

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-СИЛОВОЙ МЕТОД МАНИПУЛИРОВАНИЯ НАНООБЪЕКТАМИ С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ

д.ф.-м.н. **Щербаков С.С.**, мл.н.с **Полещук М.М.**

*Белорусский государственный университет, Минск*

**Введение.** Одной из наиболее значимых проблем в области нанотехнологий является манипулирование объектами наноразмеров с целью реализации их макроперемещений. На данный момент существует несколько способов управления данными объектами, например, с помощью атомно-силовых и сканирующих туннельных микроскопов. Однако данные способы не позволяют перемещать нанообъекты на расстояния порядка сантиметров или метров из-за малой рабочей области. Также одним из способов перемещения могло бы быть использование сложного наномеханического устройства, работающего по принципу "рука робота", но более перспективной представляется возможность использовать электромагнитный способ перемещения нанометровых объектов, основанный на электромагнитной левитации токопроводящего объекта или посредника [1-4]. Реализация данного метода, вообще говоря, также должна учитывать сопротивление среды.

**Постановка задачи.** В основе электромагнитно-силового метода управления движением нанообъектов лежит воздействие силами Лоренца на токопроводящий или заряженный микро- или макропосредник, к которому осуществляется крепление нанообъектов с помощью сил Ван-дер-Ваальса [1-4].

В настоящей работе ставится задача определения закона изменения напряженности электромагнитного поля, обеспечивающего перемещение посредника по заданной нелинейной траектории с учетом сопротивления среды. Как известно, заряженное тело (частица) может быть приведена в движение с помощью сил Лоренца. Тогда второй закон Ньютона для данного тела примет вид

$$m\ddot{\vec{r}} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

где  $m$  – масса посредника,  $q$  – электрический заряд,  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  – векторы электрического и магнитного полей,  $\vec{v}$  – вектор скорости посредника,  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения.

В свою очередь, взаимодействие (притяжение) нанообъекта к посреднику осуществляется за счет сил Ван-дер-Ваальса, которые при взаимодействии двух сферических тел с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , если расстояние между ними  $r \ll R_1$  или  $R_2$ , выражаются следующим соотношением

$$F^{(vw)}(r) = \frac{AR_1R_2}{(R_1 + R_2)^6 r} \quad (2)$$

где  $A$  – постоянная Хамакера.

На основе (1) и (2) может быть сформулирован метод управления объектами наноразмеров посредством токопроводящих посредников [1,2].

Во время движения заряженный металлический посредник «захватывает» объект и переносит его другую область пространства. Отделение объекта от посредника производится «стряхиванием» при торможении посредника, т.е. когда

$$m\ddot{\vec{r}} = -F^{(vw)}(r) \quad (3)$$

В силу малых массы и размеров второго тела, основное значение имеет движение крупного заряженного посредника под действие электрического поля:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = q(\dot{y}B_z - \dot{z}B_y + E_x); \\ m\ddot{y} = q(\dot{x}B_z - \dot{z}B_x + E_y); \\ m\ddot{z} = q(\dot{x}B_y - \dot{y}B_x + E_z) - mg. \end{cases} \quad (4)$$

**Моделирование движения.** Траектория движения частиц задаётся либо координатным, либо аналитическим способом.

Для нелинейной траектории движения система (4) может быть решена численно, например, методом Эйлера [5]. Тогда алгебраический аналог системы (4) запишется следующим образом:

$$\begin{cases} m \frac{\frac{x_i - x_{i-1}}{dt} - \frac{x_{i-1} - x_{i-2}}{dt}}{dt} = q \left( \frac{y_i - y_{i-1}}{dt} B_z - \frac{z_i - z_{i-1}}{dt} B_y + E_x \right); \\ m \frac{\frac{y_i - y_{i-1}}{dt} - \frac{y_{i-1} - y_{i-2}}{dt}}{dt} = q \left( \frac{x_i - x_{i-1}}{dt} B_z - \frac{z_i - z_{i-1}}{dt} B_x + E_y \right); \\ m \frac{\frac{z_i - z_{i-1}}{dt} - \frac{z_{i-1} - z_{i-2}}{dt}}{dt} = q \left( \frac{x_i - x_{i-1}}{dt} B_y - \frac{y_i - y_{i-1}}{dt} B_x + E_z \right) - mg. \end{cases} \quad (5)$$

