

УДК 537.84:621.03

*В. Г. БАШТОВОЙ, А. А. МОЦАР, А. Г. РЕКС***УПРУГИЕ СВОЙСТВА КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ  
С КОМБИНИРОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ЯДРОМ***Белорусский национальный технический университет**(Поступила в редакцию 15.05.2014)*

**Введение.** Капля магнитной жидкости с магнитным ядром является важным объектом изучения, в первую очередь, из-за возможности практического применения такой системы в различных магнитожидкостных устройствах (опоры, подвесы и демпферы). Например, капля магнитной жидкости с постоянным магнитом используется в качестве инерционного элемента в магнитожидкостных демпферах [1, 2].

Возможность использования данной системы в качестве инерционного элемента связана с некоторыми особенностями статики магнитных тел в магнитной жидкости. Если магнит поместить в немагнитный контейнер, заполненный магнитной жидкостью, то под действием объемной магнитной силы он будет плавать в магнитной жидкости, не касаясь ограничивающих твердых стенок. Приближение же магнита к стенкам будет вызывать асимметрию сил давления, действующих на него со стороны магнитной жидкости, и приводить к возникновению результирующей силы, отталкивающей магнит от стенок контейнера [3, 4].

Возможен случай, когда жидкость, притягиваясь к магниту, формирует каплю с преобладающей свободной поверхностью. Такая капля может перемещаться как единое целое и благодаря легкой подвижности обладает высокой чувствительностью к внешним воздействиям. Деформация капли также приводит к перераспределению давления в жидкости и возникновению объемной магнитной силы, препятствующей этой деформации, т. е. можно утверждать, что капля обладает упругостью.

Упругость инерционного элемента является одной из важнейших технических характеристик магнитожидкостных гасителей колебаний. Именно величина упругих сил определяет амплитуду колебаний инерционного элемента. Чем больше эта амплитуда, тем больше величина вязкой диссипации энергии в системе. Поэтому для конструирования такого рода устройств необходимо знать, какие факторы влияют на упругие свойства капли магнитной жидкости с магнитным ядром. Кроме того, способы управления упругими характеристиками такой капли представляют технический интерес для создания адаптивных виброзащитных устройств, способных подстраиваться под параметры вибраций в процессе своей работы. К одному из таких способов относится изменение магнитного поля магнитного ядра капли.

Упругие свойства капли магнитной жидкости с магнитным ядром, в качестве которого использован постоянный магнит, исследованы в каналах различной конфигурации в [5]. В [6] исследована капля магнитной жидкости с комбинированным магнитным ядром, конструкция которого предполагает возможность изменения собственного результирующего магнитного поля. Изучено влияние намагниченности магнитной жидкости, магнитного поля ядра, а также геометрии рассматриваемой системы на статику такой капли в канале клиновидной формы.

В данной статье рассмотрены упругие свойства капли магнитной жидкости с комбинированным магнитным ядром в канале клиновидной формы. Дана оценка влияния магнитного поля комбинированного источника, намагниченности жидкости, объема капли и геометрии канала на коэффициент упругости и силу упругости, возникающую в такой капле.

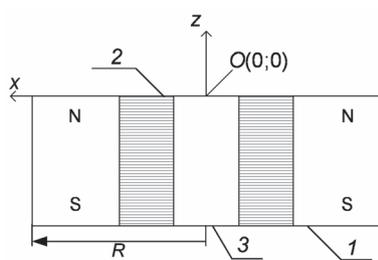


Рис. 1. Комбинированный источник магнитного поля

**Комбинированный источник магнитного поля.** Управление конфигурацией поля магнитного ядра может быть реализовано путем замещения части постоянного магнита электромагнитом с сердечником из намагничивающегося материала.

В настоящем исследовании комбинированный магнит составлен из постоянного кольцевого магнита 1, в отверстие которого помещен электромагнит 2 с сердечником 3 из намагничивающегося материала. Изменение результирующего поля комбинированного источника осуществлялось подачей напряжения на электромагнит (рис. 1).

В качестве постоянного магнита выбран кольцевой феррит-бариевый магнит. Величина напряженности магнитного поля  $H$  на поверхности магнита по модулю доходила до 90 кА/м. Внешний радиус магнита 18 мм, внутренний радиус 9 мм, высота магнита 16 мм. Диаметр электромагнита 17 мм, высота 14 мм, число витков 822. Материал сердечника – сталь Ст. 3, диаметр 6 мм, высота 14 мм.

