

Комп'ютерне моделювання броунівського руху

Ю.В. Єчкало, старший викладач кафедри фундаментальних дисциплін Криворізького металургійного факультету Національної металургійної академії України

У статті описано процес створення комп'ютерної моделі броунівського руху у середовищі електронних таблиць.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, броунівський рух.

Єчкало Ю.В. Компьютерное моделирование броуновского движения.

В статье описан процесс создания компьютерной модели броуновского движения в среде электронных таблиц.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, броуновское движение.

Echkalov J. Computer model of a Brownian motion.

In article is described process of creation of computer model of a Brownian motion.

Key words: computer model, Brownian motion.

Ознайомлення учнів з методами наукового пізнання – одна з важливих цілей шкільної освіти. Різновиди цих методів – теоретичні методи пізнання. До них відносять такі способи отримання нових наукових знань, які не пов'язані напряму із дослідом: це висування гіпотези, уявний експеримент, аналогія, ідеалізація, моделювання тощо.

Можна привести ряд доводів на користь того, що цим методам необхідно навчати школярів. По-перше, теоретичні методи містять у своєму складі ті дії, які потрібні для раціонального вирішення багатьох життєвих питань. Наприклад, досить актуальні вміння аналізувати ситуацію, що створилася, ставити перед собою конкретну мету, розробляти шляхи її досягнення, міркувати, підбирати доводи «за» і «проти», прогнозувати наслідки тощо. По-друге, для того щоб глибоко розуміти фізику, учневі недостатньо знати визначення, формули, наукові факти, формулювання законів. Необхідно ще й розбиратися в їхньому походженні, вміти застосовувати їх у конкретній ситуації. А це можливо тільки при оволодінні теоретичними методами пізнання. По-третє, будь-який теоретичний метод – це сукупність розумових дій. Оскільки дані методи науки сформувалися пізніше за інші, можна стверджувати, що вони, а значить і розумові дії, пройшли еволюційний відбір і тепер відображають оптимальний шлях до мети. Формування в учнів умінь виконувати такі дії слугує розвитку мислення. По-четверте, сучасна людина повинна вміти орієнтуватися у морі

інформації, що надходить до неї із найрізноманітніших джерел. Ця інформація може бути науковою, ненауковою, помилковою. Щоб визначити її характер, необхідно ще в школі набути власного досвіду виконання критичного аналізу, доказів висунутих положень, усвідомлення шляху, що привів до неї.

На практиці навчання теоретичним методам пізнання реалізується далеко не повною мірою. Одна з основних причин цього така: теоретичні знання, як правило, повідомляють на уроці в готовому вигляді. Наслідок: теорія з'являється перед учнями як сформована статична система; діяльність же школярів зводиться лише до «поглинання» готової інформації про теорії [10].

Методу пізнання не можна навчити, розповідаючи про нього або наводячи приклади його застосування іншими людьми. Він може бути освоєний тільки в процесі активних дій. У зв'язку із цим у [3, 9] пропонується навчати теоретичним методам пізнання шляхом організації самостійної діяльності учнів по «створенню» нових для них знань.

З розвитком фізичної науки, з її змістом нерозривно пов'язаний метод моделювання. Один із перших вітчизняних дослідників дидактичних функцій методу моделювання Л.Р. Калапуша зазначає: «метод моделювання... був і залишається своєрідним інструментом дослідження складних фізичних явищ і процесів. Тому вивчення шкільного курсу фізики не може проходити у відриві від методу моделювання як наукового методу пізнання. Метод моделювання, завдяки своїм специфічним особливостям, ще зарекомендував себе як досить ефективний засіб навчання, який може бути реалізований групою словесних, демонстраційних або практичних методів навчання» [6, 16].

З короткого пояснення особливостей методу моделей як наукового методу пізнання оточуючого світу доцільно починати вивчення молекулярно-кінетичної теорії [8]. Метод моделей полягає у тому, що на основі експериментального вивчення властивостей деякого складного об'єкта висловлюється гіпотеза про його внутрішню будову, властивості складових частин складного об'єкта і закони їх взаємодії між собою. Якщо висунута гіпотеза не тільки дозволяє пояснити всі відомі властивості виучуваного об'єкта, але й правильно передбачає деякі його властивості, невідомі раніше, то з гіпотези вона перетворюється на теорію.

