

А.Д. Терец ¹, Т.Е. Корочкова ², В.М. Розенбаум ², В.А. Машира ³,
И.В. Шапочкина ⁴, А.Н. Фурс ⁴, М.И. Иким ⁵, В.Ф. Громов ⁵

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЩЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ БРОУНОВСКОЙ ЧАСТИЦЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕРАВНОВЕСНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ

¹ Физический факультет, Киевский национальный университет им. Т. Шевченко
пр. Академика Глушкова, 4, Киев, 03127, Украина

² Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко Национальной академии наук Украины
ул. Генерала Наумова, 17, Киев, 03164, Украина, E-mail: taiscrust@yahoo.com

³ Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова Национальной академии наук Украины
бул. Академика Вернадского, 36, Киев, Украина, 03164

⁴ Физический факультет, Белорусский государственный университет
пр. Независимости, 4, Минск, 220050, Беларусь

⁵ ФИЦ Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН
ул. Косыгина, 4, Москва, 119991, Россия

Актуальным и важным вопросом при изучении транспорта наночастиц является возможность и методы управления создаваемыми потоками. Одна из возможностей – использование рэтчет-эффекта, а именно, возникновения направленного движения в результате воздействия неравновесных флуктуаций различной природы при нарушении одной или нескольких симметрий в системе. Для реализации рэтчет-эффекта часто используется детерминистический дихотомный процесс, который можно моделировать двумя чередующимися состояниями, имеющими постоянные характеристики. Обычно основной фактор, определяющий направление движения броуновского мотора, – пространственная асимметрия потенциального профиля. В определенных случаях, например, для двухъямного потенциального профиля, можно относительно легко исследовать условия, вызывающие обращение направления движения мотора. В данной работе, используя идею парадоксальных игр Паррондо, состоящих в чередовании стратегий игры, обеспечивающей средний выигрыш, проведено моделирование рэтчет-эффекта для диффузионной прыжковой модели адиабатического броуновского мотора с асимметричным двухъямным потенциалом on-off. Исследованы условия, влияющие на направление движения наночастиц, показана возможность температурного регулирования этого направления, получена оценка генерируемой средней скорости броуновского мотора в адиабатическом приближении. Проведено моделирование работы мотора в терминах теории игр и получены усредненные траектории накопления капитала, что соответствует траекториям среднего смещения броуновской частицы при работе мотора. Для выбранной модели показано, что при низких температурах частица движется направо в соответствии с простейшей моделью on-off-рэтчета, тогда как при высоких температурах происходит обращение движения. Сопоставление результатов моделирования со значениями скорости рэтчета, полученными в адиабатическом приближении, показывает, что это приближение становится справедливым при достаточно больших значениях времен жизни состояний дихотомного процесса, причем в высокотемпературной области оно оказывается намного точнее, чем в низкотемпературной.

Ключевые слова: диффузионный транспорт, броуновские моторы, рэтчет-эффект, обращение движения, дихотомный процесс, парадоксальные игры Паррондо

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов управления транспортом наночастиц является использование рэтчет-эффекта [1], который состоит в возникновении их направленного движения в результате воздействия неравновесных флуктуаций при нарушении пространственной и/или временной симметрии.

Эти флуктуации подводят энергию в систему и характеризуются нулевым средним значением прикладываемых реальных или обобщенных сил. Наномашин, функционирующие по этому принципу, были впервые обнаружены в живой природе [2–8]. Они представляют собой устройства, которые под действием неравновесных флуктуаций

различного происхождения преобразуют хаотическое броуновское движение в направленное поступательное, возвратно-поступательное или вращательное движение. Белковые броуновские моторы обеспечивают работу мышц, движение жгутиковых бактерий, внутри- и межклеточный транспорт органелл и сравнительно крупных частиц вещества. Искусственно создаваемые наномеханизмы, использующие рэтчет-эффект, позволяют в тонкостях изучать механизмы функционирования биологических моторов, а также используются в приборах для сегрегации частиц, оптических ловушках, электронных рэтчетах и т.д.

В основе управления нанотранспортом с помощью рэтчет-эффекта лежат внешние процессы различной природы [3, 8–10]. Для реализации рэтчет-эффекта часто используется детерминистический дихотомный процесс, который можно представить в виде модели с двумя чередующимися состояниями, имеющими постоянные характеристики [11–15]. Нестандартным проявлением этого эффекта являются так называемые парадоксальные игры Паррондо, состоящие в чередовании стратегий игры, обеспечивающей средний выигрыш [16–18]. Прыжковые модели диффузионных процессов [19] объясняют возникновение таких выигрышных приемов и, более того, позволяют проводить моделирование сложных процессов, обеспечивающих рэтчет-эффект [20].