Для оценки возможности изменения величины магнитного поля измерена вертикальная составляющая его индукции на вертикальной оси симметрии комбинированного магнита, а также в точке, удаленной от вертикальной оси симметрии на величину  $3/4 R$  (рис 1). Измерения проводились с помощью тесламетра с точностью до 0,1 мТл с последующим расчетом напряженности магнитного поля  $H$ . В зависимости от направления протекающего тока результирующее магнитное поле источника либо усиливалось (в данном случае условно обозначим такое направление тока как положительное), либо ослабевало (отрицательное направление тока).

Результаты измерений поля на оси симметрии представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, включение электромагнита приводит к изменению напряженности поля. На оси симметрии магнита у его поверхности при токах  $I = 0, +350$  и  $-350$  мА напряженность магнитного поля составляла 84, 112 и 58 кА/м соответственно. Измерение магнитного поля вдоль вертикальной оси в точке  $3/4 R$  показало, что величина результирующего поля в этой области остается практически неизменной. Поле, генерируемое электромагнитом, вносит существенный вклад в результирующее поле в ограниченной области, не превышающей размеров самого электромагнита.

**Экспериментальная установка и методика измерений.** Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Капля магнитной жидкости 1 известного объема  $V$ , внутри которой расположен комбинированный магнит 2, помещена в канал клиновидной формы 3 с заданным значением угла раствора канала  $\gamma$ . Геометрия комбинированного магнита описана ранее. Канал

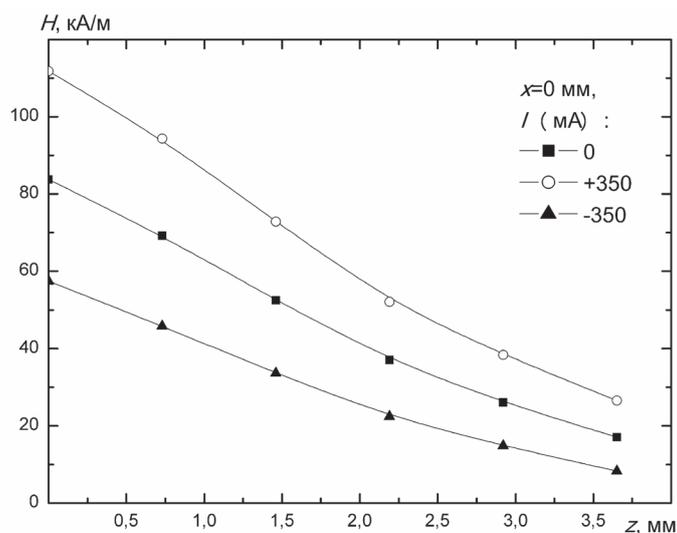


Рис. 2. Напряженность поля комбинированного магнита при различной величине тока, протекающего через электромагнит

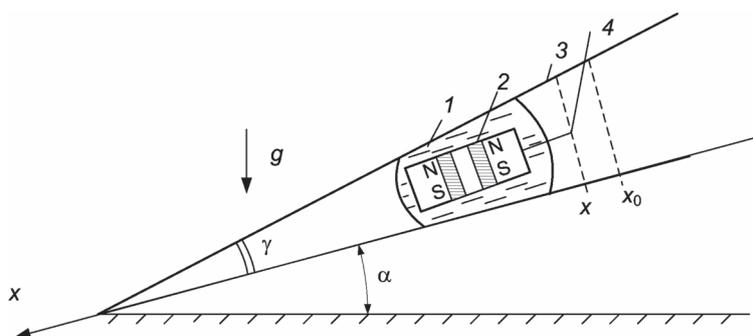


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

выполнен из двух пластин, изготовленных из плексигласа, расположенных друг от друга под углом  $\gamma$ . Для определения положения магнита к его стенке был приклеен немагнитный маячок 4.

