

УДК 531; 539.3; 620.3

УПРАВЛЕНИЕ НАНООБЪЕКТОМ В НЕЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ С ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ И СИЛАМИ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

С.С. ЩЕРБАКОВ

Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15 августа 2018

Аннотация. Рассматривается метод управления объектом микро- и наноразмеров посредством токопроводящего посредника. Силами межмолекулярного взаимодействия Ван-дер-Ваальса производится крепление к посреднику объекта. Последующее перемещение прикрепленного объекта к посреднику реализуется силой Лоренца, обусловленной действием электромагнитного поля. Представлено решение задачи определения изменения напряженности компонент электромагнитного поля, обеспечивающее перемещения посредника в потоке жидкости в нелинейном канале.

Ключевые слова: нанобъект, метод посредника, сила Лоренца, силы Ван-дер-Ваальса.

Abstract. The method of controlling objects of micro- and nanosizes by means of a conductive mediator is considered. The attachment of an object to a mediator is performed by van der Waals forces of molecular interaction. Subsequent motion of the object attached to the mediator is realized by Lorentz force caused by the electromagnetic field. The solution of the problem of determining the change in the intensity of the components of the electromagnetic field providing the motion of the mediator in a nonlinear channel with a fluid flow is presented.

Keywords: nanoobject, mediator method, Lorentz force, van der Waals forces.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 116, No. 6, pp. 80-85

**Control of a nanoobject in nonlinear channel with a fluid flow
by electromagnetic field and forces of intermolecular interaction
S.S. Sherbakov**

Введение

В различных отраслях физики, техники, биологии и медицины требуется не только изучать индивидуальные нанобъекты, но и манипулировать ими: захватывать, перемещать, деформировать. Одной из наиболее сложных и актуальных задач применительно к наноразмерным объектам является управление (манипулирование) их положением (движением). Этими объектами могут быть углеродные нанотрубки, органические и неорганические частицы различной природы, элементы микросхем, молекулы и даже отдельные атомы. При создании органических нановолокон существует проблема отделения их от субстрата.

На данный момент существует ряд возможностей для двумерного и трехмерного позиционирования наноразмерных объектов. Применяются как традиционные механические способы управления с помощью микропинцетов, атомно-силового микроскопа, манипулятора робота, так и, например, оптический за счет действия лазерного луча [1, 2]. Также рассматривается возможность управления движением наночастицы с помощью эффекта памяти формы [3]. 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.

Следует отметить, что для манипулирования наночастицами зачастую необходим инструмент с очень малыми размерами рабочего инструмента. Однако изготовление подобного инструмента весьма затруднительно. К настоящему моменту характерные размеры наноманипуляторов лежат в диапазоне от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Также одним из важнейших недостатков указанных нанопозиционеров для применения в технических приложениях являются ограничения на перемещения нанообъектов, обусловленные размерами рабочей области позиционера. Поэтому представляется перспективным применение для управления нанообъектами физических эффектов, которые не связаны с механическим воздействием на частицы.

Метод посредника

Использование электромагнитного поля для воздействия на заряженную частицу за счет силы Лоренца [4, 5] может быть альтернативным механическому способу манипулирования микро- и нанообъектами:

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

где $\mathbf{F}^{(l)}$ – сила Лоренца; \mathbf{B} и \mathbf{E} – напряженности электрического и магнитного полей; \mathbf{v} и q – скорость и заряд частицы.

Поскольку многие нанообъекты не являются электропроводящими и не несут электрического заряда, то использование формулы (1) возможно лишь в ограниченном числе случаев. Выходом из данного положения может быть применение токопроводящего макро- или микропосредника, управляемого изменением напряженности компонент электромагнитного поля, к которому крепится перемещаемый нанообъект.

Крепление наночастицы к посреднику может производиться силами Ван-дер-Ваальса [4, 5]. Величина данных сил описывается в первом приближении для взаимодействия двух сферических тел следующей формулой:

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

где R_1 и R_2 – радиусы взаимодействующих тел; A – постоянная Хамакера; $r \ll R_1$ или R_2 – расстояние между телами.

