



**19-я  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ПЛЕССКАЯ  
НАУЧНАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО НАНОДИСПЕРСНЫМ  
МАГНИТНЫМ  
ЖИДКОСТЯМ**

**сентябрь, 2020  
Иваново, Россия**

**Сборник  
научных трудов**

Организована  
Министерством образования и науки РФ  
Ивановским государственным энергетическим университетом  
имени В.И. Ленина  
Академией электротехнических наук РФ

19-я Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям организована Министерством образования и науки РФ, ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Академией электротехнических наук РФ.

В сборнике научных трудов конференции рассмотрены вопросы физикохимии магнитных коллоидных систем, физических свойств и гидродинамики, тепло- и массообмена, применения магнитных жидкостей в медицине, биологии, экологии и технике. В него включены доклады об исследованиях, которые представляют научный, учебный и практически-методический интерес.

Сборник научных трудов подготовлен в рамках базовой части задания Министерства образования и науки РФ.

Под общей редакцией  
доктора технических наук, профессора Ю.Б. Казакова

*По материалам 19-ой Международной Плесской научной конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям будет выпущен электронный сборник научных трудов, который будет размещен в научной электронной библиотеке на eLIBRARY.RU договор № 1042-03/2015К.*

ISBN 978-5-00062-432-6

©ФГБОУВО «Ивановский государственный  
энергетический университет  
им. В.И. Ленина», 2020

## АВТОНОМНЫЕ ДВИЖИТЕЛИ НА ОСНОВЕ НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Меркулов Д.И. <sup>1</sup>, Пелевина Д.А., В.А. Турков, Налетова В.А.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова»,

119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

E-mail: merkulovdima@mail.ru<sup>1</sup>

**Аннотация.** В работе предложены прототипы автономных движителей (тел из намагничивающихся материалов), управляемых переменным однородным магнитным полем, направленным под углом к горизонтальной плоскости. Экспериментально и теоретически исследовано направленное движение данных тел в окружающей вязкой жидкости вдоль горизонтального дна сосуда. Обнаружена зависимость направления движения и скорости автономного движителя от вязкости окружающей жидкости. Предложена математическая модель, описывающая экспериментально обнаруженные эффекты. Получено хорошее согласование теоретических результатов и экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** актуаторы, автономные движители, намагничивающиеся материалы, переменное однородное магнитное поле, влияние вязкости на движение тел.

## ACTUATORS BASED ON MAGNETIZABLE MATERIALS

Merkulov D.I. <sup>1</sup>, Pelevina D.A., Turkov V.A., Naletova V.A.

Lomonosov Moscow State University,

119991, Russian Federation, Moscow, Leninskiye gory, 1

E-mail: merkulovdima@mail.ru<sup>1</sup>

**Abstract.** New prototypes of actuators (bodies with magnetizable materials) controlled by an alternating magnetic field have been proposed. An alternating uniform magnetic field inclined to a horizontal plane is used to control the prototypes. The directed motion of these actuators in the surrounding viscous liquids along a horizontal vessels bottom is investigated experimentally and theoretically. The dependence of movement direction of the actuators on viscosity of the surrounding fluid is found experimentally. The mathematical model well predicting experimental effects is proposed.

**Key words:** actuators, magnetizable materials, alternating uniform magnetic field, effect of viscosity on the body movement.



МЕРКУЛОВ Дмитрий Игоревич, научный сотрудник НИИ механики МГУ. Имеет 19 научных публикаций, в том числе 9 статей в журналах. Научно-исследовательская работа поддерживалась грантами РФФИ и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.



НАЛЕТОВА Вера Арсеньевна, д.ф.-м.н., профессор кафедры гидромеханики механико-математического факультета МГУ. Имеет 163 статьи в реферируемых журналах. Научно-исследовательская работа неоднократно поощрялась грантами РФФИ.



ПЕЛЕВИНА Дарья Андреевна, к.ф.-м.н., доцент кафедры гидромеханики механико-математического факультета МГУ. Имеет 46 научных публикаций, в том числе 24 статьи в журналах. Научно-исследовательская работа поддерживалась грантами РФФИ и Президента РФ.



