

СЕКЦИЯ «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

УДК 538.4

Особенности формирования пузырей в магнитной жидкости в поле кольцевого магнитаБаштовой В.Г.¹, Рекс А.Г.¹, Ряполов П.А.², Загадская А.А.¹¹Белорусский национальный технический университет²Юго-западный государственный университет, г.Курск, Россия

Магнитное поле кольцевого магнита имеет интересную особенность, которая состоит в наличии области пространства над магнитом, где модуль напряженности поля равен нулю. Это означает, что в данной области величина поля увеличивается во всех направлениях, т.е. градиент поля меняет свой знак. В объеме магнитной жидкости в данной области пространства создается область пониженного давления, что создает условия устойчивого плавания в ней газовых пузырей.

В соответствии с этим имеет интерес изучение особенностей формообразования газовых пузырей в магнитной жидкости в поле кольцевого магнита. С целью возможности визуализации формы пузыря исследование выполнено в тонком слое магнитной жидкости между горизонтальными прозрачными пластинами.

Пусть объем магнитной жидкости находится в магнитном поле кольцевого магнита. В области объема жидкости, где напряженность магнитного поля приближается к нулю, создается область пониженного давления. Если на поверхности жидкости давление воздуха превышает давление в этой области жидкости, то воздух снаружи будет стремиться прорваться внутрь жидкости в виде пузырька, который будет перемещаться в область минимального давления.

Условия для проникновения воздуха из окружающей среды в область объема магнитной жидкости с пониженным давлением могут быть созданы путем использования тонкого слоя магнитной жидкости между горизонтальными пластинами и соединением этого слоя полый трубкой или отверстием в верхней пластине с окружающим воздухом.

При помещении слоя магнитной жидкости, заполняющего щель между двумя плоскопараллельными пластинами, над кольцевым магнитом параллельно его плоским поверхностям воздух снаружи через отверстие проникает в магнитную жидкость и заполняет область пониженного давления и образует пузырь. Если толщина слоя жидкости мала, то область пузыря становится прозрачной и доступной для регистрации. Поскольку поле осесимметрично, то прозрачная область, занимаемая пузырем, имеет форму круга.

Рассматривается горизонтальный плоский слой магнитной жидкости между плоскопараллельными твердыми пластинами, расположенный над кольцевым магнитом (рисунок 1). Слой имеет форму круга толщиной 1 мм. При понижении давления в его центре воздух через отверстие в верхней

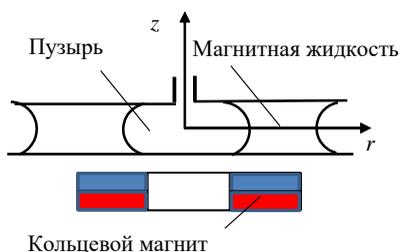


Рисунок 1. Геометрия задачи

пластине проникает в магнитную жидкость и образует осесимметричный пузырь.

Плоский слой с пузырем внутри имеет две свободные поверхности: наружную и внутреннюю поверхности контакта с пузырем.

Обе свободные поверхности слоя магнитной жидкости формируются так, чтобы значения модуля

напряженности магнитного поля на них были одинаковыми [2]. Это означает, что внутренняя и внешняя свободные поверхности слоя жидкости совпадают с одинаковыми изолиниями модуля напряженности магнитного поля.

Для выполнения экспериментов выбраны магнитные жидкости на основе керосина МК-28 и МК-44 с намагниченностями насыщения соответственно 28,3 и 44,7 кА/м, плотностями соответственно 1151 и 1332 кг/м³ и коэффициентами поверхностного натяжения 0,029 и 0,028 Н/м.

Использован феррит-бариевый кольцевой магнит с наружным и внутренним диаметрами соответственно 56 и 24 мм и высотой 12 мм.

Вертикальное распределение характеристик магнитного поля над кольцевым магнитом вдоль оси его симметрии показано на рисунке 2. Начало отсчета координаты z выбрано в центре магнита (см. рисунок 1).

