

17. Горленко А.О., Матлахов В.П. Моделирование контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2007. - № 8. - С. 1-9.

18. Горленко А.О., Матлахов В.П. Технологическое повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2010. - № 5. - С. 20-26.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ОПОРЫ

*Стороженко Анастасия Михайловна, к.ф.-м.н, доцент,  
(storogenko\_s@mail.ru)*

*Шабанова Ирина Александровна, к.ф.-м.н, доцент,  
Юго-западный государственный университет, г. Курск, Россия*

*Рекс Александр Георгиевич, д.ф.-м.н, профессор  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

*Моцар Александр Александрович, ассистент  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск  
(alexfx20@yandex.ru)*

*В работе выполнено компьютерное моделирование деформации упруго-демпфирующего элемента магнитожидкостной опоры, представляющего собой каплеобразный объем магнитной жидкости, сформированный во круг комбинированного магнита. Определено влияние магнитного поля магнита на максимальную удерживающую силу такого элемента, а также на статический зазор между плоскостью давления и поверхностью магнита.*

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, магнитожидкостная опора, упруго-демпфирующий элемент

**Введение.** В данном исследовании рассмотрена деформация упруго-демпфирующего элемента магнитожидкостной опоры, который представляет собой комбинированный магнит, покрытый ограниченным объемом магнитной жидкости (капель) 1 (рисунок 1).

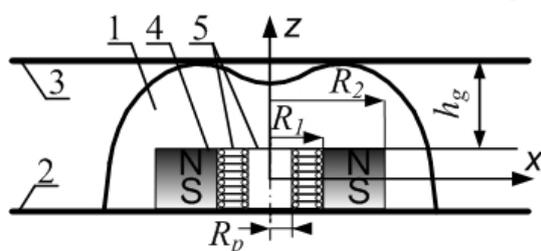


Рисунок 1 – Геометрия задачи

Деформация системы происходит при поперечном перемещении пластины 3 расположенной плоскопараллельно по отношению к пластине 2. Деформация капли жидкости пластиной 3 приводит к возникновению уп-

Комбинированный магнит нижним основанием жестко закреплен на неподвижной плоской немагнитной пластине 2 и состоит из постоянного кольцевого магнита 4 и электромагнита 5 с сердечником из магнитомягкого материала.

ругой силы, стремящейся вернуть пластину 3 в исходное положение. Природа возникновения упругой силы связана с наличием магнитной составляющей давления в магнитной жидкости, которая тем больше, чем больше напряженность магнитного поля в жидкости. Уменьшение статического зазора  $h_g$  между верхним основанием магнита и пластиной давления 3 приводит к увеличению напряженности магнитного поля в области касания поверхности жидкости с поверхностью пластины 3. Магнитная составляющая давления в жидкости возрастает и на пластину 3 со стороны жидкости начинает действовать объемная магнитная сила, препятствующая деформации рассматриваемой системы и обуславливающая ее упругие свойства. Благодаря этим свойствам капля магнитной жидкости с внутренним источником магнитного поля может удерживать внешнюю полезную нагрузку, обеспечивая разрыв жесткой механической связи между твердыми поверхностями 2, 3. Такая система также может обладать виброизолирующими свойствами и выступать в роли частотного фильтра, не передающего вибрации между пластинами, частота которых больше собственной частоты колебаний системы.

Максимальная удерживающая сила такой системы, а также амплитудно-частотный диапазон, в котором проявляются ее виброизолирующие свойства, являются основными техническими характеристиками такой системы. Первая из них определяется предельным весом внешней нагрузки, при превышении которого не происходит дальнейшего перемещения пластины давления. Рабочий же амплитудно-частотный диапазон определяется как собственной частотой колебаний упруго-демпфирующего элемента, так и величиной статического зазора, который в процессе колебаний не должен быть меньше амплитуды колебаний пластины 3 относительно верхнего основания магнита. Возможность управления этими характеристиками позволит подстраивать работу магнитожидкостной опоры на основе такого упруго-демпфирующего элемента под параметры внешних вибраций, что расширит ее рабочий амплитудно-частотный диапазон.

Изучению влияния магнитного поля комбинированного магнита на максимальную удерживающую силу и величину статического зазора и посвящено данное исследование.

