

---

## ДИССИПАТИВНЫЕ СВОЙСТВА КАПЛИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ, СФОРМИРОВАННОЙ ВОКРУГ КОМБИНИРОВАННОГО МАГНИТА

**Баштовой В.Г., Моцар А.А.<sup>1</sup>, Рекс А.Г.**

Белорусский национальный технический университет,  
220013, г. Минск, пр-т Независимости 65, Республика Беларусь  
E-mail: alexfx20@yandex.ru<sup>1</sup>

**Аннотация:** В работе исследована диссипация энергии в магнитожидкостном динамическом гасителе колебаний, основанном на использовании капли магнитной жидкости с комбинированным магнитом в качестве базового диссипативного элемента. Изучено влияние объема жидкости и ее магнитных свойств на диссипативные свойства такой капли при различной начальной амплитуде колебаний демпфируемого объекта. Показано что максимальный относительный коэффициент затухания достигается при оптимальном объеме капли. Величина этого объема определяется магнитными свойствами жидкости.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, диссипация энергии, динамическое гашение колебаний

## DISSIPATION PROPERTIES OF MAGNETIC FLUID DROP FORMED AROUND COMPOUND MAGNET

**Bashtovoi V.G., Motsar A.A.<sup>1</sup>, Reks A.G.**

Belarusian national technical university, 220013,  
Minsk, 65 Nezavisimosti ave., Republic of Belarus  
E-mail: alexfx20@yandex.ru<sup>1</sup>

**Abstract:** The study describes energy dissipation in magnetic fluid dynamic absorber based on the usage of magnetic fluid drop with compound magnet as a basic dissipative element. The influence of magnetic fluid volume and its magnetic properties on dissipative properties of such drop is examined. It is shown that maximal value of relative damping factor is reached for the optimal volume of the drop. The value of this volume depends on magnetic properties of the fluid.

**Keywords:** magnetic fluid, energy dissipation, dynamic absorbing vibration



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 190 научных публикаций.

Одним из перспективных направлений практического применения магнитных жидкостей является их использование в различного рода виброзащитных устройствах, таких как амортизаторы, демпферы и гасители колебаний. В частности, принцип действия магнитожидкостных гасителей колебаний основан на перераспределении энергии вибраций демпфируемого объекта на инерционную массу, связанную с объектом демпфирования посредством упруго-вязких связей, с последующей диссипацией энергии колебаний. В качестве инерционной массы в таких устройствах зачастую используется капля магнитной жидкости, сформированная вокруг постоянного магнита. Такая капля, расположенная в немагнитном корпусе, может перемещаться, как единое целое, и рассеивать энергию вибраций за счет сил вязкого трения. Контакт капли со стенками корпуса приводит к деформации ее свободной поверхности и возникновению сил упругости препятствующих перемещению капли. Т.е. капля обладает упругими характеристиками, определяющими собственную частоту колебаний системы. Упругие характеристики капли магнитной жидкости, с внутренним источником магнитного поля, определяются магнитными свойствами жидкости, объемом капли, геометрией системы, а также конфигурацией магнитного поля магнита [1, 2].

В данной работе рассмотрено влияние объема и намагниченности жидкости на диссипативные свойства капли магнитной жидкости, сформированной вокруг комбинированного магнита.

Капля магнитной жидкости, сформированная вокруг комбинированного магнита, расположена в цилиндрическом немагнитном корпусе (Рис. 1). Диаметр корпуса равен 55 мм. Дно внутренней полости

корпуса выполнено конусообразной формы с углом наклона к горизонту 2,5 град. Крышка корпуса имеет возможность перемещаться по вертикали вплоть до торцевой поверхности комбинированного магнита, не покрытого жидкостью.

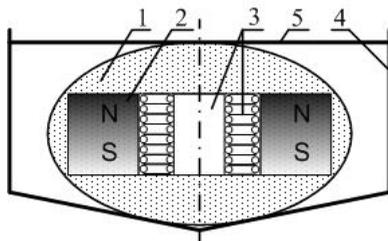


Рис. 1. Геометрия эксперимента: 1 - капля магнитной жидкости, 2 - постоянный кольцевой магнит, 3 – электромагнит с сердечником, 4 – немагнитный корпус, 5 – крышка корпуса

Комбинированный магнит представляет собой постоянный кольцевой магнит, во внутреннем отверстии которого расположен электромагнит с сердечником. В качестве кольцевого магнита использован феррит-бариевый магнит, намагниченный вдоль его вертикальной оси симметрии, с внешним диаметром 31 мм, внутренним диаметром 18 мм и высотой 18 мм. Высота электромагнита 18 мм. Сердечник электромагнита выполнен из электротехнической стали. Диаметр сердечника 10 мм. Напряженность магнитного поля по центру магнитной системы у ее поверхности составляла 71.1 кА/м, напряженность поля вдоль поверхности кольцевого магнита доходила до 115 кА/м.

Такая конструкция комбинированного магнита дает возможность изменять его конфигурацию магнитного поля путем подачи тока на электромагнит. Однако исследование влияния магнитного поля магнита на диссипативные свойства капли не входит в задачи данного исследования, поэтому результаты, представленные ниже, были получены при отключенном электромагните.

