

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАТИКА

DOI 10.15507/2079-6900.27.202503.364-379

Оригинальная статья

ISSN 2079-6900 (Print)

ISSN 2587-7496 (Online)

УДК 51-72:004.942:532.529:544.77

Моделирование захвата и транспортировки груза в жидкости системой самоорганизующихся магнитных частиц, контролируемых внешним полем

С. И. Мартынов, Л. Ю. Ткач

БОУ ВО «Сургутский государственный университет» (г. Сургут, Российская Федерация)

Аннотация. На основе экспериментов по захвату и перемещению груза системой самоорганизующихся частиц в магнитном поле моделируется динамика такого процесса. Транспортная система частиц представляет собой самособирающуюся структуру в виде одной замкнутой цепочки (двумерный случай) или двух параллельно расположенных замкнутых цепочек (трехмерный случай). В результате действия внешнего магнитного поля частицы приводятся во вращение и перемещаются поступательно. Учитывается гидродинамическое взаимодействие между всеми частицами и грузом, который с внешним полем не взаимодействует. Математическая модель включает в себя уравнения гидродинамики вязкой жидкости и динамики частиц в приближении малых чисел Рейнольдса. Для численного моделирования и визуализации полученных результатов проведены использовались специально разработанный программный комплекс. Проведенные численные расчеты подтвердили возможность управляемого захвата и переноса груза в случае расположения системы частиц и груза в одной плоскости. В трехмерном случае проведенное численное моделирование показывает, что захват груза и его перемещение транспортной структурой в виде параллельно расположенных замкнутых цепочек частиц не происходит. Полученные результаты качественно согласуются с известными экспериментами. Предлагаемая модель может быть использована для расчета динамики системы частиц, самоорганизующихся в замкнутые цепочки, в жидкости в присутствии посторонних тел.

Ключевые слова: коллективная динамика, динамическая структура, численное моделирование, вязкая жидкость, гидродинамическое взаимодействие, захват груза, перенос груза, внешнее поле, управление

Для цитирования: Мартынов С. И., Ткач Л. Ю. Моделирование захвата и переноса груза в жидкости системой частиц управляемой внешним полем // *Журнал Средневожского математического общества*. 2025. Т. 27, № 3. С. 364–379. DOI: 10.15507/2079-6900.27.202503.364-379

Об авторах:

Мартынов Сергей Иванович, докт. физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, БОУ ВО «Сургутский государственный университет» (628412 г. Сургут, пр. Ленина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6420-3315>, martynovsi@mail.ru

Ткач Леонилла Юрьевна, научный сотрудник, БОУ ВО «Сургутский государственный университет» (628412 г. Сургут, пр. Ленина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8814-9285>, leonilla7777@mail.ru

© Мартынов С. И., Ткач Л. Ю.



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

MSC2020 76D07, 76D09, 76D17

Modeling the trapping and transporting of cargo in a fluid by a system of self-assembled magnetic particles controlled by an external field

S. I. Martynov, L. Yu. Tkach

Surgut State University (Surgut, Russian Federation)

Abstract. The dynamics of this process is modeled based on experiments on the capture and movement of a load by a system of self-organizing particles in a magnetic field. The transport system of particles is a structure in the form of one closed chain (two-dimensional case) or two parallel closed chains (three-dimensional case). As a result of the action of the external field, the particles are set in rotation and move translationally. Hydrodynamic interaction between all particles and the load, which does not interact with the external field, is taken into account. The mathematical model includes equations of viscous fluid hydrodynamics and particle dynamics in the approximation of small Reynolds numbers. Numerical modeling and visualization of the obtained results are performed using a specially developed software package. The performed numerical calculations confirmed the possibility of capture and transfer of the load in the case of location of the particle system and the load in the same plane. In the three-dimensional case, the capture of cargo and its movement by the transport structure in the form of parallel chains of particles does not lead to the capture of cargo. The obtained results are in qualitative agreement with the experiments. The proposed model can be used to calculate the dynamics of a system of particles self-organizing into closed chains in a liquid in the presence of foreign bodies.

Keywords: collective dynamics, dynamic structure, numerical modeling, viscous fluid, hydrodynamic interaction, cargo capture, cargo transfer, external field, control

For citation: S. I. Martynov, L. Yu. Tkach. Modeling the trapping and transporting of cargo in a fluid by a system of self-assembled magnetic particles controlled by an external field. *Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva*. 27:3(2025), 364–379. DOI: 10.15507/2079-6900.27.202503.364-379

About the authors:

Sergey I. Martynov, D. Sci. (Phys. and Math.), Chief Researcher, Surgut State University (1 Lenina av., Surgut, 628412, Khanty-Mansiysk Autonomous District - Yugra, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6420-3315>, martynovsi@mail.ru

Leonilla Yu. Tkach, Researcher, Surgut State University (1 Lenina av., Surgut, 628412, Khanty-Mansiysk Autonomous District - Yugra, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8814-9285>, leonilla7777@mail.ru

1. Введение

Интенсивно проводимые исследования динамики микро и наночастиц частиц в жидкости, активируемых внешним полем, демонстрирует эмерджентность таких физических систем [1–2] и представляют практический интерес для управляемого внешним

полем тепло-массопереноса, как на макро, так и на микро и нано уровне. Например, наножидкости с магнитными частицами (феррожидкости) демонстрируют увеличение теплообмена и анизотропию термодиффузии в магнитных полях [3–4]. Проводятся исследования по применению наножидкостей с частицами из различного материала, в том числе и с магнитными свойствами, для увеличения нефтеотдачи пласта [5–6]. Создаются синтетические наномоторы для целевой доставки терапевтической нагрузки в клетку с помощью внешнего поля [7–8]. Изучается вопрос по захвату (или изолированию) и переносу на межфазной поверхности загрязнений в результате коллективной динамики системы активных частиц, саморганизующихся в динамическую структуру [9–10]. С процессами массопереноса в таких системах связаны исследования по управляемому формированию неравновесных динамических структур из активных частиц во внешнем переменном магнитном или электрическом поле [11–12]. Во всех приведенных выше случаях частицы в жидкости активируются внешней полем, приводя их в определенное движение, тем самым активируя и движение жидкости вокруг них. В свою очередь, формируемое течение жидкости влияет на динамику самих частиц. В результате такого взаимодействия получаем коллективную динамику всей системы. Поэтому, для того, чтобы понимать механизмы, отвечающие за преобразование динамики отдельных частиц в коллективную динамику всей системы в целом, необходимо корректно учитывать все взаимодействие между частицами и жидкостью. Гидродинамическое взаимодействие между большим числом частиц можно учесть, например, используя модель работы [13]. Взаимодействие между частицами, обладающими зарядами или дипольными моментами, можно учитывать в приближении парных взаимодействий или в приближении среднего поля, как это сделано в электродинамике [15]. В первом случае учет только парных взаимодействий для большого числа взаимодействующих частиц дает некорректный результат [14]. Во втором случае подход с использованием среднего поля означает, что масштаб, на котором рассматривается физический процесс, учитывающий межчастичные взаимодействия, на порядок превосходит размеры частиц и характерное расстояние между ними. Это достаточно грубое приближение гидродинамических процессов, связанных с коллективной динамикой частиц. Поэтому прямое численное моделирование гидродинамического взаимодействия частиц методом работы [13] дает более корректный результат.