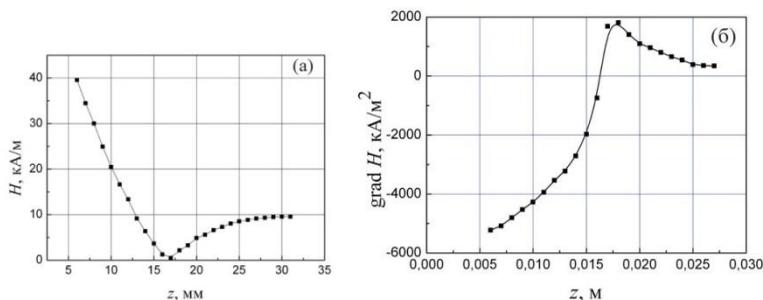


Рисунок 2. Вертикальное распределение напряженности (а) и градиента напряженности (б) над кольцевым магнитом

Поле максимально на уровне торцевой поверхности магнита. При вертикальном удалении от магнита модуль напряженности снижается монотонно до нуля и затем монотонно растет (рисунок 2 а). Градиент магнитного поля над магнитом изменяет знак. Вблизи магнита он направлен вниз к магниту, в некоторой точке изменяет направление на противоположное и направлен вертикально вверх (рисунок 2 б).

В эксперименте вначале формировался слой магнитной жидкости в горизонтальной щели при ее расположении вблизи торца магнита. Жидкость принимает форму сплошного диска.

При перемещении слоя жидкости вверх на некоторой высоте давление в центре слоя становится ниже атмосферного из-за уменьшения напряженности магнитного поля. Воздух проникает в слой жидкости извне через отверстие и образует плоский пузырь,

При дальнейшем подъеме слоя радиус пузыря вначале увеличивается за счет подсоса воздуха через отверстие, достигает максимума, затем уменьшается и исчезает. На рисунке 3 представлены зависимости радиуса пузыря r от вертикальной координаты z , в магнитной жидкости МК-28.

Направление перемещения слоя жидкости относительно магнита влияет на зависимость радиуса пузырей от высоты расположения слоя жидкости (рисунок 3). При перемещении слоя вверх (прямой ход) появление пузырей и изменение их радиуса происходит монотонно вплоть до

исчезновения на некоторой высоте. При обратном ходе перемещения слоя вниз пузырь не возникает на высоте своего исчезновения, а значительно ниже. При обратном ходе скачкообразное появление пузыря происходит приблизительно на высоте, где радиус пузыря был максимален при прямом ходе. При дальнейшем понижении уровня расположения слоя радиус пузыря монотонно уменьшается до нуля. Зависимость изменения радиуса пузыря при обратном ходе перемещения слоя жидкости практически совпадает с участком зависимости при прямом ходе.

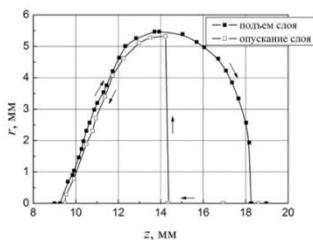


Рисунок 3. Влияние положения слоя магнитной жидкости на радиус пузыря r

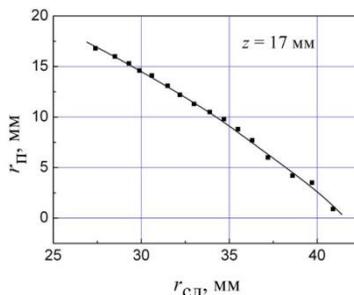


Рисунок 4. Зависимость радиуса пузыря от внешнего радиуса слоя жидкости

Гистерезис формы пузырей, возможно, определяется различием магнитных скачков давления на наружной поверхности слоя жидкости и на поверхности в отверстии верхней пластины,

Радиус пузырей зависит от объема магнитной жидкости, т.е. и внешнего радиуса слоя (рисунок 4). С увеличением радиуса слоя радиус пузыря уменьшается. Такой характер зависимости определяется условием равновесия пузыря в кольцевом слое магнитной жидкости, в соответствии с которым внутренняя и наружная поверхности слоя жидкости должны располагаться в области одинаковых напряженностей магнитного поля. Измерения магнитного поля показали, что это условие лучше соблюдается для слоев жидкости большого диаметра, и этот факт иллюстрируется в [3].