Рассматриваемая система (далее гаситель колебаний) закреплялась на консольный конец протяженной эластичной балки длиной 3м. Незакрепленный консольный конец балки отклонялся на заданную величину, что провоцировало ее свободные колебания с заданной начальной амплитудой и собственной частотой колебаний около 1 Гц. Колебания системы совершались в горизонтальной плоскости, перпендикулярной осям симметрии корпуса и комбинированного магнита. Для записи осциллограмм колебаний использован измерительный комплекс, состоящий из датчика ускорения КВ-12, усилителя аналогового сигнала, RC-фильтра низких частот, аналого-цифрового преобразователя

ADCU 14-32. Осциллограммы колебаний выводились на компьютер посредством программы Data Logger.

Принципиальная схема экспериментальной установки с измерительным комплексом представлена на рис. 2.

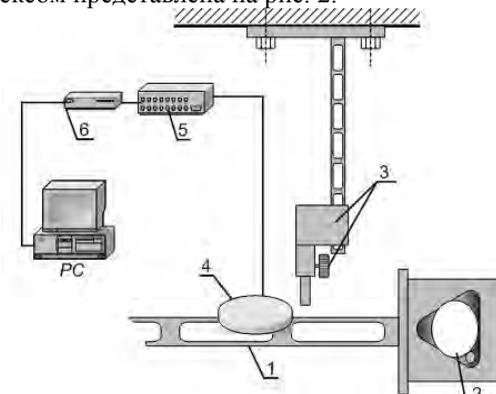


Рис. 2. Экспериментальная установка: 1 – демфируемый объект (балка), 2 – гаситель колебаний, 3- система установки начальной амплитуды колебаний, 4 – датчик ускорения, 5 – усилитель аналогового сигнала, 6 – RC фильтр с аналогово-цифровым преобразователем

Измерения были выполнены для двух случаев:

1. с установленным на консольный конец балки гасителем колебаний
2. с установленным на консольный конец балки грузом, равным по массе гасителю колебаний (далее массоимитатор)

В ходе измерений корпус устройства заполнялся различными объемами жидкости от 25 до 45 мл. Независимо от выбранного объема жидкости крышка корпуса устройства устанавливалась так, чтобы ее поверхность касалась свободной поверхности магнитной жидкости, но при этом не деформировала ее в случае центрального расположения демфирующего элемента. Начальная амплитуда колебаний балки  $A_0$  варьировалась в диапазоне 1-5 мм. В качестве магнитной жидкости были использованы жидкости на основе керосина МК-21, МК-43 и МК-52 с намагниченностью насыщения 21.1, 42.8 и 52.1 кА/м, плотностью 1119, 1432 и 1476 кг/м<sup>3</sup> соответственно.

На основе полученных осциллограмм колебаний определялся средний логарифмический декремент затухания системы, и среднее время релаксации, как отношение декремента затухания к среднему периоду колебаний. Диссипация энергии в системе оценивалась по отношению времени релаксации балки с массоимитатором  $\tau_0$  к времени релаксации балки с гасителем колебаний  $\tau$ . Соотношение  $\tau_0/\tau$  показывает во

сколько раз увеличивается коэффициент затухания системы в случае установки гасителя, при условии, что масса всей системы остается неизменной. Величина  $\tau_0/\tau$  далее называется относительным коэффициентом затухания.

При колебаниях балки с установленным гасителем колебаний происходит перемещение капли относительно стенок корпуса. Это приводит к ее деформации и изменению сил упругости препятствующих перемещению капли. Диссипация энергии колебаний происходит за счет сил вязкого трения при течении жидкости между стенками корпуса и поверхностью магнита. В результате чего колебания балки с гасителем затухают быстрее. Так, например, если для гасителя, заполненного жидкостью МК-21 объемом 30 мл, время колебаний балки составляло около 15 секунд, то колебания балки с массоимитатором продолжались более 100 секунд.

Зависимости относительного коэффициента затухания колебаний балки от объема капли для жидкостей с различными магнитными свойствами представлены на рис. 3.

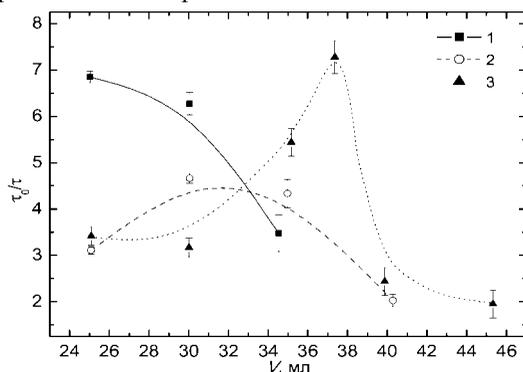


Рис. 3. Зависимости коэффициента затухания от объема капли для жидкостей: 1 – МК-21, 2 – МК-43, 3 – МК-52

Из представленных результатов эксперимента видно, что в зависимости от магнитных свойств жидкости изменяется и объем капли, при котором относительный коэффициент затухания достигает максимального значения. Например, для жидкости МК-52 максимальное значение коэффициента затухания наблюдалось при объеме капли 37,5 мл. Причем при изменении объема от 25 до 37,5 мл происходит увеличение относительного коэффициента затухания. Это связано с тем, что при увеличении объема капли крышка корпуса устанавливалась на большем расстоянии от поверхности магнита, т.е. область касания поверхности крышки с поверхно-

---

стью жидкости перемещалась в зону с меньшей величиной напряженности магнитного поля. Вследствие этого уменьшалась и величина сил упругости препятствующих перемещению капли, амплитуда колебаний капли наоборот возрастала, что приводило к большей диссипации энергии и росту коэффициента затухания.