Движение посредника с прикрепленной частицей в некоторую точку по заданной траектории производится при ускорении, обеспечивающем крепление:

$$m\ddot{r} \leq F^{vw}. \quad (3)$$

Выражения (1) и (2) составляют основу метода токопроводящего посредника управления нанообъектами, основанного на следующей модели:

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

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

Воздействие на посредник в нелинейном канале с потоком жидкости

В настоящей работе решалась задача расчета изменения напряженности электромагнитного поля, позволяющего переместить посредник по некоторой нелинейной траектории в цилиндрическом канале с жидкостью, моделирующем человеческую вену (см. рис. 1). Течение жидкости описывалось законом Пуазейля при пульсирующем давлении [6]. Расчеты проводились с учетом как электромагнитного, так и гидродинамического сопротивления жидкости.

Так как наночастица по сравнению с посредником крайне мала (в том числе ее масса и заряд), то во всех дальнейших расчетах будем учитывать лишь движение посредника на основе формулы (1):

$$m\ddot{\mathbf{r}} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + m\mathbf{g}, \quad (5)$$

где m – масса посредника; q – электрический заряд; \mathbf{g} – ускорение свободного падения.

Поскольку движение частицы рассматривается в потоке жидкости, то было учтено гидродинамическое сопротивление:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{F}_s + m\mathbf{g}, \quad (6)$$

где \mathbf{F}_s – сила гидродинамического сопротивления.

Гидродинамическое сопротивление для течения жидкости в соответствии с законом Пуазейля описывается следующей формулой [7]:

$$\mathbf{F}_s = \pm \frac{1}{2} \rho S c \mathbf{v}_s^2, \quad (7)$$

где ρ – плотность жидкости; S – площадь поперечного сечения тела; c – безразмерный коэффициент сопротивления.

В формуле (7) \mathbf{v}_s является скоростью потока жидкости в канале радиуса R , рассчитываемой следующим образом:

$$\mathbf{v}_s = \mp \left(\dot{\mathbf{r}}_i \pm \frac{\delta P}{4\eta l} (R^2 - r^2) \right), \quad (8)$$

где $\dot{\mathbf{r}}_i$ – скорость частицы; δP – разность давлений на участке движения; η – вязкость жидкости; l – длина участка движения; r – расстояние от частицы до центра канала, а знаки зависят от направления движения частицы относительно течения (см. рис. 1).

В вене из-за сердцебиения происходят колебания давления крови, что было учтено в разности давлений δP :

$$\begin{aligned} \delta P &= P_0 + P_1 \sin\left(2\pi\nu_0 t + \frac{\pi}{2}\right), \\ P_0 &= P_{\min} + \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2}, \\ P_1 &= \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2}. \end{aligned} \quad (9)$$

На основе (6)–(9) была построена система разрешающих дифференциальных уравнений относительно неизвестных полей \mathbf{E} и \mathbf{B} для реализации метода манипулирования объектами наноразмеров токопроводящим посредником:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = q(\varepsilon_0 E_x + \dot{y}\mu_0 B_z - \dot{z}\mu_0 B_y) - F_{sx}(\dot{x}); \\ m\ddot{y} = q(\varepsilon_0 E_y + \dot{x}\mu_0 B_z - \dot{z}\mu_0 B_x); \\ m\ddot{z} = q(\varepsilon_0 E_z + \dot{x}\mu_0 B_y - \dot{y}\mu_0 B_x) - F_{sz}(\dot{z}) - mg. \end{cases} \quad (10)$$

Траектория движения для наночастицы задавалась аналитически либо набором координат. Были проведены моделирование и сравнительный анализ движения частицы по трем различным траекториям в меняющемся направлении канале (см. рис. 1), а также рассмотрены случаи движения частицы как по течению, так и против него.

