

УДК 53:004.924

Муляр В. П., к. пед. н., доцент, Яцюк С. М., к. пед. н., доцент  
Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки**ЕЛЕМЕНТИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ У ВІЗУАЛІЗАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ  
МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ЯВИЩ І ПРОЦЕСІВ**

**Муляр В. П., Яцюк С. М. Елементи комп'ютерної графіки у візуалізації результатів моделювання фізичних явищ і процесів.** У статті досліджено можливості моделювання в науці й у навчальному процесі. Розглянуто основні прийоми комп'ютерної графіки та їх використання для візуалізації результатів моделювання фізичних процесів і явищ.

**Ключові слова:** моделювання, комп'ютерне моделювання, комп'ютерний експеримент, комп'ютерна графіка, навчальний процес.

**Муляр В. П., Яцюк С. М. Элементы компьютерной графики в визуализации результатов моделирования физических явлений и процессов.** В статье исследованы возможности моделирования в науке и в учебном процессе. Рассмотрены основные приемы компьютерной графики и их использование для визуализации результатов моделирования физических процессов и явлений.

**Ключевые слова:** моделирование, компьютерное моделирование, компьютерный эксперимент, компьютерная графика, учебный процесс.

**Mulyar V. P., Yatsyuk S. M. Elements of computer graphics in visualization of results of modeling of physical phenomena and processes.** The capabilities of modeling in science and in the learning process are analyzed in the article. The basic techniques of computer graphics and their use for visualization of modeling of physical processes and phenomena are described.

**Keywords:** modeling, computer simulation, computer experiment, computer graphics, learning process.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** У процесі пізнання і практичної діяльності людина широко застосовує різноманітні моделі. Під моделюванням розуміють заміну вивчення явища в природі вивченням аналогічного явища на моделі. Основний зміст моделювання полягає в тому, щоб за результатами дослідів із моделями можна отримати потрібну інформацію про досліджуваний об'єкт, безпосереднє вивчення якого становить значні труднощі або зовсім неможливе. Значно розширилися можливості цього методу з появою сучасних комп'ютерів. Вони поєднали в собі матеріальні та мислені математичні моделі, що дало змогу на цій основі одержати новий вид моделювання – комп'ютерне.

Моделювання стало невід'ємним складником навчального процесу в вищій школі. І це закономірно, адже сам процес формування знань пов'язаний із перетворенням у свідомості студента одних моделей в інші, які є похідними від перших, але точнішими, з більшим наближенням до абсолютної істини. Ознайомлення студентів із методами науки, зокрема із методом моделювання, дає їм можливість зрозуміти логіку наукового пізнання, осмислити його методологію. Моделювання дає можливість викладачеві глибше розкрити зміст фізичних понять, ознайомити студентів із сучасною експериментальною базою фізики, розкрити важливе значення методів дослідження фізичних явищ і процесів, озброїти студентів системою фізичних знань у тісному зв'язку з методами наукових досліджень.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Фундаментальні дослідження в галузі моделювання зробили такі вчені як М. Алексєєв, М. Амосов, В. Веніков, Б. Глинський, В. Глушков, Ю. Жданов, Б. Кедров, І. Новік, І. Ревзін, В. Штофф, А. Уємов та багато інших. Вагомий внесок у розвиток комп'ютерного моделювання зробив академік О. А. Самарський. Саме ним була запропонована знаменита тріада «модель – алгоритм – програма» і розроблена технологія комп'ютерного моделювання, яка використовується для вивчення фізичних явищ. Дослідженню дидактичних функцій методу моделювання присвячені праці Л. Калапуші, В. Попковича, М. Солодухіна, Л. Зоріної та інші. Вчені вважають, що моделювання в навчальному процесі з фізики має ту специфічну особливість, що воно одночасно виступає методом наукового пізнання, є частиною змісту навчального матеріалу з фізики та ефективним засобом її вивчення [1, с. 4].

**Формулювання цілей статті.** Мета статті – розглянути основні прийоми комп'ютерної графіки та їх використання для візуалізації результатів моделювання фізичних явищ і процесів.

**Виклад основного матеріалу.** Комп'ютер є ефективним засобом моделювання реальних предметів або матеріалів. Широкі можливості мають комп'ютери для розв'язання математичних задач. Як відомо, не всі задачі можна розв'язати аналітично, тобто отримати розв'язок у вигляді формул. У такому випадку використовують числові методи, за допомогою яких можна отримати лише приблизний результат. Наближені розрахунки на комп'ютерах дозволяють підвищити їхню

точність і швидкість. Як показує практика, лише з використанням комп'ютерної техніки можна розв'язати задачі: в яких за однією і тією ж формулою необхідно провести обчислення декілька разів з наступною побудовою графіків; у процесі розв'язання яких виникають рівняння високих степенів або трансцендентні рівняння, які легко розв'язуються тільки числовими методами; в яких потрібно знайти екстремуми функцій, якщо ці екстремуми неможливо знайти аналітично; у яких потрібно знайти визначений інтеграл, обчислення якого потребує використання числових методів; з оптимізації простих конструкцій і процесів; у яких необхідно застосувати числові методи обробки експериментальної залежності  $y(x)$  (підбір функціонального масштабу, апроксимація методом найменших квадратів, лінійна екстраполяція, обчислення похибок тощо); у яких потрібно розв'язувати диференціальні рівняння; у яких виникає необхідність розв'язання системи лінійних рівнянь; на спектральний аналіз (розкладання в ряд Фур'є) і синтез функції за відомим спектром [2, с. 4].