При наклоне канала на угол  $\alpha$  (угол наклона нижней пластины канала к горизонту) магнит с объемом магнитной жидкости под действием силы тяжести из начального положения  $x_0$  смещается в узкую часть канала. Этому смещению препятствует сила упругости капли, возникающая вследствие ее деформации и уравнивающая составляющую силы тяжести, в этом случае магнит принимает положение  $x$ .

В начальном положении магнита  $x_0$  электромагнит отключен, угол наклона канала к горизонту  $\alpha = 0$  град, капля 1 не деформирована и касается верхней пластины канала. За начало координат принята вершина угла раствора клиновидного канала. Координата максимального перемещения магнита определялась при касании поверхностью магнита стенок канала.

Положение маячка измерялось с точностью до 0,5 мм. Составляющая силы тяжести, действующая на каплю с магнитом, рассчитывалась исходя из угла наклона канала  $\alpha$  к горизонту. Угол наклона канала измерялся с точностью до 0,05 град.

В эксперименте использовались магнитные жидкости на основе трансформаторного масла с намагниченностью насыщения  $M_s = 23,1, 43,8$  кА/м и плотностью 1180, 1400 кг/м<sup>3</sup> и на основе керосина с намагниченностью насыщения  $M_s = 72,5$  кА/м и плотностью 1650 кг/м<sup>3</sup>. В ходе эксперимента для различных образцов магнитных жидкостей варьировались объем капли, угол раствора канала  $\gamma$ , а также величина магнитного поля, генерируемого электромагнитом.

**Результаты эксперимента.** Получены зависимости силы упругости, действующей на каплю, от ее положения в канале (рис. 4). Магнит покрывался магнитными жидкостями с различной величиной  $M_s$ . Объем капли магнитной жидкости составлял 10 мл,  $\gamma = 2,5$  град. Измерения проводились при отключенном электромагните, а также для случаев, когда через электромагнит протекал постоянный ток различного направления, равный по модулю 350 мА.

Сила упругости при перемещении капли изменяется практически линейно почти во всем диапазоне исследованных перемещений. Только вблизи области максимально возможного перемещения капли происходит резкое нелинейное изменение силы упругости. Для полученных зависимостей нелинейный конечный участок хорошо прослеживается для жидкости с  $M_s = 23,1$  кА/м. Для жидкостей с  $M_s = 43,8$  и 72,5 кА/м в выбранном диапазоне перемещений магнит не приближался к области максимально возможного перемещения, поэтому для этих жидкостей нелинейного роста силы упругости не наблюдалось.

Как видно из рис. 4, для жидкостей с большей величиной намагниченности насыщения интенсивность роста силы упругости увеличивалась. При этом величина максимально возможного перемещения и длина линейного участка зависимостей также повышаются с ростом намагниченности насыщения жидкости.

Подача тока на электромагнит давала возможность контроля положения капли в канале. Перераспределение магнитного поля магнитной системы вызывало изменение силы упругости, действующей на магнитную систему. При увеличении результирующего поля источника капля вытеснялась в более широкое сечение канала. При этом изменялась и форма самой капли: объем жидкости увеличивался в центре магнитной системы. В случае уменьшения магнитного поля

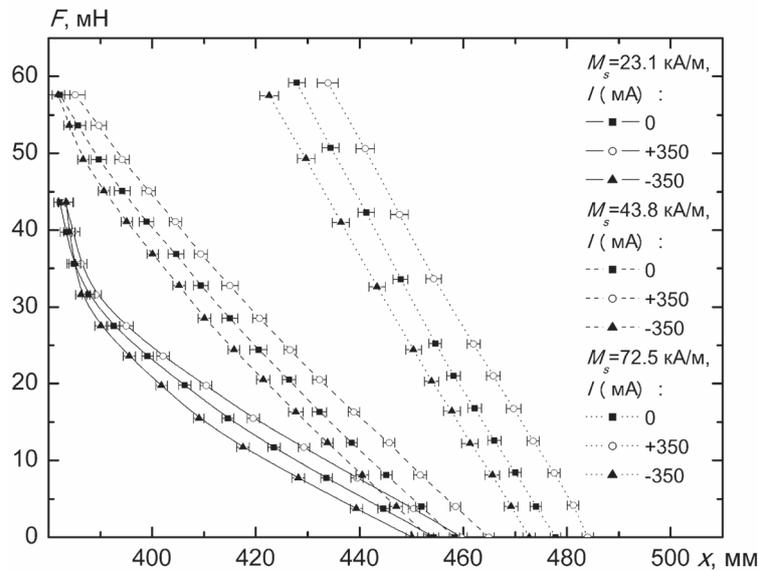


Рис. 4. Зависимости силы упругости от положения капли в канале, объем капли  $V = 10$  мл, угол раствора канала  $\gamma = 2,5$  град

