rho R^6 v_z^2}{r^4} \left(\frac{3}{2} \cos 2\theta + \frac{1}{2} \right), \quad (1)$$

где θ — угол между линией центров и направлением движения, v_z — скорость движения капли, R — радиус капель, r — расстояние между центрами капель, ρ — плотность капель.

Между каплями действует также сила, обусловленная магнитным взаимодействием [8]

$$F_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{9\chi^2 V^2 H^2}{(1+n\chi)^2 r^4}, \quad (2)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, χ — магнитная восприимчивость, n — размагничивающий фактор, который в случае малых деформаций может быть определен выражением $n = (1/3) - (2/15e^2)$ (e — эксцентриситет деформированной в эллипсоид вращения капли); H — напряженность магнитного поля; V — объем капли.

Уравнение движения капли в проекции на горизонтальную ось x с учетом того, что по условию эксперимента $\theta = 90^\circ$, запишем в виде

$$m \frac{dv_x}{dt} = F_m - F_h \quad (3)$$

или, с учетом (1) и (2),

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\mu_0}{4\pi m} \frac{9\chi^2 V^2 H^2}{\left(1 + \frac{2}{3} - \frac{2}{15}\chi e^2\right)^2 x^4} - \frac{3\pi\rho R^6 v_z^2}{m x^4}.$$

Если обозначить

$$c_1 = \frac{\mu_0}{4\pi m} \frac{9\chi^2 V^2 H^2}{\left(1 + \frac{\chi}{3} - \frac{2}{15}\chi e^2\right)^2}, \quad c_2 = \frac{3\pi\rho R^6 v_z^2}{m},$$

то уравнение движения вдоль оси x примет вид

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{c_1 - c_2}{x^4}. \quad (4)$$

Последнее уравнение позволяет найти зависимость координаты x от времени t .

Зависимость смещения капли по вертикали от времени найдем из уравнения движения в проекции на вертикальную ось z , которое запишется в виде

$$mg - F_A - F_S = ma \quad (5)$$

или

$$\rho g V - \rho_1 g V - 6\pi\eta R v_z = m \frac{dv_z}{dt},$$

где ρ_1 — плотность среды (вода); m — масса капли; η — вязкость среды, t — время движения капли; g — ускорение свободного падения, F_A — выталкивающая сила, F_S — сила Стокса.

Из последнего уравнения найдем скорость движения капли вдоль оси z

$$v_z = \frac{gV(\rho - \rho_1)}{6\pi\eta R} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right)\right), \quad (6)$$

где

$$\tau_0 = \frac{m}{6\pi\eta R} = \frac{2}{9} \frac{\rho R^2}{\eta}, \quad (7)$$

τ_0 — время релаксации, характеризующее процесс установления скорости оседания частицы в поле сил тяжести.

Проведенные расчеты с учетом условий эксперимента показали, что в данном случае $\tau_0 \ll t$. Следовательно, движение капли вдоль вертикали можно считать равномерным, а для смещения капли по оси z возможно использование формулы

$$z(t) = \frac{g(\rho - \rho_1)}{\rho} \tau_0 t. \quad (8)$$

Совместный анализ выражений (4) и (8), проведенный с помощью программы MathCAD, позволил получить траекторию движения капли, которая представлена на рис. 6, в случае если сила магнитная больше силы гидродинамической.

Далее рассмотрим падение двух капель магнитной жидкости в магнитном поле, направленном перпендикулярно направлению движения.

В этом случае для определения смещения вдоль оси x воспользуемся уравнением (3), изменив знак силы магнитного взаимодействия на противоположный, в результате получим

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{c_1 + c_2}{x^4}. \quad (9)$$

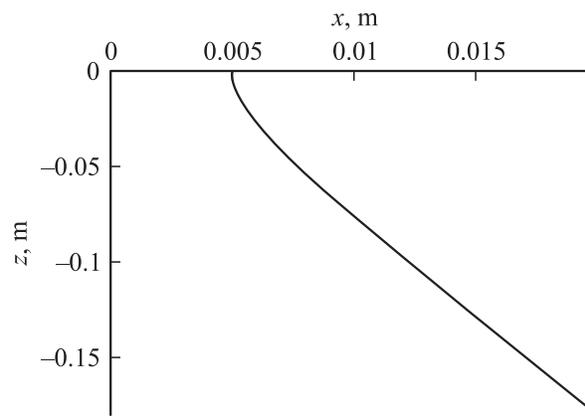


Рис. 6. Траектория движения одной капли магнитной жидкости относительно другой (направление движения совпадает с направлением напряженности магнитного поля).

