

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПОСРЕДНИКА ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НАНОЧАСТИЦУ В НЕЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ С ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

д.ф.-м.н. Щербаков С.С., маг. Полещук М.М.

*Белорусский государственный университет, Минск*

**Введение.** В различных отраслях физики, техники, биологии и медицины требуется не только изучать индивидуальные нанообъекты, но и манипулировать ими: захватывать, перемещать, деформировать. Этими объектами могут быть углеродные нанотрубки, органические и неорганические частицы различной природы, элементы микросхем, молекулы и даже атомы. На данный момент существует несколько способов манипулирования частицами наноразмеров. Например, оптический [1] или же механические способы (рука робота, микро- и наноинструменты) [2]. Также рассматривается возможность управления движением наночастицы с помощью эффекта памяти формы [3]. Следует отметить, что для манипулирования наночастицами зачастую необходим инструмент крайне малых размеров. Однако изготовление такого рода инструмента весьма затруднительно, и на сегодняшний день размеры «наноманипулятора» составляет несколько сантиметров или десятков сантиметров. Однако для более широкого и эффективного применения большинства из них требуется уменьшение размеров и улучшение функциональных характеристик. Поэтому применение для управления нанообъектами физических эффектов, которые не связаны с механическим воздействием на частицы, представляется перспективным.

**Постановка задачи.** Основой электромагнитно-силового метода является перемещение нанообъекта с помощью макрочастицы (посредника) [4-6]. Под действием электромагнитного поля токопроводящий (заряженный) посредник подводится к частице и «захватывает» её с помощью сил Ван-дер-Ваальса, которые при взаимодействии, например, двух сферических тел с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , если расстояние между ними  $r \ll R_1$  или  $R_2$ , имеют вид

$$F^{(vw)}(r) = \frac{AR_1R_2}{(R_1 + R_2)^6 r}, \quad (1)$$

где  $A$  – постоянная Хамакера.

Далее осуществляется движение посредника в заданную точку по некоторой траектории таким образом, чтобы не произошёл «отрыв» наночастицы, т.е. при обеспечении условия

$$m\ddot{r} \leq F^{vw}. \quad (2)$$

В настоящей работе решалась задача определения закона изменения напряженности электромагнитного поля, обеспечивающего перемещение посредника по заданной нелинейной траектории в цилиндрическом канале с жидкостью, моделирующем человеческую вену (см. рис. 1). Течение жидкости описывалось законом Пуазейля при пульсирующем давлении [7]. Расчёты проводились с учетом как электромагнитного, так и гидродинамического сопротивления жидкости.

Так как наночастица по сравнению с посредником крайне мала (в т.ч. ее масса и заряд), то во всех дальнейших расчётах будем учитывать лишь посредник. Как известно, заряженное тело (частица) может быть приведено в движение с помощью сил Лоренца [4-6]

$$m\ddot{\vec{r}} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + m\vec{g}, \quad (3)$$

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

$$m\ddot{\vec{r}} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + \vec{F}_s + m\vec{g}, \quad (4)$$

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,  $\vec{F}_s$  – гидродинамическое сопротивление

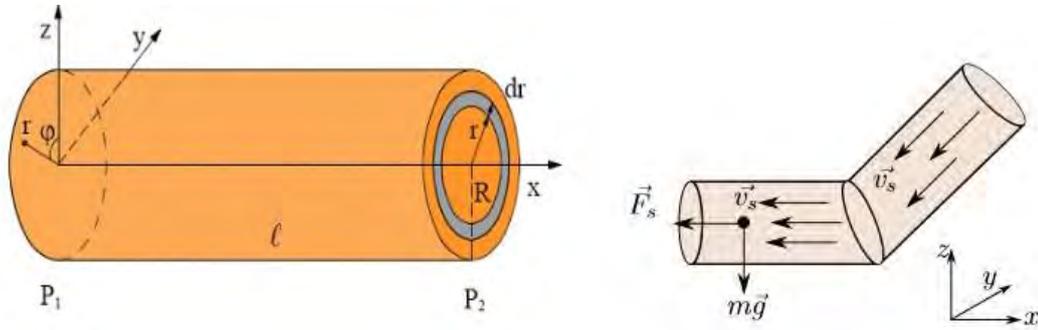


Рис. 1. Схема движения частицы в цилиндрическом канале

Гидродинамическое сопротивление описывается следующей формулой [8]:

$$\vec{F}_s = \pm \frac{1}{2} \rho S c \vec{v}_s^2, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $S$  – площадь поперечного сечения тела,  $c$  – безразмерный коэффициент сопротивления,

$$\vec{v}_s = \mp \left( \dot{r}_i \pm \frac{\delta P}{4\eta l} (R^2 - r^2) \right), \quad (6)$$

