
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С КОМБИНИРОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ЯДРОМ

Баштовой В.Г.¹, Моцар А.А.^{1*}, Рекс А.Г.¹, Стороженко А.М.²,
Шабанова И.А.²

¹Белорусский национальный технический университет,
220013, г. Минск, пр-т Независимости 65, Республика Беларусь
²Юго-западный государственный университет, 305040, г. Курск, ул. 50
лет Октября, 94, Россия
E-mail: alexfx20@yandex.ru*

Аннотация: Выполнено численное моделирование процессов деформации капли магнитной жидкости с комбинированным магнитным ядром с учетом силы тяжести. Рассмотрено влияние гравитационного давления на упругую силу, возникающую при деформации такой капли твердой немагнитной поверхностью. Получены зависимости силы упругости от намагниченности сердечника электромагнита для капель различных объемов.

Ключевые слова: магнитная жидкость, упругость капли магнитной жидкости, магнитожидкостные виброизоляторы

INVESTIGATION OF DEFORMATION PROSESSES OF MAGNETIC FLUID DROP WITH COMPOUND MAGNETIC CORE

Bashtovoi V.G.¹, Motsar A.A.^{1*}, Reks A.G.¹, Storozhenko A.M.²,
Shabanova I.A.²

¹Belarusian national technical university, 220013, Minsk, 65 Nezavisimosti
ave., Republic of Belarus
²Southwest state university, 305040, Kursk, 94 50 Let Oktiabria str., Russia
E-mail: alexfx20@yandex.ru*

Abstract: The study describes the results of numerical simulation of deformation processes of magnetic fluid drop with compound magnetic core. Influence of gravitation pressure on elastic force which appears during the deformation of such drop by a non magnetic solid surface is examined. The dependencies of elastic forces on magnetization of the plunger are presented.

Keywords: magnetic fluid, elasticity of magnetic fluid drop, magnetic, magnetic fluid vibration isolator



БАШТОВОЙ Виктор Григорьевич окончил Белорусский государственный университет в 1968 г. Защитил диссертации на соискание степени д.ф.-м.н. по теме "Термомеханика поверхностно-конвективных и волновых явлений в намагничивающихся жидкостях" в 1986 г. С 1968 г. работал в Институте тепло- и массообмена АН Беларуси. С 1980 года работает в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ), в настоящее время в должности заведующего кафедрой. Имеет более 300 публикаций



МОЦАР Александр Александрович окончил Белорусский национальный технический университет (БНТУ) в 2010 г. В 2011 году окончил магистратуру БНТУ с присвоением степени магистра технических наук. В настоящее время является ассистентом кафедры ЮНЕСКО БНТУ, младшим научным сотрудником НИЛ «Термомеханика магнитных жидкостей» БНТУ. Имеет около 40 научных публикаций.



РЕКС Александр Георгиевич окончил Белорусский государственный университет в 1974 г. С 1975 г. работал в Институте тепло- и массообмена АН Беларуси, с 1981 г. в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ). В 2007 г. защитил диссертацию на соискание степени д.ф.-м.н. по теме «Механика магнитоуправляемых магнитожидкостных систем со свободной поверхностью». В настоящее время является профессором кафедры ЮНЕСКО БНТУ, заведующим НИЛ «Термомеханика магнитных жидкостей» БНТУ. Имеет более 200 научных публикаций.



СТОРОЖЕНКО Анастасия Михайловна в 2008 году окончила Курский государственный технический университет, в 2011 году защитила ученую степень кандидата физико-математических наук. В настоящее время является доцентом кафедры нанотехнологий и инженерной физики ЮЗГУ. Имеет около 100 научных публикаций и 2 учебных пособия, является руководителем 4 международных научных проектов.



ШАБАНОВА Ирина Александровна окончила Курский государственный университет. В 2012 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В настоящее время доцент кафедры нанотехнологий и инженерной физики ЮЗГУ. Имеет около 80 научных и методических публикаций, в том числе 9 патентов РФ, является руководителем 2 грантов.