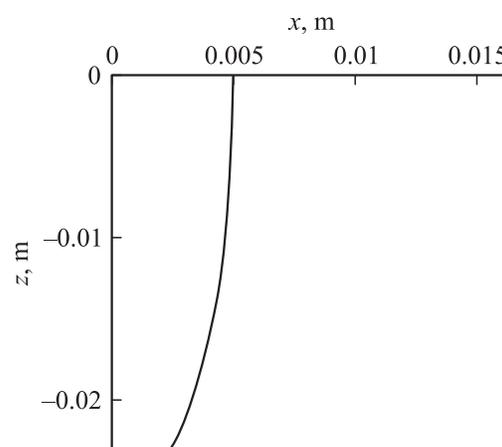


Рис. 7. Траектория движения одной капли магнитной жидкости относительно другой (направление движения перпендикулярно направлению напряженности магнитного поля).

Использование (9) и (4) позволило определить для рассматриваемой ситуации траекторию движения одной из капель, которая представлена на рис. 7.

Движение двух одинаковых капель в переменном магнитном поле. Рассмотрим движение одной капли магнитной жидкости относительно другой в переменном магнитном поле. Если капля осциллирует по отношению к неподвижной среде, то в ней возникают течения, которые, в свою очередь, действуют на другую частицу. Таким образом, возникает гидродинамическое взаимодействие между осциллирующей и неподвижной каплями. Если обе частицы осциллируют, то между ними возникает гидродинамическая сила, называемая силой Бьеркнеса [1].

Сила Бьеркнеса, возникающая между двумя колеблющимися каплями с одинаковыми радиусами R , центры которых расположены на расстоянии r и поверхности

которых осциллируют с частотой ω , равна

$$F_B = 6\pi\rho \frac{R^6}{r^2} \omega^2. \quad (10)$$

Уравнение движения (3) в проекции на ось x в случае, когда поле направлено вдоль направления движения капля, примет вид

$$\frac{mdv_x}{dt} = F_m - F_B. \quad (11)$$

По аналогии с [1], где было рассмотрено действие электрического поля на диэлектрическую каплю, запишем зависимость эксцентриситета капли от напряженности магнитного поля в виде

$$e = \sqrt{\frac{1}{4} \frac{\mu_0 R}{\sigma} \frac{\chi}{1 + \chi/3} H}. \quad (12)$$

Пусть напряженность магнитного поля изменяется по закону

$$H = H_0 \cos \omega t, \quad (13)$$

тогда

$$F_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{9\chi^2 V^2 H_0^2 \cos^2 \omega t}{(1 + n\chi)^2 x^4}.$$

Учитывая (13), получим зависимость эксцентриситета капли от напряженности магнитного поля в виде

$$e = \sqrt{\frac{1}{4} \frac{\mu_0 R}{\sigma} \frac{\chi}{1 + \chi/3} H_0 \cos \omega t}, \quad (14)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения капли.

Окончательно, с учетом выражения для размагничивающего фактора, полученного при использовании для эксцентриситета формулы (14), для магнитной силы запишем

$$F_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{9\chi^2 V^2 H_0^2 \cos^2 \omega t}{\left(1 + \frac{\chi}{3} - \frac{2}{15} \chi e^2\right)^2 x^4}. \quad (15)$$

Тогда уравнение движения (11) примет вид

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{\mu_0}{4\pi m} \frac{9\chi^2 V^2 H_0^2 \cos^2 \omega t}{\left(1 + \frac{\chi}{3} - \frac{2}{15} \chi e^2\right)^2 x^4} - 6\pi\rho \frac{r^6}{mx^2} \omega^2. \quad (16)$$

Введем обозначения

$$c_1 = \frac{\mu_0}{4\pi m} \frac{9\chi^2 V^2 H_0^2}{\left(1 + \frac{\chi}{3} - \frac{2}{15} \chi e^2\right)^2}, \quad c_2 = 6\pi\rho \frac{r^6}{m} \omega^2 \quad (17)$$

