

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ МИЦЕЛЛ В АКТИВНОЙ МАТЕРИИ НА ОСНОВЕ СКОПЛЕНИЯ РОБОТОВ

Молодцова А.А. (Университет ИТМО), Бузаков М.К. (Университет ИТМО),
Сенникова Д.В. (Университет ИТМО), Дмитриев А.А. (Университет ИТМО)
Научный руководитель – к.ф.-м.н. Олехно Н.А. (Университет ИТМО)

Введение. Активная материя – это направление физики конденсированного состояния, посвященное исследованию свойств скоплений частиц, каждая из которых может преобразовывать запас своей внутренней энергии в направленное движение. Неравновесный характер таких систем приводит к ряду интересных физических явлений. В природе встречается огромное количество примеров систем активной материи: как макроскопические – стаи птиц, косяки рыб [1] и толпы людей, так и микроскопические, от колоний бактерий [2] до коллоидных микрочастиц [3]. В настоящей работе изучаются скопления из роботов асимметричной каплевидной формы с заостренным носом, параметры которых в экспериментах можно гибко контролировать, а также отслеживать скорости и положения всех роботов. Частицы такой формы представляют интерес ввиду нарушения симметрии. В частности, недавно было теоретически предсказано образование мицелл в таких системах [4], связанное исключительно с движением частиц и нарушением симметрии, а не со смещением плотности распределения заряда, как в поверхностно-активных веществах, тоже способных образовывать мицеллы.

Основная часть. В данной работе рассматривается скопление прямолинейно движущихся роботов, помещенных в параболический потенциал в виде спутниковой тарелки с большой осью 120 см, малой осью 110 см и глубиной 20 см. Такой мягкий потенциал предотвращает оседание роботов на границе системы, в отличие от резкого барьера. Каждый робот состоит из сборного пластикового корпуса, распечатанного на 3D принтере и включающего крышку в виде соединенных треугольника длиной $L=37.6$ мм и окружности радиусом $R=47.7$ мм, и основание, к которому крепится плата управления с вибромотором. При колебаниях мотора робот приходит в движение за счёт эластичных щетинок, помещенных на основании под платой параллельно оси вращения мотора и соприкасающихся с поверхностью, по которой движется робот. Размеры корпуса подобраны таким образом, чтобы восемь роботов формировали мицеллу. В экспериментах менялось положение центра масс робота при помощи помещения утяжелительного болта на нос робота. В частности, были рассмотрены системы с положением центра масс на расстоянии 45 мм и 35 мм от носа робота.

В ходе экспериментов проводилось исследование параметра порядка, формула для подсчета которого также была предложена в рамках данной работы и протестирована на различных конфигурациях системы из рассматриваемых роботов. Варьируемыми параметрами в системе являлись количество роботов, которое равнялось $N=15,30,45$, положение центра масс, средняя скорость движения роботов, меняющаяся путём переключения мощности вибрации мотора, а также величина трения между боковыми поверхностями роботов. Движение системы записывалось с помощью видеокамеры, расположенной на штативе над системой из роботов в параболической тарелке. Затем при помощи программного пакета OpenCV были извлечены положения и угловые ориентации каждого робота. Для статистического усреднения каждый набор параметров повторялся для пяти реализаций системы.

В результате экспериментов было показано, что в системах со смещённым к носу робота

центром масс наблюдается мицеллизация в то время, как при положении центра масс ближе к середине робота мицеллизации нет. Кроме того, при малых плотностях заполнения тарелки роботами и при малых скоростях движения роботов мицеллы не образуются. При сравнении рассчитанных параметров порядка для различных значений трения между роботами, усредненных по пяти реализациям с разными начальными положениями роботов, был сделан вывод, что чем больше трение между роботами, тем больше эффективность мицеллообразования.

Выводы. В данной работе исследованы зависимости параметра порядка от времени в системе активной материи в виде скопления из роботов. Экспериментальные исследования показывают, что при изменении таких характеристик системы, как трение между роботами, скорость движения и плотность заполнения системы можно управлять эффективностью образования мицелл. Было продемонстрировано формирование мицелл, а также предложена формула для количественной оценки мицеллообразования. Подобные движущиеся частицы с нарушенной симметрией недавно были реализованы на микроуровне [5,6,7], что открывает перспективы дальнейших исследований мицеллизации активных частиц.

Список использованных источников:

1. Filella A, Nadal F, Sire C, Kanso E, Eloy C. Model of Collective Fish Behavior with Hydrodynamic Interactions // *Phys Rev Lett.* – 2018. – 120, 198101.
2. Mathijssen AJTM, Guzmán-Lastra F, Kaiser A, Löwen H. Nutrient Transport Driven by Microbial Active Carpets // *Phys Rev Lett.* – 2018. – 121, 248101.
3. Villa, K., Pumera, M. Fuel-free light-driven micro/nanomachines: Artificial active matter mimicking nature // *Chemical Society reviews.* – 2019. – 48, 4966-4978.
4. T. Kruglov and A. Borisov. Micellisation and aggregation of self-propelled hard circulanles // *Particles* 2021. – 2021. – URL https://www.scipedia.com/public/Kruglov_Borisov_2022a.
5. Zameer Hussain Shah, Shuo Wang, Longbin Xian, Xuemao Zhou, Yi Chen, Guanhua Lin, Yongxiang Gao. Highly efficient chemically-driven micromotors with controlled snowman-like morphology // *Chemical Communications.* – 2020. – 56, 15301.
6. Baohu Dai, Jizhuang Wang, Ze Xiong, Xiaojun Zhan, Wei Dai, Chien-Cheng Li, Shien-Ping Feng, Jinyao Tang. Programmable artificial phototactic microswimmer // *Nature Nanotechnology.* – 2016. – 11, 1087–1092.
7. Liu M., et al. Light-driven Au-ZnO nanorod motors for enhanced photocrystallite degradation of tetracycline // *Nanoscale.* – 2022. – 14, 12804–12813.