**Математическая постановка задачи.** Предполагая справедливым допущение, что 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  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $M(H)$  – намагниченность магнитной жидкости,  $H$  – напряженность магнитного поля,  $n$ - внешняя к поверхности тела нормаль.

Намагниченность жидкости  $M(H)$  задавалась аппроксимацией Вислови-ча [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).

Поле вокруг комбинированного магнита было рассчитано по формулам А.Ф. Пшеничникова, справедливым для цилиндрического магнита [2]:

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

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

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 [3]:

$$\hat{O}^*(z^*) - G \cdot z^* = const \quad (4)$$

где

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

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

$z^*$ - безразмерная координата поверхности жидкости,  $\Phi^*(z^*)$  – безразмерный потенциал объемной магнитной силы,  $G$  – критерий, представ-

ляющий собой отношение гравитационного давления к магнитостатическому.

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

Представленные ниже результаты получены для следующих безразмерных геометрических параметров магнитной системы: полувысота  $h^*=0.58$ , внутренний радиус  $R_I^*=0.58$ , радиус сердечника  $R_p=0.3$ . Безразмерный объем капли был принят  $V_f^*=2.4$ , напряженность полунасыщения жидкости  $H_T^*=0.08$ . Намагниченность сердечника электромагнита  $M_p^*$  варьировалась в диапазоне от 0 до 3.

**Результаты.** В ходе моделирования получена зависимость максимальной удерживающей силы от намагниченности сердечника электромагнита. Максимальная удерживающая сила  $F_{max}^*$  в данном исследовании определялась при постоянном значении статического зазора  $h_g^*=0.004$ . Ненулевое значение статического зазора  $h_g^*$  выбрано исходя из тех соображений, что объемная магнитная сила противодействующая деформации капли возникает только в случае наличия слоя жидкости между поверхностью давления и магнитом. Кроме того, согласно [4, 5], даже в случае превышения внешней нагрузкой максимальной удерживающей силы между поверхностью магнита и поверхностью жидкости все равно остается тонкий слой магнитной жидкости толщиной не менее 0,05-0,06 мм.

Зависимость максимальной удерживающей силы от намагниченности сердечника представлена на рисунке 2.

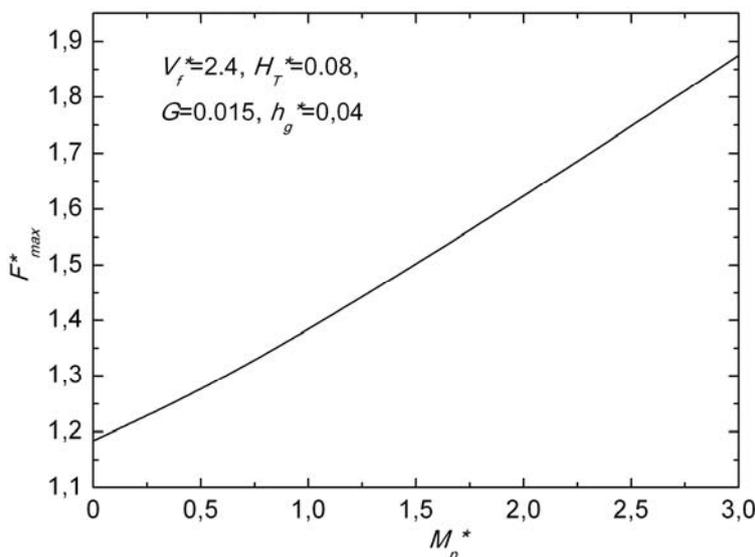


Рисунок 2 – Зависимость максимальной удерживающей силы от намагниченности сердечника электромагнита

Как видно из представленной зависимости изменение намагниченности сердечника от 0 до 3 приводит к росту максимальной удерживающей силы примерно на 60% по сравнению с начальным значением. Такой эффект обусловлен ростом результирующего значения напряженности магнитного

поля комбинированного магнита. При этом происходит увеличение магнитной составляющей давления, что и приводит к увеличению упругой силы возникающей при деформации капли.

В случае если вес полезной нагрузки удерживаемой рассматриваемой опорой не изменяется, т.е. величина удерживающей силы постоянна, изменение намагниченности сердечника приводит к изменению статического зазора. Зависимости величины статического зазора от намагниченности сердечника при фиксированном значении упругой силы представлены на рисунке 3.