Для демонстрации результативности такого подхода в работе [16] рассмотрен гидродинамический механизм формирования из равновесного состояния неравновесной динамической структуры системы дипольных частиц, вращающихся под действием переменного внешнего поля. В частности показано, что равновесные структуры в виде плоского правильного многоугольника при вращении частиц, входящих в эту структуру, начинают вращаться с некоторой угловой скоростью, сохраняя свою форму. Вращательное движение частиц стабилизирует форму структуры даже при наличии силы, действующей на частицы и перемещающей их поступательно. Как было показано в работе [17], действие силы перемешивает частицы в облаке и приводит, например, к периодическому изменению их положения в системе первоначально расположенных в вершинах правильного плоского четырехугольника. Проведенное численное моделирование динамики демонстрирует, что наличие вращения частиц приводит к устойчивости структуры в виде правильного многоугольника: такая система вращается как целое и одновременно поступательно перемещается, сохраняя свою первоначальную форму.

Рассмотренный в работе [16] подход использовался в настоящей работе и для моделирования процесса захвата, фиксации и транспортировки груза системой частиц, наблюдаемой в эксперименте [10]. В эксперименте пять прозрачных капсул, в которые

были помещены магнитные микрочастицы, самоорганизуются в контролируемую динамическую структуру на границе раздела воздух-жидкость в магнитном поле, прецессирующем относительно перпендикулярной поверхности раздела оси. Процесс формирования структуры включает сборку магнитных микрочастиц в цепочки частиц внутри капель и их взаимодействие между собой в магнитном поле. В работе представлено видео, показывающее, как происходит процесс захвата, удержания, транспортировки и освобождения груза за счет изменения угла прецессии однородной составляющей и создания градиентной составляющей магнитного поля вдоль поверхности раздела. Считается, что внутри капель магнитные частицы образуют замкнутые цепочки, взаимодействие которых между собой рассматривается в рамках парного диполь-дипольного взаимодействия. За счет прецессирующего магнитного поля вращающиеся капсулы образовали структуру в виде правильного пятиугольника, вращающегося вокруг оси симметрии, а за счет градиентной составляющей магнитного поля вся вращающаяся структура перемещалась по поверхности жидкости. Все это соответствует неравновесной динамике структуры из пяти вращающихся частиц, рассмотренной в работе [16], и поэтому используется в настоящей работе для моделирования процесса захвата, фиксации и транспортировки груза, соответственно эксперименту.

2. Основные уравнения и допущения

Рассматривались двухмерный и трехмерный случаи задачи. В двухмерном случае система из 5 твердых сферических частиц радиуса a , помещенных в несжимаемую жидкость вязкости η и обладающих магнитным моментом $\mathbf{m}$, в равновесном состоянии формирует плоскую структуру в виде правильного пятиугольника [18] в вершинах которого располагаются частицы, суммарный магнитный момент которых равен нулю. В настоящей работе моделируется динамика системы из пяти твердых сферических частиц, образующих двухмерную структуру, близкую к правильному пятиугольнику и лежащую в плоскости YOZ на окружности радиуса $3a$. Векторы магнитных моментов частиц также лежат в этой плоскости. Приложенное внешнее магнитное поле имеет составляющие в виде однородного переменного с вектором напряженности $\mathbf{H}_1 = \{0; -H_0 \cos(\Omega t); H_0 \sin(\Omega t)\}$, лежащим в плоскости структуры и с постоянным градиентом напряженности $\mathbf{H}_2 = \left\{0; y \frac{\partial H}{\partial y}; 0\right\}$. Переменное магнитное поле приводит частицы во вращательное движение, а градиентное магнитное поле создает силу, действующую на частицы в структуре. Вращательное и поступательное движение частиц под действием приложенных магнитных полей, в свою очередь, приводит к возникновению течения вязкой жидкости и формированию гидродинамических сил и моментов, действующих на частицы. Под грузом, который необходимо захватить и перенести указанной выше структурой, берется немагнитная сферическая частица радиуса b . Груз располагается в той же плоскости, что и структура из пяти магнитных частиц на некотором расстоянии от них и по направлению действия силы со стороны магнитного поля. Таким образом, на груз действует только сила со стороны жидкости, течение которой формируется движением магнитных частиц. Рассмотренный случай соответствует условиям расположения частиц и груза в эксперименте.

В трехмерном случае задачи рассматриваются две плоские структуры, каждая из которых соответствует рассмотренному выше двухмерному случаю, расположенные параллельно друг другу. В качестве груза рассматривается одиночная частица, расположенная между плоскостями двух структур, и цепочка из трех частиц, соединенных

между собой стержнями. Причем крайние частицы в цепочке находятся в плоскостях, соответствующих каждой из структур магнитных частиц, а средняя – между этими плоскостями. Внешнее магнитное поле имеет такие же составляющие, как и в двухмерном случае, а именно, $\mathbf{H}_1$ и $\mathbf{H}_2$.

