

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ДВИЖЕНИЯ В ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Д.А. Пелевина¹, Д.И. Меркулов¹, И.М. Зейдис², В.А. Турков¹, В.А. Налетова¹

¹ *ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, РФ*

² *Ilmenau University of Technology, 98693, Ilmenau, Ehrenbergstr. 29, Germany*

pelevina.daria@gmail.com

Аннотация. Экспериментально и теоретически исследуется движение тел из упругих намагничивающихся материалов в окружающей немагнитной жидкости на горизонтальной подложке в однородном наклонном переменном во времени поле. Обнаружена зависимость направления движения центра масс тел в зависимости от окружающей жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-31-00066 мол_а (исследование возможности использования тел из намагничивающихся эластомеров для создания движения в магнитных полях) и № 18-501-12011 ННИО_а (численное моделирование движения намагничивающихся сфер, связанных упругим приводом, в переменном магнитном поле).

Введение

Тела из намагничивающегося эластомера могут деформироваться в приложенном магнитном поле. При наличии точек опоры и упругих сил положение центра масс тела при деформации может изменяться, и может возникать направленное движение тела. Одной из возможностей создания магнитоуправляемых движителей является имитация изгибных движений, встречающихся в природе (ползание и плавание змей, ползание червей). В работах [1,2] описано экспериментальные исследования плавающих микро- объектов, движения которых вызваны внешним магнитным полем. В работах [3-5] теоретически описана динамика тонкой намагничивающейся нити, погруженной в вязкую жидкость, в однородном, меняющем свое направление поле. Такая нить моделирует движение встречающейся в природе магнитотактической бактерии (magnetotactic bacteria). В работах [6, 7] экспериментально изучено движение цепи упругих шаров, наполненных магнитной жидкостью, под действием магнитного поля в цилиндрическом канале, создаваемого двумя движущимися постоянными магнитами. Основы для создания мобильных роботов на базе магнитных жидкостей, перемещающихся по принципу дождевого червя, изложены в [8]. В данной работе экспериментально и теоретически исследовано движение упругой капсулы, заполненной магнитной жидкостью. В [9] впервые показана возможность создания движения, связанного с изгибной деформацией, цилиндрического тела из намагничивающегося эластомера в цилиндрическом канале неоднородном бегущем магнитном поле. В [10,11] экспериментально изучено движение тела из намагничивающегося композита в канале с катушками, создающими неоднородное “бегущее” магнитное поле. В [12] проведен расчет движения исследуемого тела в пакете ANSYS в модели тонкого упругого намагничивающегося стержня для произвольных частот переключения магнитного поля. В [13,14] предложена модель тонкого тела из вязкоупругого намагничивающегося материала. С использованием этой модели написана программа и численно решена задача о движении такого тела в канале в вертикальной плоскости под действием магнитного поля. Приведено сравнение теоретических результатов и экспериментальных данных.

В данной работе экспериментально и теоретически исследуется движение упругих образцов, взаимодействующих с приложенным магнитным полем. Образцы имеют контакт с горизонтальным дном и погружены в окружающую вязкую жидкость. К системе приложено однородное переменное во времени магнитное поле, направленное под острым углом к горизонтали.

Эксперимент

В эксперименте исследовалось движение тел (движителей) из намагничивающихся материалов в однородном переменном магнитном поле. Экспериментальная установка включала в себя катушки Гельмгольца, подключенные к программируемому источнику тока и закрепленные таким образом, чтобы угол между осью катушек и горизонталью составлял 21 градус. Данная система позволяла создать наклонное переменное однородное магнитное поле напряженностью до $H=430$ Э. Эксперимент проводился при различных частотах изменения магнитного поля (0,5 Гц, 1 Гц и 1,5 Гц). Внутри системы катушек Гельмгольца располагалась горизонтальная подложка из немагнитного материала, закрепленная в штативе таким образом, чтобы установленная на ней пластиковая кювета с размерами 9 x 2,5 x 1 см находилась в зоне действия однородного магнитного поля. В качестве гидродинамических ячеек для движения тел использовались кюветы с параллельными плоскими стенками из прозрачного пластика. Проводились эксперименты с двумя видами

двигателей: пружины из намагничивающегося эластомера (см. Рис. 1 и 2) и стальных сфер с упругим приводом (см. Рис. 3).



