

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-СИЛОВОЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ НАНООБЪЕКТАМИ

к.ф.-м.н. <sup>1</sup>Щербаков С.С., д.т.н. <sup>2</sup>Сосновский Л.А.

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск

<sup>2</sup>ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель

Одной из наиболее сложных и актуальных задач применительно к наноразмерным объектам является управление их положением (движением). В настоящее время данная задача решается с помощью атомно-силовых микроскопов, сканирующих туннельных микроскопов и другими нанопозиционерами. В частности, разрабатываются микропинцеты, предназначенные для трехмерного позиционирования нанообъектов. Одним из недостатком указанных нанопозиционеров является ограниченность перемещения объектов размерами рабочей области прибора, что осложняет их применение в технических приложениях.

При создании органических нановолокон существует проблема отделения их от субстрата. Применение субстрата из многослойных нанотрубок позволяет облегчить отделение нановолокон при их малом деформировании. Ведутся работы по применению подобного подхода при создании наноманипуляторов, состоящих из нанотрубок и производящих захват объекта за счет сил Ван-дер-Ваальса.

Одним из альтернативных (не механических) способов управления нанообъектами может быть применение силы Лоренца, вызванной совокупностью электромагнитных полей при действии на заряженную частицу

$$\mathbf{F}^{(l)} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}); \quad (1)$$

где  $q$  – заряд частицы (тела),  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  – векторы напряженности электрического поля и магнитной индукции.

Применение формулы (1) ограничено тем, что большинство нанообъектов не несут электрического заряда и не являются электропроводящими, а также не обладают высокими магнитными свойствами.

С другой стороны взаимодействие (притяжение) нанообъектов 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  $R_2$ , имеет вид

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

где  $A$  – постоянная Хамакера.

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

В качестве последних можно использовать как известные инденторы атомно-силовых микроскопов, так и токопроводящие или заряженные частицы размеров, сравнимых с размерами управляемых объектов. Взаимодействие – крепление объектов к посреднику осуществляется за счет сил Ван-дер-Ваальса, а перемещение посредника с объектом – за счет результирующей силы Лоренца от совокупности электромагнитных полей:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{F}_1^{(l)}(t) + \mathbf{F}_{12}^{(vw)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t) + \mathbf{F}_1^{(g)} \\ m_2 \ddot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{F}_{12}^{(vw)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t) + \mathbf{F}_2^{(g)} \end{cases} \Rightarrow (m_1 + m_2) \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}_{12}^{(l)}(t) + \mathbf{F}_{12}^{(g)}. \quad (3)$$

где  $\mathbf{F}^{(g)}$  – сила тяжести.

В качестве примера реализации метода рассмотрим решение следующей модельной задачи (при отсутствии магнитной индукции  $\mathbf{B}$ ):

$$\begin{cases} m_1 \ddot{\mathbf{x}}_1 = q\mathbf{E}_1^{(l)}(t) + \mathbf{F}_{12}^{(vw)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t) + \mathbf{F}_1^{(g)} \\ m_2 \ddot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{F}_{12}^{(vw)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t) + \mathbf{F}_2^{(g)} \end{cases} \Rightarrow (m_1 + m_2) \ddot{\mathbf{x}} = q\mathbf{E}_{12}^{(l)}(t) + \mathbf{F}_{12}^{(g)}. \quad (4)$$

где  $\mathbf{E}(t) = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 t$ ;  $\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1$  – искомые векторы.

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

$$m_2 \ddot{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{F}_{12}^{(vw)} = 0. \quad (5)$$

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

$$m_1 \ddot{\mathbf{x}}_1 = q\mathbf{E}_1^{(l)}(t) + \mathbf{F}_1^{(g)}. \quad (6)$$

Решение системы уравнений (6) имеет вид

$$\begin{aligned} x &= x^0 + v_x^0 t + \frac{cb_x^0}{2} t^2 + \frac{cb_x^1}{6} t^3, \quad y = y^0 + v_y^0 t + \frac{cb_y^0}{2} t^2 + \frac{cb_y^1}{6} t^3, \\ z &= z^0 + v_z^0 t + \frac{1}{2} (cb_z^0 - g) t^2 + \frac{cb_z^1}{6} t^3, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $x^0, y^0, z^0$  – координаты начального положение тела,  $v_x^0, v_y^0, v_z^0$  – компоненты вектора начальной скорости тела.

