

# ОБРАЗОВАНИЕ ПРОБОК В СКОПЛЕНИИ РОБОТОВ, ДВИЖУЩИХСЯ ПО ЗАМКНУТОЙ ТРАССЕ С СУЖЕНИЕМ<sup>1</sup>

Розенблит А.Д., Бузаков М.К., Молодцова А.А., Дмитриев А.А., Олехно Н.А.

Физический факультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия  
alina.rozenblit@metalab.ifmo.ru, mikhail.buzakov@metalab.ifmo.ru, a.molodtsova@metalab.ifmo.ru,  
alexey.dmitriev@metalab.ifmo.ru, nikita.olekhno@metalab.ifmo.ru

*Аннотация.* В данной работе экспериментально исследован локальный фазовый переход образования пробки в скоплении из роботов, прямолинейно движущихся по замкнутому кольцевому треку с сужением. Рассмотрено влияние плотности заполнения трека роботами, скорости движения роботов, а также ширины участка с сужением на движение такого скопления. Полученные результаты могут быть применены для оптимизации транспортных систем и при проектировании общественных пространств с целью снижения вероятности возникновения пробок в скоплениях из большого числа людей.

*Ключевые слова:* самодвижущиеся частицы, активная материя, групповая робототехника, образование пробок, вибрирующий робот.

## Введение

Образование пробок является универсальной особенностью транспортных систем, проявляющейся как для автотранспорта на дорогах [1], так и в скоплениях людей, проходящих через узкие выходы из помещений [2, 3]. С позиций физики, такие явления связаны с фазовым переходом заторообразования (jamming transition), соответствующим переходу скопления подвижных частиц в аморфное твёрдое состояние при увеличении локальной плотности их упаковки [4]. Данный переход исследуется как в пассивных гранулярных средах [5], так и в системах из активно движущихся частиц [6]. Можно выделить два основных типа перехода заторообразования – объёмный переход, связанный с превышением плотностью заполнения системы соответствующего критического значения, а также локальное образование пробок, происходящее из-за наличия препятствий или сужений.

Подобный локальный фазовый переход исследовался экспериментально на примере скопления из вибрирующих роботов, движущихся прямолинейно с фиксированной скоростью по замкнутой кольцевой трассе с сужением [7]. В приведённом примере переключение между фазами системы с образованием пробок и без образования пробок достигалось только за счет изменения количества роботов, в то время, как формирование локальных заторов в сужении при изменении скорости роботов и ширины участка трассы с сужением экспериментально не исследовались.

В настоящей работе экспериментально исследуются свойства перехода заторообразования в скоплении движущихся роботов, проходящих через сужение в замкнутой кольцевой трассе, в зависимости от числа роботов в скоплении при фиксированной площади трассы (определяющего плотность заполнения системы), скорости движения роботов и ширины сужения.

## 1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка включает в себя набор движущихся роботов [8] овальной формы, Рис. 1 (а), помещенных между двумя барьерами круговой формы с внешним диаметром  $D_1 = 59$  см и с внутренним диаметром  $D_2 = 30$  см, и толщинами 3 см и 1,5 см, соответственно. Центры барьеров смещены относительно друг друга с целью вариации минимальной ширины зазора между ними  $h$ , Рис. 1 (б).

---

<sup>1</sup> Работа поддержана грантом Российского научного фонда, проект №24-79-10314.

