

538.221

ФЕРРОГИДРОДИНАМИКА *)

Р. Розенцвайг

Все известные материалы, обладающие ферромагнитными свойствами, представляют собой твердые тела. Возможность существования ферромагнитных жидкостей теоретически не исключена, но до сих пор мы не знаем ни одной такой жидкости. Можно, однако, изготовить стойкую суспензию тонко измельченных частиц твердого ферромагнитного тела в жидкости «носителе» и получить, таким образом, жидкость, чрезвычайно чувствительную к магнитному полю. Подобные жидкости получили название «феррогидродинамических» (ФГД), или просто магнитных жидкостей.

Создание мельчайших (коллоидальных) магнитных частиц может быть обеспечено путем размалывания ферромагнитных (например, ферритовых) порошков между стальными шариками барабанной мельницы в течение нескольких недель. Размалывание производится в присутствии жидкого носителя, например, керосина, в котором растворен диспергирующий агент, скажем, олеиновая кислота, образующая на поверхности каждой частицы слой, препятствующий сближению частиц. Получаемые таким способом частицы, типичный размер которых порядка 100 \AA , довольно интенсивно перемешиваются благодаря броуновскому движению, препятствующему оседанию частиц или их сепарации под действием силы тяжести или сильного магнитного поля. Таким образом, коллоидальные смеси этого рода ведут себя в отношении механических свойств как однородные жидкости. Но они, кроме того, обладают еще одной характерной особенностью — высокой восприимчивостью к магнитным полям.

При рассмотрении поведения этих магнитных жидкостей мы исходим из хорошо известного уравнения Бернулли, выражающего связь между давлением P в жидкости, скоростью жидкости v и высотой h в гравитационном поле вдоль линии тока,

$$P + \frac{1}{2} v^2 \rho + \rho gh = \text{const},$$

где ρ — плотность жидкости.

Возникает вопрос: как будет влиять магнитное поле на течение магнитной жидкости. Справедливо ли вообще уравнение Бернулли для магнитных жидкостей? Ведь в «магнитогидродинамике» (МГД), например, имеющей дело с поведением проводящих жидкостей в магнитных полях, уравнение Бернулли неприменимо из-за возбуждаемых электрических токов. Там свойства струи в заданной точке линии тока зависят от всей предыстории элементов жидкости до того момента, когда они достигли этой точки.

*) R. E. Rosenzweig, The Fascinating Magnetic Fluids, New Scientist 29, 146 (1966). Перевод К. Э. Виллер. Статья в переводе несколько сокращена.

Хотя в феррогидродинамике подобные проблемы не возникают, если только магнитная жидкость не является проводником, там имеются свои, не менее трудные проблемы, обусловленные прежде всего сложным характером магнитного поля и его воздействием на жидкость. Дело в том, что магнитное поле является вектором, а в простое уравнение Бернулли входят только скалярные величины.

Нам удалось написать расширенное уравнение Бернулли для магнитных жидкостей¹. В нем магнитный эффект выражается дополнительным членом, который освобождает нас от необходимости учитывать направление магнитного поля,

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h - \mu_0 \int_0^H M dH = \text{const},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, M — магнитный момент единицы объема жидкости, индуцированный под действием поля напряженности H . Таким образом, оказывается, что условия в какой-нибудь точке вдоль линии тока однозначным образом связаны с условиями в другой ее точке независимо от того, насколько сложны и насколько быстро меняются условия на линии, соединяющей обе эти точки.

В расширенном уравнении можно рассмотреть сочетание магнитного члена с каждым из остальных. Возьмем, например, отдельно случаи, когда одна из величин — давление, скорость или высота — изменяется, а две остальные остаются постоянными; тогда получатся три новых вида взаимодействия магнитной жидкости с полем.

В опытах с магнитной жидкостью сразу же привлекает внимание очень своеобразное явление: поверхность покоящейся магнитной жидкости, налитой в бутылку, сильно деформируется даже от действия маленького магнита. Происходит это потому, что вдоль поверхности жидкости давление постоянно и никакого движения нет ($v = 0$). Если приложить сильное магнитное поле, то для того, чтобы было удовлетворено расширенное уравнение Бернулли, высота жидкости h должна возрасти. Варьируя форму магнитных полей, мы смогли проверить справедливость расширенного уравнения Бернулли. Опыты такого типа дают возможность получить подробную картину намагничивания магнитной жидкости.

Рассмотрим теперь течение свободной горизонтальной струи магнитной жидкости. Здесь высота h и давление P постоянны. Отсюда легко сделать вывод, что при вхождении этой струи в магнитное поле скорость v не повысится и, следовательно, площадь поперечного сечения должна уменьшиться. И наоборот, при выходе струи из магнитного поля ее скорость должна уменьшиться, а площадь поперечного сечения увеличиться.

Возможно, что этот и аналогичные эффекты найдут применение в жидкостных счетно-решающих устройствах, поскольку они дают способ введения электрических сигналов в гидравлическую систему без движущихся частей. Другой запроектированный способ применения этого эффекта приведет, вероятно, к созданию индукционных электрогенераторов с жидкостными роторами.