Моделирование динамики рассматриваемой системы частиц следует работе [16]. Система уравнений динамики рассматриваемой системы включает уравнения движения жидкости и каждой частицы, входящей в систему. Уравнения динамики частиц учитывают как внутренние, так и внешние силы и моменты, действующих на частицы, в том числе и со стороны жидкости. Так как рассматривается случай малых чисел Рейнольдса, при которых в уравнениях течения жидкости отсутствуют слагаемые с ускорением, то и для уравнений динамики частиц необходимо использовать такое приближение. Сравнительные оценки показывают, что в случае малых чисел Рейнольдса силы инерции малы по сравнению вязким трением. Это позволяет использовать следующую систему уравнений для описания динамики системы частиц:

$$\mathbf{F}_k^{(i)} + \mathbf{F}_k^{(e)} + \mathbf{F}_k^{(h)} = 0, \quad \mathbf{T}_k^{(i)} + \mathbf{T}_k^{(e)} + \mathbf{T}_k^{(h)} = 0.$$

Здесь $\mathbf{F}_k^{(h)}$ – силы, $\mathbf{T}_k^{(h)}$ – моменты сил со стороны жидкости, $\mathbf{F}_k^{(e)}$, $\mathbf{T}_k^{(e)}$ – силы и моменты сил со стороны внешнего поля, $\mathbf{F}_k^{(i)}$, $\mathbf{T}_k^{(i)}$ – силы и моменты диполь-дипольного взаимодействия, действующие на частицу с номером k со стороны других частиц. Необходимо отметить, что в случае воздействия на частицы высокочастотного переменного магнитного поля силы инерции в уравнениях динамики частиц необходимо учитывать даже в случае малых чисел Рейнольдса. В настоящей работе рассматривается воздействие переменного магнитного поля с частотой, при которой силы инерции можно не учитывать (случай малых частот). Внутренние взаимодействия частиц учитываются в приближении парных диполь-дипольных взаимодействий, так как количество частиц мало.

Гидродинамические силы $\mathbf{F}_k^{(h)}$ и моменты $\mathbf{T}_k^{(h)}$, действующих на частицы, определяются из решения следующей системы уравнений гидродинамики для скорости $\mathbf{u}$ и давления p :

$$\nabla \mathbf{u} = 0, \quad -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{u} = 0.$$

Граничные условия на поверхности частицы с номером k имеют вид:

$$u_i = V_i^k + \Omega_{ij}^k x_j^k, \quad |\mathbf{X}^k| = a^k.$$

Здесь используются следующие обозначения: $\mathbf{V}^k$ – вектор абсолютной линейной скорости, Ω_{ij}^k – тензор угловой скорости, $\mathbf{X}^k$ – вектор положения точки жидкости относительно центра частицы с номером k и радиусом a^k .

Кроме того, при удалении от частиц должны выполняться условия:

$$u_i \rightarrow 0, \quad p \rightarrow p_0 \quad \text{если } |\mathbf{X}| \rightarrow \infty.$$

Здесь p_0 – невозмущенное давление в жидкости.

Так как межчастичное взаимодействие учитывается в виде парных диполь-дипольных взаимодействий, то внутренние силы и моменты имеют следующий вид

[19]:

$$\mathbf{F}_k^{(i)} = \sum_{l \neq k}^n \left[\frac{3}{r_{kl}^5} [(\mathbf{m}_k \mathbf{r}_{kl}) \mathbf{m}_l + (\mathbf{m}_l \mathbf{r}_{kl}) \mathbf{m}_k + (\mathbf{m}_k \mathbf{m}_l) \mathbf{r}_{kl}] - \frac{15}{r^7} (\mathbf{m}_k \mathbf{r}_{kl})(\mathbf{m}_l \mathbf{r}_{kl}) \mathbf{r}_{kl} \right],$$

$$\mathbf{T}_k^{(i)} = \sum_{l \neq k}^n \left[\frac{3}{r_{kl}^5} (\mathbf{m}_l \mathbf{r}_{kl})(\mathbf{m}_k \times \mathbf{r}_{kl}) + \frac{1}{r_{kl}^5} (\mathbf{m}_l \times \mathbf{m}_k) \right],$$

$$\mathbf{T}_l^{(i)} = \sum_{k \neq l}^n \left[\frac{3}{r_{kl}^5} (\mathbf{m}_k \mathbf{r}_{kl})(\mathbf{m}_l \times \mathbf{r}_{kl}) + \frac{1}{r_{kl}^5} (\mathbf{m}_k \times \mathbf{m}_l) \right].$$

В приведенных выражениях вектор $\mathbf{r}_{kl}$ соединяет центры частиц с номерами k и l , а суммирование берется по всем магнитным частицам, кроме немагнитной частицы, которая выступает в качестве груза. Более подробно о таком приближении можно прочитать в работе [16].

Помимо указанных выше внутренних сил и моментов, на частицу с номером k со стороны внешнего магнитного поля действуют соответствующие силы и моменты [15]:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_k^{(e)} &= m_k \nabla H_2, \\ \mathbf{T}_k^{(e)} &= (\mathbf{m}_k \times \mathbf{H}_1). \end{aligned} \quad (2.1)$$

Предполагается, что однородная составляющая внешнего магнитного поля с вектором напряженности $\mathbf{H}_1$ создает одинаковый момент силы, вращающий частицы в одном направлении. Неоднородная составляющая внешнего магнитного поля с вектором напряженности $\mathbf{H}_2$ создает силу, перемещающую частицы с магнитным моментом. При этом суммарные силы и моменты диполь-дипольного взаимодействия, действующие на выбранную частицу со стороны других, считаются равными нулю. Такое предположение упрощает задачу изучения влияния только гидродинамического взаимодействия частиц на формирование коллективной динамики системы. Более подробное обоснование такого предположения можно найти в работе [16]. Косвенным подтверждением допустимости такого предположения служит видео эксперимента по вращению системы самоорганизующихся магнитных капсул с сохранением формы структуры. Это, в свою очередь, согласуется с результатами моделирования, проведенными в работе [16] с принятыми допущениями. Таким образом, принятые допущения означают, что при моделировании учитываются действие на частицы силы трения со стороны жидкости, сила и внешний момент (2.1) со стороны магнитного поля, одинаковые для всех частиц.

3. Моделирование динамики системы

Как и в предыдущих работах авторов [13–14], при компьютерном моделировании задачи используются такие модельные параметры, как размер частицы $\hat{a}$, вязкость несущей жидкости $\hat{\eta}$, величина внешней силы $\hat{F}$ и внешнего момента силы $\hat{T}$, действующих на частицы с магнитным моментом $\hat{m}$ и промежуток времени $\hat{t}$. Модельные параметры связаны с реальными определенными соотношениями, следующих из условий подобия модельного и реального течений жидкости, а именно, равенств чисел Рейнольдса при вращательном и поступательном движении частиц:

$$\frac{\rho \hat{V} \hat{a}}{\hat{\eta}} = \frac{\rho V a}{\eta}, \quad \frac{\rho \omega a^2}{\eta} = \frac{\rho \hat{\omega} \hat{a}^2}{\hat{\eta}}.$$

Уравнения движения модельной и реальной частицы с номером k имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} 6\pi\eta a K V_k &= F_k^{(e)}, & 6\pi\hat{\eta}\hat{a} K \hat{V}_k &= \hat{F}_k^{(e)}, \\ 8\pi\eta a^3 S \omega &= T, & 8\pi\hat{\eta}\hat{a}^3 S \hat{\omega} &= \hat{T}. \end{aligned}$$