ТУРКОВ Владимир Андреевич, к.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИИ Механики МГУ. Имеет 94 статьи в реферируемых журналах. Научно-исследовательская работа неоднократно поощрялась грантами РФФИ.

**Введение.** Тела из намагничивающихся деформируемых материалов могут двигаться в приложенном переменном магнитном поле. Примером таких материалов являются намагничивающиеся эластомеры (НЭ). Преимуществом движителей на основе НЭ является отсутствие внутри них моторов, источников тока и твердых механических элементов. Благодаря этому автономные движители могут применяться в медицинских и биологических исследованиях.

Различные типы движителей из намагничивающихся материалов предложены во многих работах. Например, в [1] экспериментально исследовано плавание гибкой магнитной нити, движение которой вызвано однородным магнитным полем, изменяющим свое направление. В работах [2, 3] теоретически изучена динамика гибкой магнитной нити, погруженной в вязкую жидкость, в однородном меняющем направление магнитном поле. В [4] экспериментально исследовано движение в цилиндрическом канале цепочки упругих сферических тел, заполненных магнитной жидкостью, в индуцируемом двумя движущимися постоянными магнитами поле.

Одной из возможностей создания автономных движителей является имитация изгибных движений, возникающих в природе (ползающие и плавающие змеи/черви). В работе [5] экспериментально исследовано движение тонкого цилиндрического тела из НЭ, имитирующего поведение дождевого червя, в цилиндрическом канале в неоднородном «бегущем» магнитном поле. В работе [6] предложена модель тонкого тела из вязкоупругого намагничивающегося материала; с ее использованием чис-

ленно решена задача о движении такого тела в «бегущем» магнитном поле. Во всех вышеперечисленных работах для создания движения используется либо неоднородное магнитное поле, либо меняющее направление однородное поле. Следует отметить, что размер движителя, управляемого однородным магнитным полем, может быть существенно уменьшен, что является дополнительным преимуществом.

В представленной статье предложены два новых типа автономных движителей, управляемых однородным переменным магнитным полем. Экспериментально и теоретически исследовано их движение в окружающей жидкости вдоль горизонтального дна сосуда. Обнаружена зависимость направления движения тел от вязкости окружающей жидкости. Предложена математическая модель, описывающая данный эффект, и проведены численные расчеты.

**Эксперимент.** В экспериментах исследовалось движение тел на основе намагничивающихся материалов (автономных движителей) в однородном переменном магнитном поле. Электромагнитная установка включала в себя катушки Гельмгольца, подключенные к программируемому источнику питания и закрепленные так, что угол  $\alpha$  между осями катушек и горизонтальной плоскостью составляет  $21^\circ$ . Эта система создавала наклонное переменное однородное магнитное поле амплитудой  $H = 430$  Э. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Эксперимент проводился при различных частотах изменения магнитного поля  $f_H$  (0,5 Гц, 1 Гц). Внутри системы катушек Гельмгольца располагалась кювета (сосуд) размером  $9 \times 2,5 \times 1$  см с параллельными стенками из прозрачного пластика.

Экспериментальные исследования проводились с двумя видами автономных движителей: пружиной из НЭ (рис. 2 и рис. 3) и стальными сферическими телами с упругой связью (рис. 4 и рис. 5). Пружина (образец 1) была изготовлена путем создания спирального разреза в цилиндрическом образце из НЭ. Длина пружины составляет 3,7 см, вес – 2,6 г, шаг пружины – 4,4 мм. Второй движитель (образец 2) представляет собой два сферических тела из стали, которые сцеплены упругим силиконовым приводом. Расстояние между центрами сфер  $l_0 = 5,43$  мм, диаметр  $d = 2R = 3,1$  мм и масса каждой сферы  $M = 0,3$  г. Переменное (прямоугольной конфигурации) наклонное магнитное поле приводило к движению данных тел. В экспериментах кюветы заполня-