Рис. 1. Движение тела из намагничивающегося эластомера в воде в однородном магнитном поле H : (a) – $t=0$, $H=0$; (b) – $t=1$ с, $H=430$ Э; (c) – $t=2$ с, $H=0$; (d) – $t=42$ с, $H=0$.



Рис. 2. Движение тела из намагничивающегося эластомера в глицерине в однородном магнитном поле H : (a) – $t=0$, $H=0$; (b) – $t=1$ с, $H=430$ Э; (c) – $t=2$ с, $H=0$; (d) – $t=42$ с, $H=0$.

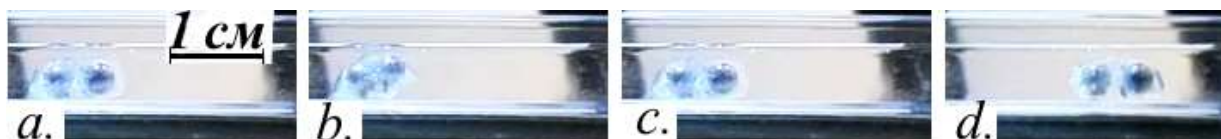


Рис. 3. Движение тела из стальных сферических тел в упругой матрице в глицерине в пульсирующем однородном магнитном поле H : (a) – $t=0$, $H=0$; (b) – $t=1$ с, $H=430$ Э; (c) – $t=2$ с, $H=0$; (d) – $t=42$ с, $H=0$.

Пружина изготавливалась путем создания спирального разреза в цилиндрическом образце из намагничивающегося эластомера. Длина тела 3,7 см, масса 2,6 г, шаг пружины 4,4 мм. Кроме того, был изготовлен двигатель, в котором две стальные сферы (диаметром $R=3,1$ мм и массой $M=0,3$ г каждая) сцеплялись упругой связью на расстоянии между центрами сфер $l_0=5,1$ мм. Периодическое включение и выключение (прямоугольная конфигурация) наклонного магнитного поля приводило к движению в жидкости вышеуказанных видов двигателей. Кюветы в эксперименте заполнялись либо водой с плотностью $\rho_e=1$ г/мл и вязкостью $\mu=0,01$ дин сек/см², либо глицерином с плотностью $\rho_e=1,26$ г/мл и вязкостью $\mu=14,8$ дин сек/см².

Обнаружено, что и пружина, и стальные сферы с упругим приводом в воде движутся влево (если вершину угла наклона катушек считать находящейся слева по отношению к экспериментальной установке), а в глицерине движутся вправо. На Рис. 1 и Рис. 2 представлены раскадровки видеозаписей движения пружины, соответственно, в воде и в глицерине для магнитного поля напряженностью $H=430$ Э, изменяющегося с частотой 0,5 Гц (при этой частоте поле включалось на 1 сек, а затем выключалось на 1 сек). На Рис. 3 представлена раскадровка видеозаписи движения сфер с приводом в глицерине при тех же параметрах поля. Построены графики зависимости координаты центра масс стальных сфер с упругим приводом от времени в воде и в глицерине. На Рис. 4 эти графики представлены для частоты изменения магнитного поля 0,5 Гц.