Для заданной траектории движения система (10) была решена численно методом Эйлера [8]. Разностный аналог системы (10) в этом случае был следующим:

$$\begin{cases} m \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\delta t^2} = q(\varepsilon_0 E_x + \frac{y_i - y_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_z - \frac{z_i - z_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_y) - F_{sx}(\dot{x}); \\ m \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\delta t^2} = q(\varepsilon_0 E_y + \frac{x_i - x_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_z - \frac{z_i - z_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_x); \\ m \frac{z_{i+1} - 2z_i + z_{i-1}}{\delta t^2} = q(\varepsilon_0 E_z + \frac{x_i - x_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_y - \frac{y_i - y_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_x) - F_{sz}(\dot{z}) - mg. \end{cases} \quad (11)$$

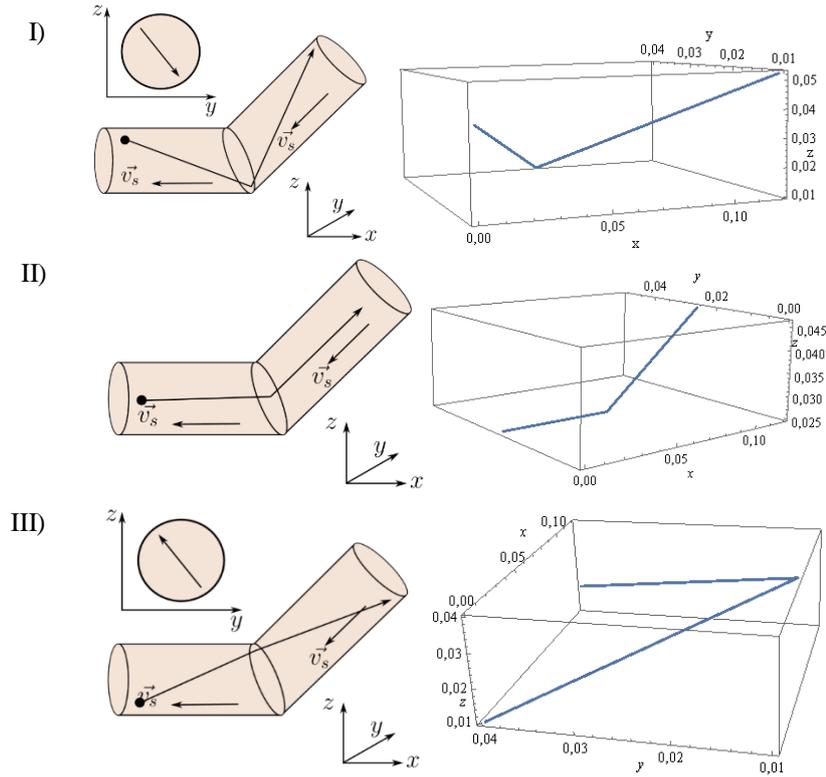


Рис. 1. Траектории движения частицы

Следует принять во внимание, что движение может производиться посредством шести заранее неизвестных компонент электромагнитного поля. При этом в системе (11) есть лишь три уравнения. Для ее замыкания предположим, что движение происходит за счет только трех компонент. Это предположение возможно, поскольку трех компонент достаточно для реализации движения тела в трехмерном пространстве.

В этом случае система (11) примет вид

$$\begin{cases} m \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\delta t^2} = q(\varepsilon_0 E_x - \frac{z_i - z_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_y) - F_{sx} \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{\delta t} \right); \\ m \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\delta t^2} = q\varepsilon_0 E_y; \\ m \frac{z_{i+1} - 2z_i + z_{i-1}}{\delta t^2} = q \frac{x_i - x_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_y - F_{sz} \left(\frac{z_i - z_{i-1}}{\delta t} \right) - mg. \end{cases} \quad (12)$$

Для проведения расчетов были приняты следующие исходные данные: $q = 1 \times 10^{-6}$ Кл, $r = 1 \times 10^{-6}$ м, $l = 0,12$ м, $\eta = 3,5 \times 10^3$ Па·с, $R = 0,025$ м, $\delta t = 0,01$ с, $\mu_0 = 1$, $\varepsilon_0 = 1/85$, $\rho = 1050$ кг/м³, $P_{\min} = 0,55$ Па, $P_{\max} = 750$ Па, $\nu = 0,05$.

Траектории были заданы точками пространства при фиксированном шаге по времени таким образом, чтобы выполнялось условие (3). На каждом графике рис. 2 приведены изменения составляющих электромагнитного поля для трех разных траекторий (I – сплошная, II – пунктирная, III – штриховая); a и v – по течению, b и z – против течения. Составляющая E_y была нулевой для всех трех траекторий, так как движение вдоль оси y отсутствует.

