

$T > T_c$ ). Так возникает термомагн. конвекция, к-рая по интенсивности может во много раз превосходить обычную гравитац. конвекцию, причём величину и направление этой конвекции можно изменять при помощи магн. поля. Термомагн. конвекцию можно использовать для увеличения теплообмена в силовых трансформаторах, применения М. ж. на основе трансформаторного масла, а также в тепловых машинах (т. н. тепловых насосах), утилизирующих низкопотенц. тепло окружающей среды.

Притяжение М. ж. к магниту используется во мн. устройствах. Сила магн. притяжения, действующая на единичный объём М. ж., равна произведению её намагниченности на градиент магн. поля и направлена вдоль этого градиента. На  $1 \text{ см}^3$  стандартной М. ж. на основе магнетита с  $C=0,2$  в поле  $H=3 \text{ кЭ}$  при градиенте  $\sim 1 \text{ кЭ}\cdot\text{см}^{-1}$  действует сила  $\approx 0,05 \text{ кг}$ , т. е. сила, в 50 раз превышающая вес  $1 \text{ см}^3$  жидкости. Поэтому немагн. тела легко всплывают в М. ж., помещённой в магн. поле с градиентом вдоль направления силы тяжести. Это обстоятельство используют при создании сепараторов цветных металлов и др. немагн. материалов.

На основе М. ж. создают смазки, удерживаемые магн. полем в зоне контакта трущихся поверхностей, герметичные подшипники скольжения, подвижные вакуумные уплотнения, удерживающие перепад давлений в неск. атмосфер. М. ж. применяют в робототехнике, в переключающих устройствах и клапанах, управляемых магн. полем, а также в громкоговорителях для улучшения их амплитудно-частотной характеристики.

В электрич. или магн. полях М. ж. становятся подобными одноосным кристаллам. Они проявляют анизотропию тепло- и электропроводности, вязкости, а также анизотропию оптич. свойств: двулучепреломление, дихроизм, анизотропию рассеяния. Эти эффекты связаны с ориентацией вдоль внеш. магн. поля  $H$  или электрич. поля  $E$  неферрич. коллоидных частиц, а также с их выстраиванием в плотные цепочки, направленные вдоль поля. Характерные значения электрич. и магн. полей, при к-рых становятся существенными ориентац. эффекты, можно оценить, приравнивая электростатич. или магнитостатич. энергии для частицы ср. размера к энергии её теплового движения:  $m_0 H_0 \approx kT$  или  $V_0 E_0^2 \approx kT$ . Отсюда можно получить  $H_0 \approx kT/m_0 \approx 10^2 \text{ Э}$  и  $E_0 \approx (kT/V_0)^{1/2} \approx 3 \cdot 10^4 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$ .

Величины электро- и магнитооптич. эффектов в М. ж. на 6 порядков превосходят аналогичные величины в обычных жидкостях, т. к. объём коллоидных частиц в  $10^6$  раз превышает объём молекул. В скрещённых электрич. и магн. полях М. ж. подобны двуслоному кристаллу, в к-ром *оптическую анизотропию* можно изменять как по величине, так и по направлению. При определ. соотношении между  $H$  и  $E$ , направленных перпендикулярно друг к другу, наблюдается эффект компенсации оптич. анизотропии. Это происходит при  $H/E \sim H_0/E_0 \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ Э}\cdot\text{В}^{-1} \text{ см}$ . Эффект компенсации оптич. анизотропии используют для визуализации и измерения электростатич. полей (измеряют компенсирующие магн. поля). Для визуализации магн. полей можно использовать скрещённые *поляроиды* с помещённым между ними слоем М. ж. Магн. коллоиды используют для визуализации *доменных стенок* в ферромагнетиках, а также для наблюдения скрытых дефектов в непрозрачных магн. материалах.

Изучаются возможности применения М. ж. в медицине для направленного транспорта лекарств, герметизации повреждённых участков внутри органов, создания локальной гипертермии и т. д.

Лит.: Шлиomis М. И., Магнитные жидкости, «УФН», 1974, т. 112, с. 427; Башговой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н., Введение в термомеханику магнитных жидкостей, М., 1985; Неравновесные процессы в магнитных суспензиях. Сб., под ред. М. И. Шлиомиса, Свердловск, 1986; Берковский Б. М., Медведев В. Ф., Краков М. С., Магнитные жидкости, М., 1989.