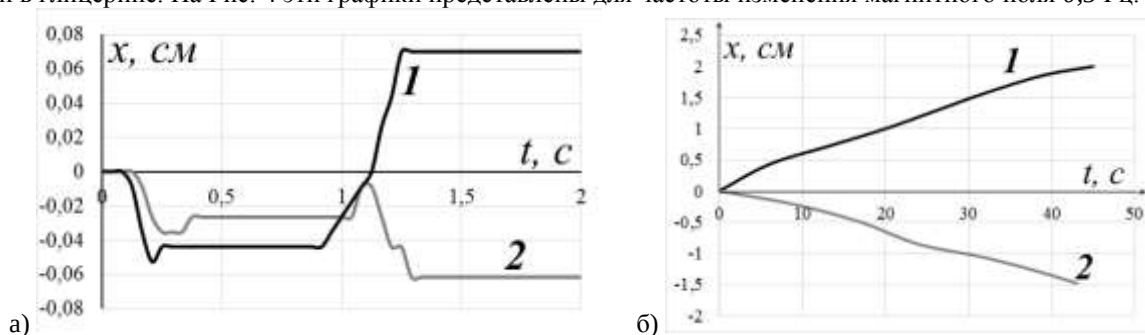


Рис. 4. Горизонтальная координата центра масс сферических тел с упругой связью от времени в магнитном поле H с частотой 0,5 Гц (1 – в глицерине, 2 – в воде): (a) за один цикл включения и выключения H ; (б) в течение всего движения.

В представленном эксперименте впервые наблюдался интересный эффект влияния окружающей тела жидкости на направление движения этих тел в переменном наклонном магнитном поле. Вода и глицерин имеют разные вязкости: в воде вязкость на три порядка меньше чем в глицерине. Кроме того, коэффициент сухого трения тел о дно сосуда с водой и с глицерином тоже разное: в глицерине этот коэффициент несколько меньше. Для стальных сфер с упругим приводом экспериментально получены следующие коэффициенты трения: в глицерине – $k_{fr}=1,15$; в воде – $k_{fr}=1,28$.

Объяснить это интересное явление можно следующим образом. Рассмотрим движение двух сферических тел из намагничивающегося материала, соединенных упругой связью. Движение тел при включении наклонного магнитного поля приводит к тому, что левое тело смещается вдоль дна вправо, а правое

тело поднимается и смещается влево на расстояние большее, чем сместилось левое тело вправо. При этом центр масс перемещается влево. В воде (при малой вязкости) при выключении поля правое тело быстро опускается на дно, и затем оба тела под действием упругой силы раздвигаются в разные стороны. В воде центр масс при выключенном поле практически не меняет свое положение. Таким образом, в воде тела движутся влево. В глицерине (при большой вязкости) при выключении поля правое тело медленно опускается. При этом на тело действует упругая сила, и оно перемещается право. Левое тело при этом практически не движется. Правое тело падает на дно, когда упругий элемент полностью распрямился. Центр масс системы при этом движении смещается право по отношению к исходному состоянию. Таким образом, в глицерине тела движутся вправо.

Теория

Для исследования влияния различных параметров задачи на направление и скорость движения сферических тел с упругой связью необходимо написать математическую модель этого движения. Предложена математическая модель движения левой и правой сферы под действием магнитной силы F_m , силы тяжести F_p , вязких сил F_{visc} , упругих сил F_e и силы сухого Кулоновского трения F_{fr} о дно:

$$\begin{aligned}\frac{dv_1}{dt} \left(M + \rho_e \frac{V}{2} \right) &= -F_m - F_e - N_B + F_P + F_{1visc} + N_1 + F_{1fr}; \\ \frac{dv_2}{dt} \left(M + \rho_e \frac{V}{2} \right) &= F_m + F_e + N_B + F_P + F_{2visc} + N_2 + F_{2fr}.\end{aligned}$$

Здесь r – радиус вектор между центрами тел, V – объем тел, χ – магнитная восприимчивость тел, N_B – сила реакции при касании тел, N – сила реакции дна кюветы, индексы $i=1,2$ обозначают параметры левой и правой сферы, соответственно. Магнитная сила F_m , действующая на второе тело, вычисляется как сила взаимодействия двух магнитных диполей. Сила вязкого трения $F_{i visc}$ рассчитывается в приближении Стокса с учетом влияния горизонтального дна на движение, согласно [15]. В начальный момент времени оба тела покоятся и их положение известно. Проведены численные расчеты задачи методом Рунге-Кутты в пакете программ Maple для параметров, совпадающих с экспериментальными. Результаты расчета качественно совпадают с данными эксперимента. Сферические тела с упругой связью в воде и в глицерине движутся вдоль дна согласно расчетам в противоположные стороны.