Коэффициенты K и S характеризуют геометрию структуры и не зависят от размеров частиц ее составляющих. Предполагается, что магнитные моменты частиц одинаково ориентированы во внешнем магнитном поле. Поэтому вращательный модельный момент $\hat{T}_k^{(e)} = |\mathbf{m} \times \mathbf{H}_1|$ прикладывается к каждой частице. Его величина берется равной $1 \text{ г}\cdot\text{см}^2/\text{с}^2$. Считается, что величина вращательного момента $\hat{T}$ остается постоянной, для чего необходимо, чтобы угол между векторами $\mathbf{m}$ и $\mathbf{H}$ оставался неизменным. Это возможно, когда угловая скорость частиц и частота вращения вектора $\mathbf{H}_1$ совпадают $\omega = \Omega$. Подробности обоснования этого предположения можно найти в работе [16]. Полагая, что частицы сделаны из одного магнитного материала их магнитный момент определяется выражением $m = M_s 4\pi a^3/3$. Здесь M_s величина намагниченности насыщения материала частиц. С учетом этого из уравнения вращательного движения частиц получаем

$$8K\pi\eta a^3 \omega = \frac{4\pi a^3}{3} M_s H, \quad 8K\pi\hat{\eta}\hat{a}^3 \hat{\omega} = \frac{4\pi\hat{a}^3}{3} M_s \hat{H}.$$

Из приведенных выше уравнений следуют соотношения между реальными и модельными параметрами при вращении частиц

$$\frac{\eta\omega}{\hat{\eta}\hat{\omega}} = \frac{H}{\hat{H}}.$$

Из условия подобия вращательного движения реальных и модельных частиц, получаем соотношение между реальным и модельным значением напряженности магнитного поля

$$H = \frac{\eta^2 \hat{a}^2}{\hat{\eta}^2 a^2} \hat{H}.$$

Аналогично считая, что сила $\hat{F}_k^{(e)}$ одинакова для всех магнитных частиц и ее величина равна $1 \text{ г}\cdot\text{см}/\text{с}^2$, из соотношений уравнений движения частиц и условия подобия течения жидкости получаем следующие соотношения:

$$V_k = \frac{\hat{a}\eta\hat{V}_k}{\hat{\eta}a}, \quad \hat{\eta}^2 = \eta^2 \frac{\hat{F}_k^{(e)}}{F_k^{(e)}}.$$

С учетом вида силы $F_k^{(e)} = m \frac{\partial H_2}{\partial y}$ и $m = \frac{M_s 4\pi a^3}{3}$ следует связь между реальным и модельным градиентом магнитного поля:

$$\frac{\partial H_2}{\partial y} = \frac{\eta^2 \hat{a}^3}{\hat{\eta}^2 a^3} \frac{\partial \hat{H}_2}{\partial y}.$$

Будем полагать, что материал частиц представляет собой ферромагнетик с намагниченностью насыщения $M_s = 450 \text{ Г}$. Из того, что модельное значение вращающегося момента $\hat{T}_k^{(e)}$ равно $1 \text{ г}\cdot\text{см}^2/\text{с}^2$ для модельной частицы размером $\hat{a} = 1 \text{ см}$,

получаем модельное значение напряженности вращающегося магнитного поля равное $\hat{H}_1 = 5.31 \cdot 10^{-4}$ Э. Модельное значение вязкости жидкости считалось равным $\hat{\eta} = 1 \text{ г}/(\text{см} \cdot \text{с})$, тогда для реальных частиц размером $a = 10^{-4} \text{ см}$ и реальной жидкости с вязкостью $\eta = 10^{-2} \text{ г}/(\text{см} \cdot \text{с})$ получаем, что фактическая величина напряженности магнитного поля должна быть $H_1 = 5.31$ Э. Модельный промежуток времени $\hat{t} = 1 \text{ с}$ при принятых значениях размера частиц и вязкости жидкости соответствует реальному промежутку, равному $t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Значения модельной и реальной частоты вращения магнитного поля в этом случае, соответственно, равны $\hat{\Omega} = 3.7 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, $\Omega = 3.7 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Для модельного и фактического градиента напряженности магнитного поля получаем, соответственно, $\partial \hat{H}_2 / \partial \hat{y} = 5.31 \cdot 10^{-4} \text{ Э}/\text{см}$ и $\partial H_2 / \partial y = 5.31 \cdot 10^4 \text{ Э}/\text{см}$.

4. Результаты моделирования динамики захвата и переноса груза самоорганизующейся системой вращающихся частиц

В качестве самоорганизующейся в результате межчастичного взаимодействия структурой дипольных частиц, используемой в качестве транспортного средства, рассматривается структура в виде правильного многоугольника, в вершинах которого располагаются частицы, и суммарный магнитный момент которых равен нулю. В настоящей работе моделируется динамика системы из пяти твердых сферических частиц, образующих двухмерную структуру, близкую к правильному пятиугольнику и лежащую в плоскости YOZ на окружности радиуса $3\hat{a}$. Дипольные моменты частиц также лежат в этой плоскости. Приложенное внешнее магнитное поле, лежащее в плоскости диполей, приводит их во вращательное движение. Частицы в структуре имеют модельный радиус $\hat{a} = 1 \text{ см}$. Считается, что вращательный модельный момент $\hat{M} = 1 \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}^2$, направленный вдоль оси OX , прикладывается к каждой частице. Действие момента приводит во вращение частицы, что формирует течение окружающей их вязкой жидкости. В результате гидродинамического взаимодействия частиц создается сила, перемещающая частицы. Первоначальная структура частиц меняется и формируется новая, как результат их коллективной динамики.

Ниже на рис. 4.1 последовательно представлено начальное положение транспортной системы частиц, обозначенных буквами A, B, C, D, E и груза F , а затем динамика сближения и захвата груза рассматриваемой системой магнитных частиц.

В момент времени, соответствующий последней конфигурации системы частиц и груза, внешнее магнитное поле выключается. В отсутствии внешнего поля включается механизм саморганизации структуры из-за диполь-дипольного взаимодействия частиц и система возвращается в равновесное состояние в виде правильного пятиугольника. Процесс саморганизации приведен на рис. 4.2. В результате этой динамики груз фиксируется внутри структуры.