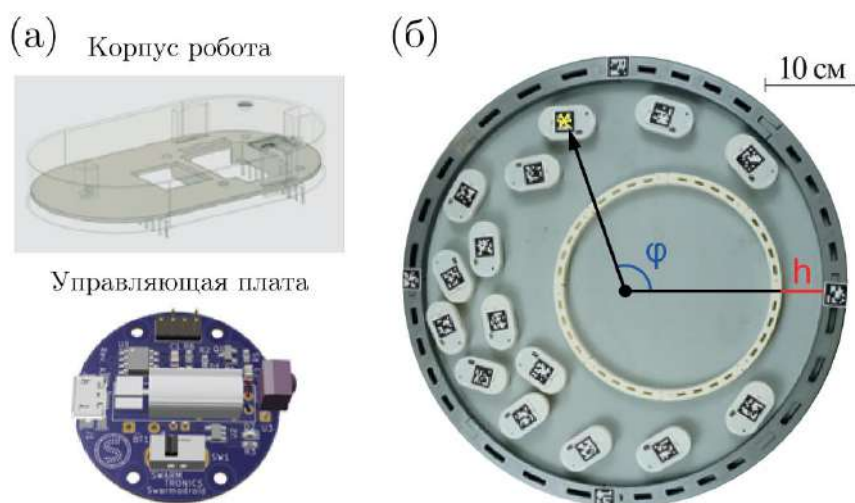


Рис. 1. (а) 3д-модель корпуса робота, состоящего из крышки овальной формы, основания и щетинок (верхняя панель), а также печатная плата электрической управляющей схемы с вибромотором (нижняя панель). (б) Фотография экспериментальной установки в конфигурации, включающей 15 движущихся роботов, помещенных между двумя неконцентрическими барьерами круговой формы с шириной минимального зазора  $h$ , величина  $\varphi$  обозначает угол робота в полярной системе координат

Корпуса роботов имеют модульную конструкцию и состоят из трёх напечатанных на 3D-принтере компонентов: крышки, основания и эластичных щетинок, выполняющих функцию ног робота, Рис. 1 (а). На верхней поверхности крышки каждого робота размещен индивидуальный маркер ArUco для распознавания робота и извлечения его характеристик движения при помощи библиотеки AMRu, написанной на языке программирования Python [9]. В основании каждого робота размещена печатная плата электрической схемы управления, включающая в себя микроконтроллер, вибромотор, аккумулятор и ИК-приемник для синхронного включения и выключения роботов и изменения их скорости движения при помощи пульта дистанционного управления, Рис. 1 (а). Скорость движения регулируется посредством изменения коэффициента заполнения широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения, подаваемого на вибромотор. Подробное описание конструкции робота представлено в работе [8]. Собранный робот имеет размеры 83 x 45 x 26 мм и массу 23 г.

Также в экспериментах используется HD-камера Sony ZV-E10, осуществляющая запись со скоростью 50 кадров в секунду. Полученные экспериментальные видеозаписи обрабатываются с помощью библиотеки AMRu [9], которая позволяет определять координаты роботов в декартовой и полярной системах и их ориентацию на каждом кадре.

## 2. Характеристики движения одиночного робота

Для того, чтобы изучить поведение одиночного робота при разных уровнях ШИМ, мы измеряем скорости и спектры вибрации робота на трех уровнях ШИМ: 10%, 20%, и 30%. Скорости движения роботов измеряются для пяти различных случайным образом выбранных роботов, и усредняются по пяти измерениям для каждого робота, Рис. 2 (а). Из Рис. 2 (а) видно, что скорость движения роботов возрастает с увеличением уровня ШИМ. При рассматриваемых уровнях ШИМ скорости варьируются от 12 до 26 см/с.

Для получения спектра вибрации, колебания отдельного робота измерялись с помощью акселерометра, закрепленного на крышке его корпуса, с последующим применением преобразования Фурье к полученным временным рядам. Результаты, представленные на Рис. 2 (б), показывают монотонную зависимость основной гармоники от уровня ШИМ. В частности, пики амплитуды вибрации наблюдаются на частотах 170 Гц, 220 Гц, и 250 Гц для уровня ШИМ 10%, 20%, и 30%, соответственно.