Магнитное поле кольцевого магнита вносит свои особенности в условия всплывания газовых пузырей в магнитной жидкости. Из-за существования над магнитом области с полем $H = 0$ градиент напряженности поля в этой области меняет свое направление (рисунок 26). Действующая на

магнитную жидкость объемная магнитная сила $f_m = \mu_0 M \nabla H$ тоже изменяет свою величину и направление в соответствии с законом изменения градиента поля.

Зависимости объемной магнитной силы, отнесенной к гравитационной силе, от высоты z для образцов магнитных жидкостей с различной намагниченностью насыщения приведены на рисунке 5.

Вблизи магнита градиент направлен к магниту, магнитная сила имеет же направление. Поэтому вблизи магнита в магнитной жидкости создается область повышенного давления. Если пузырь находится в этой области, то на него помимо силы Архимеда дополнительно действует выталкивающая сила, направленная вверх, и эта сила может в десятки раз превышать силу Архимеда и будет ускорять движение пузыря вверх.

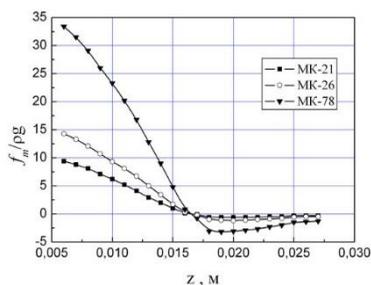


Рисунок 5. Вертикальное распределение относительной объемной магнитной силы в магнитных жидкостях с различной намагниченностью над кольцевым магнитом

По мере удаления от магнита вверх давление в жидкости уменьшается, и затем на некоторой высоте начинает повышаться. В результате в этой области объема жидкости магнитное поле стремится замедлить движение пузыря вверх. При достаточно большом градиенте поля магнитное поле способно остановить всплывание вверх пузыря.

Такой захват пузырька воздуха в поле кольцевого магнита в вертикальной трубке с магнитной жидкости наблюдался авторами [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (№ТМС20-015) и государственного задания РФ на 2020 г. (номер 0851-2020-0035).

Литература

5. Баштовой, В.Г. Форма поверхности воздушной полости в магнитной жидкости, захваченной и удерживаемой магнитным полем / В.Г.Баштовой [и др.] // Известия ЮЗГУ, Серия Физика и химия. – 2012. – № 2. – С.107-112.
6. Баштовой В.Г., Берковский Б.М., Вислович А.Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. – М.:ИВТАН СССР, 1985. – 188с.
7. Ryapolov, P.A. Study of the working area of a ring magnet MagLev system using a thin layer of magnetic fluid / P. A. Ryapolov, V.M. Polunin, V.G. Bashtovoi, A.G. Reks, E.A. Sokolov, E.B. Postnikov //IEEE Magnetics Letters . – August 2020. – V.11. – PP.7104305.
8. Боев, М.Л. Неустойчивость течения магнитной жидкости в процессе затопления ею воздушной полости / М.Л.Боев [и др.] // Известия высших учебных заведений, Физика. – 2014. – № 10. – С. 47-53.

УДК 538.4

Влияние перераспределения концентрации частиц в магнитной жидкости на характеристики магнитожидкостного уплотнения

Баштовой В.Г., Рекс А.Г., Погирницкая С.Г.
Белорусский национальный технический университет

Как показано в работах [1-4] перераспределение концентрации частиц в магнитной жидкости, вызванное процессами магнитофореза и броуновской диффузии, может приводить к заметному изменению удерживаемого перепада давления в магнитожидкостном уплотнении.

В настоящей работе представлены результаты теоретического рассмотрения этого вопроса на примере модели магнитожидкостного уплотнения, представленной на рисунке1.