Видео из работы [10] демонстрирует, что для переноса груза системой капсул приложенный момент сил со стороны магнитного поля увеличивается. Это приводит к увеличению скорости вращения как самих капсул, так и всей структуры в целом. При этом еще за счет магнитного поля увеличивается сила взаимодействия между капсулами, что приводит к уменьшению размера структуры в виде правильного пятиугольника. Все это способствует переносу груза, не давая ему вырваться из окружающего его кольца. Как показывают результаты моделирования работы [16], увеличение скорости вращения частиц под действием приложенного поля увеличивает скорость вращения всей

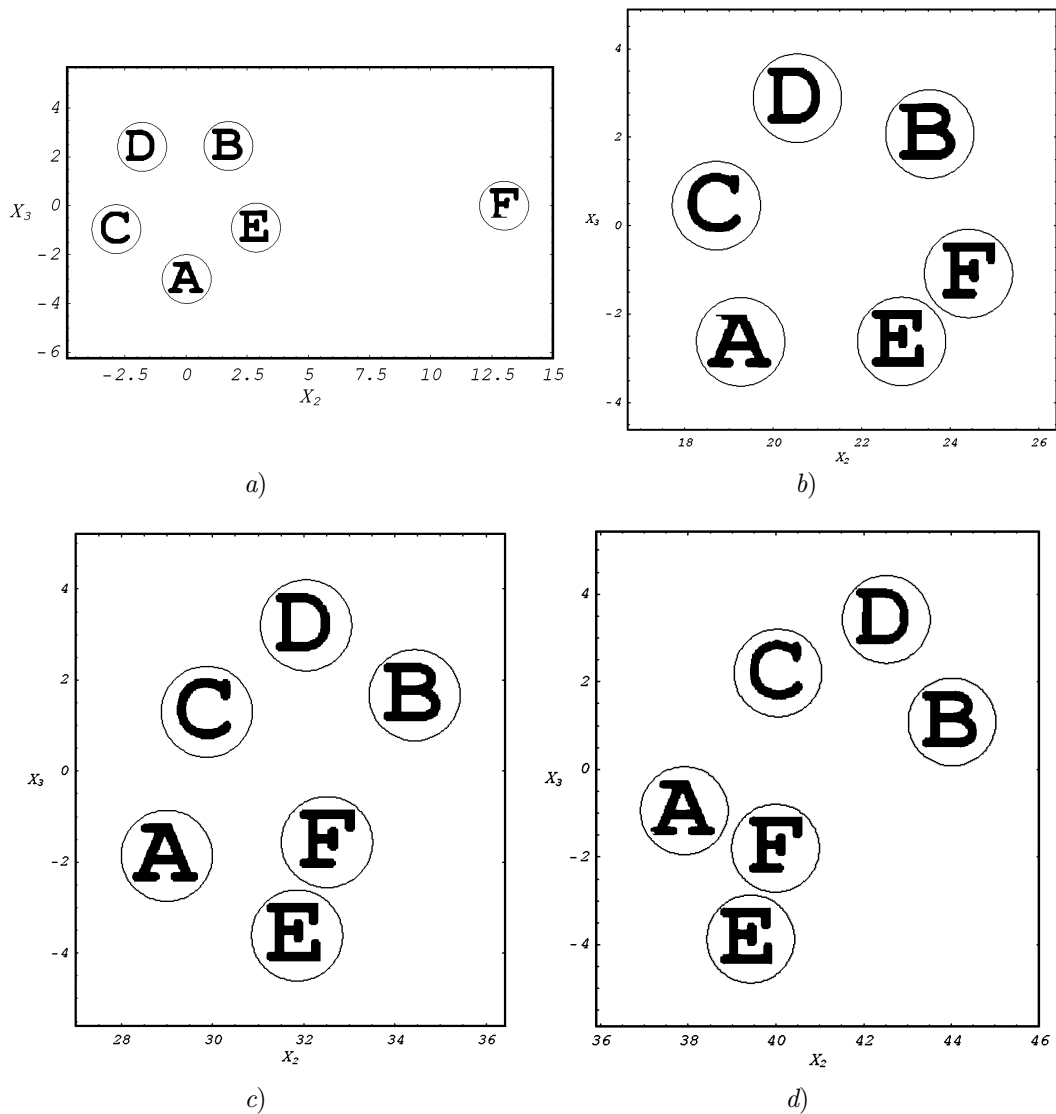


Рис. 4.1. Динамика захвата груза системой саморганизованных магнитных частиц: *a)* начальная положение системы и груза ($\hat{t} = 0$ с), *b)* момент начало захвата груза ($\hat{t} = 100$ с); динамика проникновения груза внутрь системы частиц: *c)* $\hat{t} = 270$ с, *d)* $\hat{t} = 323$ с

Fig 4.1. Dynamics of cargo capture by a system of self-organized magnetic particles: *a)* initial position of the system and cargo ($\hat{t} = 0$ s), *b)* moment of cargo capture start ($\hat{t} = 100$ s); dynamics of cargo penetration into the particle system: *c)* $\hat{t} = 270$ s, *d)* $\hat{t} = 323$ s