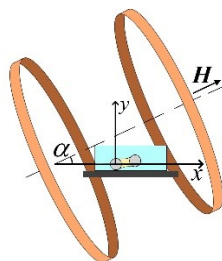


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

лись либо водой с плотностью  $\rho_e = 1$  г/мл и вязкостью  $\eta = 0,01$  Пуаз, либо глицерином с плотностью  $\rho_e = 1,26$  г/мл и вязкостью  $\eta = 14,8$  Пуаз. Для образца 2 экспериментально найдены следующие коэффициенты трения сферических тел о дно сосуда: в глицерине  $k_{fr} = 1,15$ ; в воде  $k_{fr} = 1,28$ .

На рис. 2 и рис. 3 представлены раскадровки видеозаписей движения образца 1, соответственно, в воде и в глицерине для магнитного поля амплитудой 430 Э, изменяющегося с частотой 0,5 Гц.

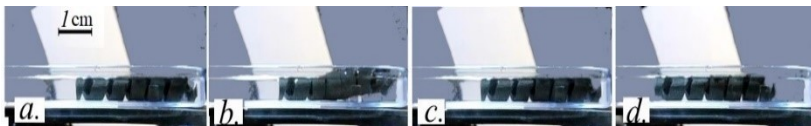


Рис. 2. Движение образца 1 в воде при  $f_H = 0,5$  Гц: (a)  $t = 0$ ,  $H = 0$ ; (b)  $t = 1$  с,  $H = 430$  Э; (c)  $t = 2$  с,  $H = 0$ ; (d)  $t = 42$  с,  $H = 0$

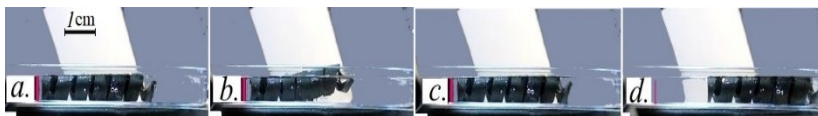


Рис. 3. Движение образца 1 в глицерине при  $f_H = 0,5$  Гц: (a)  $t = 0$ ,  $H = 0$ ; (b)  $t = 1$  с,  $H = 430$  Э; (c)  $t = 2$  с,  $H = 0$ ; (d)  $t = 42$  с,  $H = 0$

На рис. 4 и рис. 5 представлены раскадровки видеозаписей движения образца 2, соответственно, в воде и в глицерине для магнитного поля амплитудой 430 Э, изменяющегося с частотой 0,5 Гц.

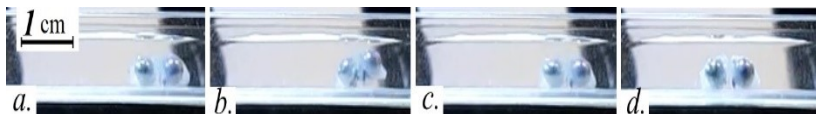


Рис. 4. Движение образца 2 в воде при  $f_H = 0,5$  Гц: (a)  $t = 0$ ,  $H = 0$ ; (b)  $t = 1$  с,  $H = 430$  Э; (c)  $t = 2$  с,  $H = 0$ ; (d)  $t = 42$  с,  $H = 0$

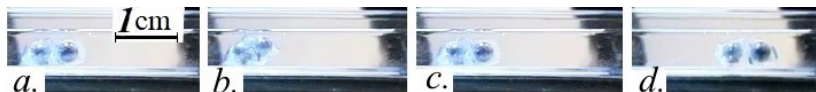


Рис. 5. Движение образца 2 в глицерине при  $f_H = 0,5$  Гц: (a)  $t = 0$ ,  $H = 0$ ; (b)  $t = 1$  с,  $H = 430$  Э; (c)  $t = 2$  с,  $H = 0$ ; (d)  $t = 42$  с,  $H = 0$

Пусть  $x_c$  – горизонтальная координата центра масс образца 2. На рис. 6 представлены графики зависимости  $x_c$  от времени в глицерине (кривая 1) и в воде (кривая 2) при частоте магнитного поля  $f_H = 0,5$  Гц.

