

Др. лабораторными объектами М. г. являются *низкотемпературная плазма*, жидкие металлы и электролиты. Разл. эффекты, изучаемые М. г., находят применение в инженерной практике (см., напр., *Магнитогидродинамический генератор*).

**Уравнения М. г.** Магнитогидродинамич. подход для описания электропроводящей среды используется, если характерные для рассматриваемого движения расстояния и промежутки времени велики по сравнению с длиной пробега и временем пробега носителей тока (электронов и ионов).

В большинстве случаев, рассматриваемых М. г., скорость среды  $v$  можно считать малой по сравнению со скоростью света (нерелятивистская М. г.); в этом случае электрич. поля (энергия) в среде малы по сравнению с магн. полем (энергией):  $E \sim vH/c$ , что и обусловило название М. г.

В магнитной гидродинамике используются ур-ния Максвелла без учёта тока смещения, т. е.  $\epsilon^{-1} \partial E / \partial t \ll \ll |\text{rot } H|$ , и закон Ома для движущейся среды. Из этих ур-ний можно получить ур-ние для магн. поля в движущейся среде — ур-ние индукции. В простейшем случае, когда электропроводность среды  $\sigma$  можно считать изотропной и однородной, ур-ние индукции имеет вид:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{rot} [vH] + D_m \nabla^2 H.$$

Здесь первый член справа описывает индукц. эффект, а второй — диффузию магн. поля с коэф. диффузии  $D_m = c^2/4\pi\sigma$ , наз. также (не очень удачно) *магнитной вязкостью* по аналогии с обычной гидродинамикой. При более общей форме закона Ома ур-ние индукции усложняется. Кроме ур-ния индукции М. г. использует также всю систему ур-ний обычной гидродинамики, включающую ур-ние непрерывности, ур-ние движения жидкости и ур-ние баланса тепла.

Магн. поле действует на жидкость распределённой по объёму магн. силой, наз. *Лоренца силой*. Плотность этой силы  $F = c^{-1} [IH]$  ( $I$  — плотность электрич. тока) и может быть также выражена непосредственно через магн. поле в виде  $F = (H \nabla) H / 4\pi - \nabla H^2 / 8\pi$ . Второй член этого выражения — градиент магн. давления, к-рое добавляется к гидростатич. давлению жидкости, а первый член может быть интерпретирован как квазиупругое натяжение вдоль магн. силовых линий. Применимость ур-ний М. г. для плазмы ограничивается требованиями, чтобы время между столкновениями частиц было мало по сравнению с характерным временем рассматриваемого процесса, а длина свободного пробега мала по сравнению с характерной длиной. Иногда для описания плазмы используется система ур-ний многожидкостной гидродинамики, напр. ур-ния *двухжидкостной гидродинамики плазмы* для простейшей полностью ионизованной плазмы, состоящей из электронов и одного сорта ионов. При описании плазмы малой плотности, когда частота столкновений между частицами уменьшается, или при высокой её темп-ре, когда длина свободного пробега сопоставима с характерной длиной, гидродинамич. подход становится неприменимым и плазму описывают с помощью *кинетических уравнений*. Эл.-магн. поле можно по-прежнему описывать ур-ниями Максвелла без тока смещения. При этом многие эффекты, характерные для М. г., качественно сохраняются, но появляются разл. новые эффекты.

**Процессы, характеризующиеся малой и большой электропроводностью.** Характер взаимодействия проводящей жидкости и магн. поля определяется т. н. магнитным числом Рейнольдса,  $R_m = Lv/D_m$  по аналогии с обычным числом Рейнольдса, где  $L$  — характерная длина,  $v$  — характерная скорость для рассматриваемого процесса. По величине параметра  $R_m = 4\pi\sigma Lv/c^2$  все процессы в М. г. можно разделить на два класса, характеризующиеся малой проводимостью, тогда  $R_m \ll 1$ , и большой проводимостью,  $R_m \gg 1$ .