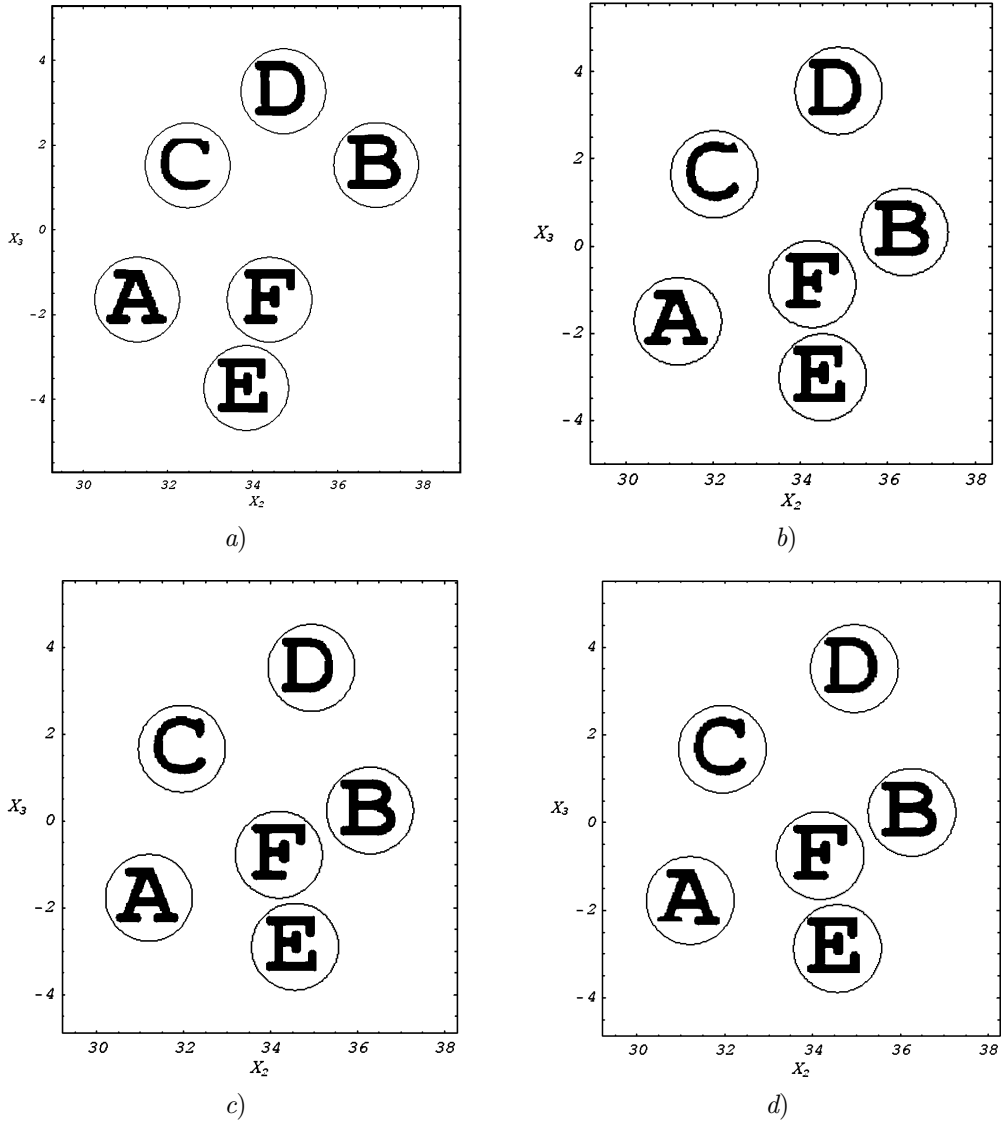


Рис. 4.2. Фиксация груза системой самоорганизующихся магнитных частиц и последовательное формирование равновесной структуры: а) $\hat{t} = 0$ с, б) $\hat{t} = 40$ с, в) $\hat{t} = 80$ с, г) $\hat{t} = 126$ с

Fig 4.2. Fixation of cargo by a system of self-organizing magnetic particles and sequential formation of an equilibrium structure: а) $\hat{t} = 0$ s, б) $\hat{t} = 40$ s, в) $\hat{t} = 80$ s, г) $\hat{t} = 126$ s

структуры и предотвращает ее распад из-за действия приложенных сил. Такой результат моделирования качественно согласуется с тем, что демонстрирует видео. Поэтому при моделировании переноса груза рассматривались случаи разных по величине приложенных моментов. В первом случае приложенный момент был равен по величине тому, что действовал при захвате груза. В результате при переносе груз достаточно быстро терялся системой частиц. Увеличение приложенного момента в два раза приводило к большей стабилизации сформированной структуры и переносу груза на значительно большее расстояние. На рис. 4.3 приведены результаты моделирования переноса груза при действии приложенного момента со стороны магнитного поля, равного $2 \text{ г}\cdot\text{см}^2/\text{с}^2$.

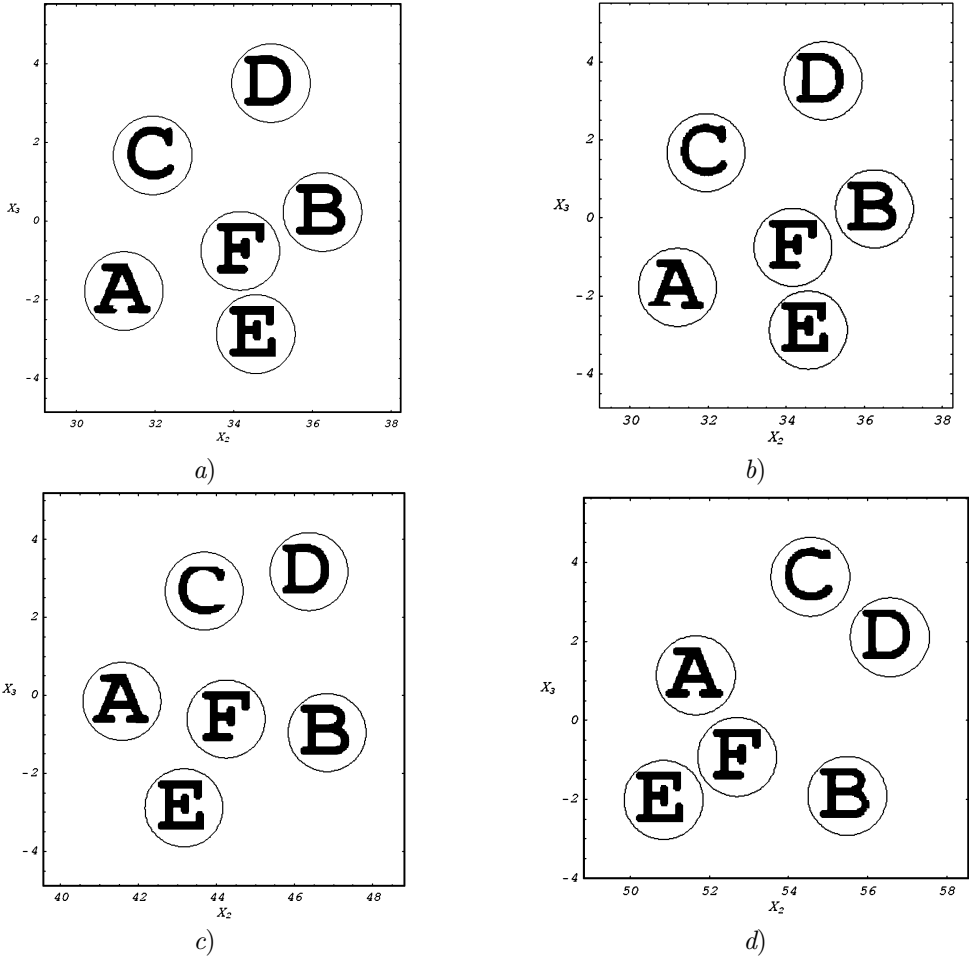


Рис. 4.3. Динамика переноса груза системой частиц и последовательное положение системы частиц и груза при их перемещении: а) $\hat{t} = 0 \text{ с}$, б) $\hat{t} = 60 \text{ с}$, в) $\hat{t} = 120 \text{ с}$, г) $\hat{t} = 150 \text{ с}$