Основным фактором, определяющим направление движения броуновского мотора, является асимметрия потенциального профиля. В тех случаях, когда профиль изменяет свою форму с течением времени, бывает очень трудно, а часто и невозможно заранее, без конкретных расчетов определить направление движения, возникающего вследствие рэтчет-эффекта [1]. Тем не менее, существуют ситуации, в которых направление движения можно легко предсказать, а главное, и выяснить условия, вызывающие его обращение. Так называемый on-off-рэтчет с двухъямным потенциальным профилем, рассмотренный в работе [21], является примером рэтчета с температурным регулированием направления движения. В данной работе такое регулирование

иллюстрируется посредством прыжковой диффузионной модели, развитой в работе [20]. В первом разделе будет рассмотрена модель броуновского мотора и получено выражение для средней скорости, генерируемой детерминистическим дихотомным процессом в адиабатическом приближении, условия возникновения направленного транспорта и ключевые факторы, влияющие на его направление. Во втором разделе будет проведено моделирование работы мотора в терминах теории игр и получены усредненные траектории накопления капитала, что соответствует траекториям среднего смещения броуновской частицы в результате работы мотора. В заключительном разделе будут даны интерпретации и оценки средней скорости классического биологического мотора, рассчитанные для параметров рассматриваемой модели.

МЕХАНИЗМ ОБРАЩЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрим потенциальный профиль, который в состоянии А изображен на рис. 1. Период потенциального профиля содержит два минимума, правый x_2 и левый x_1 . Правый минимум ближе к наибольшему максимуму в точке $x = L$, а левый минимум ближе к такому же максимуму в точке $x = 0$. При этом правый минимум глубже левого на энергию ΔV . В случае низких температур, когда $k_B T \ll \Delta V$, вероятность пребывания частицы в левом минимуме стремится к нулю, и частица с большой вероятностью пребывает в правом минимуме с координатой x_2 . В состоянии В потенциальный профиль отсутствует, и поскольку точка x_2 ближе к правому, чем к левому, максимуму потенциала в состоянии А, то вследствие свободной диффузии частица с большей вероятностью пересечет правую границу периода $x = L$, чем левую $x = 0$. Таким образом, после следующего переключения потенциального профиля в состояние А частица с большей вероятностью окажется в его правом периоде профиля, чем в левом. Такой механизм движения соответствует, фактически, известному принципу, согласно которому в on-off-рэтчете с одноямным потенциалом движение происходит в сторону ближайшего максимума [1, 22, 23]. Таким образом, при $k_B T \ll \Delta V$ благодаря рэтчет-эффекту частица

будет двигаться направо. Предположим теперь, что левый локальный минимум ближе к левому барьеру, чем правый абсолютный минимум к правому барьеру, то есть $x_1 < L - x_2$. Тогда с ростом температуры

вероятность пребывания вблизи левого минимума будет расти, и появятся предпосылки для движения частицы налево [21].

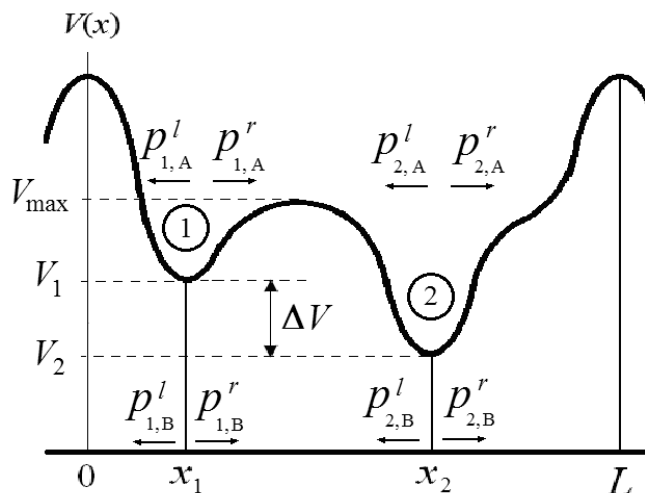


Рис. 1. Прыжковая модель броуновского мотора: асимметричный потенциал, соответствующий состоянию on (A), содержащий две ямы (отмечены «1» и «2») и два барьера. Вероятности перескоков частицы из ям налево и направо соответствуют значениям $p_{1,A}^l$, $p_{1,A}^r$ и $p_{2,A}^l$, $p_{2,A}^r$. В состоянии off (B) потенциал отсутствует, и вероятности перескоков налево и направо из точек 1 и 2 соответствуют значениям $p_{1,B}^l$, $p_{1,B}^r$ и $p_{2,B}^l$, $p_{2,B}^r$

Моделирование проведем с помощью подхода, представленного в работе [20]. Вероятности ухода частицы в состоянии A из потенциальных ям 1 и 2 налево и направо обозначим через $p_{1,A}^l$, $p_{1,A}^r$ и $p_{2,A}^l$, $p_{2,A}^r$. Барьеры, отделяющие один период потенциального профиля от другого, будем считать настолько большими, что частица не