Тогда для того, чтобы тело перешло за время  $t^*$  в точку  $x^*, y^*, z^*$  с конечной скоростью  $(v_x^*, v_y^*, v_z^*)$ , векторы  $\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1$  должны быть следующими

$$\begin{aligned} b_x^0 &= \frac{2}{ct_*} \left( \frac{3x^0}{t_*} - \frac{3x^*}{t_*} + 2v_x^0 + v_x^* \right), \quad b_x^1 = \frac{6}{ct_*^2} \left( \frac{2x^0}{t_*} - \frac{2x^*}{t_*} + v_x^0 + v_x^* \right), \\ b_y^0 &= \frac{2}{ct_*} \left( \frac{3y^0}{t_*} - \frac{3y^*}{t_*} + 2v_y^0 + v_y^* \right), \quad b_y^1 = \frac{6}{ct_*^2} \left( \frac{2y^0}{t_*} - \frac{2y^*}{t_*} + v_y^0 + v_y^* \right), \\ b_z^0 &= \frac{2}{ct_*} \left( \frac{3y^0}{t_*} - \frac{3y^*}{t_*} + 2v_z^0 + v_z^* - gt_* \right), \quad b_z^1 = \frac{6}{ct_*^2} \left( \frac{2z^0}{t_*} - \frac{2z^*}{t_*} + v_z^0 + v_z^* \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Если для реализации «стряхивания» в соответствии с (5) необходимо, чтобы тело в некоторый момент времени  $t^*$  имело скорость  $v_x^*, v_y^*, v_z^*$  и ускорение  $a_x^*, a_y^*, a_z^*$ , то векторы  $\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1$  будут

$$\begin{aligned} b_x^0 &= \frac{1}{ct_*} (2v_x^* - 2v_x^0 - a_x^* t_*), \quad b_x^1 = \frac{2}{ct_*^2} (v_x^0 - v_x^* + a_x^* t_*), \\ b_y^0 &= \frac{1}{ct_*} (2v_y^* - 2v_y^0 - a_y^* t_*), \quad b_y^1 = \frac{2}{ct_*^2} (v_y^0 - v_y^* + a_y^* t_*), \\ b_z^0 &= \frac{1}{ct_*} (2v_z^* - 2v_z^0 - a_z^* t_* + gt_*), \quad b_z^1 = \frac{2}{ct_*^2} (v_z^0 - v_z^* + a_z^* t_*). \end{aligned} \quad (9)$$

Для расчета примем следующие численные значения исходных данных:  $m_1 = 2,5 \cdot 10^{-6}$  Кг,  $m_2 = 2,33 \cdot 10^{-21}$  Кг,  $q = 10$  Кл,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>,  $R_1 = 4,23 \cdot 10^{-4}$  м,  $R_2 = 2,10 \cdot 10^{-9}$  м, ускорение отрыва захваченной посредником частицы – 8 м/с<sup>2</sup>.