Расширенное уравнение Бернулли показывает, что при постоянных скорости v и высоте h (например, в неподвижном бассейне или в горизонтальной трубе, наполненных магнитной жидкостью) давление в жидкости повысится там, где напряженность магнитного поля H больше. Мы изучали преобразование тепловой энергии и движение магнитной жидкости при циклическом процессе непосредственного преобразования энергии, основанном на данном явлении. Это применение опирается также на тот факт, что намагниченность жидкости уменьшается с повышением темпе-

ратуры. Таким образом, тепловая энергия предоставляет еще один способ изменения давления магнитной жидкости.

На рис. 1 представлен эскиз устройства для осуществления цикла преобразования тепловой энергии. Под действием силы притяжения холодная магнитная жидкость течет по горизонтальной трубе в ту область, где имеется магнитное поле; здесь давление возрастает. На этом этапе задача заключается в том, чтобы жидкость вышла из поля без потери повышения давления. Для этого повышают температуру жидкости, все еще находящейся в однородном поле, с помощью некоторого источника тепла — солнечного, ядерного, химического и т. п. Так как нагретая жидкость намагничена слабее, то действие поля на жидкость при выходе из него меньше, чем при входе.

В результате давление в магнитной жидкости на выходе из поля выше, чем до входа, поэтому можно любым удобным способом получить от нее работу². Можно указать возможные области использования этого явления: гидравлические турбины, магнитогидродинамические трубопроводы (если жидкость обладает электропроводностью), упомянутые выше индукционные устройства с жидкостными роторами. Жидкость, используемая в качестве рабочего вещества, может служить также для переноса выделяющегося тепла, что в свою очередь позволяет достичь высокого к. п. д., приближающегося к пределу, допускаемому законами термодинамики. Сейчас основная задача заключается в синтезировании магнитных жидкостей с большой магнитной восприимчивостью и высокой теплопроводностью, которые необходимы для более мощных выходных устройств. Возможно, что для этой цели окажутся подходящими суспензии частиц железа в жидком металле типа сплава натрия и калия.

Усовершенствованные устройства этого типа могли бы быть полезны для производства энергии в космосе или отдаленных районах, где усилия по эксплуатации должны быть доведены до минимума. Они могли бы, например, быть использованы для автоматической циркуляции тепла на борту космических кораблей. В качестве земного применения можно указать паровой насос для циркуляции воды в системе домашнего газового отопления без применения электрической энергии.

Пожалуй, еще более поразительно явление всплывания, наблюдаемое при определенном соотношении между давлением и магнитным полем. Если поместить магнит под стаканом с магнитной жидкостью, то ее свободная поверхность продолжает оставаться невозмущенной и никакого

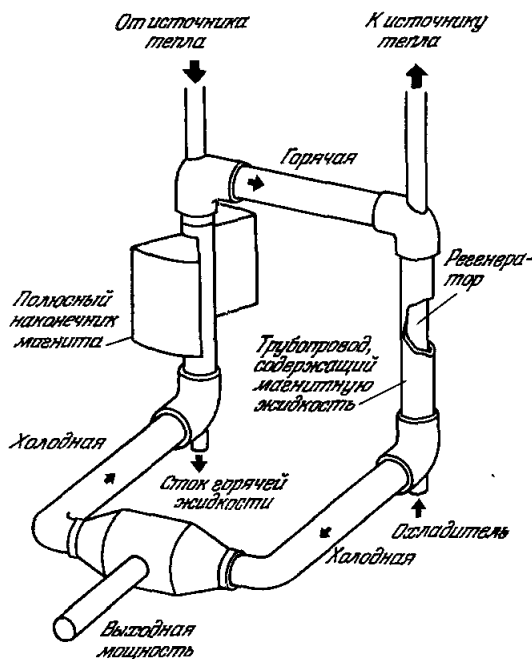


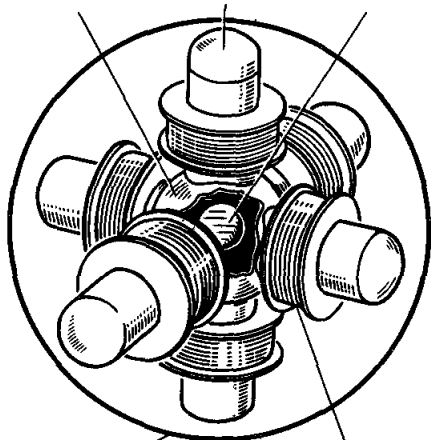
Рис. 1. Принципиальная схема, иллюстрирующая «феррогидродинамическую» тепловую машину с замкнутой цепью.

Регенеративный нагрев позволяет достигать высоких к.п.д. при малых размерах устройства благодаря высокой теплопередаче жидких металлов. Нагрузка не должна быть непременно механической, и тогда отпадают движущиеся части.