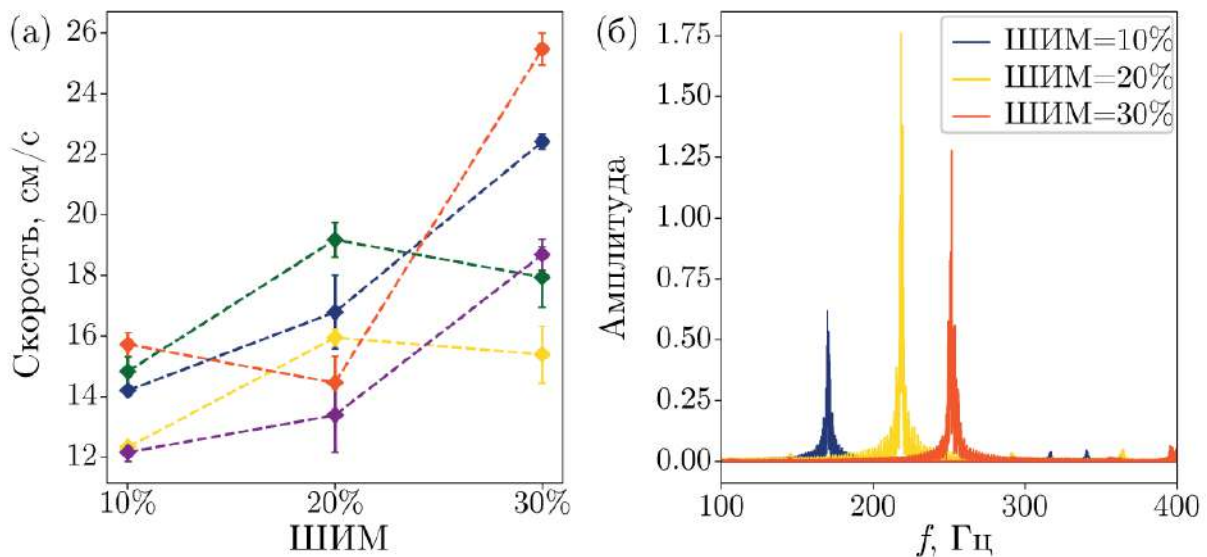


Рис. 2. Зависимость характеристик движения роботов от уровня ШИМ. (а) Скорость движения для пяти различных роботов, усредненная по пяти реализациям для каждого робота, при уровнях ШИМ 10%, 20%, и 30%. Разные цвета линий соответствуют разным роботам. (б) Спектр вибрации одиночного робота. Разные цвета линий соответствуют различным уровням ШИМ

### 3. Экспериментальные результаты

В начале каждого эксперимента  $N$  роботов помещаются между двумя барьерами с минимальной шириной зазора  $h$ , Рис. 1 (б). С помощью пульта управления осуществляется одновременное включение всех роботов с заданным уровнем ШИМ. В настоящей работе рассмотрены системы со следующими значениями параметров: минимальная ширина сужения трассы  $h = \{5 \text{ см}, 6 \text{ см}, 6.7 \text{ см}, 7.5 \text{ см}\}$ , уровень ШИМ =  $\{10\%, 20\%, 30\%\}$ , число роботов в системе  $N = \{10, 12, 15, 17, 20\}$ . Для каждого набора параметров движение роботов записывается в течение 120 секунд, и эксперимент повторяется по четыре раза с различными начальными положениями.

Для изучения движения роботов в системе мы рассматриваем полярные координаты каждого робота относительно центра внешнего барьера, Рис. 1 (б). Примеры зависимостей полярного угла роботов от времени, представленные на Рисунке 3, соответствуют свободному движению скопления роботов (Рис. 3 (а)), образованию и последующей релаксации временного затора (Рис. 3 (б)) и образованию постоянного затора (Рис. 3 (в)) в различных реализациях экспериментов с заданными параметрами  $N$ ,  $h$  и ШИМ. Зависимости полярного угла от времени для свободного движения скопления роботов в основном представляют собой периодически возрастающие кривые, Рис. 3 (а). В случае образования временного затора, наблюдаемые плато в интервале от  $t = 30 \text{ с}$  до  $t = 50 \text{ с}$  сменяются возрастающими кривыми, указывающими на восстановление движения скопления роботов, Рис. 3 (б). Наконец, образование затора, начинающееся около  $t = 50 \text{ с}$  на Рис. 3 (в), характеризуется возникновением плато траекторий до конца эксперимента, соответствующих полной остановке движения роботов.