Характерною рисою методу моделей є введення спрощених уявлень про виучуваний об'єкт, зведення невідомого до відомого у нових сполученнях. Ця особливість методу моделей зумовлює наближений характер будь-якої теорії, отриманої з його допомогою, і примушує особливо строго ставитися до з'ясування границь застосовності теорії на практиці.

Слід також звернути увагу учнів на те, що існує декілька різних методів моделювання. До них відноситься, наприклад, виготовлення зменшених або збільшених моделей об'єктів з

метою вивчення їхніх властивостей, а також комп'ютерне моделювання. Комп'ютерна модель поєднує в собі властивості матеріального й мисленого математичного моделювання. Користуючись комп'ютерною моделлю, дослідник може змінювати відповідні параметри досліджуваного об'єкта, визначати найоптимальніші їх значення, встановлювати між ними функціональні залежності тощо [5].

Переважає застосування метод моделювання знаходить у вирішальних експериментах молекулярно-кінетичної теорії: дифузії в газах, броунівському русі, дослідах Перрена та Штерна, різних методах визначення сталої Авогадро. Факультативний курс комп'ютерного моделювання дає змогу розглянути їх більш детально, ніж в основному курсі фізики. Це зумовлено такими чинниками.

Зміст діяльності учнів на уроках, напрями їх творчого пошуку регламентовано навчальною програмою. Не завжди можливе органічне поєднання діяльності зі створення комп'ютерних моделей з розв'язанням дидактичних задач уроку. Час, що можна присвятити комп'ютерному моделюванню, обмежено як тривалістю самого уроку, так і часом, відведеним на окремі його етапи.

Моделі доводиться підбирати досить прості, такі, які б потребували нескладного алгоритму і застосування знань, набутих під час вивчення фізики на попередніх заняттях. Часто доводиться обмежуватися роботою з готовою моделлю.

На факультативних заняттях можна краще враховувати інтереси, потреби, мотиви, індивідуальні нахили та особливості учнів, стимулювати інтелектуальну активність і самостійність школярів.

Факультативні заняття дають можливість організувати роботу учнів над досить складними комп'ютерними моделями, розробка і створення яких вимагає застосування знань з різних розділів курсу фізики та інших предметів (зокрема, математики та інформатики), встановлення зв'язків між ними, проведення обчислювальних експериментів, використання додаткової наукової літератури. Велике значення має і творча атмосфера колективу, що потребує від кожного учасника активної пошукової діяльності.

Основне положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини, що впливає з дослідних фактів, полягає в тому, що всі макроскопічні тіла складаються з атомів і молекул, які перебувають у стані безперервного хаотичного теплового руху. Найбільш переконливим дослідним фактом, що наочно підтверджує хаотичний характер теплового руху й залежність інтенсивності цього руху від температури, є броунівський рух.

Спостерігаючи у мікроскоп за рухом дрібних частинок у рідині, можна виявити, що кожна частинка здійснює хаотичний рух. Уявлення про характер блукання частинки можна отримати, якщо фіксувати її положення в полі зору вимірювального мікроскопа через рівні

проміжки часу. З'єднавши послідовні положення частинки прямими, ми одержимо ламану лінію. На рис. 1 зображена отримана Ж. Перреном горизонтальна проекція (у збільшеному вигляді) послідовних положень, зайнятих через кожні 30 с трьома частинками гумігуту діаметром трохи більше 1 мм.

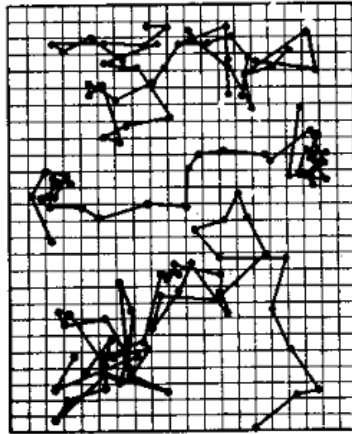


Рис. 1. Броунівський рух трьох частинок гумігуту у воді

Напрямки сусідніх ділянок ламаної лінії складають різні кути один з одним, так що не вдається помітити ніякої закономірності у зміні напрямку ламаної лінії. Чим коротші проміжки часу, через які фіксується положення частинки, тим більш зламаною буде виглядати «траєкторія» частинки. На рис. 2 зображене більше число переміщень однієї частинки гумігуту, отриманих тим же способом, що і на попередньому рисунку [7].