Интерес к изучению капли магнитной жидкости с внутренним источником магнитного поля вызван в первую очередь возможностью использования такой системы в различных технических приложениях.

Так, благодаря действию объемной магнитной силы, такая капля способна удерживать значительную полезную нагрузку и может выступать в качестве несущего элемента в магнитожидкостных опорах,

предназначенного для разрыва жесткой механической связи между изолируемым объектом и источником вибраций.

В данной работе выполнен численный расчет удерживающей силы такой системы, а также рассмотрена возможность изменения этой силы с учетом силы тяжести.

Геометрия задачи представлена на рис. 1. Капля магнитной жидкости 1 с комбинированным магнитом расположена между двумя плоскопараллельными пластинами 2, 3. Комбинированный магнит состоит из постоянного кольцевого магнита 4 и электромагнита с сердечником 5. Нижнее основание магнита жестко закреплено на пластине 2.

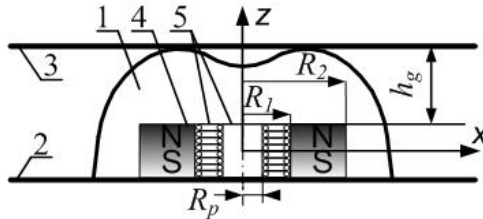


Рис. 1. Геометрия задачи

Деформация капли происходит при плоскопараллельном перемещении пластины 3 по вертикали и приводит к возникновению упругой силы действующей на поверхность пластины 3 и препятствующей уменьшению статического зазора h_g между поверхностью пластины и поверхностью магнита.

Пренебрегая действием размагничивающего поля жидкости, а также магнитным скачком давления, что справедливо, в случае если напряженность магнитного поля значительно превосходит намагниченность жидкости $H \gg M$, сила, действующая со стороны жидкости на пластину 3, определяется как [1]:

$$F = -\mu_0 \oint_s \left(\int_0^H M(H) dH \right) \vec{n} dS \quad (1)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, $M(H)$ - намагниченность магнитной жидкости, H - напряженность магнитного поля, n - внешняя к поверхности тела нормаль.

Намагниченность жидкости $M(H)$ задавалась аппроксимацией Вилловича [1]:

$$M(H) = M_s \frac{H}{H_T + H} \quad (2)$$

здесь H_T – напряженность магнитного поля, при которой намагниченность жидкости равна половине намагниченности ее насыщения $M(H_T) = M_s/2$ (далее напряженность полунасыщения).

Для расчета поля создаваемого комбинированным магнитом были использованы выражения, описывающие поле цилиндрического магнита намагниченного вдоль оси, полученные А.Ф. Пшеничниковым [2]:

$$H_z = \frac{M}{2\pi} \sum_{k=1}^2 (-1)^k \int_{r-R}^{r+R} \frac{z_k}{x^2 + z_k^2} \sqrt{\frac{R^2 - (x-r)^2}{R^2 + z_k^2 + 2xr - r^2}} dx$$

$$H_r = \frac{M}{2\pi} \sum_{k=1}^2 (-1)^k \int_{r-R}^{r+R} \frac{x}{x^2 + z_k^2} \sqrt{\frac{R^2 - (x-r)^2}{R^2 + z_k^2 + 2xr - r^2}} dx$$
(3)

где H_z , H_r – осевая и радиальная составляющая поля, M – намагниченность материала, $z_{1,2} = z \pm h$, h – полувысота магнита, R – радиус магнита.

Комбинированный магнит представлялся как три сплошных цилиндрических магнита с радиусами R_1 , R_2 , R_p , намагниченностями M_m и M_p и полувысотой h . Результирующее поле определялось как разность между полем создаваемым магнитом с радиусом R_2 и полями создаваемыми магнитами с радиусами R_1 и R_p , где R_2 и R_1 внешний и внутренний радиус кольцевого магнита с намагниченностью материала M_m , а R_p радиус сердечника намагниченность материала которого M_p .