Fig 4.3. Dynamics of cargo transfer by a system of particles and sequential position of the system of particles and cargo during their movement: а) $\hat{t} = 0 \text{ s}$, б) $\hat{t} = 60 \text{ s}$, в) $\hat{t} = 120 \text{ s}$, г) $\hat{t} = 150 \text{ s}$

При моделировании в трехмерном случае рассматривалась структура в виде двух параллельных двумерных, каждая из которых повторяет рассмотренную выше в виде правильного пятиугольника. Двухмерные структуры располагаются в параллельных плоскостях, каждая из которых перпендикулярна оси OX . Расстояние между параллельными плоскостями равно $4\hat{a}$. Моделировалось два варианта расположения груза. В первом случае груз в виде одиночной частицы располагался в плоскости, параллельной двумерным структурам, на расстоянии $2\hat{a}$ от каждой. Во втором случае груз представлял собой цепочку из трех частиц, связанных между собой стержнями. Крайние частицы в цепочке располагались в тех же плоскостях, что и двумерные структуры в виде пятиугольников из магнитных частиц. Средняя частица в цепочке располагалась в той же плоскости, что и в первом варианте, то есть между двумя плоскостями транспортной структуры. Во всех случаях проведенное моделирование показало, что наличие частицы между плоскостями, в которых находятся магнитные структуры, не приводит к захвату груза рассматриваемой транспортной системой. Предварительный анализ динамики используемой пространственной структуры и груза свидетельствует о необходимости наличия связей между соседними элементами в виде плоских пятиугольников, сохраняющими расстояние между ними. При этих условиях прогнозируется возможность захвата груза транспортной системой с указанными связями.

5. Заключение

Предложен гидродинамический механизм управляемой внешним магнитным полем динамики захвата, фиксации и переноса груза саморганизуемой системой магнитных частиц. Внешнее магнитное поле приводит во вращение и поступательно перемещает частицы с магнитным дипольным моментом. Считается, что груз не взаимодействует с магнитным полем, а с транспортной системой из магнитных частиц происходит только гидродинамическое взаимодействие. Моделировались двумерные и трехмерные случаи расположения магнитных частиц и груза. В двумерном случае система пяти магнитных частиц в отсутствии внешнего поля саморганизуется в структуру в виде правильного многоугольника с частицами в его вершинах. Результаты численного моделирования динамики захвата, фиксации и переноса груза в этом случае качественно согласуются с видео известного эксперимента. В трехмерном случае рассматривалась транспортная система в виде двух параллельно расположенных плоских структур из пяти магнитных частиц и с различными вариантами расположения груза относительно них. Во всех рассмотренных пространственных случаях положение груза или его одной из составных частей вне плоскости, в которой находится транспортная система, не приводит к его захвату и транспортировке. Таким образом, рассмотренный гидродинамический механизм захвата, фиксации и переноса груза системой магнитных частиц, управляемых внешним магнитным полем, дает положительный результат только в двумерном случае. Для использования указанного гидродинамического механизма для переноса груза в трехмерном случае требуется иная, чем предложенная в данной работе конструкция транспортной системы из магнитных частиц. Полученные результаты могут быть использованы для управления массопереносом в системе жидкость-частицы во внешнем магнитном поле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hana K., Kokot G., Tovkach O., Glatz A., Aranson I., Snezhko A. Emergence of self-organized multivortex states in flocks of active rollers. *PNAS*. 2020. Vol. 117, no. 18. P. 9706-9711. DOI: 10.1073/pnas.2000061117
2. Moran S., Schönhöfer P., Glotzer S. Shape-driven, emergent behavior in active particle mixtures. *New J. Phys.* 2022. Vol. 22. DOI: 10.1088/1367-2630/ac7161
3. Cao Y., Mansir I., Kumar S., Elhosiny A., Abed A. Heat transfer analysis on ferrofluid natural convection system with magnetic field. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. Vol. 14, no. 19. DOI: 10.1016/j.asej.2023.102122
4. Fiuza T., Sarkar M., Riedl J., Cebers A., Cousin F., Demouchy G., Depeyrot J., Dubois E., Gélébart F., Mériguet G., Perzynski R., Peyre V. Thermodiffusion anisotropy under magnetic field in ionic liquid-based ferrofluids. *Soft Matter, Royal Society of Chemistry*. 2021. Vol. 17. P. 4566-4577. DOI: 10.1039/d0sm02190c
5. Franco Camilo A., Franco Carlos A., Zabala R., Bahamon I. Forero A., Cortes F. Field Applications of Nanotechnology in the Oil and Gas Industry: Recent Advances and Perspectives. *Energy Fuels*. 2021. Vol. 35, no. 23. P. 19266-19287. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c02614
6. Alkalbani A., Chala G. A Comprehensive Review of Nanotechnology Applications in Oil and Gas Well Drilling Operations. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 4. DOI: 10.3390/en17040798
7. Zhang P., Wu G., Zhao C., Zhou L., Wang X., Wei S. Magnetic stomatocyte-like nanomotor as photosensitizer carrier for photodynamic therapy based cancer treatment. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2020. Vol. 194. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2020.111204
8. Gao W., Esteban-Fernandez de Avila B., Zhang L., Wang J. Targeting and Isolation of Cancer Cells Using Micro/Nanomotors. *Adv Drug Deliv Rev*. 2018. Vol. 125. P. 94-101. DOI: 10.1016/j.addr.2017.09.002
9. Kokot G., Kolmakov G., Aranson I., Snezhko A. Dynamic self-assembly and selforganized transport of magnetic micro-swimmers. *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. DOI: 10.1038/s41598-017-15193-z
10. Wang Q., Yang L., Wang B., Yu E., Yu J., Zhang L. Collective Behavior of Reconfigurable Magnetic Droplets via Dynamic Self-Assembly. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019. Vol. 11, no. 1. P. 1630-1637. DOI: 10.1021/acs.accounts.5b00025
11. Arigaa K., Nishikawa M., Mori T., Takey J., Shrestha L. K., Hill J. P. Self-assembly as a key player for materials nanoarchitectonics. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2019. Vol. 20, no. 1. P. 51-95. DOI: 10.1080/14686996.2018.1553108
12. Driscoll M., Delmotte B. Leveraging collective effects in externally driven colloidal suspensions: experiments and simulations. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. 2019. Vol. 40. P. 42-57. DOI: 10.1016/j.cocis.2018.10.002