Из рис. 2 видно, что изменение направления движения (по или против течения) влечет за собой почти симметричное изменение в значениях интенсивности соответствующих полей.

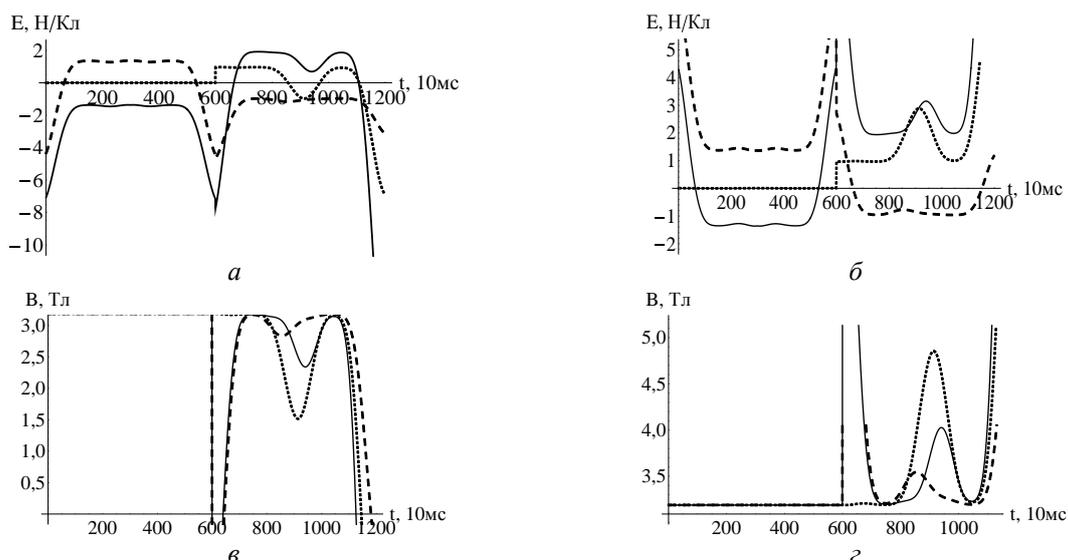


Рис. 2. Распределение полей для трех разных траекторий E_x (а, б); B_y (в, г)

Заключение

Рассмотрен метод управления движением токопроводящего посредника для манипулирования наночастицей в канале с жидкостью. Метод основан на применении электромагнитного поля и учете как гидродинамического, так и электромагнитного сопротивления. При реализации метода отсутствует механическое воздействие на посредника: его движение по заданной траектории происходит за счет соответствующего изменения компонент поля. Крепление наночастицы к посреднику может быть осуществлено с помощью сил межмолекулярного взаимодействия Ван-Дер-Ваальса.

Решен ряд модельных обратных задач определения компонент электромагнитного поля, обеспечивающего движение макросредника по заданной траектории в нелинейном канале с потоком жидкости с учетом колебания давления в нем, профиля и направления скорости жидкости, а также сил магнитного сопротивления и электрической проницаемости среды.

Список литературы

1. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н. Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порождённые дифракционной оптикой // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35, № 6. С. 1368–1432.
2. Коледов В. «Нанопальцы» для наноинженеров // Наноиндустрия. 2014. № 6. С. 52–57.
3. Манипулирование микро- и нанобъектами при помощи эффекта памяти формы/ А.В. Маширов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 12. С. 1–26.
4. Щербаков С.С., Сосновский Л.А. О некоторых методах управления движением и деформированием нанобъектов // Материалы IV-й Междунар. науч. конф. «Наноструктурные материалы-2014: Беларусь-Россия-Украина (НАНО-2014)». Минск, 7–10 октября 2014 г. С. 328.
5. Щербаков С.С., Сосновский Л.А. Электромагнитно-силовой метод управления нанобъектами // Теоретическая и прикладная механика: межведомственный сб. науч.-метод. ст. 2015. Вып. 30. С. 306–310.
6. Sherbakov S.S., Sosnovskiy L.A. Manipulation of nanoobjects by electromagnetic and van der Waals forces // Proc. of 8-th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures and Fracture and Fragmentation in Science and Engineering Conference. Augustow, May 31–June 3 2015. P. 147–148.
7. Щербаков С.С., Сосновский Л.А. Управление нанобъектами с помощью электромагнитных сил и сил межмолекулярного взаимодействия // Сб. докл. XI Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 20–24 августа 2015 г. С. 4278–4280.
8. Щербаков С.С., Полещук М.М. Электромагнитно-силовой метод манипулирования нанобъектами с учетом сопротивления среды // Теоретическая и прикладная механика: межведомственный сб. науч.-метод. ст. 2017. Вып. 32. С. 40–45.