При моделировании в качестве характерной величины для геометрических размеров использован внешний радиус кольцевого магнита R_2 , для объема капли – объем комбинированного магнита V_m , для напряженности магнитного поля, а также для намагниченности сердечника электромагнита – намагниченность материала кольцевого магнита M_m , для намагниченности жидкости – ее намагниченность насыщения M_s . За единицу силы упругости принята величина $\mu_0 M_s M_m R_2^2$.

Площадь поверхности интегрирования определялась исходя из формы свободной поверхности магнитной жидкости. Пренебрегая капиллярным и магнитным скачком давления, форма свободной поверхности жидкости в безразмерном виде описывалась уравнением [1]:

$$\Phi^*(z^*) - G \cdot z^* = const$$
(4)

где

$$z^* = z / R_2; \quad \Phi^*(z^*) = \int_0^{H(z^*)} M(H) dH / \mu_0 M_s M_m;$$

$$G = \rho g R_2 / \mu_0 M_s M_m$$

z^* - безразмерная координата поверхности жидкости, $\Phi^*(z^*)$ – безразмерный потенциал объемной магнитной силы, G – критерий, представляющий собой отношение гравитационного давления к магнито-статическому.

Задача решалась численно, методом сеток. При заданном объеме капли форма ее поверхности определялась методом дихотомии.

В ходе моделирования исследовано влияние критерия G на величину максимальной удерживающей силы рассматриваемой системы для различных объемов капли, а также влияние этого критерия на возможность управления этой силой, осуществляемого путем изменения намагниченности сердечника M_p .

Представленные ниже результаты получены для следующих безразмерных геометрических параметров магнитной системы: полувысота $h^*=0.58$, внутренний радиус $R_1^*=0.58$, радиус сердечника $R_p=0.3$. Значение безразмерной намагниченности насыщения $H_T^*=0.08$, диапазон изменения критерия G от 0.05 до 0 и диапазон изменения намагниченности сердечника M_p от 0 до 3 соответствуют свойствам магнитных жидкостей на основе керосина и трансформаторного масла с намагниченностью насыщения от 20 до 73 кА/м и плотностью от 1115 до 1650 кг/м³, а также стандартным типоразмерам кольцевых анизотропных феррит-барьерных магнитов с внешним радиусом до 30 мм и сердечникам из электротехнической стали различных марок.

Максимальная удерживающая сила соответствует максимальной величине полезной нагрузки, размещаемой на пластине 3, при превышении которой не происходит дальнейшего перемещения пластины и изменения величины статического зазора h_g . Известно, что в этом случае между поверхностью магнита и поверхностью давления остается тонкий слой магнитной жидкости, величина которого по экспериментальным оценкам [3, 4] составляет 0.05-0.06 мм. Исходя из этого при расчетах максимальной удерживающей силы выбрано фиксированное значение величины безразмерного статического зазора $h_g^*=0,004$, что соответствовало толщине слоя жидкости до 0,12 мм для магнитов с внешним радиусом не превышающим 30 мм.

На рис. 2 показаны зависимости безразмерной максимальной удерживающей силы от безразмерного объема капли при $M_p=0$ и различном значении критерия G .

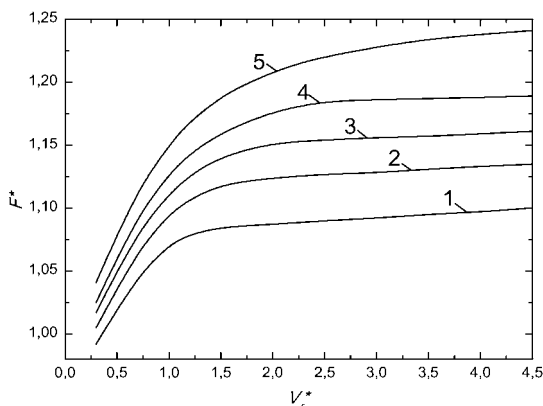


Рис. 2. Зависимость удерживающей силы от объема капли при критерии G равном: 1 - 0.05, 2 - 0.035, 3 - 0.025, 4 - 0.015, 5 - 0

Представленные зависимости иллюстрируют известный факт того, что с ростом объема капли удерживающая сила асимптотически стремится к максимуму [3]. С другой стороны они дают количественное представление о максимальном целесообразном объеме капли, при превышении которого удерживающая сила практически не изменяется. С уменьшением роли гравитационного давления этот объем также возрастает, достигая максимального значения при $G=0$, что соответствует условиям невесомости.