может их преодолевать, так что $p_{1,A}^l = 0$, $p_{2,A}^r = 0$, и условие детального баланса в состоянии A, $p_{1,A}^l p_{2,A}^l = p_{1,A}^r p_{2,A}^r$, выполняется. Вероятности преодоления внутреннего барьера с координатой максимума V_{\max} пропорциональны экспоненциальным факторам закона Аррениуса:

$$p_{1,A}^r = \exp[-\beta(V_{\max} - V_1)], \quad p_{2,A}^l = \exp[-\beta(V_{\max} - V_2)], \quad \beta = (k_B T)^{-1}, \quad (1)$$

где V_1 и V_2 – минимумы потенциальных ям. Для описания движения частицы в состоянии B учтем, что переход частицы из точки левого минимума налево более вероятен, чем из правого минимума направо: $p_{1,B}^l > p_{2,B}^r$. Принцип детального баланса в состоянии B, $p_{1,B}^l p_{2,B}^l = p_{1,B}^r p_{2,B}^r$, будет удовлетворен, если считать, что $p_{1,B}^l = p_{1,B}^r$ и $p_{2,B}^l = p_{2,B}^r$, так что получаем

$$p_{1,B}^l = p_{1,B}^r = c_1 / 2, \quad p_{2,B}^l = p_{2,B}^r = c_2 / 2, \quad c_1 > c_2, \quad (2)$$

где c_1 и c_2 – вероятности покинуть положения 1 и 2 (независимо в какую сторону).

Итак, вероятности, определенные соотношениями (1) и (2), характеризуют каждый прыжок в состояниях А и В, и будем считать, что количество прыжков в каждом состоянии задают целочисленные параметры τ_A и τ_B . Такой процесс служит моделью детерминистического дихотомного процесса с временами жизни состояний $\tau_A t_0$ и $\tau_B t_0$, где t_0 – время между прыжками, определяемое свойствами рассматриваемой системы. Например, движение головы кинезина вдоль микротрубочки с длиной

димера тубулина $L_0 = 4$ нм, определяющей пространственный период системы $L = 2L_0 = 8$ нм, происходит в результате циклически повторяющихся процессов гидролиза АТФ, временной период которых $t_0 \sim 10^{-3}$ с [24–28]. Используя соотношения работы [12], вероятности прыжков (1), (2) и размерные параметры L_0 и t_0 , среднюю скорость рассматриваемого броуновского мотора в адиабатическом приближении можно оценить как

$$\langle v \rangle = \frac{L_0}{t_0} J, \quad J = \frac{e^{\beta \Delta V} - \kappa}{(\tau_A + \tau_B)(1 + \kappa)(1 + e^{\beta \Delta V})}, \quad \kappa = \frac{c_1}{c_2}, \quad \Delta V = V_1 - V_2. \quad (3)$$

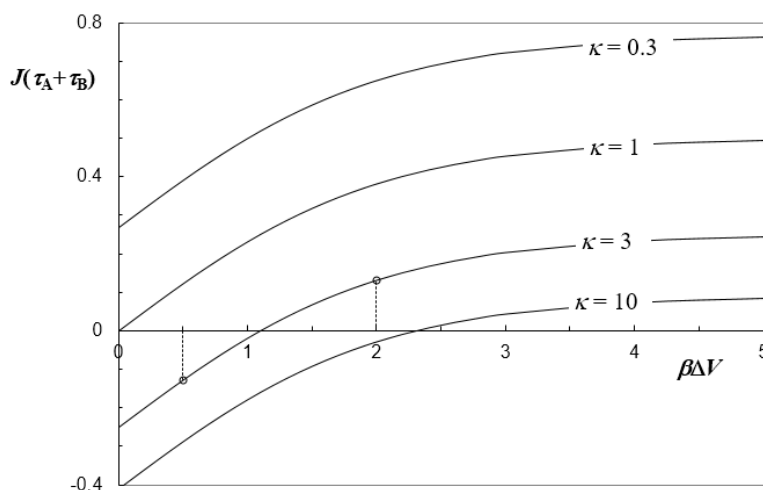


Рис. 2. Поток частиц J (измеряемый в единицах $(\tau_A + \tau_B)^{-1}$) как функция обратной температуры $\beta \Delta V$ при фиксированных значениях параметра κ (указаны на кривых)

Зависимость безразмерного потока J от обратной температуры $\beta \Delta V$ приведена на рис. 2. Кривые с большими κ демонстрируют смену знака потока. Например, при $\kappa = 3$ поток положителен в низкотемпературной области $\beta \Delta V > 1.1$ и становится отрицательным при $\beta \Delta V < 1.1$. Вертикальные штриховые линии отмечают значения $\beta \Delta V = 0.5$ и 2, при которых численное моделирование (см. далее) должно описывать движение частицы налево и направо.

