

3. Магниторекомбинационный преобразователь с оптическим управлением / Воробей Р.И. [и др.] // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов // Сборник статей 8-й Междунар. научн.-технич. конфер. – Министерство образования Респ. Бела-русь, Министерство образования и науки Рос. Федерации, НАН Беларуси. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. – С. 74–78.

4. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements. – 2021. – № 2. – P. 108–116.

5. Фотоприемники на основе собственных полупроводников для построения измерительных преобразователей / Гусев О. К. [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2017. – № 2. – С. 34–42.

УДК 681.513.8

## ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ АГЕНТОВ РОЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТА ТЕПЛООВОГО ДВИЖЕНИЯ АТОМОВ

Гейс Э.А., Морозов О.О.

*ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация*

**Аннотация.** В ранее опубликованных работах представлен метод организации движения агентов роя, названный методом эквивалента теплового движения. Данный метод основан на методе потенциального поля и побуждает агентов к поведенческому повторению теплового движения атомов. Согласно методу, каждый агент может характеризоваться скалярным параметром «температура». При «низкой температуре» агенты образуют «кристаллическую решетку», при «высокой температуре» агенты воспроизводят характер поступательного броуновского движения молекул газа. В работе выполнен анализ распределения скоростей агентов в состоянии эквивалента термодинамического равновесия. Показана высокая степень корреляции характера распределения скоростей агентов с распределением молекул газа по критерию Пирсона.

**Ключевые слова:** многоагентная система, рой, распределение Максвелла, метод эквивалента теплового движения.

## FEATURES OF THE SWARM AGENTS' MOTION USING THE THERMAL EQUIVALENT MOTION METHOD

Heiss E., Morozov O.

*Tula State University  
Tula, Russian Federation*

**Abstract.** Previously published works present a method for organizing the swarm agents' motion, called the thermal equivalent motion method. This method is based on the artificial potential field and induces agents to repeat the atoms thermal motion. A scalar parameter that is equivalent to temperature can be used in modeling the swarm behavior. At "low temperature", the agents form a "crystal lattice". At "high temperature", the agents reproduce the gas molecules random motion. The paper analyzes the agents' speed distribution in a state of equivalent thermodynamic equilibrium. Agents speed distribution correlate to the gas molecules distribution according to the Pearson criterion.

**Key words:** multi-agent system, swarm, Maxwell distribution, thermal equivalent motion method.

*Адрес для переписки: Гейс Э.А., ул. Епифанская, 125, Тула 100003, Российская Федерация  
e-mail: edheiss73@gmail.com*

**Введение.** Одной из основополагающих задач проектирования роя является задача организации взаимодействия агентов [1, 2]. Под роём понимается многоагентная система, где агентом является программно-аппаратный комплекс, имеющий устройства взаимодействия со средой и другими агентами. Основная идея метода эквивалента теплового движения заключается в организации поведенческого повторения роём теплового движения атомов. Поведенческое повторение агентами теплового движения в теории позволит использовать известные законы термодинамики для обеспечения требуемых свойств роя.

В предыдущих работах [3, 4] предложен метод эквивалента теплового движения. Данный метод основан на методе потенциального поля [5].

**Постановка задачи.** Первым этапом оценки качества поведенческого повторения агентами

роя теплового движения является анализ распределения скоростей агентов роя в состоянии эквивалента термодинамического равновесия. Согласно методу, каждый агент может характеризоваться скалярным параметром «температура». При «высокой температуре» характер движения агентов должен коррелировать с поступательным броуновским движением молекул газа.

Целью работы является оценка корреляции между движением агентов роя при «высокой температуре» и движением молекул газа.

**Анализ характера движения агентов роя.** Распределение скоростей молекул газа в состоянии термодинамического равновесия соответствует распределению Больцмана-Максвелла [6, 7]. Требуется оценить распределение скоростей агентов при разном значении эквивалента внутренней энергии, то есть температуры.

Функция распределения агентов в зависимости от эквивалента температуры роя имеет вид

$$F(V, V_s) = 4N\pi \left(\frac{3}{2\pi V_s^2}\right)^{\frac{3}{2}} V^2 \exp\left(-\frac{3V^2}{2V_s^2}\right), \quad (1)$$

где  $V$  – скорость агентов, м/с;  $N$  – количество агентов,  $V_s$  – средняя скорость агентов роя, м/с.