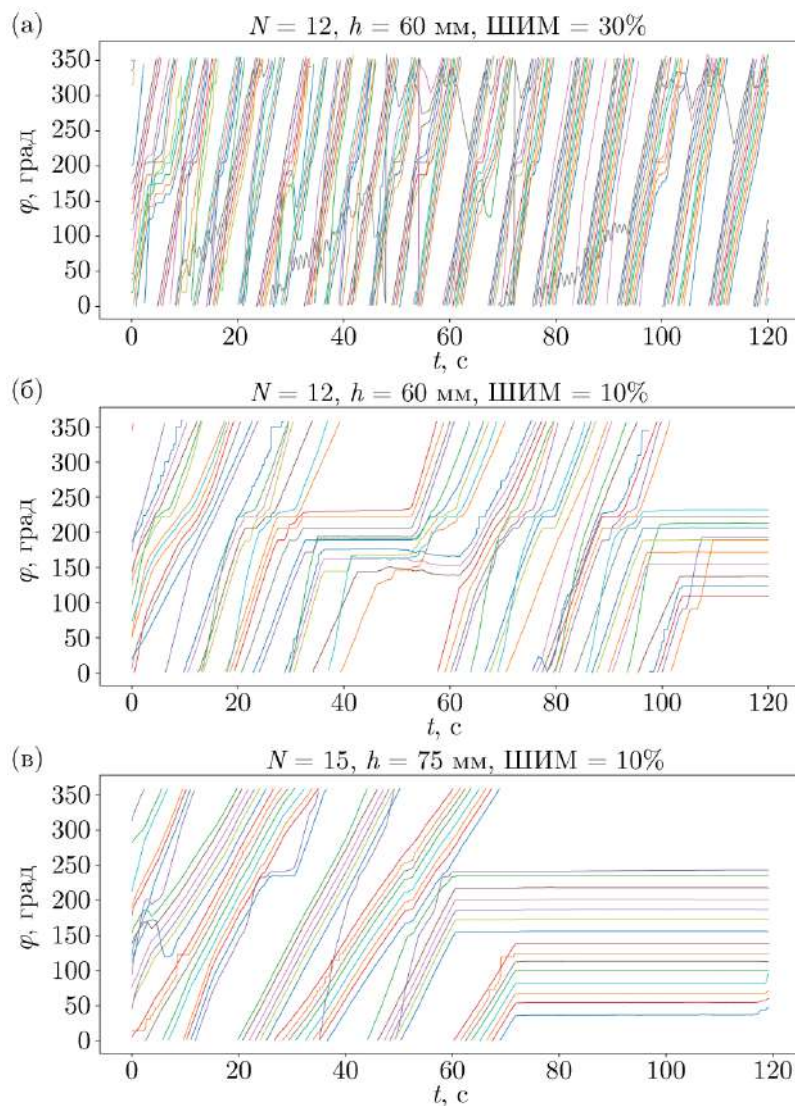


Рис. 3. Примеры экспериментальных зависимостей полярного угла роботов в скоплении от времени, демонстрирующих состояния (а) свободного движения роботов, (б) появление и релаксацию временного затора, (в) образования постоянного затора. Параметры  $N$ ,  $h$ , и ШИМ обозначают количество роботов в системе, минимальную ширину сужения и уровень ШИМ (характеризующий скорость движения роботов), соответственно. Цвета кривых соответствуют различным роботам в одной реализации эксперимента

Для оценки динамики системы вводится параметр  $\Psi$ , определяемый с помощью формулы

$$\Psi(k) = \sum_{i=2}^k (\varphi_i - \varphi_{i-1}), \quad (1)$$

где  $(\varphi_i - \varphi_{i-1})$  – смещение полярного угла каждого робота между  $i$ -ым и  $(i-1)$ -ым кадрами, усредненное по  $N$  роботам,  $k$  – номер текущего кадра. Значения полярного угла извлекаются для каждого пятого кадра (т.е., временной шаг составляет 0.1 с при частоте съемки 50 кадров в секунду). Линейная зависимость параметра  $\Psi(t)$  соответствует свободному движению скопления роботов по кольцевой трассе, тогда как плато  $\Psi(t)$  отвечает состоянию, когда система перестает двигаться из-за формирования пробки в сужении трассы, Рис. 4. В экспериментах наблюдается различие в динамике между разреженными системами с меньшим числом роботов в скоплении, в большинстве случаев характеризуемыми непрерывным движением скопления вдоль трассы, Рис. 4(а, б), и более плотно упакованными системами, демонстрирующими образование заторов для большинства экспериментов, Рис. 4(в-д).