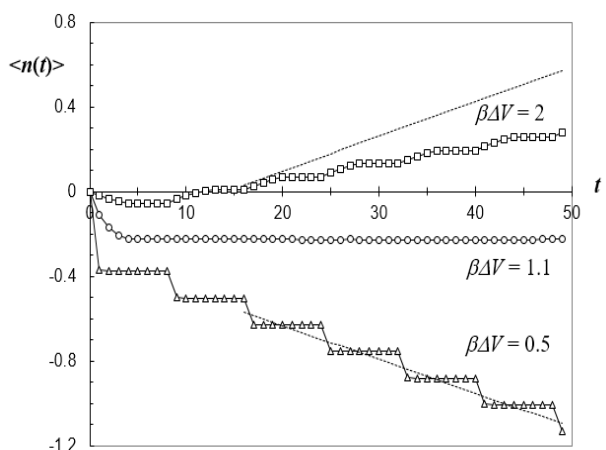
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЭТЧЕТ-ЭФФЕКТА

Моделирование направленного движения при переключении состояний А и В проводилось в терминах теории игр, согласно

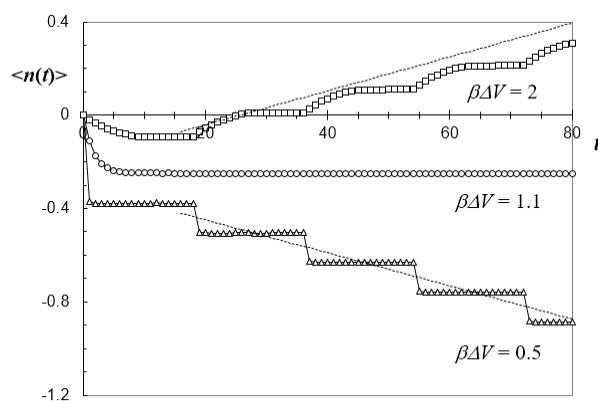
стратегии, изложенной в работе [20]. В начальный момент времени $t = 0$ частица находилась в начале координат, а в последующие моменты, соответствующие целочисленным t , могла осуществлять целочисленные смещения, задаваемые функцией $n(t)$, которая в теории игр ассоциируется с капиталом игрока, изменяющимся с числом бросков игральной кости t . Изменение $n(t)$ происходило в соответствии с вероятностями p^r сместиться направо, p^l сместиться налево и $1 - p^r - p^l$ не измениться. Такой алгоритм легко реализуется программно: на каждом шаге t (броске игральной кости) генератор случайных чисел выдает значение базовой

случайной величины, равномерно распределенной на отрезке от нуля до единицы; которое проверяется на попадание в интервалы от 0 до p^r , от p^r до $p^r + p^l$ и от $p^r + p^l$ до 1. В первом случае игроку присуждается выигрыш с прибавлением одной денежной единицы к его текущему капиталу ($n(t) = n(t-1) + 1$), во втором случае присуждается проигрыш с вычитанием одной денежной единицы ($n(t) = n(t-1) - 1$), в третьем случае капитал игрока не изменяется ($n(t) = n(t-1)$). Массив дискретных значений капитала игрока для всех шагов запоминается в памяти компьютера. После этого монету бросает второй игрок, третий и т.д. Для K игроков получается K траекторий $n(t)$, которые затем усредняются для получения

искомой средней зависимости капитала от числа бросков $\langle n(t) \rangle$. Значения p^r и p^l зависят от четности параметра n и принадлежности состоянию А или В. Предполагается, что τ_A прыжков происходит в состоянии А, затем τ_B прыжков – в состоянии В и т.д., так что длительность цикла дихотомного процесса равна $\tau_A + \tau_B$. При нечетных значениях n в качестве p^r берутся вероятности $p_{1,A}^r$ или $p_{1,B}^r$, а в качестве p^l – вероятности $p_{1,A}^l$ или $p_{1,B}^l$ в зависимости от того, какое состояние (А или В) реализуется. Аналогично при четных значениях n в качестве p^r и p^l фигурируют, соответственно, вероятности $p_{2,A(B)}^r$ и $p_{2,A(B)}^l$.



А



Б

Рис. 3. Траектории изменения капитала (линии с маркерами) в зависимости от номера броска игральной кости для трех значений $\beta\Delta V$ (указаны на кривых). (а) – $\tau_A = \tau_B = 4$, усреднение выполнено для 3 млн траекторий, (б) – $\tau_A = \tau_B = 9$, усреднение выполнено для 5 млн траекторий. Пунктирные линии рассчитаны по формуле (3) и соответствуют оценке средней скорости в адиабатическом приближении