Следует принять во внимание, что движение осуществляется за счёт шести неизвестных компонент электромагнитного поля  $\{E^x, E^y, E^z, B^x, B^y, B^z\}$ , а уравнений в системе три, поэтому для замыкания системы положим, что движение будет осуществляться за счёт лишь трёх компонент поля  $\{E^y, E^z, B^z\}$ . Сделать это возможно потому, что данных трёх компонент хватает, чтобы осуществлять движение тела по трём различным координатным направлениям. Также примем во внимание сопротивление среды, в которой происходит движение. Тогда система (5) примет вид

$$\begin{cases} m \frac{\frac{x_i - x_{i-1}}{dt} - \frac{x_{i-1} - x_{i-2}}{dt}}{dt} = q \frac{y_i - y_{i-1}}{dt} \mu_{cp} B_z; \\ m \frac{\frac{y_i - y_{i-1}}{dt} - \frac{y_{i-1} - y_{i-2}}{dt}}{dt} = q \left( \frac{x_i - x_{i-1}}{dt} \mu_{cp} B_z + \varepsilon_{cp} E_y \right); \\ m \frac{\frac{z_i - z_{i-1}}{dt} - \frac{z_{i-1} - z_{i-2}}{dt}}{dt} = q \varepsilon_{cp} E_z - mg. \end{cases} \quad (6)$$

где  $\mu_{cp}$  и  $\varepsilon_{cp}$  – магнитное сопротивление и электрическая проницаемость среды.

Траектория, показанная на рисунке 1, строилась в виде набора координат точек, исходя из ее аналитического вида. Таким образом, за счет увеличения либо уменьшения расстояния между координатами  $\{x_i, y_i, z_i\}$  и  $\{x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}\}$  при неизменном  $dt$  может быть реализовано увеличение либо уменьшение скорости и ускорения.

Были приняты следующие исходные данные, использовавшиеся в вычислениях:  $q = 1 \text{ Кл}, m = 1 \times 10^{-6} \text{ кг}, dt = 0.01 \text{ с}, R_1 = 10^{-9} \text{ м}, R_2 = 10^{-10} \text{ м}, r = 10^{-11} \text{ м}, \mu_{cp} = 0,9991, \varepsilon_{cp} = 0,012345$ .

Траектория, по которой осуществлялось движение тела (см. рисунки 1-4) состояла из четырёх частей:

- 1) параболы при движении посредника к объекту для его захвата;
- 2) прямой при движении посредника вместе с объектом;
- 3) параболы при плавном подведении тела на прямую сброса;
- 4) прямой при осуществлении разгона и резкого торможения для сброса тела в заданную точку.

В начальной точке и в точке захвата объекта скорость принималась равной 0.