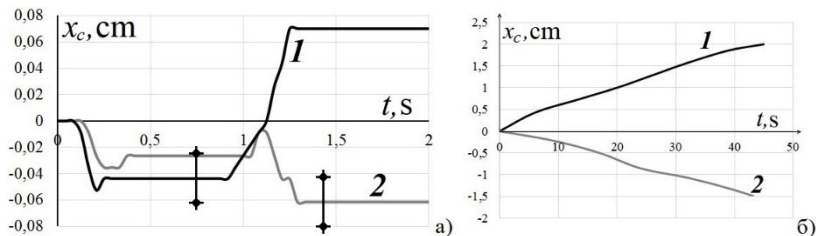


Рис. 6. Экспериментальные зависимости  $x_c$  (образец 2) от времени при  $f_H = 0,5$  Гц (1 – в глицерине, 2 – в воде): (а) один цикл изменения магнитного поля; (б) сплайн-аппроксимация в течение всего движения ( $0 < t < 42$  с)

В представленных экспериментах впервые наблюдается интересный эффект: влияние окружающей жидкости на направление движения тел в переменном однородном магнитном поле. Обнаружено, что для всех частот изменения магнитного поля образцы 1 и 2 перемещаются влево в воде и вправо в глицерине. При этом в глицерине (с высокой вязкостью) скорости автономных движителей больше, чем в воде (с низкой вязкостью).

**Теория.** Для изучения направления и скорости движения стальных сферических тел с упругой связью (образец 2) была предложена математическая модель движения левого и правого сферических тел с учетом действия магнитных, упругих, вязких сил, сил сухого трения и тяжести. Введем следующие обозначения:  $\mathbf{r} = r\mathbf{e}_r$  – радиус-вектор между центрами сфер (начало вектора  $\mathbf{r}$  в центре левого сферического тела),  $l_0$  – длина упругого привода в недеформированном состоянии,  $R$  – радиус сферического тела,  $V = 4\pi R^3/3$  – его объем,  $M$  – масса каждого сферического тела,  $\chi$  – магнитная восприимчивость стали, индексы  $i = 1, 2$  обозначают параметры левого и правого сферического тела, соответственно.

Введем систему координат  $(x, y, z)$  таким образом, чтобы вектор магнитного поля лежал в плоскости  $(x, y)$ , ось  $y$  перпендикулярна дну сосуда, а ось  $x$  направлена от левого сферического тела к правому при  $t = 0$ . Также  $x = 0$  и  $y = 0$  в центре левого тела при  $t = 0$ .

Магнитная сила  $\mathbf{F}_m^i$ , действующая на  $i$ -ое тело, пропорциональна силе взаимодействия двух магнитных диполей  $\mathbf{m}$  и вычисляется по формуле:

$$\bar{\mathbf{F}}_m^i = (-1)^i A \left[ \bar{\mathbf{r}} \left( \frac{3m^2}{r^5} - \frac{15(\bar{\mathbf{m}}\bar{\mathbf{r}})^2}{r^7} \right) + \frac{6\bar{\mathbf{m}}(\bar{\mathbf{m}}\bar{\mathbf{r}})}{r^5} \right], \bar{\mathbf{m}} = \frac{3\chi V}{3 + 4\pi\chi} \bar{\mathbf{H}}, i = 1, 2 \quad (1)$$

Уточняющий коэффициент  $A = A(r)$  определялся экспериментально путем измерения магнитной силы, действующей между стальными сферическими телами (аналогичными используемым при изготовлении образца 2) в однородном магнитном поле.