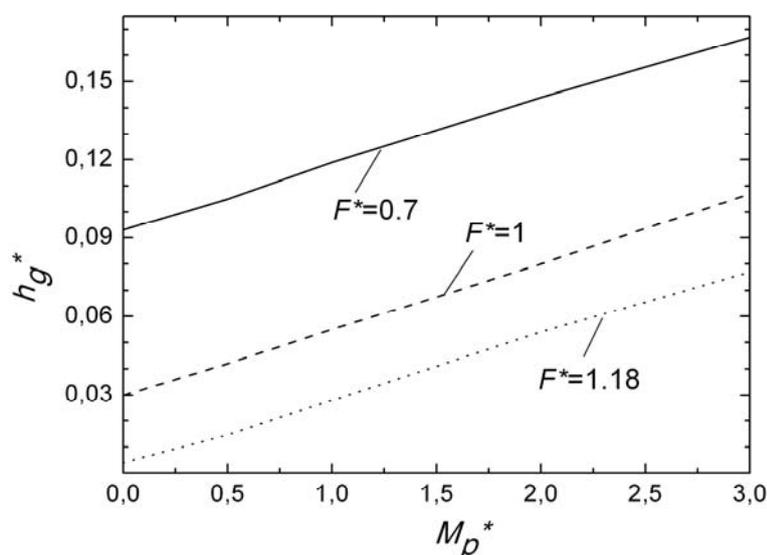


Рисунок 3 – Зависимость статического зазора от намагниченности сердечника

Изменение статического зазора при различном значении удерживающей силы в абсолютном выражении оставалось практически постоянной величиной и составляло порядка 0,08 безразмерных единиц.

**Выводы.** Результаты моделирования показали возможность эффективного управления как величиной максимальной удерживающей силы так и статическим зазором путем изменения намагниченности сердечника. Электромагнитное управление этими параметрами рассматриваемого элемента опоры в режиме реального времени позволит осуществлять подстройку ее работы под характеристики внешних вибраций и расширит ее эффективный амплитудный диапазон работы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 16-32-50061)*

*Список литературы*

1. Баштовой, В.Г. Введение в термомеханику магнитных жидкостей / В.Г. Баштовой, Б.М. Берковский, А.Н. Вислович. – М.: ИВТАН СССР, 1985. – 188 с. (53)
2. Пшеничников, А.Ф. Магнитное поле в окрестности уединенного магнетика / А.Ф. Пшеничников // Магнитная гидродинамика. – 1993.- №1. – с. 37-40

3. Берковский, Б.М. Магнитные жидкости /Б.М. Берковский, В.Ф.Медведев, М.С. Краков. – М.: Химия, 1989. – 240с. (59)
4. 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.
5. 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.

*Storozhenko Anastasiya Michailovna, PhD, associate professor*

*Southwest state university, Kursk, Russia (storogenko\_s@mail.ru)*

*Shabanova Irina Aleksandrovna, PhD, associate professor*

*Southwest state university, Kursk, Russia*

*Reks Aleksandr Georgievich, doctor of sciences, professor*

*Belarussian National Technical University, Minsk, Belarus*

*Motsar Aleksandr Aleksandrovich, assistant*

*Belarussian National Technical University, Minsk, Belarus  
(alexfx20@yandex.ru)*

#### **ELASTIC ELEMENT OF MAGNETIC FLUID SUPPORT AND SIMULATION OF ITS DEFORMATION PROCESSES**

**Abstract.** This work describes the simulation of deformation processes of magnetic fluid drop with compound magnetic core. Such system regards as an elastic element of magnetic fluid support. The influence of magnetic field of compound magnet on maximal bearing force and on static gap of such element is examined.

**Keywords:** magnetic fluid, magnetic fluid support, elastic and damping element

#### **ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗИМНИХ ОШИПОВАННЫХ ШИН ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «SHEEP»**

*Стратий Игорь Васильевич, магистр*

*Степанов Александр Сергеевич, к.т.н.*

*Вологодский государственный университет, Россия*

В настоящее время производится и эксплуатируется множество видов протекторов и типоразмеров зимних шин. Все новые шины появляются с целью улучшить управляемость автомобиля и повысить безопасность движения в сложных зимних условиях.

Для того чтобы определить эффективность работы шины с шипами необходимо проанализировать схему ошиповки. Анализ схемы размещения шипов на протекторе шины проводится с целью исключения или уменьшения дублирования дорожек по всем направлениям в пределах не менее