и уравнение движения (18) представим в виде

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{c_1 \cos^2 \omega t}{x^4} - \frac{c_2}{x^2}. \quad (18)$$

Используя решение уравнения (18), полученное с помощью программы MathCAD, и учитывая (8), найдем

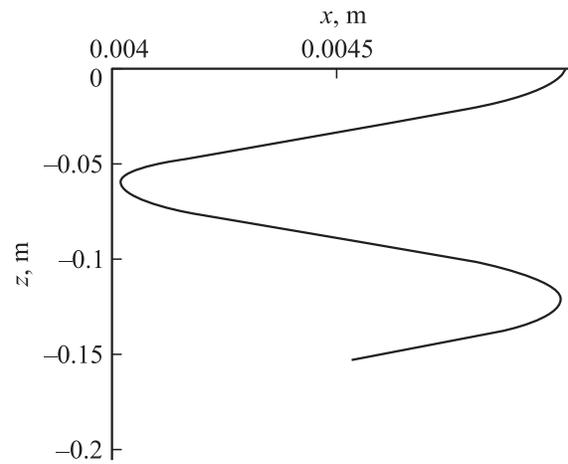


Рис. 8. Траектория движения капли магнитной жидкости относительно другой в переменном магнитном поле (направление движения параллельно направлению напряженности переменного магнитного поля).

траекторию движения одной капли магнитной жидкости относительно другой, движущейся в переменном магнитном поле, направленном параллельно скорости движения. На рис. 8 показана траектория движения капли магнитной жидкости в переменном магнитном поле, рассчитанная теоретически. Как видно из рисунка, расчетная траектория, как и наблюдаемая визуально, имеет извилистый вид.

Далее рассмотрим параллельное движение капель магнитной жидкости перпендикулярно направлению напряженности магнитного поля.

В этом случае F_B и F_m имеют одинаковое направление, благодаря чему капли должны сближаться. Уравнение движения в проекции на ось x для данного случая имеет вид

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{\mu_0}{4\pi m} \frac{9\chi^2 V^2 H_0^2 \cos^2 \omega t}{\left(1 + \frac{\chi}{3} - \frac{2}{15} \chi e^2\right)^2 x^4} - 6\pi\rho \frac{r^6}{mx^2} \omega^2. \quad (19)$$

Можно предположить, что если в момент столкновения капля мгновенное значение напряженности магнитного поля принимает нулевое значение, то возникающие в момент соударения силы отталкивания преобладают над силами притяжения, что и приводит к отталкиванию каплей друг от друга, наблюдаемому в эксперименте. В последующие моменты времени магнитная сила, в соответствии с изменением напряженности поля начинает увеличиваться, вследствие чего (а также постоянного действия гидродинамической силы притяжения) капли начинают вновь сближаться. Очевидно, что при таком механизме изменения траектории время сближения каплей должно равняться четверти периода переменного магнитного поля. По-видимому, этим и объясняется тот факт, что описанный характер совместного движения наблюдается только при определенной частоте переменного магнитного поля.

Таким образом, проведенные исследования совместного движения двух капель магнитной жидкости в постоянном и переменном магнитном полях позволили установить особенности изменения траектории движения в зависимости от направления и величины напряженности постоянного и переменного магнитных полей. Проведенный анализ полученных экспериментальных результатов указывает на возможность эффективного управления движением капель магнитной жидкости с помощью воздействия магнитных полей.

Список литературы

- [1] *Панченков Г.М., Цабек Л.К.* Поведение эмульсий во внешнем электрическом поле. М.: Химия, 1969. 179 с.
- [2] *Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1972. 427 с.
- [3] *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
- [4] *Диканский Ю.И., Киселев В.В.* // Магнитная гидродинамика. 1998. Т. 34. № 3. С. 263–266.
- [5] А.с. № 966735. СССР. Магниточувствительная эмульсия / В.В. Чеканов, В.И. Дроздова. // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки. 1982. № 38.
- [6] *Копылова О.С.* // Мат. II Всерос. науч. конф. студентов-физиков. Екатеринбург, 2005. С. 260–261.
- [7] *Кифер И.И.* Испытания ферромагнитных материалов. М., 1962. 544 с.
- [8] *Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О.* Магнитные жидкости. Рига: Зинатне, 1989. 387 с.