где  $\dot{r}_i$  – скорость частицы,  $\delta P$  – разность давлений на участке движения,  $\eta$  – вязкость жидкости,  $l$  – длина участка движения,  $R$  – радиус участка движения,  $r$  – расстояние от частицы до центра, 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  $\delta P$ :

$$\begin{aligned} \delta P &= P_0 + P_1 \sin\left(2\pi\nu_{0,0} t + \frac{\pi}{2}\right) \\ P_0 &= P_{\min} + \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2} \\ P_1 &= \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

На основе (4-7) была построена система разрешающих дифференциальных уравнений относительно неизвестных полей  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  для реализации метода управления объектами наноразмеров посредством токопроводящего посредника.

$$\begin{cases} m\ddot{x} = q(\varepsilon_0 E_x + \dot{y}\mu_0 B_z - \dot{z}\mu_0 B_y) - F_{sx}(\dot{x}) \\ m\ddot{y} = q(\varepsilon_0 E_y + \dot{x}\mu_0 B_z - \dot{z}\mu_0 B_x) \\ m\ddot{z} = q(\varepsilon_0 E_z + \dot{x}\mu_0 B_y - \dot{y}\mu_0 B_x) - F_{sz}(\dot{z}) - mg \end{cases} \quad (8)$$

Траектория движения частиц задавалась координатным либо аналитическим способом. Были проведены моделирование и сравнительный анализ движения частицы по

трём различным траекториям в меняющемся направлении канала (см. рис.2), а также рассмотрены случаи движения частицы как по течению, так и против него.