А. А. Минаков.

**МАГНИТНЫЕ ЗЕРКАЛА** — области повышенной напряжённости магн. поля, в к-рых происходит отражение частицы (изменение направления движения на обратное) вследствие адиабатич. инвариантности её магн. момента. Подробнее см. *Открытые ловушки, Магнитные ловушки*.

**МАГНИТНЫЕ ЛИНЗЫ** — определённые конфигурации магн. полей, обладающих симметрией, для фокусировки пучков заряж. частиц (электронов, ионов). Подробнее см. *Электронные линзы*.

**МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ** — конфигурация магн. поля, способные длительное время удерживать заряж. частицы или плазму в ограниченном объёме. Естеств. М. л. является, напр., магн. поле Земли, захватившее плазму *солнечного ветра* и удерживающее её в виде радиац. поясов Земли. Искусств. М. л. используют в исследованиях по УТС.

Магн. поле может удерживать заряж. частицы как в поперечном, так и в продольном направлении по отношению к вектору магн. индукции  $B$ . Оба эти свойства порознь либо одновременно используют в М. л.

**Поперечное удержание частиц.** Возможность создания М. л. основана на особенностях движения заряж. частиц в магн. поле. На частицу с зарядом  $e$  и скоростью  $v$  действует сила Лоренца  $F = e(E + [vB])$  (в СИ), где  $E$  — электрич. поле. В сильном магн. поле частица движется вдоль магн. силовой линии со скоростью  $v_{||} = (vB)/B$ , совершая при этом быстрое вращение по ларморовской окружности радиуса  $r_B = mv_{\perp}/eB$  с угловой частотой  $\omega_B = -eB/m$  ( $m$  — масса частицы,  $v_{\perp}$  — составляющая скорости, перпендикулярная полю). Частицы могут удерживаться в поперечном (относительно  $B$ ) направлении, если ларморовский радиус  $r_B$  мал по сравнению с поперечным размером  $a$  М. л.:  $r_B \ll a$ . При этом условия плазму можно рассматривать как газ заряж. «ларморовских кружков», совершающих быстрое движение с газокинетич. скоростью  $v_{||}$  лишь вдоль магн. силовых линий. Помимо быстрого продольного движения ларморовские кружки могут совершать также относительно медленный поперечный электрич. дрейф с одинаковой для всех частиц скоростью  $v_E = [EB]/B^2$ , а также градиентный и центробежный со скоростью  $v_p = mv_{\perp}^2 [B \nabla B]/2eB^3$  и  $v_c = mv_{\perp}^2 [B(B \nabla)B]/eB^4$  соответственно (см. *Дрейф заряженных частиц*). В области без тока  $\text{rot } B = 0$ ,  $(B \nabla)B = -B \cdot \nabla B$  и направления градиентного и центробежного дрейфов совпадают. Конфигурация магн. поля должна быть выбрана так, чтобы ни поперечные дрейфы, ни продольное движение не выводили осн. массу частиц плазмы из М. л. Это соответствует выполнению условия равновесия плазмы в М. л. Выбор магн. конфигурации, способной удерживать плазму, ограничен необходимостью подавления возникающих в плазме неустойчивостей, а также условиями малости диффузии и теплопроводности в поперечном направлении.

**Продольное удержание частиц.** В продольном направлении на ларморовский кружок, представляющий собой круговой ток с магн. моментом  $M_1 = -mv_{\perp}^2 B/2|B|^2$ , действует сила  $F_1 = M_1 \nabla B$ , приводящая к отражению с достаточно большим значением *адиабатического инварианта*  $M_1 = mv_{\perp}^2/2B$  от областей повышенной напряжённости магн. поля (т. н. магн. пробки, магн. зеркала). На этом принципе основаны открытые магн. ловушки (рис. 1), к их числу относятся и магн. конфигурации, создаваемая дипольным магн. полем Земли.

Из законов сохранения магн. момента и сохранения энергии следует, что при движении частицы из области миним.  $B$ , где компоненты скорости равны  $v_{||0}$  и  $v_{\perp0}$ , поперечная составляющая кинетич. энергии растёт с