Влияние критерия G на возможность управления силой упругости оценивалась для объема капли, в 2 раза превышающего объем магнита. Что для рассматриваемых значений критерия G отличных от нуля было равным или несколько превышало максимальный целесообразный объем капли. Зависимость удерживающей силы от намагниченности сердечника M_p^* при $V_f^*=2$ и различном значении критерия G представлены на рис. 3.

С ростом намагниченности сердечника удерживающая сила увеличивается, что обусловлено ростом магнитного давления жидкости, связанного с увеличением напряженности магнитного поля в области контакта между жидкостью и пластиной. Влияние критерия G на диапазон изменения силы упругости незначительно и наблюдается только при большом значении намагниченности сердечника. Так в рассматриваемом диапазоне M_p^* величина изменения безразмерной силы упругости составила 0.73 и 0.7 для значений критерия G равного 0.05 и 0 соответственно. Несколько больший диапазон изменения силы упругости при G отличном от нуля связан с уменьшением роли гравитационного давления в процессах формирования капли жидкости вокруг

магнита, обусловленным ростом напряженности его поля. В результате чего объем жидкости над верхним основанием магнита должен несколько увеличиваться, вызывая увеличение площади контакта пластины с каплей.

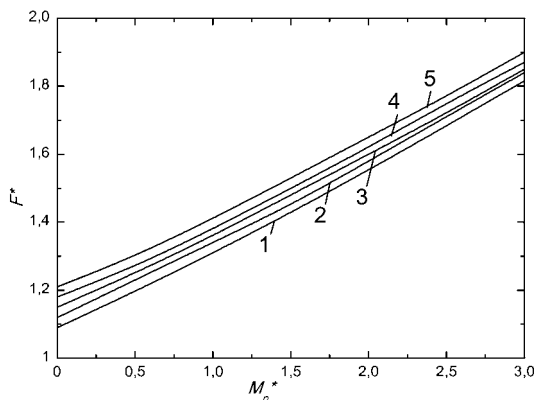


Рис. 3. Зависимость удерживающей силы от намагниченности сердечника при критерии G равном: 1 - 0,05, 2 - 0,035, 3 - 0,025, 4 - 0,015, 5 - 0

Таким образом, величина максимальной удерживающей силы капли жидкости с комбинированным ядром может изменяться в достаточно широком диапазоне путем изменения намагниченности сердечника магнитной системы. Безразмерный критерий G , характеризующий соотношение гравитационного и магнитного давления в капле жидкости, в значительной степени определяет величину безразмерной силы упругости, однако практически не оказывает влияния на диапазон изменения этой силы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-32-50061)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берковский, Б.М. Магнитные жидкости /Б.М. Берковский, В.Ф.Медведев, М.С. Краков. – М.: Химия, 1989. – 240с.
2. Пшеничников, А.Ф. Магнитное поле в окрестности уединенного магнетика / А.Ф. Пшеничников // Магнитная гидродинамика. – 1993.- №1. – с. 37-40
3. Баштовой, В.Г. Экспериментальное исследование некоторых виброзащитных характеристик магнитожидкостной опоры / В.Г. Баштовой, В.С. Дашкевич, В.А. Радионов, В.А. Чернобай // Магнитная гидродинамика. – 1990. - №3. - с. 130-134.
4. Чернобай, В.А. Динамические характеристики магнитожидкостных опор / В.А. Чернобай, Н.В. Зенько // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2008. - №3. – с. 78-81.