Дальнейшее увеличение объема капли для этой жидкости начинает приводить к уменьшению коэффициента затухания. Такой эффект связан с тем, что с увеличением объема капли уменьшается расстояние между боковой стенкой корпуса и боковой поверхностью капли. Для некоторого объема амплитуда колебаний капли начинает превышать расстояние между ее боковой поверхностью и боковой стенкой корпуса. При этом в процессе колебаний боковая поверхность капли деформируется, что приводит к возникновению дополнительных сил упругости, в результате чего возрастает коэффициент упругости рассматриваемой системы, а амплитуда колебаний капли относительно стенок корпуса падает. Значительное снижение амплитуды колебаний капли визуально наблюдалось для объема, при котором боковая поверхность капли находящейся в состоянии покоя контактировала с боковой стенкой корпуса.

Для жидкостей с меньшей намагниченностью деформация боковой поверхности капли происходит при меньших объемах, что связано, во-первых, с меньшей величиной возвращающей упругой силы, т.е. с большей амплитудой колебаний капли при одинаковых параметрах внешних вибраций, а во-вторых, с большим продольным размером капли. Ввиду чего максимальное значение коэффициента затухания с уменьшением намагниченности жидкости смещается в сторону меньших объемов.

Зависимости относительного коэффициента затухания от объема капли для жидкости МК-52 при разной начальной амплитуде колебаний балки представлены на рис. 4.

Как видно из представленных результатов для объемов жидкости от 25 до 35 мл коэффициенты затухания при рассмотренных амплитудах колебаний отличаются незначительно. Такой эффект можно пояснить тем, что амплитуда колебаний капли увеличивается пропорционально увеличению внешней амплитуды колебаний балки, при условии, что перемещение капли не будет ограничиваться деформацией ее боковой поверхности о боковую поверхность стенкой корпуса. При этом пропорционально увеличению внешней энергии вибраций растёт и величина диссипации энергии в устройстве.

Наиболее существенное отличие в коэффициентах затухания наблюдается для капли объемом 37,5 мм. При этом здесь имеет место ярко выраженная обратная зависимость между амплитудой колебаний и коэффициентом затухания. Что может быть связано, с тем, что капля

с данным объемом жидкости обладает небольшим коэффициентом упругости и даже при малой начальной амплитуде колебаний балки, капля достаточно подвижна относительно корпуса устройства, что обеспечивает эффективное гашение вибраций с малыми начальными амплитудами. С увеличением внешней амплитуды колебаний рост амплитуды колебаний капли ограничен силами упругости, возникающими при деформации боковой поверхности капли. Как следствие увеличение диссипации энергии происходит на меньшую величину, чем увеличение внешней энергии вибраций, что и выражается в таком отличии коэффициентов затухания системы.

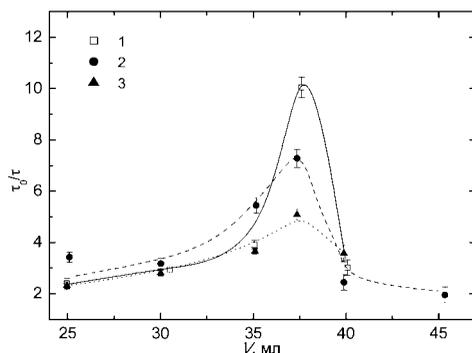


Рис. 4. Зависимости относительного коэффициента затухания от объема капли для начальной амплитуды колебаний балки  $A_0$ : 1 – 1 мм, 2 – 2.5 мм, 3 – 5 мм

Таким образом, показано, что существует оптимальный объем капли при котором наблюдается максимальное значение коэффициента затухания колебаний демпфируемого объекта. Величина этого объема определяется магнитными свойствами жидкости. Начальная амплитуда колебаний оказывает существенное влияние на относительный коэффициент затухания, только при оптимальном объеме капли.

*Работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bashtovoi, V. Statics of magnetic fluid drop with compound magnetic core in a wedge-shared channel / V. Bashtovoi, A. Reks, S. Klimovich, A. Motsar et al. // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2013. – V. 5, No 4. – P. 04012 (4pp).
2. Баштовой, В.Г. Упругие свойства капли магнитной жидкости с комбинированным магнитным ядром / В.Г. Баштовой, А.А.Моцар, А.Г.Рекс // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук». – 2014. - № 4. – с. 39-43