капли, наоборот, перемещалась в более узкую область канала, при этом наблюдались отток жидкости к краям магнита и общее понижение ее уровня в центре системы. Таким образом, на рис. 4 зоны, заключенные между зависимостями при  $I = +350$  и  $-350$  мА, для каждой жидкости могут быть рассмотрены как возможный диапазон регулирования положения капли в канале  $x$  для каждой отдельно взятой силы упругости. Как видно из рисунка, с уменьшением намагниченности насыщения жидкости диапазон регулирования в абсолютном значении снижался незначительно и на начальном участке составлял 10,9, 11,5, 11,9 мм для жидкостей с  $M_s = 23,1, 43,8$  и  $72,5$  кА/м соответственно. Диапазон изменения силы упругости при фиксированном положении капли в канале составлял 4,6, 7,4 и 12,7 мН для жидкостей с вышеуказанной намагниченностью насыщения соответственно.

Для жидкости с  $M_s = 43,8$  кА/м при  $\gamma = 2,5$  град также получены зависимости силы упругости от положения капли в канале при разных объемах магнитной жидкости. Для капли с меньшим объемом наблюдалась большая интенсивность роста силы упругости. Абсолютный диапазон регулирования положения капли на начальном участке составил 11,5 и 10,6 мм, а диапазон изменения силы – 7,4 и 5,2 мН для объемов капли 10 и 20 мл соответственно. Такое отличие объясняется тем, что на начальном участке зависимости для капли большего объема расстояние между поверхностью магнита и стенкой канала больше. Соответственно область соприкосновения жидкости со стенкой канала находится в полях меньшей величины, что приводит к уменьшению силы упругости, действующей на каплю, а также к снижению диапазона ее регулирования.

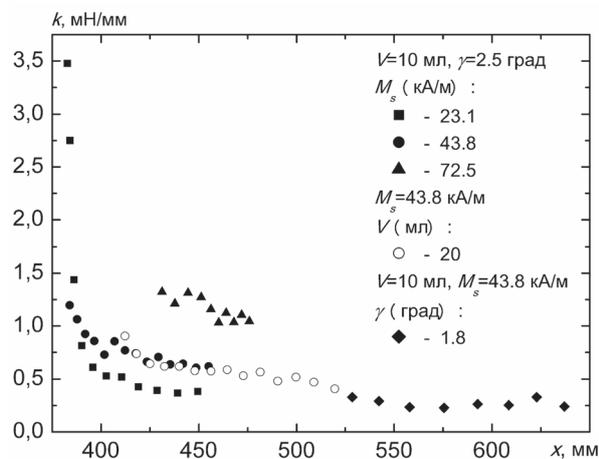


Рис. 5. Зависимость коэффициента упругости капли от ее положения в канале

Для жидкости с  $M_s = 43,8$  кА/м получены зависимости силы упругости от положения капли в канале при различных углах  $\gamma$  и объеме капли 10 мл. При меньшем угле раствора канала сила упругости возрастает медленнее при перемещении капли. Для  $\gamma = 2,5$  и  $1,8$  град абсолютный диапазон регулирования положения капли в канале на начальном участке зависимости составил 11,5 и 20,4 мм, а диапазон изменения силы – 7,4 и 5,3 мН соответственно.

**Определение коэффициентов упругости капли.** Полученные результаты позволяют рассчитать коэффициент упругости  $k$  системы магнит – магнитная жидкость как отношение изменения силы упругости  $\Delta F$ , действующей на каплю, к ее перемещению вдоль канала  $\Delta x$ :  $k = \Delta F / \Delta x$ .

На рис. 5 представлена зависимость коэффициента упругости капли от ее положения в канале для жидкостей с разной величиной намагниченности насыщения для различных объемов капли и углов раствора канала при отключенном электромагните.