Описанный алгоритм позволял рассчитывать большое число траекторий $n(t)$, а затем проводить усреднение по этому большому числу испытаний, которое в наших расчетах составляло от 3 до 5 млн. Конкретные значения вероятностей подставлялись в соответствии с формулами (1) и (2) для трех значений обратной температуры $\beta\Delta V$ и фиксированного значения $\kappa = 3$. Результаты моделирования представлены на рис. 3. При чередовании двух типов игры получена устойчивая картина изменения капитала с увеличением дискретного времени t : нарастание капитала (что в терминах броуновских моторов аналогично смещению частицы вправо), уменьшение (смещение частицы влево) либо сохранение постоянного значения. Наклон средней линии траектории к оси t характеризует среднюю скорость движения частиц. В соответствии с рис. 2 (см. кривую $\kappa = 3$), линии с треугольными маркерами, построенные для $\beta\Delta V = 0.5$, убывают, то есть средняя скорость наночастиц отрицательна, линии с квадратными маркерами с $\beta\Delta V = 2$ возрастают, то есть средняя скорость положительна, а траектории с круглыми маркерами и $\beta\Delta V = 1.1$ выходят на постоянное значение (моторный эффект отсутствует). Моделирование проводилось для двух значений времен жизни состояний А и В: $\tau_A = \tau_B = 4$ (рис. 3 а) и $\tau_A = \tau_B = 9$ (рис. 3 б). Пунктирные линии рассчитаны по формуле (3) и соответствуют оценке средней скорости в адиабатическом приближении.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результаты, представленные на рис. 2 и 3, показывают, что обращение движения броуновской частицы под действием неравновесных флуктуаций происходит при изменении температуры. При низких температурах частица движется направо в соответствии с простейшей моделью on-off-рэтчета [1, 22, 23]. Согласно выражению (3), обращение движения происходит при температуре $T_0 = \Delta V / (k_B \ln \kappa)$, и при высоких температурах ($T > T_0$) частица движется уже налево. Моделирование, проведенное при трех значениях температур, $T < T_0$, $T = T_0$ и $T > T_0$ подтверждает этот вывод (рис. 3). Сопоставление результатов моделирования

со значениями скорости рэтчета, найденными по формуле (3) адиабатического приближения (сплошные линии с маркерами и штриховые линии), показывает, что адиабатическое приближение становится справедливым при достаточно больших значениях $\tau_A + \tau_B$, причем в высокотемпературной области оно оказывается намного точнее, чем в низкотемпературной. Объяснение этого факта требует дополнительного исследования с привлечением прыжковых моделей диффузионных процессов [19], которое выходит за рамки данной статьи.

Динамика смещений частицы для указанных трех случаев, представленная на рис. 3, позволяет оценить смещения частиц в реальных системах, если задавать характерные времена t_0 и длины смещений при каждом прыжке L_0 . Например, согласно экспериментальным данным по исследованию подвижности белкового мотора кинезина С351 [29], длина одного шага мотора равна $L_0 = 4$ нм, время одного полного цикла гидролиза АТФ $\approx 9 \cdot 10^{-3}$ с, а средняя наблюдаемая скорость движения С351 вдоль микротрубки составляет 140 нм/с. Используя значения $L_0 = 4$ нм, $t_0 = 10^{-3}$ с, $\tau_A = \tau_B = 4$, типичную для кинезина величину энергетического барьера $\beta\Delta V = 10$ и $\kappa = 1$ (что соответствует свободному диффузионному движению наночастицы в состоянии В), из формулы (3) получаем оценочное значение средней скорости 250 нм/с. Таким образом, предлагаемый подход является достаточно плодотворным для моделирования движения белковых моторов и показывает хорошее соответствие теоретических оценок с наблюдаемыми величинами. Заметим, что в данной статье флуктуации системы задавались дихотомным детерминистическим процессом, в то время как для моделирования траекторий, близких к реально наблюдаемым [29], более точным было бы рассмотрение стохастических флуктуаций и введение в систему временной асимметрии, что планируется нами в будущих работах.

Работа поддержана грантами БРФФИ (Ф20Р-032) и РФФИ (20-57-00007; 18-29-02012-мк).

Моделивання обернення руху броунівської частинки під дією нерівноважних флуктуацій

А.Д. Терещ, Т.Є. Корочкова, В.М. Розенбаум, В.А. Машира, І.В. Шапочкіна,
А.Н. Фурс, М.І. Ікім, В.Ф. Громов

*Фізичний факультет, Київський національний університет ім. Т. Шевченка
пр. Академіка Глушкова, 4, Київ, 03127, Україна*

*Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка Національної академії наук України
вул. Генерала Наумова, 17, Київ, 03164, Україна, taiscrust@yahoo.com*

*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова Національної академії наук України
бул. Академіка Вернадського, 36, Київ, Україна, 03164*

*Фізичний факультет, Білоруський державний університет
пр. Незалежності, 4, Мінськ, 220050, Білорусь*

*ФІЦ Інститут хімічної фізики ім. Н.Н. Семенова РАН
вул. Косигіна, 4, Москва, 119991, Росія*