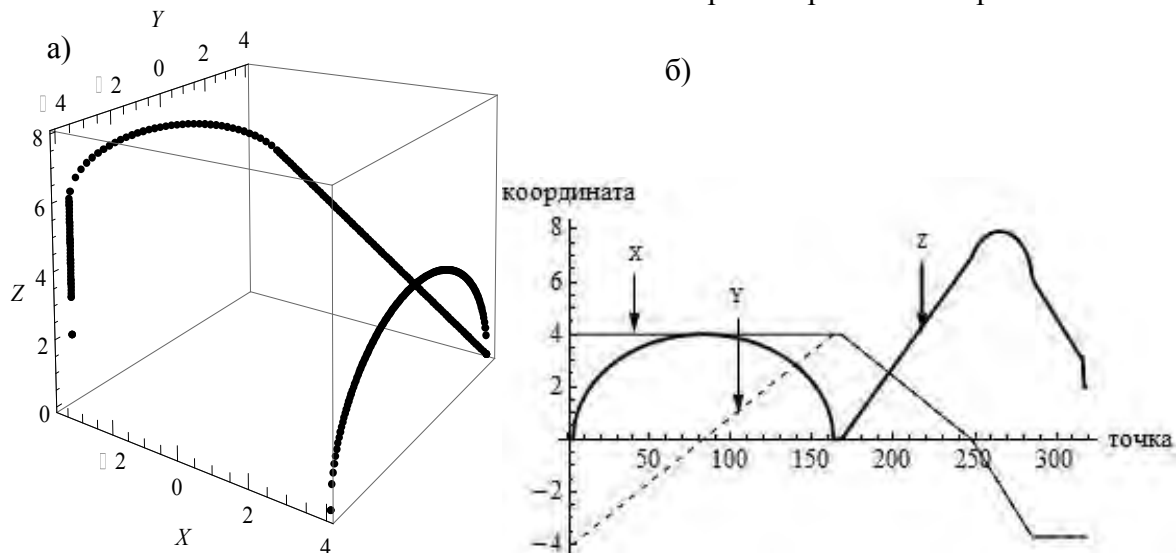
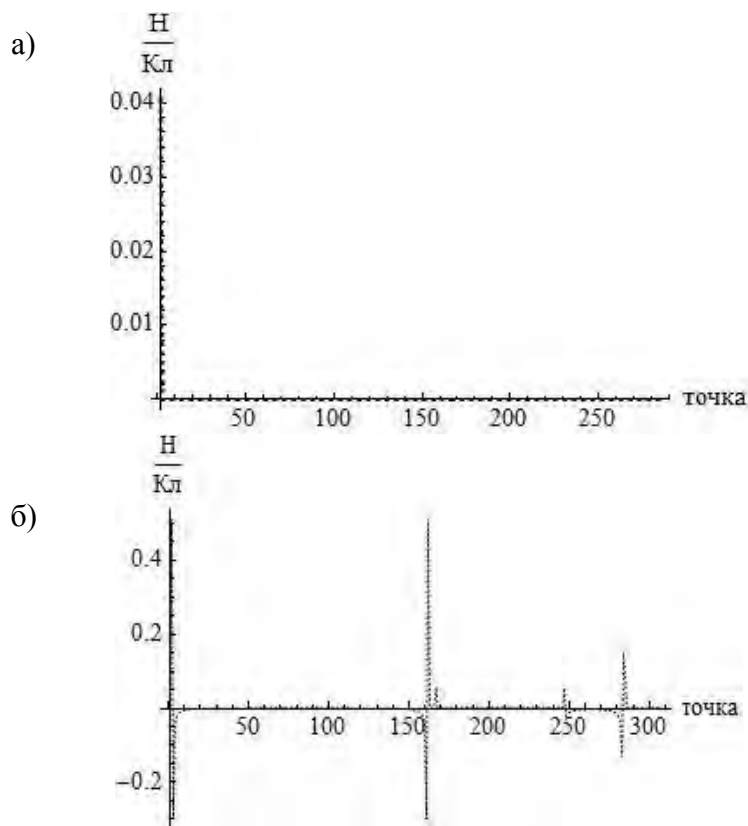


Рис. 1. Траектория движения тела (а) и его координаты (б)