Якщо спостерігати за рухом відразу декількох частинок у рідині, то можна помітити, що вони рухаються то в один бік, то у протилежні боки, то під кутом одна до одної. Звідси можна зробити висновок, що спостережуваний броунівський рух не пов'язаний з переміщенням потоків рідини, оскільки у цьому випадку сусідні частинки завжди переміщувалися б разом. На досліді ж ніякої узгодженості в русі сусідніх частинок не спостерігається, рухаються вони цілком незалежно одна від одної.

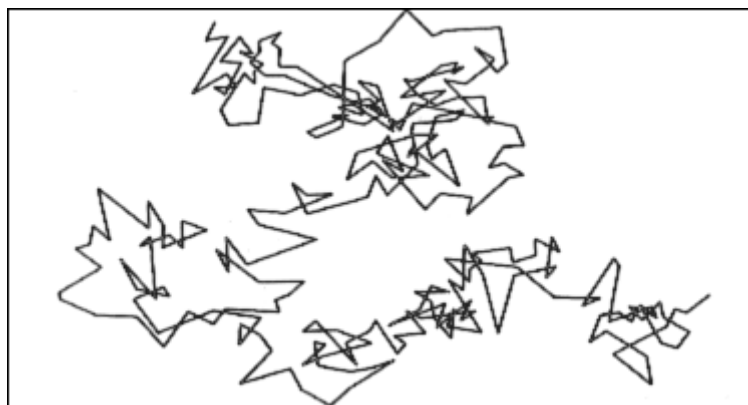


Рис. 2. Більше число переміщень однієї частинки гумігуту

Змінюючи температуру, при якій проводиться дослід, можна помітити, що зі збільшенням

температури інтенсивність броунівського руху зростає, зі зниженням температури він завмирає.

Такий характер руху дозволяє припустити, що броунівська частинка рухається під дією ударів, отриманих від молекул рідини, у якій вона перебуває. Якщо при цьому вважати, що тепловий рух молекул рідини є хаотичним, то можна пояснити всі спостережувані на досліді закономірності броунівського руху.

На перший погляд могло б здатися, що цілком хаотичний, безладний характер ударів окремих молекул повинен був би призводити до того, що броунівська частинка, маса якої у багато разів більша від маси молекули, взагалі не повинна була б помітно переміщуватися. Насправді, дія ударів, отриманих броунівською частинкою з одного боку, має повністю компенсуватися ударами із протилежного боку. У такій ситуації, здавалося б, броунівська частинка може тільки «тремтіти» на місці. Помилка такого міркування полягає в тому, що випадковий процес підмінюється, власне кажучи, регулярним чергуванням впливів із протилежних боків. Але таке чергування вже не є випадковим процесом, а має високий ступінь упорядкованості. Ступінь упорядкованості такого чергування не відрізняється від ступені упорядкованості процесу, в якому всі завдані частинці удари відбуваються в одному напрямку [2].

Чудовий результат, доступний експериментальній перевірці, був отриманий А. Ейнштейном на основі використання молекулярно-кінетичної теорії для пояснення броунівського руху. З теорії броунівського руху, створеної А. Ейнштейном у 1905 р., випливало, що у хаотичному русі маленької твердої частинки, що відбувається під дією молекул рідини або газу, повинні спостерігатися цілком визначені закономірності. Найважливішою серед них виявляється залежність середнього квадрату переміщення частинки від інтервалу часу між двома послідовними моментами спостережень і від температури рідини або газу. Головний висновок теорії полягає в тому, що квадрат зміщення броунівської частинки від початкового положення, усереднений по багатьом броунівським частинкам, пропорційний до часу спостереження. При цьому сам коефіцієнт пропорційності зростає при збільшенні абсолютної температури [8].

Вивчення броунівського руху відіграло визначну роль у розвитку молекулярно-кінетичної теорії будови речовини. Саме броунівський рух не тільки приніс неспростовний доказ реальності атомів і молекул, але й дозволив уперше підрахувати кількість молекул у макроскопічному об'ємі речовини, тобто визначити число Авогадро. Таким чином було остаточно встановлено, що тепла форма руху матерії обумовлена хаотичним рухом атомів або молекул, з яких складаються макроскопічні тіла.

Які основні особливості броунівського руху можна встановити з цих даних?