References

1. Sojfer V.A., Kotljarskiy V.V., Honina S.N. Opticheskoe manipulirovanie mikroob'ekami: dostizheniya i novye vozmozhnosti, porozhdjonnnye difrakcionnoj optikoj // Fizika jelementarnyh chastic i atomnogo jadra. 2004. T. 35, № 6. S. 1368–1432. (in Russ.)
2. Koledov V. «Nanopal'cy» dlja nanoinzhenierov // Nanoindustrija. 2014. № 6. S. 52–57. (in Russ.)
3. Manipulirovanie mikro- i nanoob'ektmi pri pomoshhi jeffekta pamjati formy/ A.V. Mashirov [i dr.] // Zhurnal radiojelektroniki. 2014. № 12. S. 1–26. (in Russ.)
4. Shherbakov S.S., Sosnovskij L.A. O nekotoryh metodah upravlenija dvizheniem i deformirovaniem nanoob'ektov // Materialy IV-j Mezhdunar. nauch. konf. «Nanostrukturnye materialy-2014: Belarus'-Rossija-Ukraina (NANO-2014)». Minsk, 7–10 oktjabrja 2014 g. S. 328. (in Russ.)
5. Shherbakov S.S., Sosnovskij L.A. E'lektromagnitno-silovoj metod upravlenija nanoob'ektami // Teoreticheskaja i prikladnaja mehanika: mezhvedomstvennyj sb. nauch.-metod. st. 2015. Vyp. 30. S. 306–310. (in Russ.)
6. Sherbakov S.S., Sosnovskiy L.A. Manipulation of nanoobjects by electromagnetic and van der Waals forces // Proc. of 8-th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures and Fracture and Fragmentation in Science and Engineering Conference. Augustow, May 31–June 3 2015. P. 147–148. (in Russ.)
7. Shherbakov S.S., Sosnovskij L.A. Upravlenie nanoob'ektami s pomoshh'ju jelektromagnitnyh sil i sil mezhmolekuljarnogo vzaimodejstvija // Sb. dokl. XI Vseros. s'ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskaj i prikladnoj mehaniki. Kazan', 20–24 avgusta 2015 g. S. 4278–4280. (in Russ.)
8. Shherbakov S.S., Poleshuk M.M. Jelektromagnitno-silovoj metod manipulirovanija nanoob'ektami s uchetom soprotivlenija sredy // Teoreticheskaja i prikladnaja mehanika: mezhvedomstvennyj sb. nauch.-metod. st. 2017. Vyp. 32. S. 40–45. (in Russ.)

Сведения об авторах

Щербаков С.С., д.ф.-м.н., доцент, заместитель
Председателя Государственного комитета по
науке и технологиям Республики Беларусь.

Адрес для корреспонденции

220072. Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Академическая, 1,
Комитет по науке и технологиям
Республики Беларусь
тел. +375-17-284-15-54;
e-mail: sherbakovss@mail.ru
Щербаков Сергей Сергеевич

Information about the authors

Sherbakov S.S., D.Sci, associate professor, vice
chairman of the State committee on science and
technology of the Republic of Belarus.

Address for correspondence

220072. Republic of Belarus,
Minsk, Academicheskaya str., 1,
State committee on science and technology
of the Republic of Belarus
tel. +375-17-284-15-54;
e-mail: sherbakovss@mail.ru
Sherbakov Sergei Sergeevich