

Статическое равновесие упругого магнитожидкостного элемента с магнитным ядром

Баштовой В. Г., Рекс А.Г., Рекс П.А.

Белорусский национальный технический университет

Капля магнитной жидкости с размещенным внутри постоянным магнитом представляет собой интерес не только как объект чисто научного исследования, но и как новый перспективный чувствительный элемент датчиков силы, обладающих рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с традиционными, в том числе и жидкостными. Этот магнитожидкостный элемент интересен также возможностью создания новых вибропоглощающих устройств.

Магнит удерживается внутри объема жидкости без касания окружающих немагнитных стенок благодаря эффекту плавления магнитных тел в магнитной жидкости, основанному на перераспределении давления в магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле [1]. Из-за перераспределения магнитного поля между магнитом и стенкой возникает область повышенного давления, которое создает упругую силу, отталкивающую магнит от стенки. Эта сила тем больше, чем ближе магнит приближается к стенке. Если под действием силы тяжести магнит в магнитной жидкости тонет, то на некотором расстоянии от дна сосуда эта сила уравнивает силу тяжести и магнит плавает над дном сосуда.

Совокупность ограниченного объема магнитной жидкости с размещенным внутри постоянным магнитом ведет себя как единое целое, как одна капля, способная перемещаться в любом направлении и существовать самостоятельно без внешнего корпуса. Жидкость вокруг магнита удерживается его магнитным полем, и форма поверхности объема жидкости определяется этим полем. Сам же магнит занимает вполне определенное положение относительно объема жидкости.

Поскольку капля магнитной жидкости с ядром как чувствительный элемент может находиться внутри каналов различной конфигурации, то ее равновесное положение определяется силовым взаимодействием магнита со стенками каналов. В связи с этим представляет интерес изучение

статических силовых характеристик системы «магнит-стенка». Такие характеристики определяются как физическими свойствами магнитной жидкости и магнита, их геометрией, так и величиной зазора между стенкой и поверхностью магнита.

Сила, действующая на магнит в капле магнитной жидкости, определяется распределением давления в жидкости /1/

$$p = p_0 - \rho g(z - z_0) + \mu_0 \int_{H_0}^H M(H) dH,$$

где p_0 - давление в точке (x_0, y_0, z_0) , H_0 - напряженность магнитного поля в этой же точке, ось z направлена вертикально вверх. Увеличение магнитного поля в какой-либо области объема магнитной жидкости приводит к увеличению давления в этой области и появлению упругой магнитной силы, действующей на магнит.

Аналитическое описание распределения давления в капле магнитной жидкости наталкивается на трудности задания магнитного поля постоянного магнита, связанные с его формой и формы капли.

Статические характеристики силового взаимодействия постоянного магнита, покрытого слоем магнитной жидкости, с плоской пластиной исследованы экспериментально.

Для исследований выбран постоянный самарий-кобальтовый магнит размером 30x20x10 мм со средней величиной магнитной индукции на плоской поверхности, равной 220 мТ. С целью исключения боковых перемещений магнит закреплен на плоском горизонтальном основании. Над магнитом установлена горизонтально подвижная немагнитная пластина. В центре верхней поверхности пластины закреплен шток, который по направляющим может перемещаться в вертикальном направлении. На другом конце штока укреплена площадка для установки калиброванных грузов. Магнит покрывается слоем магнитной жидкости. Возникающая магнитная сила действует на подвижную пластину, выталкивает ее и перемещает вверх. Равновесие наступает при равенстве магнитной силы и силы тяжести пластины с грузом. Величина вертикального перемещения подвижной пластины определяется катетометром.

Для экспериментов использована магнитная жидкость на основе керосина МК-45 с намагниченностью насыщения 47 кА/м .

Влияние силы, действующей на пластину, от величины зазора между пластиной и магнитом представлено на рис. 1. Сила выталкивания определена для различных объемов капли магнитной жидкости, и в качестве параметра выбрано отношение объема магнитной жидкости к собственному объему постоянного магнита, который она покрывает ($\Delta = V_{\text{мж}} / V_{\text{магн}}$). При приближении пластины к магниту сила увеличивается, причем более резкое увеличение силы наблюдается при малых зазорах δ . Максимального значения сила достигает при касании пластины и поверхности магнита. Для всех объемов капли максимальная сила оказалась равной $8,3 \text{ Н}$.

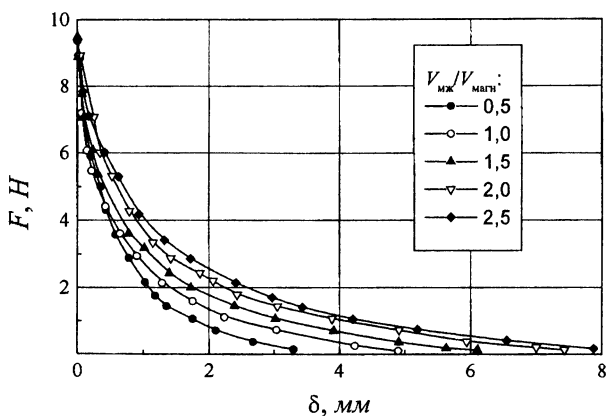


Рис. 1. Статические силовые характеристики капли с магнитом при различных отношениях объема магнитной жидкости к объему магнита

Максимальную силу отталкивания пластины от магнита в магнитной жидкости можно приближенно оценить исходя из простых соображений. Если объем магнитной жидкости достаточно велик, то на его поверхности напряженность магнитного поля близка к нулю. В этом случае выталкивающая

сила пропорциональна магнитостатическому давлению $\mu_0 M_S H$ и площади сечения магнита, перпендикулярного направлению выталкивающей силы $F = \mu_0 M_S H$.

С учетом того, что напряженность магнитного поля на поверхности магнита $H = 175 \text{ кА/м}$, а намагниченность насыщения магнитной жидкости $M_S = 45 \text{ кА/м}$, получается предельное значение силы $F = 6 H$, что хорошо соответствует экспериментальным значениям. Удельная нагрузка на единицу площади магнита равна 10^4 Н/м^2 .

Объем капли магнитной жидкости влияет на жесткость системы «магнит-пластина». Анализ силовых характеристик показал, что их можно достаточно хорошо аппроксимировать экспоненциальной зависимостью $F = F_0 \exp(-\alpha x)$. Показатель экспоненты α , характеризующий жесткость системы, изменяется от $\alpha = 1470 \text{ м}^{-1}$ для соотношения объемов жидкости и магнита $\Delta = V_{\text{мж}}/V_{\text{магн}} = 0,5$ до значения 620 м^{-1} (при $\Delta = 2,5$).

С увеличением соотношения объемов до $\Delta = 3$ жесткость системы значительно уменьшается. С увеличением объема капли начальное положение пластины относительно магнита изменяется незначительно, если объем капли велик. Кроме того, дальнейшее увеличение объема магнитной жидкости, покрывающей постоянный магнит, может привести к потере устойчивости магнитожидкостной капли как единого целого. Эти факты связаны с уменьшением напряженности магнитного поля по мере удаления от поверхности магнита. Находящиеся на большом расстоянии от магнита элементы объема магнитной жидкости слабо взаимодействуют с магнитом и не вносят свой вклад в создание выталкивающей силы. Удаленные от магнита слои магнитной жидкости плохо удерживаются полем магнита, и жидкость может растекаться. Для капли с магнитным ядром существует предельный объем, который определяется свойствами магнита и магнитной жидкости.

Работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь.

Литература

1. Баштовой, В.Г., Берковский, Б.М., Вислович, А.Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. – М.:ИВТАН СССР, 1985. – 188с.