График теоретического распределения агентов по скоростям, приведенный на рис. 1, получен подстановкой в (1) значений средней скорости 1,49, 3,62 и 4,60 метров в секунду.

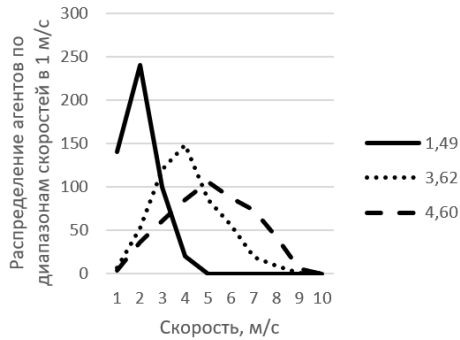


Рисунок 1 – Теоретическое распределение для 500 агентов роя при средней скорости 1,49, 3,62 и 4,60 метров в секунду

Моделирование 500 агентов выполнялось в разработанной среде проектирования роевых систем MASPlatform при следующих условиях:

- 1) время свободного пробега агентов много больше времени взаимодействия с соседями и границами допустимой области;
- 2) фиксация данных происходила в тот момент, когда все агенты находились в состоянии свободного пробега.

Агенты функционировали в сферической допустимой области в состоянии эквивалента термодинамического равновесия [3]. График распределения скоростей представлен на рис. 2:

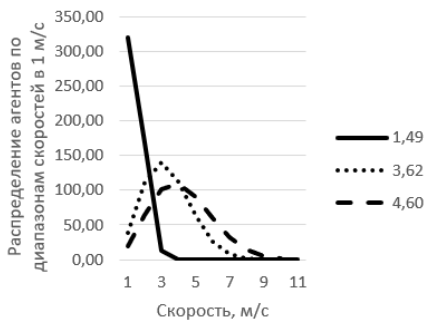


Рисунок 2 – Распределение скоростей 500 агентов роя при средней скорости 1,49, 3,62 и 4,60 метров в секунду

Начальные координаты агентов выбирались так, чтобы пересечения радиусов [3] с соседями и границей допустимой области не имело место.

Начальное направление вектора скорости устанавливалось случайным образом. Значение амплитуды скорости устанавливалось пользователем перед началом моделирования. С течением времени распределение скоростей агентов роя приходит к распределению Максвелла-Больцмана, что отражает схожая тенденция графиков на рис. 1 и рис. 2.

Численным критерием корреляции является критерий Пирсона. В данной работе он определяется по значениям, найденным из функции распределения Максвелла, примененной к рою.

Критерий Пирсона, рассчитанный для теоретических результатов и результатов моделирования, при средней скорости в соответствии с рис. 2 равны соответственно 0,82, 0,87, 0,77. Анализ показал высокую силу корреляции между результатами, полученными теоретически и с помощью разработанной среды моделирования.

**Заключение.** Полученные результаты говорят о корректном поведенческом повторении агентами роя теплового движения атомов в части характера поступательного движения.

Такое движения агентов роя полезно при решении задач мониторинга местности, поиска объектов, поиска пути.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0003.

#### Литература

1. Rastgoftar, H. Cooperative aerial lift and manipulation / H. Rastgoftar, E.M. Atkins // *Aerospace Science and Technology*. – 2018. – Vol. 82. – P. 105–118.
2. Ding, X. C. Multi-UAV convoy protection: An optimal approach to path planning and coordination / X. C. Ding, A. R. Rahmani, M. Egerstedt // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2010. – Vol 26. – P. 256–268.
3. Гейс, Э. А. Разработка метода организации движения группы БЛА на основе эквивалента теплового движения / Э. А. Гейс // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2021. – № 11. – С. 41–45.
4. Гейс, Э. А. Разработка регулятора квадрокоптера, входным воздействием которого является эквивалент вектора силы потенциального поля / Э. А. Гейс // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2021. – № 11. – С. 10–15.
5. Liu, W. h. Dynamic collision avoidance for cooperative fixed-wing UAV swarm based on normalized artificial potential field optimization / W. h. Liu, X. Zheng, Z. h. Deng // *Journal of Central South University*. – 2021. – Vol. 28, № 10. – P. 3159–3172.
6. Евдокимов, И. Н. Молекулярные механизмы вязкости жидкости и газа / И. Н. Евдокимов, Н. Ю. Елисеев. – М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. – 59 с.
7. Молекулярная физика и термодинамика. Методика решения задач / Г. А. Миронова [и др.]. – М.: Физический факультет МГУ, 2016. – 416 с.