Актуальним і важливим питанням при вивченні транспорту наночастинок є можливість і методи управління створюваними потоками. Одна з можливостей - використання ретчет-ефекту, а саме, виникнення направленої руху в результаті впливу нерівноважних флуктуацій різної природи при порушенні однієї або декількох симетрій в системі. Для реалізації ретчет-ефекту часто використовується детерміністичний дихотомний процес, який можна моделювати двома станами, що чергуються та характеризуються сталими характеристиками. Зазвичай основний фактор, що визначає напрямок руху броунівського мотора, - просторова асиметрія потенціального профілю. У певних випадках, наприклад, для двоямного потенціального профілю, можна відносно легко досліджувати умови, що викликають обернення напрямку руху мотора. У даній роботі, використовуючи ідею парадоксальних ігор Парондо з чергуванням стратегій гри так, що забезпечується середній виграв, проведено моделювання ретчет-ефекту для дифузійної стрибкової моделі адіабатичного броунівського мотора з асиметричним двоямним потенціалом on-off. Досліджено умови, що впливають на напрямок руху наночастинок, показано можливість температурного регулювання цього напрямку, отримано оцінку середньої швидкості броунівського мотора в адіабатичному наближенні. Проведено моделювання роботи мотора в термінах теорії ігор та отримано усереднені траєкторії накопичення капіталу, що відповідає траєкторіям середнього зміщення броунівської частинки в результаті роботи мотора. Для обраної моделі показано, що при низьких температурах частинка рухається праворуч у відповідності з найпростішою моделлю on-off ретчета, потім відбувається обернення руху, і при високих температурах частинка рухається вже ліворуч. Порівняння результатів моделювання зі швидкістю ретчета, отриманою в адіабатичному наближенні, показує, що адіабатичне наближення стає справедливим при досить великих значеннях часів життя станів дихотомного процесу, причому у високотемпературній області воно виявляється набагато точніше, ніж у низькотемпературній.

Ключові слова: дифузійний транспорт, броунівські мотори, ретчет-ефект, обернення руху, дихотомний процес, парадоксальні ігри Парондо

Motion reversal modeling for a Brownian particle affected by nonequilibrium fluctuations

A.D. Terets, T.Ye. Korochkova, V.M. Rozenbaum, V.A. Mashira, I.V. Shapochkina,
A.N. Furs, M.I. Ikim, V.F. Gromov

*Department of Physics, Kyiv National University. T. Shevchenko,
4 Akademician Glushkova ave., Kyiv, 03127, Ukraine*

*Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine
17 General Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine, taiscrust@yahoo.com*

*G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of National Academy of Sciences of Ukraine
36 Academician Vernadsky boul., Kyiv, 03142, Ukraine*

Department of Physics, Belarusian State University

4 Nezavisimosti pr., Minsk, 220050, Belarus

Semenov Institute of Chemical Physics

4 Kosygina Str., Building 1, Moscow, 119991, Russian Federation

A relevant and important question in studying the transport of nanoparticles is the possibility and methods of controlling the generated currents. One of the possibilities is to use the ratchet effect, i.e. the occurrence of directed motion as a result of the influence of nonequilibrium fluctuations of various nature when one or more symmetries in the system are broken. To implement the ratchet effect, a deterministic dichotomous process is often used, which can be modeled by two alternating states that have constant characteristics. Usually, the main factor determining the direction of motion of a Brownian motor is the spatial asymmetry of the potential profile. In certain cases, for example, for a double-well potential profile, one can relatively easily investigate the conditions for reversal of the direction of motor motion. In this paper, using the idea of Parrondo's paradox games consisting of alternating strategies of a game that provides an average winning, we simulated the ratchet effect for a diffusion hopping model of an adiabatic Brownian motor with an asymmetric double-well on-off potential. The conditions affecting the direction of nanoparticle motion are investigated, the possibility of temperature control of the motion direction is shown, and an estimate of the generated average velocity of the Brownian motor in the adiabatic approximation is obtained. The motor functioning is simulated in terms of the game theory and the average trajectories of capital accumulation are obtained, which correspond to the trajectories of the average displacement of a Brownian particle due to the ratchet effect. For the chosen model, it is shown that, at low temperatures, a particle moves to the right in accordance with the simplest on-off ratchet model, while, at high temperatures, the motion reverses. A comparison of the simulation results with the values of the ratchet velocity obtained within the adiabatic approximation shows that this approximation becomes valid at sufficiently large values of the lifetimes of the states of the dichotomous process, and it turns out to be much more accurate in the high-temperature region than in the low-temperature one.

Keywords: *diffusion transport, Brownian motors, ratchet effect, movement reversal, dichotomous process, Parrondo's paradox games*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гуляев Ю.В., Бугаев А.С., Розенбаум В.М., Трахтенберг Л.И. Управление нанотранспортом с помощью рэтчет-эффекта // Успехи физ. наук. – 2020. – Т. 190, № 4. – С. 337–354.*
2. *Howard J. Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton. – Sunderland, MA: Sinauer Associates, 2001. – 367 p.*
3. *Reimann P. Brownian Motors: Noisy Transport far from Equilibrium // Phys. Rep. – 2002. – V. 361, N 2–4. – P. 57–265.*
4. *Bressloff P.C., Newby J.M. Stochastic models of intracellular transport // Rev. Mod. Phys. – 2013. – V. 85. – P. 135–196.*
5. *Chowdhury D. Stochastic mechano-chemical kinetics of molecular motors: A multidisciplinary enterprise from a physicist's perspective // Phys. Rep. – 2013. – V. 529. – P. 1–197.*
6. *Kolomeisky A.B. Motor Proteins and Molecular Motors. – Boca Raton, FL: CRS Press, 2015. – 200 p.*
7. *Hoffmann P.M. How molecular motors extract order from chaos (a key issues review) // Rep. Prog. Phys. – 2016. – V. 79, N 3. – P. 032601.*