13. Мартынов С. И., Ткач Л. Ю. Моделирование динамики агрегатов частиц в вязкой жидкости // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2015. Т. 55, № 2. С. 109-118. DOI: 10.7868/S0044466915020143
14. Мартынов С. И., Ткач Л. Ю. О механизме перемещения агрегатов частиц в вязкой жидкости в переменном однородном внешнем поле // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2019. Т. 50, № 3. С. 505-515. DOI: 10.31857/S0044466920110083
15. Тамм И. Е. Основы теории электричества. – М.: Физматлит, 2003. – 616 с.
16. Мартынов С. И., Ткач Л. Ю. Гидродинамический механизм формирования динамической структуры системы вращающихся частиц // *Журнал Средневолжского математического общества*. 2024. Т. 26, № 2. С. 175-194. DOI: 10.15507/2079-6900.26.202402.175-194
17. Баранов В. Е., Мартынов С. И. Влияние гидродинамического взаимодействия на скорость осаждения большого числа частиц в вязкой жидкости // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2004. № 1. С. 152-164.
18. Шутый А. М. Равновесные значения и динамика суммарного магнитного момента систем магнитных диполей // *ЖЭТФ*. 2010. Т. 137. Вып. 2. С. 277-286.
19. Батыгин В. В., Топтыгин И. Н. Сборник задач по электродинамике. – М.: Наука, 1970. – 488 с.

*Поступила 24.02.2025; доработана после рецензирования 10.04.2025;
принята к публикации 27.08.2025*

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. K. Hana, G. Kokot, O. Tovkach, A. Glatz, I. Aranson, A. Snezhko, “Emergence of self-organized multivortex states in flocks of active rollers”, *PNAS*, **117**:18 (2020), 9706-9711. DOI: 10.1073/pnas.2000061117
2. S. Moran, P. Schönhöfer, S. Glotzer, “Shape-driven, emergent behavior in active particle mixtures”, *New J. Phys.*, **22** (2022). DOI: 10.1088/1367-2630/ac7161
3. Y. Cao, I. Mansir, S. Kumar, A. Elhosiny, A. Abed, “Heat transfer analysis on ferrofluid natural convection system with magnetic field”, *Ain Shams Engineering Journal*, **14** (2023). DOI: 10.1016/j.asej.2023.102122
4. T. Fiuza, M. Sarkar, J. Riedl, A. Cebers, F. Cousin, G. Demouchy, J. Depeyrot, E. Dubois, F. Gélébart, G. Mériguet, R. Perzynski, V. Peyre, “Thermodiffusion anisotropy under magnetic field in ionic liquid-based ferrofluids”, *Soft Matter, Royal Society of Chemistry*, **17** (2021), 4566-4577. DOI: 10.1039/d0sm02190c

5. Camilo A. Franco, Carlos A. Franco, Richard D. Zabala, Italo Bahamon, Angela Forero, Farid B. Cortes, “Field Applications of Nanotechnology in the Oil and Gas Industry: Recent Advances and Perspectives”, *Energy Fuels*, **35**:23 (2021), 19266–19287. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c02614
6. A. Alkalbani, G. Chala, “A Comprehensive Review of Nanotechnology Applications in Oil and Gas Well Drilling Operations”, *Energies*, **17**:4 (2024). DOI: 10.3390/en17040798
7. P. Zhang, G. Wu, C. Zhao, L. Zhou, X. Wang, S. Wei, “Magnetic stomatocyte-like nanomotor as photosensitizer carrier for photodynamic therapy based cancer treatment”, *Colloids Surf., B*, **19** (2020). DOI: 10.1016/j.colsurfb.2020.111204
8. W. Gao, de Avila B. Esteban-Fernandez, L. Zhang, J. Wang, “Targeting and Isolation of Cancer Cells Using Micro/Nanomotors Emergent pattern formation of active magnetic suspensions in an external field”, *Adv Drug Deliv Rev.*, **125** (2018), 94–101. DOI: 10.1016/j.addr.2017.09.002
9. G. Kokot, G. V. Kolmakov, I. S. Aranson, A. Snezhko, “Dynamic self-assembly and self-organized transport of magnetic micro-swimmers”, *Scientific Reports*, **7** (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-15193-z
10. Q. Wang, L. Yang, B. Wang, E. Yu, J. Yu, L. Zhang, “Collective Behavior of Reconfigurable Magnetic Droplets via Dynamic Self-Assembly”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**:1 (2019), 1630–1637. DOI: 10.1021/acs.accounts.5b00025
11. K. Arigaa, M. Nishikawa, T. Mori, J. Takey, L. K. Shrestha, J. P. Hill, “Self-assembly as a key player for materials nanoarchitectonics”, *Science and Technology of Advanced Materials.*, **20**:1 (2019), 51–95. DOI: 10.1080/14686996.2018.1553108
12. M. Driscoll, B. Delmotte, “Leveraging collective effects in externally driven colloidal suspensions: experiments and simulations”, *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, **40** (2019), 42–57. DOI: 10.1016/j.cocis.2018.10.002
13. S. I. Martynov, L. Yu. Tkach, “Simulation of Particle Aggregate Dynamics in a Viscous Fluid”, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, **55**:2 (2015), 282–290. DOI: 10.7868/S0044466915020143
14. S. I. Martynov, L. Yu. Tkach, “Mechanism of Moving Particle Aggregates in a Viscous Fluid Subjected to a Varying Uniform External Field”, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, **59**:3 (2019), 475–483. DOI: 10.31857/S0044466920110083
15. I. E. Tamm, *Fundamentals of the Theory of Electricity*, M.: Fizmatlit, 2003, 616 p.
16. S. I. Martynov, L. Yu. Tkach, “Hydrodynamic mechanism for dynamical structure formation of a system of rotating particles”, *Zhurnal Srednevolzhskogo Matematicheskogo Obshchestva*, **26**:2 (2024), 175–194. DOI: 10.15507/2079-6900.26.202402.175-194
17. V. E. Baranov, S. I. Martynov, “The influence of hydrodynamic interaction on the rate of sedimentation of a large number of particles in a viscous fluid”, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of fluid and gas*, 2004, no. 1, 152–164.

18. A. M. Shutyy, “Equilibrium values and dynamics of the total magnetic moment of systems of magnetic dipoles”, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, **137**:2 (2010), 277-286.
19. V. V. Batygin, I. N. Toptygin, *Collection of problems on electrodynamics*, M. : Nauka, 1970, 488 p.

Submitted 24.02.2025; Revised 10.04.2025; Accepted 27.08.2025

The authors have read and approved the final manuscript.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.