Среднее значение коэффициентов упругости капли магнитной жидкости на начальном участке при одинаковом объеме капли и  $\gamma = 2,5$  град составляло 0,42, 0,64, 1,1 мН/мм для жидкостей с  $M_s = 23,1, 43,8$  и  $72,5$  кА/м соответственно. Для жидкости с  $M_s = 43,8$  кА/м коэффициент упругости равен 0,49 мН/мм при объеме капли 20 мл и 0,26 мН/мм при  $\gamma = 1,8$  град.

Зависимость коэффициента упругости капли от ее положения в канале для жидкости с  $M_s = 23,1$  кА/м при различной величине тока, подаваемого на электромагнит, представлена на рис. 6. Как видно из рисунка, подача тока на электромагнит в исследованном диапазоне параметров не влияет на коэффициент упругости капли.

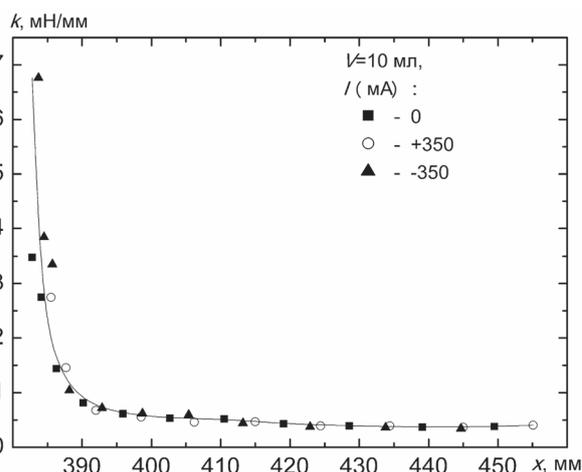


Рис. 6. Зависимость коэффициента упругости капли от ее положения в канале для жидкости с намагниченностью насыщения 23,1 кА/м при различной величине тока, подаваемого на электромагнит

## Выводы

1. Магнитное поле ядра капли в значительной степени определяет величину упругих сил, действующих на каплю магнитной жидкости. Изменяя это поле, можно управлять положением такой капли в канале клиновидной формы. Сила упругости, а также диапазон регулирования перемещения капли зависят от разных факторов (величина намагниченности насыщения жидкости, объем капли, угол раствора канала и др.).

2. Уменьшение намагниченности жидкости снижает возможный диапазон регулирования перемещения капли и коэффициент ее упругости. Капли меньшего объема также обладают большим диапазоном регулирования перемещения. Экспериментальные данные показывают, что в исследованном диапазоне параметров варьирование конфигурации поля комбинированного магнита приводит к изменению действующей на каплю силы упругости, коэффициент упругости при этом не меняется.

3. Капля с комбинированным источником поля может быть использована в качестве инерционного элемента магнитожидкостных виброзащитных устройств. Контроль перемещения рассматриваемой системы дает возможность оптимизации ее амплитуды колебаний и реализации управления процессами диссипации энергии в таких устройствах.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ.

## Литература

1. Moskowitz R., Stahl P., Reed W. R. Pat. US 4.123.675, USA publ. 31.10.1978.
2. Bashtovoi V., Reks A., Kuzhir P. et al. Pat. 0512012, France, publ. 01.06.07, bul. № 07/22.
3. Баитовой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. М., 1985.
4. Берковский Б. М., Медведев В. Ф., Краков М. С. Магнитные жидкости. М., 1989.
5. Bashtovoi V., Kuzhir P. // J. Magn. Mater. 1999 Vol. 201. P. 328–331.
6. Bashtovoi V., Reks A., Klimovich S. et al. // Journal of nano- and electronic physics. 2013. Vol. 5, N 4. P. 04012.

V. G. BASHTOVOI, A. A. MOT SAR, A. G. REKS

## ELASTIC PROPERTIES OF A MAGNETIC FLUID DROP WITH A COMPOUND MAGNETIC CORE

### Summary

Elastic properties of a magnetic fluid drop with a compound source of magnetic field in a wedge-shaped channel with regard to vibroprotective devices are examined experimentally. A possibility to alter an elastic force and a position of such drop by means of electromagnetic field has been shown. Obtained data allowed to calculate elastic coefficients of the observed system. Control ranges of the position and the elastic force of the drop are evaluated.