8. *Cubero D., Renzoni F.* Brownian Ratchets: From Statistical Physics to Bio and Nanomotors. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2016. – 200 p.
9. *Hänggi P., Marchesoni F.* Artificial Brownian motors: Controlling transport on the nanoscale // *Rev. Mod. Phys.* – 2009. – V. 81, N 1. – P. 387–442.
10. *Schadschneider A., Chowdhury D., Nishinari K.* Stochastic Transport in Complex Systems: From Molecules to Vehicles. – Amsterdam: Elsevier, 2010. – 582 p.
11. *Chauwin J.-F., Ajdari A., Prost J.* Force-free motion in Asymmetric structures: a mechanism without diffusive steps // *Europhys. Lett.* – 1994. – V. 27, N 6. – P. 421–426.
12. *Rozenbaum V.M., Yang D.-Y., Lin S.H., Tsong T.Y.* Catalytic Wheel as a Brownian Motor // *J. Phys. Chem. B.* – 2004. – V. 108, N 40. – P. 15880–15889.
13. *Розенбаум В.М.* Высокотемпературные броуновские моторы: детерминистические и стохастические флуктуации периодического потенциала // *Письма в ЖЭТФ.* – 2008. – Т. 88, № 5. – С. 391–395.
14. *Wu S.-H., Huang N., Jaquay E., Povinelli M.L.* Near-field, on-chip optical Brownian ratchets // *Nano Lett.* – 2016. – V. 16, N 8. – P. 5261–5266.
15. *Розенбаум В.М., Шапочкина И.В., Трахтенберг Л.И.* Метод функций Грина в теории броуновских моторов // *Успехи физ. наук.* – 2019. – Т. 189, № 5. – С. 529–543.
16. *Harmer G.P., Abbott D.* Losing strategies can win by Parrondo's paradox // *Nature.* – 1999. – V. 402. – P. 864.
17. *Parrondo J.M.R., Harmer G.P., Abbott D.* New paradoxical games based on Brownian ratchets // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – V. 85, N 4. – P. 5226–5229.
18. *Parrondo J.M.R., Dinís L.* Brownian motion and gambling: from ratchets to paradoxical games // *Contemp. Phys.* – 2004. – V. 45, N 2. – P. 147–157.
19. *Derrida B.* Velocity and diffusion constant of a periodic one-dimensional hopping model // *J. Stat. Phys.* – 1983. – V. 31, N 3. – P. 433–450.
20. *Розенбаум В.М.* Конструктивная роль хаоса: броуновские моторы и выигрышные стратегии в теории игр // *Химия, физика и технология поверхности.* – 2020. – Т. 11, № 1. – С. 100–114.
21. *Швед Н.Ю., Шапочкина И.В., Розенбаум В.М.* Температурное обращение движения адиабатического броуновского мотора // *Вестник БГУ.* – 2014. – Серия 1, № 2. – С. 27–32.
22. *Astumian R.D., Hänggi P.* Brownian motors. Thermal motion combined with input energy gives rise to a channeling of chance that can be used to exercise control over microscopic systems // *Phys. Today.* – 2002. – V. 55, N 11. – P. 33–39.
23. *Розенбаум В.М.* Низкотемпературный режим функционирования адиабатического броуновского мотора // *Физика низких температур.* – 2014. – Т. 40, № 5. – С. 604–607.
24. *Hunt A.J., Gittes F., Howard J.* The force exerted by a single kinesin molecule against a viscous load // *Biophys. J.* – 1994. – V. 67, N 2. – P. 766–781.
25. *Svoboda K., Block S.M.* Force and velocity measured for single kinesin molecules // *Cell.* – 1994. – V. 77, N 5. – P. 773–784.
26. *Mogilner A., Mangel M., Baskin R.J.* Motion of molecular motor ratcheted by internal fluctuation and protein friction // *Phys. Lett. A.* – 1998. – V. 237, N 4–5. – P. 297–306.
27. *Okada Y., Hirokawa N.* Mechanism of the single-headed processivity: Diffusional anchoring between the K-loop of kinesin and the C terminus of tubulin // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* – 2000. – V. 97, N 2. – P. 640–645.
28. *Dekhtyar M.L., Ishchenko A.A., Rozenbaum V.M.* Photoinduced molecular transport in biological environments based on dipole moment fluctuations // *J. Phys. Chem. B.* – 2006. – V. 110, N 41. – P. 20111–20114.
29. *Okada Y., Hirokawa N.* A Processive Single-Headed Motor: Kinesin Superfamily Protein KIF1A // *Science.* – 1999. – V. 283, N 5405. – P. 1152–1157.