Заключение

Экспериментально обнаружено, что в глицерине рассмотренные тела в переменном во времени магнитном поле движутся вдоль дна в сторону наклона поля, а в воде – в противоположную сторону. Для описания движения тел предложена математическая модель, учитывающая влияние магнитных, упругих, вязких сил, сил трения и тяжести. Проведены численные расчеты в предложенной модели и получено качественное совпадение расчетов и результатов экспериментов. Показано влияние вязкости жидкости и коэффициента сухого трения на направление движения тел.

Литература

1. C. Goubault, P. Jop, M. Fermigier, J. Baudry, E. Bertrand, and J. Bibette // *Physical Review Letters*. 2003. Vol. 91. № 26. p. 260802.
2. Remi Dreyfus, Jean Baudry, Marcus L. Roper, Marc Fermigier, Howard A. Stone, and Jerome Bibette // *Nature*. 2005. Vol. 437. № 7060. Pp. 862–865.
3. A. Cebers // *Magnetohydrodynamics*. 2005. Vol. 41. № 1. Pp. 63–72.
4. A. Cebers // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2005. Vol. 15. Pp. 1335–1344.
5. A. Cebers and M. Ozols // *Physical Review E*. 2006. Vol. 73. № 2. P. 021505.
6. Norihiko Saga and Taro Nakamura // *J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 91. № 10. Pp. 7003–7005.
7. Norihiko Saga and Taro Nakamura // *Smart Materials and Structures*. 2004. № 13. Pp. 566–569.
8. K. Zimmermann, I. Zeidis, V.A. Naletova, V.A. Turkov, F.S. Bayburtzkiy, M.V. Lukashevich, V. Bohm // *Book of Abstracts, EUROMECH Colloquium "Recent Development in Magnetic Fluid Research"*, Dresden. 2006. Pp. 41–42.
9. K. Zimmermann, I. Zeidis, V. A. Naletova, and V. A. Turkov // *Phys. Stat. Solidi*. 2004. Vol. 1. № 12. Pp. 3706–3709.
10. Zimmermann K., Naletova V. A., Zeidis I. et al. // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2006. Vol. 18. Pp. 2973–2383.
11. K. Zimmermann, V. A. Naletova, I. Zeidis, V. A. Turkov, E. Kolev, M.V. Lukashevich, G.V. Stepanov // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. Vol. 311. Pp. 450–453.
12. K. Zimmermann, V. A. Naletova, I. Zeidis, V. A. Turkov, E. Kolev, and S. A. Kalmykov // *Magnetohydrodynamics*. 2008. Vol. 44. № 2. Pp. 143–148.
13. Zimmermann K., Zeidis I., Naletova V.A., Kalmykov S.A., Turkov V.A. // *Solid State Phenomena: Magnetism and Magnetic materials*. 2011. Vol. 190, Pp. 629–632.
14. Калмыков С.А., Налетова В.А., Турков В.А. // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2013. № 1, с. 6–16.
15. Хаппель Дж., Бреннер Г. *Гидродинамика при малых числах Рейнольдса*. М.: Мир, 1976. 630 с.

PRINCIPLES OF MOVEMENT CREATION IN VARIABLE MAGNETIC FIELDS

D.A. Pelevina¹, D.I. Merkulov¹, I.M. Zeidis², V.A. Turkov¹, V.A. Naletova¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Institute of Mechanics, Moscow*

²*Ilmenau University of Technology, Ilmenau, Germany*

pelevina.daria@gmail.com

Abstract. The motion of elastic magnetized samples in the surrounding nonmagnetic fluid on a horizontal substrate in a uniform variable field is investigated experimentally and theoretically. The dependence of the direction of movement of the mass center of the samples on the surrounding fluid was found.

This work was supported by the RFBR (grant No. 18-501-12011, 18-31-00066).

Доклад представлен на

Подсекция II - 1. Гидродинамика

или

Подсекция II - 4. Физико-химическая механика сплошных сред.