заметного эффекта не наблюдается. Между тем расширенное уравнение Бернулли предсказывает для этого случая перераспределение давления внутри жидкости, которое должно оказаться выше в тех участках, где магнитное поле сильнее.

Если это так, то повышенное местное давление должно оказывать свое действие на любую соприкасающуюся с ним поверхность, например, на поверхность погруженного в жидкость предмета. Для демонстрации этого явления мы опустили в стакан с магнитной жидкостью нейлоновую сферу, плотность которой больше плотности жидкости; в отсутствие магнитного поля эта сфера падает на дно стакана. Однако стоит поднести

Сфера, содержащая ферромагнитную жидкость *Конструкция полюсного наконечника магнита* *Сферическая непроницаемая масса*



Обратный путь магнитного потока в наружном кожухе

Катушка

Рис. 2. В данном осуществлении идеи трехосного измерителя ускорений шарик удерживается жидкостью в равновесии в нейтральной точке магнитного поля.

двух прямых магнитов, одноименные полюсы которых обладают одинаковой намагниченностью, причем направлены навстречу друг к другу. Всплывание предметов в такого рода полях сопровождается появлением положительной восстанавливающей силы, возникающей при смещении тела в любом направлении. Поведение этого устройства можно уподобить поведению трехмерной магнитной «пружинь».

Схема трехосного акселерометра — измерителя ускорений, основанного на использовании явления всплывания, показана на рис. 2. Подвешенный шарик в отсутствие ускорения находится в центре сферического кожуха, наполненного магнитной жидкостью, плотность которой отлична от плотности шарика. Если сообщить шарiku ускорение в любом направлении, то он будет стремиться выйти из первоначального положения. При работе с «разомкнутой цепью» шарик может передвигаться на заметные расстояния и его положение можно определить, например, путем измерений индуктивности. В случае «замкнутой цепи» изменяют ток питания магнитов так, чтобы удерживать шарик в центре, и таким образом получают возможность измерить ускорение.

Возможны варианты таких устройств, в которых используются не только магнитные, но и вязкие свойства жидкости. Так например, можно

ко дну стакана магнит, как сфера всплывает и продолжает держаться на свободной поверхности жидкости. Это вполне соответствует предлагаемой теории.

Погруженный в магнитную жидкость немагнитный предмет стремится двигаться к областям, где поле слабее. В случае нейлоновой сферы сила магнитного поля оказалась достаточной для преодоления силы тяжести. Можно попытаться найти область применения этой идеи для подъема предметов в отсутствие свободной поверхности.

Попытаемся создать магнитное поле с «нейтральной точкой» нулевой напряженности в центре симметрии, вокруг которой величина поля возрастала бы во всех направлениях. Оказывается, что такое поле можно создать различными способами: например, с помощью

спроектировать прибор для измерения нарастания скорости. Другая идея касается применения ферромагнитной жидкости на спутниках в космосе, где стабилизация под действием силы тяжести нарушается колебаниями, получившими название «либрационного движения». Применение жидкостной сферы, всплывающей внутри другой сферы, может помочь удалению энергии либрации. Внутренняя сфера должна содержать магнит для ориентировки ее вдоль магнитного поля Земли. Таким образом, когда наружная сфера совершает колебания относительно внутренней, из-за вязкого трения жидкости энергия либрации переходит в тепло.

Кроме того, для облегчения запуска ракетных двигателей в космическом пространстве было предложено добавлять в ракетное топливо магнитную жидкость. В условиях состояния невесомости запасы топлива увлекают с собою его пары, которые могут попасть в насос и вызвать нарушение его работы. Если же топливо имеет заметную магнитную восприимчивость, то, поместив постоянные магниты в месте всасывания топлива, можно эти пары удалить. Имеются сообщения об опытах, проводимых Национальным управлением по авионавтике и исследованию космического пространства (США), в которых с помощью магнитной жидкости, помещенной в поле плавно меняющейся напряженности, изучался перенос тепла при кипении в условиях как уменьшенного тяготения, так и полной невесомости.

Наконец, последнее возможное применение магнитных жидкостей, о котором я хотел бы упомянуть, это их использование в жидкостных магнитогидродинамических трубопроводах; последние исследовались недавно для применения в качестве трансформаторов постоянного тока. Такой трансформатор состоит из использующих одну и ту же жидкость магнитогидродинамического насоса и соединенного с ним магнитогидродинамического генератора. Если бы оказалось возможным сделать рабочую жидкость магнитной, то размеры трубопроводов и связанных с ними магнитов можно было бы соответственно уменьшить.

В области феррогидродинамики работает очень мало людей, и в большинстве случаев их исследования несистематичны. Однако есть надежда, что по мере того, как особенности магнитных жидкостей станут более известны, интерес к ним будет возрастать и все больше ученых будут участвовать в этой работе для обоюдной пользы.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. I. Neuringer, R. E. Rosensweig, *The Physics of Fluids*, vol. 7, № 12, p. 1927 (1964).
2. E. I. Resler, R. E. Rosensweig, *AIAA. J.* 2, 1418 (1964).