Вязкая сила  $F_{visc}^i$ , действующая на  $i$ -ое тело, рассчитывается в приближении Стокса с учетом влияния на движение горизонтального дна, согласно [7]:

$$\vec{F}_{visc}^i = 6\pi\eta R \left( \frac{\mathbf{v}_x^i}{f(y_i)} \vec{e}_x + \lambda(y_i) \mathbf{v}_y^i \vec{e}_y \right), i = 1, 2, \quad (2)$$

$$f(y_i) = 1 - \frac{9}{16} \frac{R}{y_i + R} + \frac{1}{18} \left( \frac{R}{y_i + R} \right)^3 - \frac{45}{256} \left( \frac{R}{y_i + R} \right)^4 - \frac{1}{16} \left( \frac{R}{y_i + R} \right)^5$$

Здесь  $y_i + R$  – расстояние от центра сферических тел до дна сосуда;  $\mathbf{v}^i = (v_x^i, v_y^i)$  – скорость  $i$ -ого тела;  $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$  – базисные векторы декартовой системы координат (вектор  $\mathbf{e}_x$  параллелен горизонтальной плоскости). Значение  $\lambda(y_i)$  было получено с помощью сплайн-аппроксимации данных, приведенных в [7].

Сила  $\mathbf{F}_P$  является равнодействующей силы тяжести и архимедовой силы, действующих на каждое тело, и имеет следующий вид ( $\rho_e$  – плотность окружающей жидкости):

$$\vec{F}_P = (M - \rho_e V) \vec{g} \quad (3)$$

Сила упругости  $\mathbf{F}_e^i$ , действующая на  $i$ -ое сферическое тело со стороны упругой связи, может быть записана следующим образом ( $k_{e1}, k_{e2}$  – коэффициенты упругости при сжатии и растяжении тела, соответственно):

$$\vec{F}_e^i = \begin{cases} (-1)^{i+1} k_{e1} (1 - l_0 / r) \vec{r}, & \text{при } r < l_0 \\ (-1)^{i+1} k_{e2} (1 - l_0 / r) \vec{r}, & \text{при } r > l_0 \end{cases} \quad (4)$$

Сила реакции со стороны дна сосуда  $\mathbf{N}_P^i$ , действующая на  $i$ -ое сферическое тело, равна:

$$\vec{N}_P^i = \begin{cases} -(F_{my}^i + F_{py} + F_{ey}^i) \vec{e}_y, & \text{при } y = 0, F_{my}^i + F_{py} + F_{ey}^i < 0 \\ 0, & \text{при } y > 0 \end{cases} \quad (5)$$

Сила трения  $i$ -го тела о дно сосуда  $\mathbf{F}_{fr}^i$  имеет следующий вид ( $\Psi^i = F_{mx}^i + F_{ex}^i$ ):

$$\vec{F}_{fr}^i = \begin{cases} -k_{fr} |N_P^i| \text{sign}(v_x^i) \vec{e}_x, & \text{при } v_x^i \neq 0 \\ -\min(|\Psi^i|, k_{fr} |N_P^i|) \text{sign}(\Psi^i) \vec{e}_x, & \text{при } v_x^i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Используя выражения для сил (1–6), уравнение движения для стальных сферических тел, связанных упругим приводом, (образец 2) можно записать следующим образом:

$$(M + \rho_e V / 2) d\vec{v}^i / dt = \vec{F}_m^i + \vec{F}_e^i + \vec{F}_P + \vec{F}_{visc}^i + \vec{N}_P^i + \vec{F}_{fr}^i, i = 1, 2 \quad (7)$$

Начальные условия имеют следующий вид:

$$t = 0: \quad x^1 = 0, x^2 = l_0, y^1 = y^2 = 0, \vec{v}^1 = \vec{v}^2 = 0 \quad (8)$$

**Численные результаты.** Уравнение движения стальных сферических тел с упругой связью (7) с начальными условиями (8) были реше-

ны численно методом Рунге – Кутты четвертого порядка для экспериментальных параметров при  $k_{e1} = 5$  дин/см,  $k_{e2} = 100$  дин/см,  $\chi = (\mu - 1)/4\pi$ ,  $\mu = 2000$ . Полученные теоретические зависимости  $x_c$  от времени для одного цикла изменения магнитного поля в воде (кривая 1) и в глицерине (кривая 2) при  $f_H = 1$  Гц показаны на рис. 7. Видно, что теория предсказывает движение образца 2 в противоположных направлениях в воде и глицерине.