Случай малой проводимости (часто даже  $R_m \ll 1$ ) реализуется в лабораторных и техн. установках с жидкими металлами и низкотемпературной плазмой. В этом случае магн. поле под действием движущейся жидкости меняется сравнительно мало, можно считать, что оно задаётся извне. При движении жидкости в этом поле индуцируется электрич. ток  $I$  и создаваемая им сила Лоренца  $F = c^{-1} [IH]$  влияет на движение жидкости, т. е. вызывает МГД-эффекты. Малое влияние течения на поле не означает малости МГД-эффектов, т. к. сила Лоренца вполне может быть сравнима с др. действующими в жидкости силами. Практически осуществимые магн. поля могут сильно влиять на потоки металлов или плазмы, напр. *магнитное давление*  $H^2/8\pi$  достигает величины  $\sim 1$  атм при  $H = 5 \cdot 10^9$  Гс и далее растёт с полем квадратично.

Если к электропроводящей жидкости, помещённой в магн. поле, приложить внешнюю эдс, то возникший ток создаст силу  $F$ , к-рая заставит жидкость двигаться — на этом принципе основано действие МГД-насосов для перекачки жидких металлов и работа др. аналогичных устройств. С др. стороны, если поток проводящей среды, напр. плазмы, образованной продуктами сгорания (обычно с добавками для облегчения ионизации), пропустить поперёк внешнего магн. поля, то в плазме индуцируется эдс. На этом принципе основано действие *магнитогидродинамических генераторов*, преобразующих тепловую энергию в электрическую.

Наиб. ярко законы М. г. проявляются при  $R_m \gg 1$ , т. е. в случае большой проводимости среды или при её больших размерах. Это условие выполняется для астрофиз. объектов, а в лабораторных условиях — для горячей плазмы термоядерных устройств. В предельном случае  $R_m \rightarrow \infty$ , когда можно пренебречь диффузией магн. поля, влияние движения электропроводящей жидкости на магн. поле допускает наглядную интерпретацию, указанную Альвенем и заключающуюся в том, что магн. силовые линии как бы приклеены к частицам жидкости и увлекаются ими при их движении. Согласно закону индукции Фарадея, при изменении магн. потока через материальный контур в нём создаётся эдс. Условие  $R_m \rightarrow \infty$  соответствует  $\sigma \rightarrow \infty$ , и в этом случае эдс привела бы к появлению бесконечно большого тока, что невозможно. Следовательно, магн. поле должно изменяться со временем так, чтобы магн. поток через любой материальный контур не менялся. Тогда говорят, следуя Альвену, о «вмороженности» магн. поля в идеально проводящую среду. В общем случае изменение магн. поля складывается из его переноса движущимися проводящим веществом и диффузии относительно этого вещества. Перенос преобладает над диффузией при  $R_m \gg 1$ , что особенно сильно проявляется для астрофиз. объектов, где  $R_m \gg 10^{10}$ .

**Проблема МГД-динамо.** Магн. поля распространены в космосе очень широко, практически они есть везде, хотя никаких «устройств» для создания поля там нет. Поэтому одна из важнейших проблем М. г. — это выяснение того, как создаются магн. поля при движении хорошо проводящей среды — т. н. проблема МГД-динамо. В решении этой проблемы принято различать два этапа: 1) исследование самовозбуждения магн. поля при заданных скоростях жидкости — кинематич. теория динамо, и 2) исследование самовозбуждения магн. поля и движения проводящей жидкости одновременно с учётом действующих сил — полная теория МГД-динамо, к-рая развивается для конкретных физ. систем. Проблема МГД-динамо старше, чем сама наука М. г.: ещё в 1919 Дж. Лармор (J. Larmor) высказал гипотезу о том, что магн. поле Солнца создаётся механизмом МГД-динамо. С тех пор кинематич. теория МГД-динамо достигла весьма высокой степени развития. Показано, что МГД-динамо должно быть геометрически достаточно сложным; напр., при аксиальной симметрии магн. поля и скорости жидкости самоподдержание поля невозможно. Для достаточно сложных конфигураций доказана возмож-