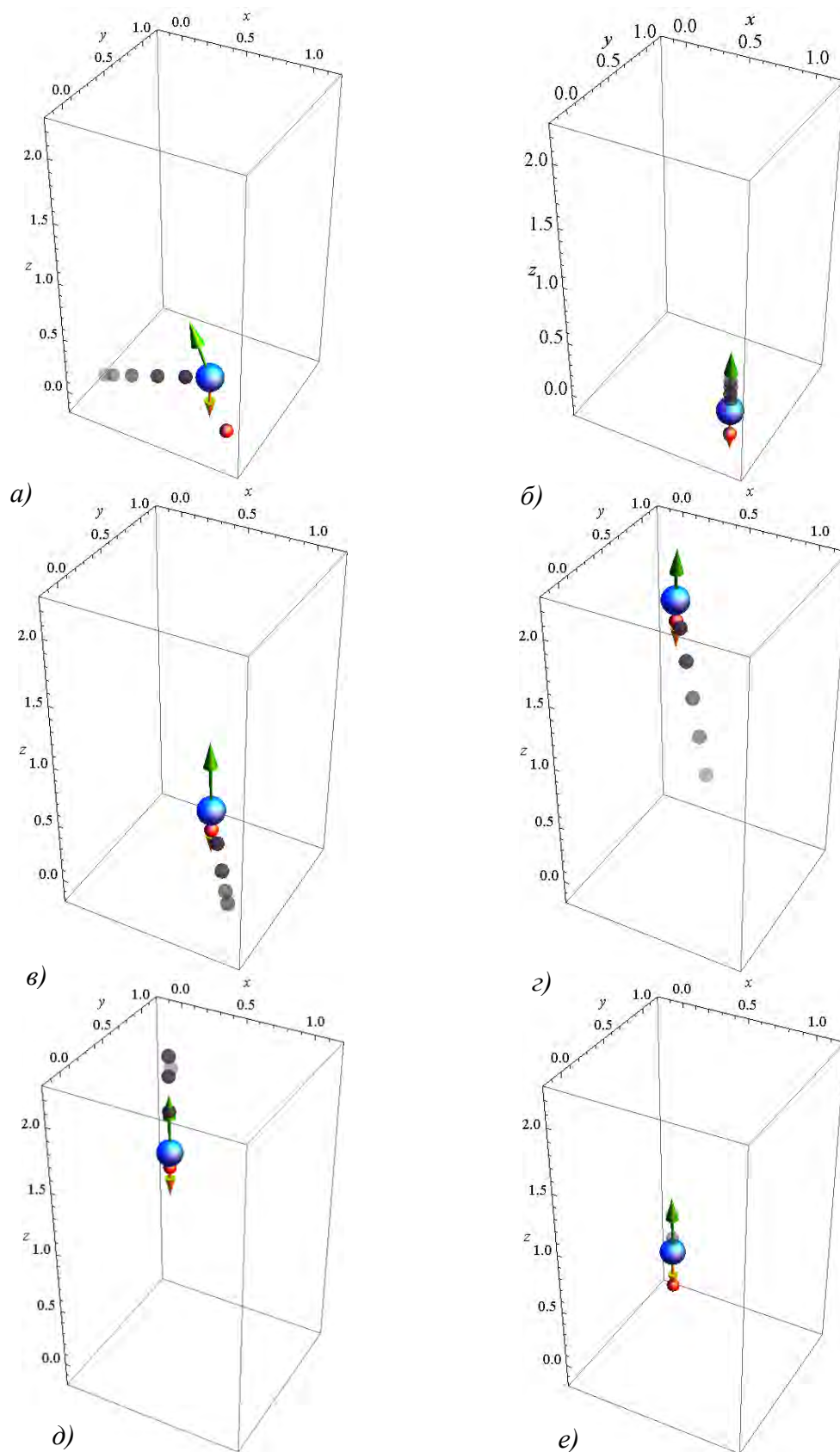


Рисунок 1. – Положения двух тел в различные моменты времени

- а) до захвата второго тела при  $t=0,77$  с;
- б) до захвата второго тела при  $t=1,71$  с;
- в) после захвата второго тела при  $t=2,71$  с;
- г) после захвата второго тела при  $t=3,61$  с;
- д) после захвата второго тела при  $t=4,52$  с;
- е) после «стряхивания» второго тела при  $t=5,53$  с.