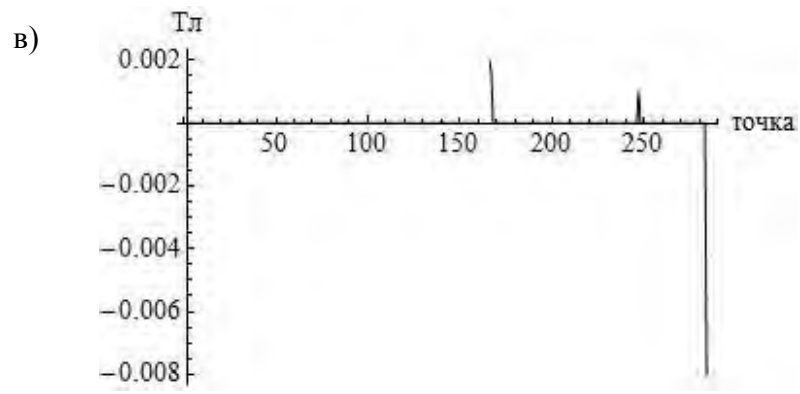


Рис. 2. Графики изменения полей  $E_y(a)$ ,  $E_z(б)$ ,  $B_z(в)$

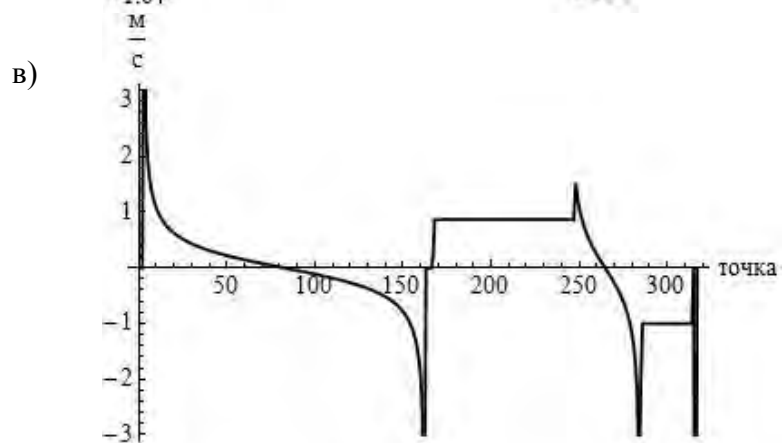
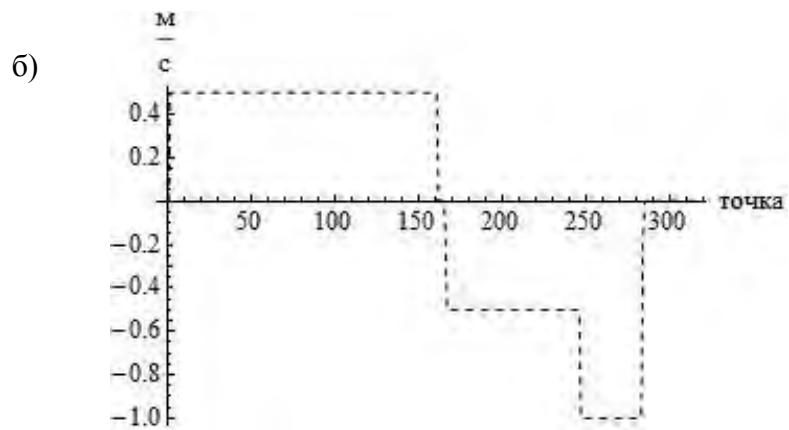
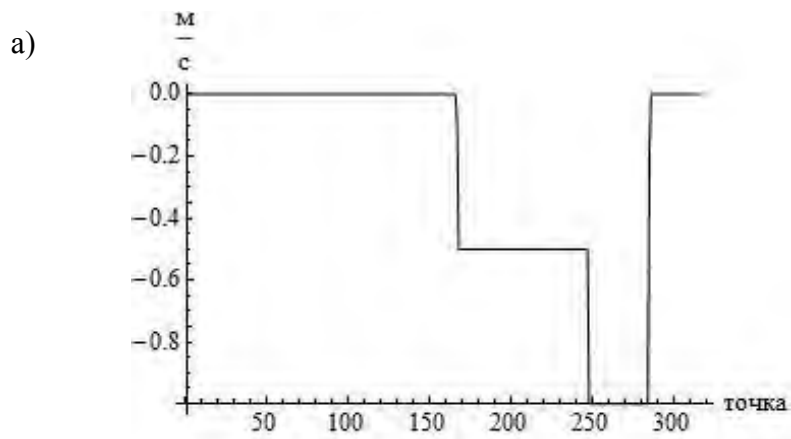