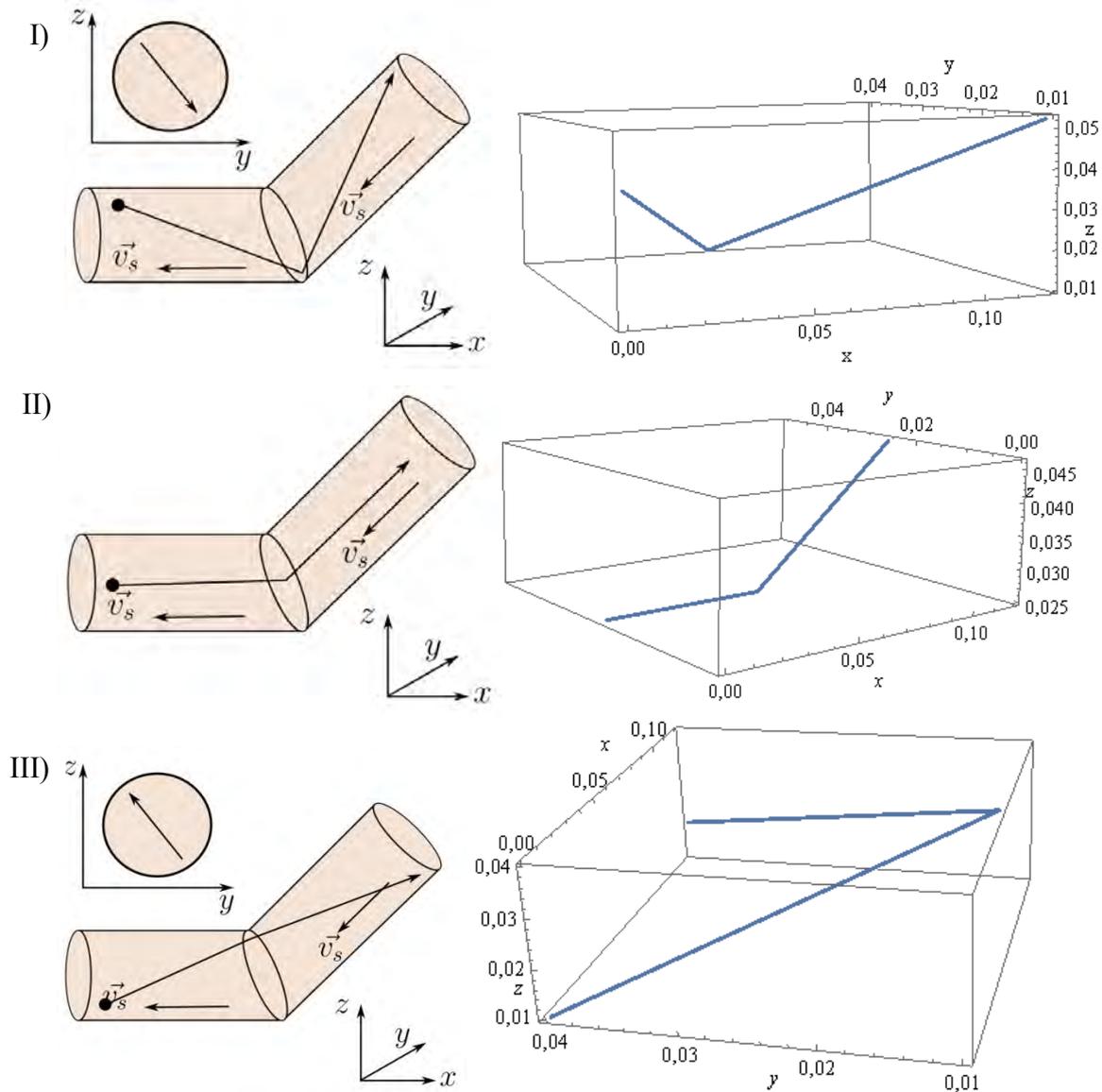


Рис. 2. Траектории движения частицы

Для нелинейной траектории движения система (8) может быть решена численно методом Эйлера [9]. Разностный аналог системы (8) в этом случае был следующим:

$$\begin{cases} m \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\delta t^2} = q(\varepsilon_0 E_x + \frac{y_i - y_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_z - \frac{z_i - z_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_y) - F_{sx}(\dot{x}) \\ m \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\delta t^2} = q(\varepsilon_0 E_y + \frac{x_i - x_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_z - \frac{z_i - z_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_x) \\ m \frac{z_{i+1} - 2z_i + z_{i-1}}{\delta t^2} = q(\varepsilon_0 E_z + \frac{x_i - x_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_y - \frac{y_i - y_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_x) - F_{sz}(\dot{z}) - mg \end{cases} \quad (9)$$

Следует принять во внимание, что движение осуществляется за счёт шести неизвестных компонент электромагнитного поля, а уравнений в системе три, поэтому для замыкания системы предположим, что движение будет осуществляться за счёт лишь трёх компонент поля. Сделать это возможно, поскольку трёх компонент достаточно, чтобы осуществлять движение тела по трём различным направлениям.

Тогда система (9) примет вид

$$\begin{cases} m \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{\delta t^2} = q(\varepsilon_0 E_x - \frac{z_i - z_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_y) - F_{sx} \left( \frac{x_i - x_{i-1}}{\delta t} \right) \\ m \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\delta t^2} = q\varepsilon_0 E_y \\ m \frac{z_{i+1} - 2z_i + z_{i-1}}{\delta t^2} = q \frac{x_i - x_{i-1}}{\delta t} \mu_0 B_y - F_{sz} \left( \frac{z_i - z_{i-1}}{\delta t} \right) - mg \end{cases} \quad (10)$$

Для проведения расчетов были приняты следующие исходные данные:

$$q = 1 \times 10^{-6} \text{ Кл}, r = 1 \times 10^{-6} \text{ м}, l = 0,12 \text{ м}, \eta = 3,5 \times 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}, R = 0,025 \text{ м}, \delta t = 0,01 \text{ с},$$

$$\mu_0 = 1, \varepsilon_0 = \frac{1}{85}, \rho = 1050 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, P_{\min} = 0,55 \text{ Па}, P_{\max} = 750 \text{ Па}, \nu = 0,05.$$