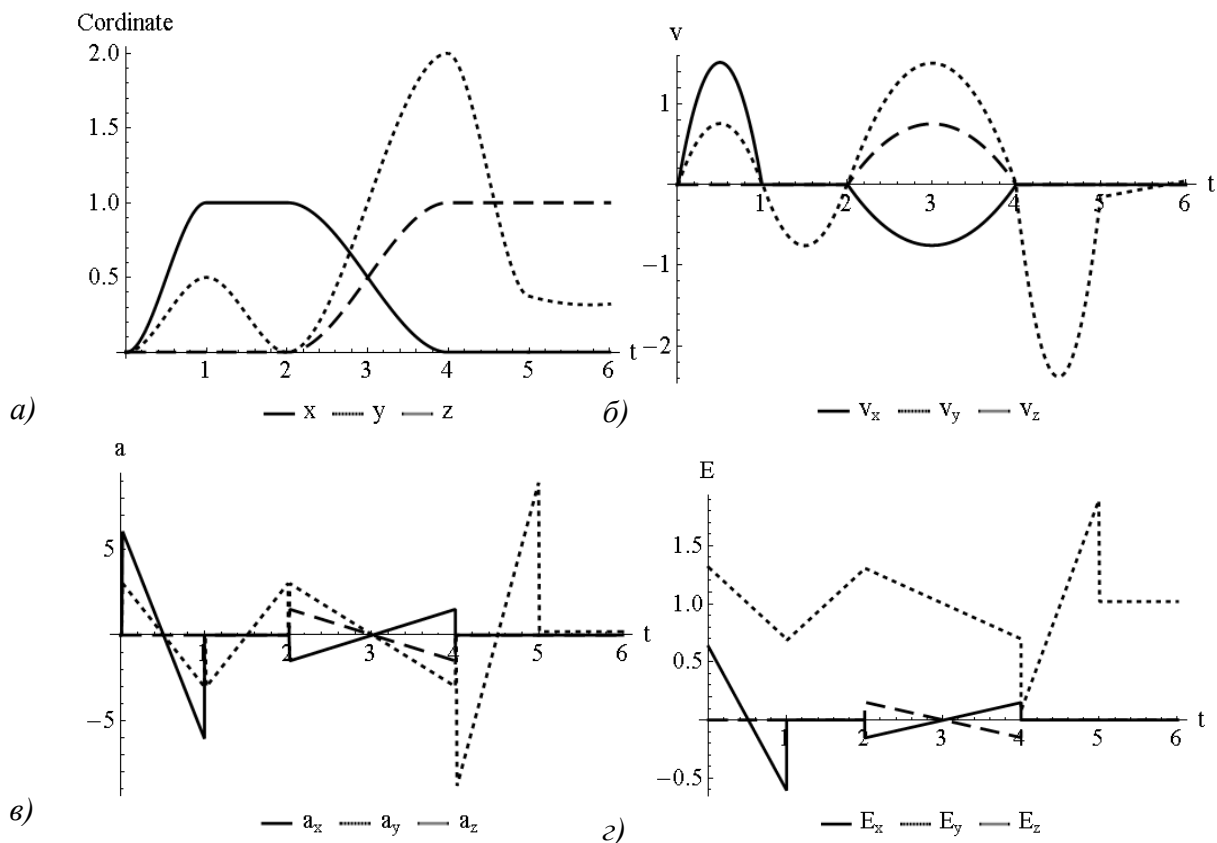


Рисунок 2. – Изменения во времени для первого тела:  
 а) положения в пространстве;  
 б) скорости;  
 в) ускорения;  
 г) напряженности электрического поля.

Из рисунков 1 и 2 видно что первое заряженное тело проходит через точки  $M_1(0, 0, R_1)$ ,  $M_2(1, 0, 0,5)$ ,  $M_3(1,0, R_1+R_2)$ ,  $M_4(0, 1, 2)$ ,  $M_5(0, 1, 0,24)$  вдоль прямых соединяющих эти точки. Для каждого этапа движения по формулам (8) и (9) определяются  $\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1$  характеризующие напряженность  $\mathbf{E}$ .

В точках  $M_1 - M_4$  скорость первого тела равна нулю. В точке  $M_3$  за счет действия сил межмолекулярного взаимодействия происходит крепление второго тела к первому, а в точке  $M_5$  при ускорении тела равном  $a_z = 8 \text{ м/с}^2$  и скорости  $v_z = -0,5 \text{ м/с}$  происходит отрыв переносимого (второго) тела.

**Закключение.** В работе рассмотрен метод «посредников», в соответствии с которым движение посредника – микро- или мезомасштабного тела, несущего электрический заряд, реализуется за счет суперпозиции электромагнитных полей, а крепление нанобъекта к посреднику производится за счет действия сил межмолекулярного взаимодействия. Прикрепленный к посреднику нанобъект в свою очередь может выступать как субпосредник для более точного позиционирования третьего наноразмерного тела.

Применение предложенного метода «посредников» позволяет

- перемещать объекты микро- и наноразмеров в большей (метры) по сравнению с известными методами области пространства ;
- за счет использования сил сил Ван-дер-Ваальса манипулировать объектами, не обладающими высокой электромагнитной проводимостью;

- исключить механические передачи при манипулировании малоразмерными объектами;
- реализовать новые способы формирования структур из нанобъектов путем их сборки из отдельных объектов или «расчесывания» (например, нанотрубок) движущимся множеством заряженных тел.

В перспективе метод можно использовать для разработки новых способов доставки медикаментов в необходимую область тела или экспрессных методов оценки механических свойств объектов (при индентировании, изгибе и др.)

### РЕЗЮМЕ

Предложен метод управления наноразмерными объектами посредством токопроводящих посредников. В качестве последних могут быть использованы как имеющиеся инденторы атомно-силовых микроскопов, так и токопроводящие или заряженные частицы размеров, сравнимых с размерами управляемых объектов. Взаимодействие (крепление) объектов к посреднику осуществляется за счет силы Ван-дер-Ваальса, а перемещение посредника с объектом – за счет результирующей силы Лоренца от совокупности электромагнитных полей. Представлено решение трехмерной модельной задачи о захвате несущим электрический заряд посредником нанобъекта, переносе их в точку доставки под действием электрического поля и сбросе нанобъекта в данной точке.

### SUMMARY

*Method of control of nanoscale objects by current-conducting mediators is proposed. The latter can be represented by both available indenters for atomic force microscopy and conductive or charged particles of a size comparable with the size of the controlled object. Interaction (mounting) of objects to the mediator is performed by van der Waals force while motion of the mediator with the object is performed by Lorentz force depending on the combination of electromagnetic fields. The solution of three-dimensional model problem is given for the seizure of the nanoobject by the electrically charged mediator, transporting them to the point of delivery under the action of the electric field and dumping the nanoobject at this point.*

**E-mail:** [sherbakovss@mail.ru](mailto:sherbakovss@mail.ru)  
[tribo-fatigue@mail.ru](mailto:tribo-fatigue@mail.ru)

Поступила в редакцию 03.11.2014