Первый выявленный эффект состоит в следующем. Контринтуитивно, для разреженных систем с числом роботов  $N = 10, 12$ , увеличение ширины сужения трассы  $h$  сопровождается не увеличением, а, напротив, снижением средней подвижности скопления роботов и образованием заторов. Такое поведение можно объяснить следующим образом. При малой ширине зазора  $h = 5$  см роботы проходят

через узкий зазор по одному, в то время как при больших значениях  $h$  два робота могут достичь сужения трассы одновременно и застрять в нём, приводя к образованию затора.

Второй эффект состоит в том, что средняя подвижность для определенных значений  $N$  и  $h$  демонстрирует немонотонную зависимость от уровня ШИМ. В большинстве случаев промежуточное значение ШИМ = 20% (зелёные кривые) соответствует свободному течению или более позднему образованию заторов по сравнению со скоплениями, движущимися при ШИМ = 10% и 30%, Рис. 4. Однако, в некоторых случаях (например, для систем с параметрами  $N = 15$  и  $h = 70$  мм или  $N = 20$  и  $h = 75$  мм) роботы при ШИМ = 30% демонстрируют более высокую подвижность, Рис. 4 (в, д).

В большинстве случаев заторы, наблюдаемые в эксперименте, являются постоянными. В то же время, в некоторых реализациях наблюдается образование временных заторов с последующим переходом к свободному движению скопления роботов, например, реализации системы со следующими наборами параметров:  $\{N; h; \text{ШИМ}\} = \{10; 50; 30\}$ ,  $\{15; 70; 20\}$  и  $\{20; 60; 10\}$ , соответственно.