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

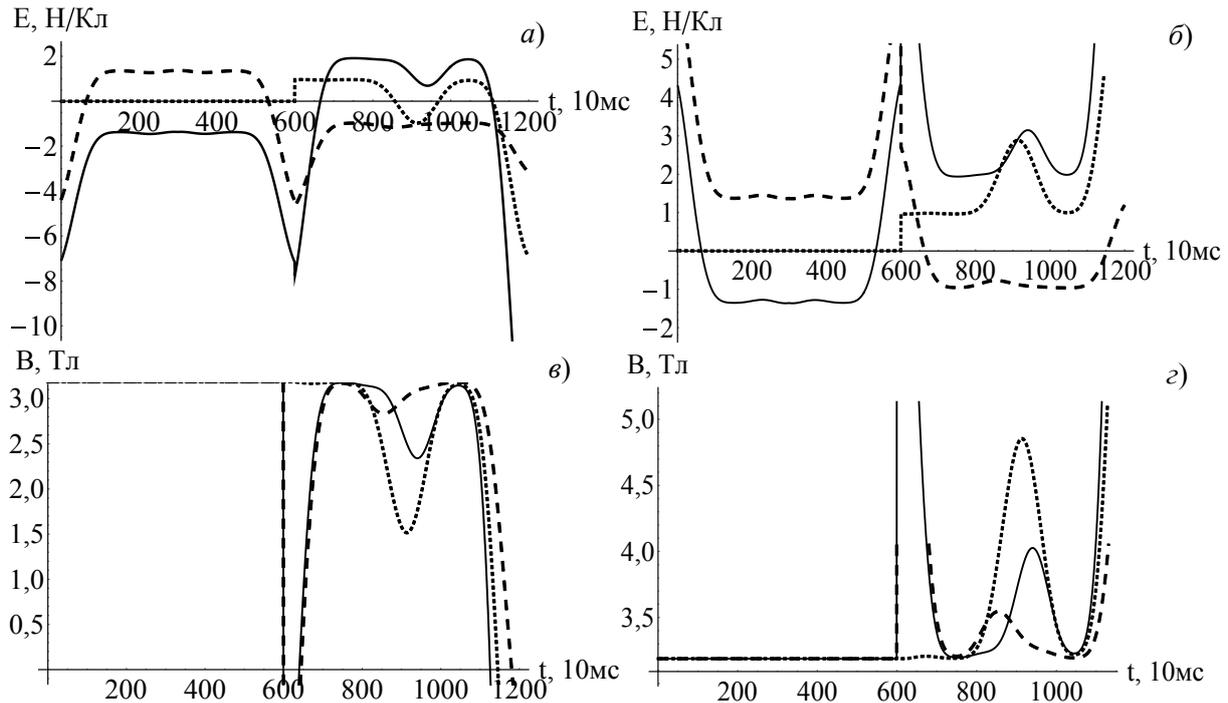


Рис. 3. Распределение полей для трёх разных траекторий а), б) –  $E_x$ ; в), г) –  $B_y$

Из рис. 4 видно, что изменение направления движения (по или против течения) влечёт за собой почти симметричное изменение в значениях интенсивности соответствующих полей.