– У кожний момент часу частинка може з однаковою імовірністю переміститися у будь-якому напрямку.

– Величина цього зміщення також випадкова і залежить від властивостей рідини, її температури та розмірів частинки.

– Для фіксованої системи є деяке середнє за один акт спостереження зміщення l , яке зростає зі зростанням температури та зменшенням в'язкості рідини.

Ці знання про броунівський рух ми покладемо в основу чисельної моделі. Експериментуючи з моделлю, ми хочемо отримати типові «траєкторії» броунівської частинки і визначити середню відстань, яку проходить броунівська частинка за великий інтервал часу спостереження t . Для реалізації моделі скористаємось середовищем Microsoft Excel [1].

Положення броунівської частинки задаватимемо у декартовій системі координат. У початковий момент нехай частинка знаходиться у початку координат. Зміщення частинки уздовж кожної з осей уздовж кожної з осей є випадковим з середнім за величиною зміщенням l і рівномірним в обох напрямках. Це зміщення будемо формувати за допомогою стандартного датчика випадкових чисел СЛЧИС() із рівномірним розподілом від 0 до 1:

$$\Delta x = 2l \cdot (\text{СЛЧИС}() - 0,5); \Delta y = 2l \cdot (\text{СЛЧИС}() - 0,5).$$

Координати нового положення частинки у послідовні моменти часу будемо визначати так:

$$x_{n+1} = x_n + \Delta x; y_{n+1} = y_n + \Delta y.$$

Відповідний момент часу буде $t_n = \Delta t \cdot n$. Таким чином, можна сказати, що час пропорційний до числа кроків по фіксації положення частинки. Відстань L , на яку віддалилась частинка від початку координат, очевидно, дорівнює $\sqrt{x_n^2 + y_n^2}$.

Структура даного проекту типова для середовища електронних таблиць. Загальний алгоритм складається з трьох блоків. Перший блок – формування таблиці значень характеристик процесу (x, y, L) у послідовні моменти часу; другий – побудова графіків за допомогою вбудованого майстра діаграм; третій – оформлення інтерфейсу. У якості результату представлені положення броунівської частинки у послідовні моменти часу, за умови, що у початковий момент часу частинка знаходилася у початку координат. Для визначення її положення у наступні моменти часу використовувався вбудований датчик випадкових чисел з діапазоном $(0, 1)$. На другій діаграмі представлена залежність від часу квадрату відстані від початкової точки до поточного положення частинки. Видно, що у середньому ця відстань зростає з часом.

У якості самостійного завдання можна запропонувати розглянути різні реалізації,

перераховуючи значення, поміщені до таблиці.