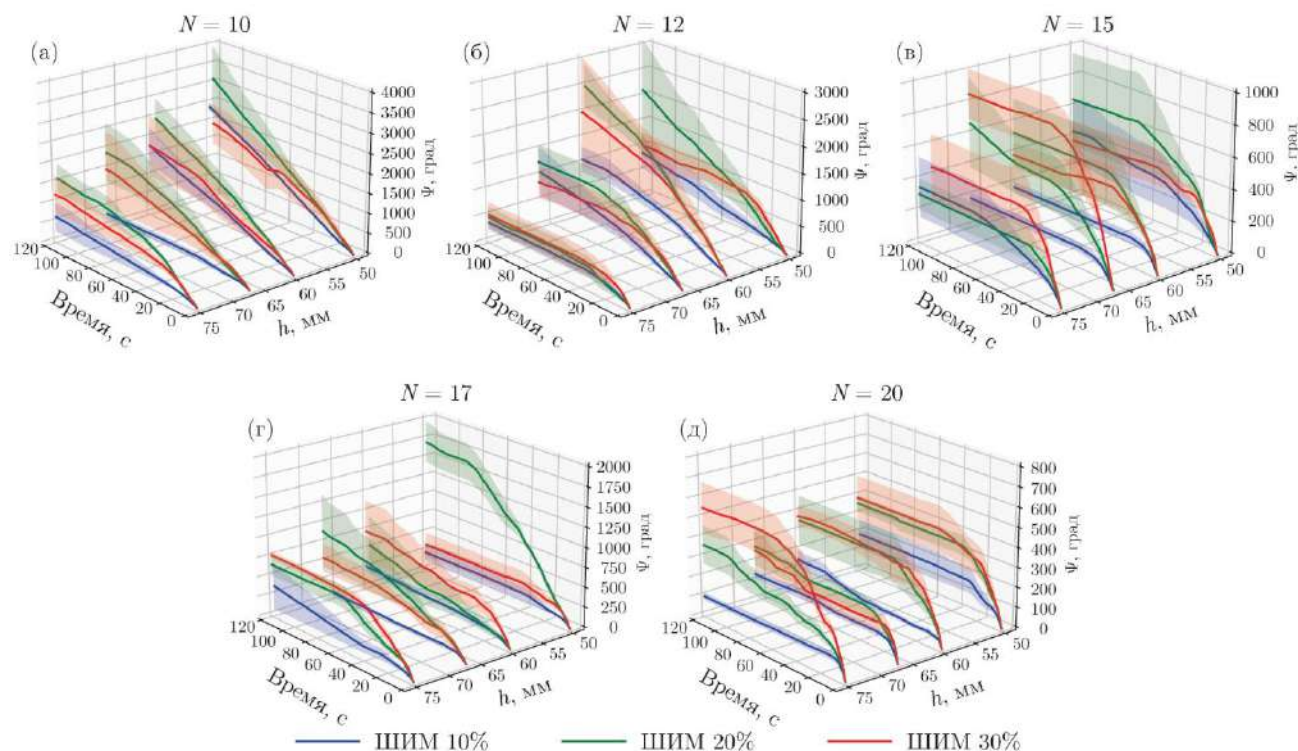


Рис. 4. Временные зависимости параметра  $\Psi$  для заданных значений ширины зазора  $h$  для систем, включающих (а)  $N = 10$ , (б)  $N = 12$ , (в)  $N = 15$ , (г)  $N = 17$ , (д)  $N = 20$  роботов. Цвета кривых соответствуют разным уровням ШИМ: 10% (голубые кривые), 20% (зеленые кривые), 30% (красные кривые)

#### 4. Заключение

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование образования пробок скоплениями роботов, движущимися по кольцевой трассе с сужением. В качестве расширения результатов работы [7], исследована зависимость подвижности скопления от ширины сужения трассы, а также от средней скорости индивидуального движения роботов, определяемой уровнем их вибрации. При этом, выявлено два эффекта: увеличение подвижности скопления роботов при уменьшении ширины сужения трассы для разреженных скоплений роботов, а также увеличение подвижности скоплений при промежуточных значениях активности вибрации роботов для всех рассмотренных значений числа роботов в системе.

#### Литература

1. Nagatani T. The physics of traffic jams // Reports on Progress in Physics. – 2002. – Vol. 65. – P. 1331.
2. Karamouzas I., Skinner B., Guy S.J. Universal power law governing pedestrian interactions // Phys. Rev. Lett. – 2014. – Vol. 113. – P. 238701.

3. *Haghani M., Sarvi M.* Simulating pedestrian flow through narrow exits // *Physics Letters A.* – 2019. – Vol. 383, № 2–3. – P. 110–120.
4. *Keys A., Abate A., Glotzer S. et al.* Measurement of growing dynamical length scales and prediction of the jamming transition in a granular material // *Nature Phys.* – 2007. – Vol. 3. – P. 260–264.
5. *Cates M. E. et al.* Jamming, force chains, and fragile matter // *Physical review letters.* – 1998. – Vol. 81, № 9. – P. 1841.
6. *Henkes S., Fily Y., Marchetti M. C.* Active jamming: Self-propelled soft particles at high density // *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics.* – 2011. – Vol. 84, № 4. – P. 040301.
7. *Barois T., Boudet J.-F., Lanchon N., et al.* Characterization and control of a bottleneck-induced traffic-jam transition for self-propelled particles in a track // *Phys. Rev. E.* – 2019. – Vol. 99. – P. 052605.
8. *Dmitriev A.A., Rozenblit A.D., Porvatov M.K., et al.* Swarmodroid 1.0: A modular bristle-bot platform for robotic active matter studies // *arXiv:2305.13510.* – 2023. – P. 1–8.
9. AMPy: AMPy is a baseline library for active matter data processing. <https://github.com/swarmtronics/AMPy> (дата обращения 05.07.2024).