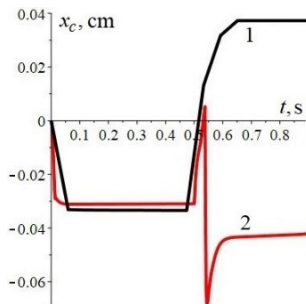


Рис. 7. Теоретические зависимости  $x_c$  от времени при  $f_H = 1$  Гц (1 – в глицерине, 2 – в воде)

Проведено сравнение численных результатов с экспериментальными данными. Экспериментальная (кривая 1) и теоретическая (кривая 2) зависимости  $x_c$  от времени при  $f_H = 1$  Гц в глицерине и воде показаны на рис. 8 и рис. 9, соответственно.

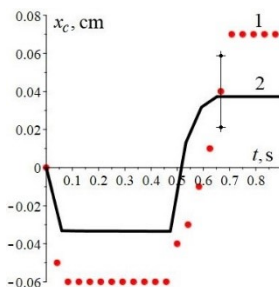


Рис. 8. Зависимости  $x_c$  от времени в глицерине (1 – эксперимент, 2 – численные расчеты) при  $f_H = 1$  Гц

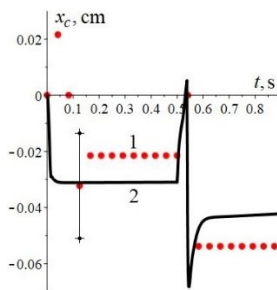


Рис. 9. Зависимости  $x_c$  от времени в воде (1 – эксперимент, 2 – численные расчеты) при  $f_H = 1$  Гц

Численные результаты качественно совпадают с экспериментальными данными. Согласно расчетам образец 2 движется вдоль дна в воде влево, а в глицерине – вправо.

**Заключение.** Экспериментально установлено, что предложенные движители из намагничивающихся материалов в переменном магнитном поле движутся вдоль дна сосуда в глицерине и в воде в противоположных направлениях. При этом скорость движителей в глицерине (при высокой вязкости) больше, чем в воде (при низкой вязкости). Для описания перемещения автономных движителей в жидкостях предложена математическая модель, учитывающая магнитные, упругие, вязкие силы, силы трения и тяжести. Проведены численные расчеты, получено качественное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Экспериментально и теоретически показано влияние вязкости окружающей жидкости на направление движения тел.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 20-71-10002).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Dreyfus, J. Baudry, M.L. Roper, M. Fermigier, H.A. Stone, J. Bibette. Microscopic artificial swimmers // *Nature*, 2005, Vol. 437, No 7060, pp. 862-865.
2. Cebers. Flexible magnetic swimmer // *Magnetohydrodynamics*, 2005, Vol. 41, No 1, pp. 63-72.
  - a. Cebers, M. Ozols. Dynamics of an active magnetic particle in a rotating magnetic field // *Physical Review E.*, 2006, Vol. 73, No 2, p. 021505.
3. Norihiko Saga, Taro Nakamura. Development of a peristaltic crawling robot using magnetic fluid on the basis of the locomotion mechanism of the earthworm // *Smart Materials and Structures*, 2004, Vol. 13, No 3, pp. 566-569.
4. K. Zimmermann, V.A. Naletova, I. Zeidis, V.A. Turkov, E. Kolev, M.V. Lukashevich, G.V. Stepanov. A deformable magnetizable worm in a magnetic field-a prototype of a mobile crawling robot // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, Vol. 311, No 1, pp. 450-453.
5. K. Zimmermann, I. Zeidis, V.A. Naletova, S.A. Kalmykov, V.A. Turkov. Model of a thin rod with viscoelastic magnetizable material in the alternating magnetic field // *Solid State Phenomena: Magnetism and Magnetic materials*, 2011, Vol. 190, pp. 629-632.
6. J. Happel, H. Brenner. Low Reynolds number hydrodynamics: with special applications to particulate media // *Springer Science & Business Media*, 2012, 553 p.