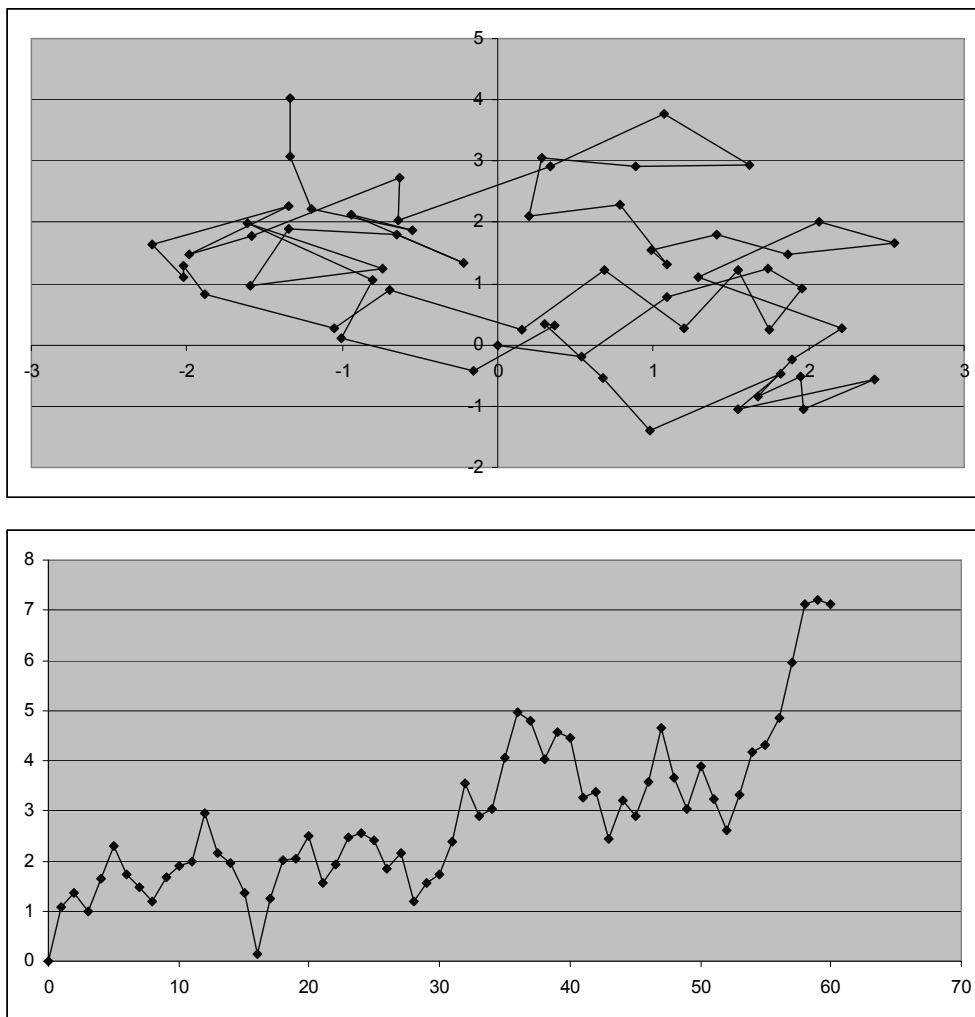


Рис. 3. Результат експерименту на моделі MS Excel

Отже, чисельне моделювання має багато спільного з лабораторними експериментами. Основним пунктом чисельного моделювання є розробка ідеалізованої моделі фізичної системи. Потім необхідно визначити процедуру або алгоритм реалізації даної моделі на комп'ютері. Комп'ютерна програма моделює фізичну систему та описує обчислювальний експеримент. Такий обчислювальний експеримент слугує містком між лабораторними й теоретичними розрахунками [4]. Наприклад, ми можемо отримати по суті точні результати, моделюючи ідеалізовану модель, у якій немає жодного лабораторного аналогу. Порівняння результатів моделювання з відповідними теоретичними розрахунками слугує стимулом для розвитку чисельних методів. З іншого боку, можна проводити моделювання на реалістичній моделі для того, щоб здійснити більш пряме порівняння з лабораторним експериментом. Комп'ютерне моделювання, як і лабораторні експерименти, не замінює роздуми, а є інструментом для розуміння складних явищ.

Література

1. Компьютерные модели в школьном курсе физики / Р.В. Бирих, Е.А. Еремин, В.И. Чернатынский // Информатика. – 2006. – № 14. – С. 3-45.
2. Бутиков Е.И. Физика для поступающих в вузы / Бутиков Е.И., Быков А.А., Кондратьев А.С. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – 608 с., ил.
3. Голин Г.М. Вопросы методологии физики в курсе средней школы: Кн. для учителя / Голин Г.М. – М.: Просвещение, 1987. – 127 с.
4. Гулд Х. Компьютерное моделирование в физике: Ч. 1. Пер. с англ / Х. Гулд, Я. Тобочник. – М.: Мир, 1990.
5. Калапуша Л.Р. Моделі в науці та в навчальному процесі з фізики. Частина I / Л.Р. Калапуша // Фізика та астрономія в школі. – 2007. – № 1. – С. 10-13.
6. Калапуша Л.Р. Моделі в науці та в навчальному процесі з фізики. Частина II / Л.Р. Калапуша // Фізика та астрономія в школі. – 2007. – № 3. – С. 13-17.
7. Льюис Марио. История физики / Марио Льюис. – М.: Мир, 1970. – 464 с., ил.
8. Методика факультативных занятий по физике: Пособие для учителя [Кабардин О.Ф., Кабардина С.И., Орлов В.А. и др.]; под ред. О.Ф. Кабардина, В.А. Орлова. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Просвещение, 1988. – 240 с.: ил.
9. Мощанский В.Н. Формирование мировоззрения учащихся при изучении физики / Мощанский В.Н. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Просвещение, 1989. – 192 с.
10. Одинцова Н.И. Обучение теоретическим методам познания / Н.И. Одинцова // Физика в школе. – 2002. – № 4. – С. 27-32.