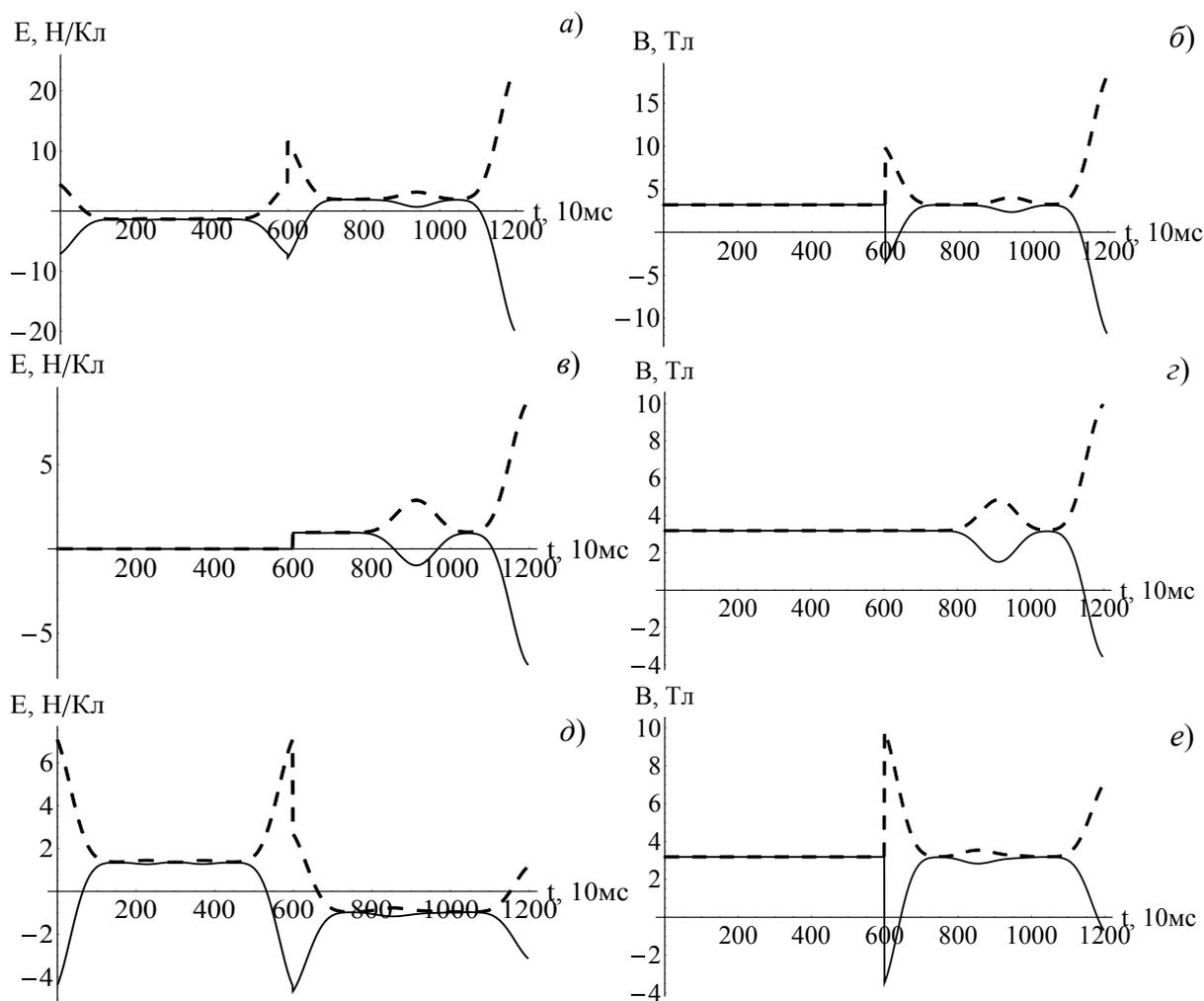


Рис. 4. Изменения компонент полей а), в), д) –  $E_x$ ; б), г), е) –  $B_y$ ) при движении частицы по течению и против – сплошная и пунктирная линии соответственно, а) и б) траектория I, в) и г) траектория II, д) и е) траектория III.

**Заключение.** Рассмотрен метод управления движением токопроводящего посредника для манипулирования наночастицей в канале с жидкостью. Метод основан на применении электромагнитных полей и учете как гидродинамического, так и электромагнитного сопротивления. Данный способ не предполагает механического воздействия на посредник, а лишь требует задания полей с параметрами необходимыми для движения посредника по требуемой траектории. 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 учётом колебания давления в нем, профиля и направления скорости жидкости, а также сил магнитного сопротивления и электрической проницаемости среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соيفер, В.А., Котляр, В.В., Хонина, С.Н. Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порождённые дифракционной оптикой / В.А. Соифер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2004. – Т. 35, № 6. – С. 1368-1432.

2. Коледов, В. "Нанопальцы" для наноинженеров / Коледов, В. // *Наноиндустрия*. – 2014, № 6. – С. 52-57.
3. Маширов, А.В. и др. Манипулирование микро- и нанообъектами при помощи эффекта памяти формы/ А.В. Маширов, В.А. Дикан, А.В. Иржак, Д.И. Захаров, П.В. Мазаев, А.М. Жихарев, А.П. Каманцев, В.С. Калашиников, В.В. Коледов, А.В. Шеляков, В.Г. Шавров // *Журнал радиоэлектроники*. – 2014, № 12. – С. 1-26.
4. 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.*
5. 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.
6. Щербаков, С.С., Электромагнитно-силовой метод манипулирования нанообъектами с учетом сопротивления среды / С.С. Щербаков, М.М. Полецук // *Теоретическая и прикладная механика: Межведомственный сборник научно-методических статей*. – Вып.32. –Минск: БНТУ, –2017. –С.40-45.
7. Савельев, И.В. Курс общей физики, т. 1. Механика. Молекулярная физика: Учебное пособие/ И.В. Савельев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 432 с.
8. Бродский, А.К. Механика полета насекомых и эволюция их крылового аппарата / А.К. Бродский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1988. – 208 с.
9. Самарский, А.А. Введение в численные методы: учебн. пособие для вузов / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1987. – 288 с.