Рис. 3. Графики изменения скоростей  $V_x(a)$ ,  $V_y(б)$ ,  $V_z(в)$

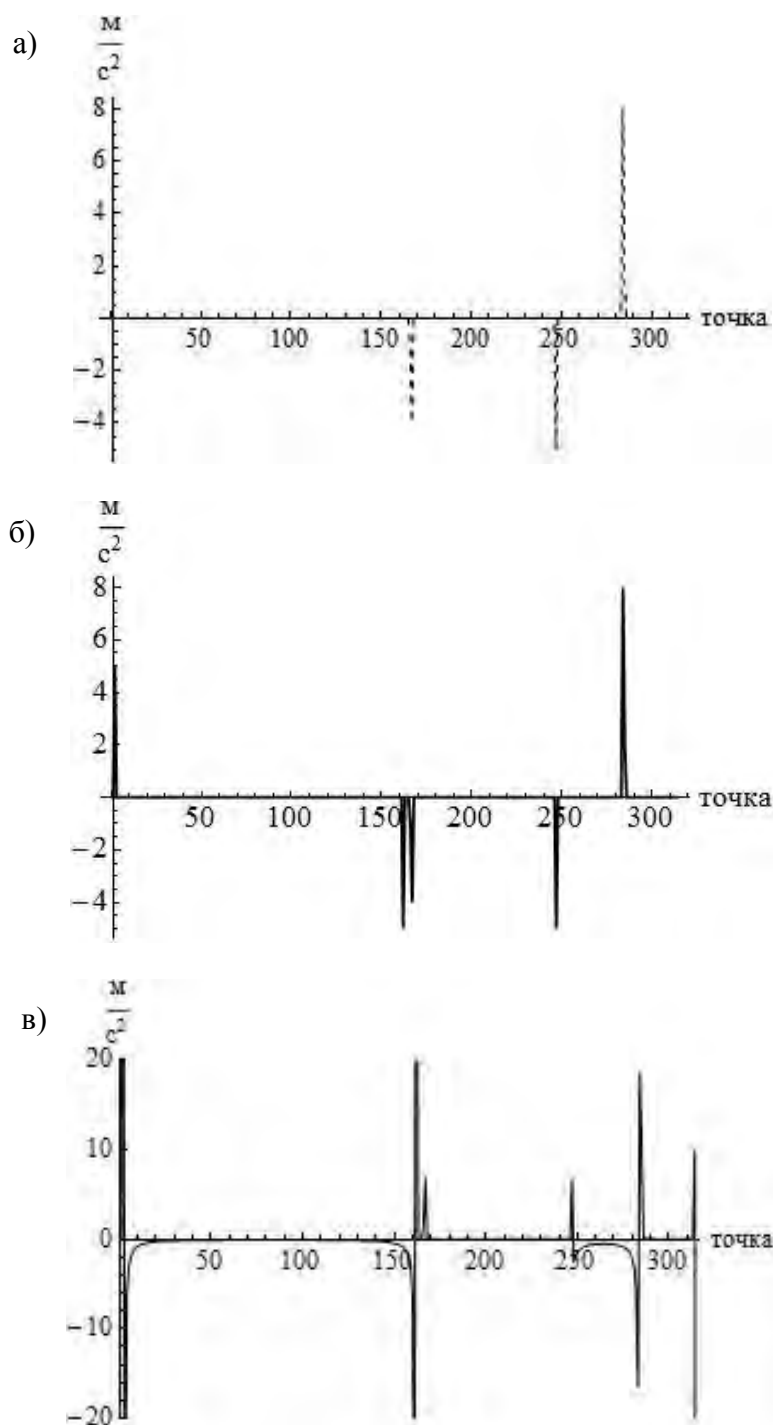


Рис. 4. График изменения ускорений  $W_x$  (а),  $W_y$  (б),  $W_z$  (в)

Из рисунков 2-4 видно, что движение посредника осуществлялось за счет импульсных воздействий компонент электромагнитного поля  $E_y$ ,  $E_z$ ,  $B_z$ . Данные компоненты меняли направление движения посредника и его скорость при переходе от одной части траектории к другой, после чего движение продолжалось по инерции.

**Заключение.** Реализован метод посредника управления движением наночастицы с помощью сил Лоренца и Ван-Дер-Ваальса с учетом магнитного сопротивления и электрической проницаемости среды. Методом Эйлера решена обратная модельная задача об определении напряженности электрического поля и магнитной индукции в каждый момент времени для реализации движения наночастицы по криволинейной траектории. В расчете отсутствовало механическое воздействие на частицу. Движение по-

средника осуществлялось заданием величин компонент электромагнитного поля полей, обеспечивающих движение частицы по требуемой траектории.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Щербаков, С.С. *О некоторых методах управления движением и деформированием нанообъектов* / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский // «Наноструктурные материалы – 2014: Беларусь-Россия-Украина (НАНО-2014)»: Материалы IV-й Международной научной конференции, Минск, 7-10 октября 2014 г. / редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2014. – С.328.
2. Щербаков, С.С. *Электромагнитно-силовой метод управления нанообъектами* / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский // Теоретическая и прикладная механика: Межведомственный сборник научно-методических статей. – Вып.30. – Минск: БНТУ, –2015. – С.306-310.
3. Sherbakov, S.S. *Manipulation of nanoobjects by electromagnetic and van der Waals forces* / S.S. Sherbakov, L.A. Sosnovskiy // Proc. of 8-th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures and Fracture and Fragmentation in Science and Engineering Conference, May 31 – June 3, Augustow, (Poland) / Ed.: A. Seweryn – Bialystok university of Technology. 2015. – P. 147-148.
4. Щербаков, С.С. *Управление нанообъектами с помощью электромагнитных сил и сил межмолекулярного взаимодействия* / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. докладов, Казань, 20-24 августа 2015 г./ КФУ; составители: Д.Ю. Ахметов [и др.]. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2015. – С. 4278-4280.
5. Самарский А.А, Гулин В.В., *Численные методы*. – Москва «Наука» - 1989, С. 214-218.

E-mail: [sherbakovss@mail.ru](mailto:sherbakovss@mail.ru)  
[arsenal-mihail@mail.ru](mailto:arsenal-mihail@mail.ru)

Поступила в редакцию 21.10.2016