REFERENCES

1. Gulyaev Yu.V., Bugaev A.S., Rozenbaum V.M., Trakhtenberg L.I. Nanotransport controlled by means of the ratchet effect. *Physics-Uspekhi.* 2020. **63**: 311. [in Russian].
2. Howard J. *Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton.* (Sunderland, MA: Sinauer Associates, 2001).
3. Reimann P. Brownian Motors: Noisy Transport far from Equilibrium. *Phys. Rep.* 2002. **361**(2–4): 57.
4. Bressloff P.C., Newby J.M. Stochastic models of intracellular transport. *Rev. Mod. Phys.* 2013. **85**:135.
5. Chowdhury D. Stochastic mechano-chemical kinetics of molecular motors: A multidisciplinary enterprise from a physicist's perspective. *Phys. Rep.* 2013. **529**: 1.
6. Kolomeisky A.B. *Motor Proteins and Molecular Motors.* (Boca Raton FL: CRS Press, 2015).

7. Hoffmann P.M. How molecular motors extract order from chaos (a key issues review) *Rep. Prog. Phys.* 2016. **79**(3): 032601.
8. Cubero D., Renzoni F. *Brownian Ratchets: From Statistical Physics to Bio and Nanomotors*. (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2016).
9. Hänggi P., Marchesoni F. Artificial Brownian motors: Controlling transport on the nanoscale. *Rev. Mod. Phys.* 2009. **81**(1): 387.
10. Schadschneider A., Chowdhury D., Nishinari K. *Stochastic Transport in Complex Systems: From Molecules to Vehicles*. (Amsterdam: Elsevier, 2010).
11. Chauwin J.-F., Ajdari A., Prost J. Force-free motion in Asymmetric structures: a mechanism without diffusive steps. *Europhys. Lett.* 1994. **27**(6): 421.
12. Rozenbaum V.M., Yang D.-Y., Lin S.H., Tsong T.Y. Catalytic Wheel as a Brownian Motor. *J. Phys. Chem. B.* 2004. **108**(40): 15880.
13. Rozenbaum V.M. High-temperature brownian motors: Deterministic and stochastic fluctuations of a periodic potential. *JETP Lett.* 2008. **88**(5): 342.
14. Wu S.-H., Huang N., Jaquay E., Povinelli M.L. Near-field, on-chip optical Brownian ratchets. *Nano Lett.* 2016. **16**(8): 5261.
15. Rozenbaum V.M., Shapochkina I.V., Trakhtenberg L.I. Green's function method in the theory of Brownian motors. *Physics-Uspokhi.* 2019. **62**(5): 496. [in Russian].
16. Harmer G.P., Abbott D. Losing strategies can win by Parrondo's paradox. *Nature.* 1999. **402**: 864.
17. Parrondo J.M.R., Harmer G.P., Abbott D. New paradoxical games based on Brownian ratchets. *Phys. Rev. Lett.* 2000. **85**(4): 5226.
18. Parrondo J.M.R., Dinís L. Brownian motion and gambling: from ratchets to paradoxical games. *Contemp. Phys.* 2004. **45**(2): 147.
19. Derrida B. Velocity and diffusion constant of a periodic one-dimensional hopping model. *J. Stat. Phys.* 1983. **31**(3): 433.
20. Rozenbaum V.M. Constructive role of chaos: Brownian motors and winning strategies in game theory. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni.* 2020. **11**(1): 100. [in Russian].
21. Shved N.Yu., Shapochkina I.V., Rosenbaum V.M. Temperature motion reversion of the adiabatic Brownian motor. *Vestnik BGU.* 2014. **1**(2): 27. [in Russian].
22. Astumian R.D., Hänggi P. Brownian motors. Thermal motion combined with input energy gives rise to a channeling of chance that can be used to exercise control over microscopic systems. *Phys. Today.* 2002. **55**(11): 33.
23. Rozenbaum V.M. Low-temperature operational regime of an adiabatic Brownian motor. *Low Temperature Physics.* 2014. **40**(5): 604. [in Russian].
24. Hunt A.J., Gittes F., Howard J. The force exerted by a single kinesin molecule against a viscous load. *Biophys. J.* 1994. **67**(2): 766.
25. Svoboda K., Block S.M. Force and velocity measured for single kinesin molecules. *Cell.* 1994. **77**(5): 773.
26. Mogilner A., Mangel M., Baskin, R.J. Motion of molecular motor ratcheted by internal fluctuation and protein friction. *Phys. Lett. A.* 1998. **237**(4–5): 297.
27. Okada Y., Hirokawa N. Mechanism of the single-headed processivity: Diffusional anchoring between the K-loop of kinesin and the C terminus of tubulin. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2000. **97**(2): 640.
28. Dekhtyar M.L., Ishchenko A.A., Rozenbaum V.M. Photoinduced molecular transport in biological environments based on dipole moment fluctuations. *J. Phys. Chem. B.* 2006. **110**(41): 20111.
29. Okada Y., Hirokawa N. A Processive Single-Headed Motor: Kinesin Superfamily Protein KIF1A. *Science.* 1999. **283**(5405): 1152.

Получена 20.05.2020, принята 27.08.2020