Окрім виконання числових розрахунків, комп'ютери надають широкі можливості для здійснення комп'ютерного експерименту, який використовується для виконання досліджень у таких напрямках, як-от [3, с. 21–22]: розрахунок ядерних реакцій; розв'язування задач небесної механіки, астрономії та космонавтики; вивчення глобальних явищ на Землі, моделювання клімату, дослідження екологічних проблем, глобального потепління, наслідків ядерного конфлікту; розв'язування задач механіки суцільних середовищ; комп'ютерне моделювання різних технологічних процесів; розрахунок хімічних реакцій та біологічних процесів, розвиток хімічної та біологічної технологій; соціологічні дослідження, зокрема, моделювання виборів, голосування, поширення відомостей, зміна громадської думки, військових дій; розрахунок і прогнозування демографічної ситуації в країні та світі; імітаційне моделювання роботи різних технічних пристроїв; економічні дослідження розвитку підприємств.

Комп'ютерне моделювання є одним з найважливіших інструментів, що полегшує проникнення людини в таємниці науки. Моделювання дозволяє створювати вражаючі наочні образи, які сприяють розумінню досліджуваного явища і запам'ятовуванню важливих деталей у порівнянні з математичними рівняннями. Моделювання дозволяє унаочнити абстрактні закони і принципи, привернути увагу дослідника до тонких деталей досліджуваного явища, які вони не помічають під час безпосереднього спостереження. Графічне відображення результатів моделювання на екрані комп'ютера одночасно з анімацією досліджуваного явища чи процесу дозволяє досліднику легко сприймати великі обсяги змістовної інформації [4, с. 46].

Універсальних систем комп'ютерної наукової графіки, мабуть, немає через величезну різноманітність задач. Часто програми, які реалізують наочне зображення розв'язку наукової задачі (майже завжди за результатами математичного моделювання), вбудовуються всередину основної програми, записуються на тій самій мові програмування.

Загальну мету наукової графіки можна сформулювати так: зробити невидиме й абстрактне «видимим». За допомогою машинної графіки можна побачити розподіл температури всередині неоднорідно нагрітого тіла складної форми без введення в нього сотень мікродатчиків, побачити розподіл металевих руд під землею без розкопок, розкрити будову невідомої планети за результатами радіолокації тощо. При цьому зрозуміло, що застосуванню машинної графіки повинна передувати математична обробка результатів експерименту, зокрема, створення відповідної математичної моделі і домовленість про сприйняття певних умовностей на рисунку. Більше того, зображення на екрані комп'ютера для тих, хто розуміє всю міру його умовності, приносить більшу користь, ніж тисячі чисел, що є результатом математичних обчислень.

Для розв'язання відносно нескладних задач не обов'язково застосовувати різноманітні стандартні пакети машинної графіки, оскільки при цьому часто виникає проблема поєднання різних систем програмування, яку не завжди легко розв'язати. Доцільніше, мабуть, орієнтуватися на ту мову програмування, на якій реалізується математична модель.

Наведемо декілька прикладів, які ілюструють можливості комп'ютерної графіки у візуалізації результатів моделювання фізичних процесів і явищ [5, с. 686–690].

*Траєкторії руху тіл, графіки.* У багатьох задачах доречно ілюструвати процес моделювання зображеннями рухомих об'єктів та їхніми траєкторіями. Обмежимося випадками плоских (двовірних) рухів, які легко відобразити на плоскому екрані комп'ютера.

Опишемо загальні моменти побудови графіків і траєкторій. Нехай у результаті обчислень ми отримали межі значень координат  $[x_{\min}, x_{\max}]$  і  $[y_{\min}, y_{\max}]$ , та таблицю значень  $x$  і  $y$  в деякі моменти

часу  $0, \tau, 2\tau, \dots, n\tau$ . Потрібно побудувати графіки залежності  $x(\tau)$ ,  $y(\tau)$  та траєкторію руху тіла. Проілюструємо це, використовуючи процедури *Delphi*.

Незвичайна орієнтація «екранної системи» координат створює певні проблеми під час побудови графіків і траєкторій. Ми хочемо виводити їх і задавати координати точок за «природною системою» координат  $x, y$ , зображеної на рис. 1, а графічні процедури (*Ellipse*, *MoveTo*, *LineTo*, *Rectangle* та ін.) сприймають аргументи в «екранній системі»  $x', y'$ .

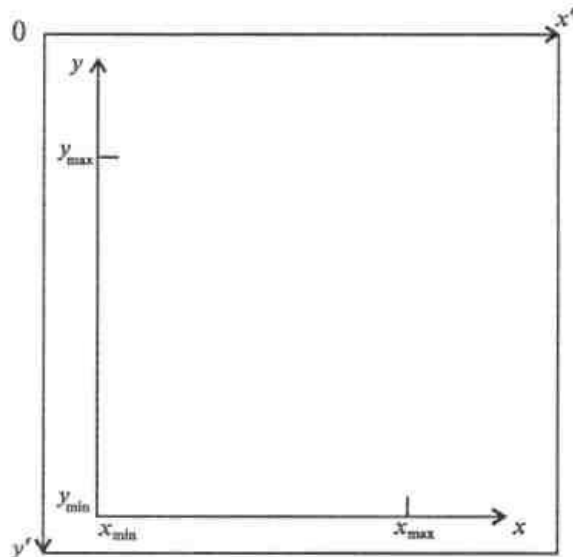


Рис. 1. Екранна і «природна» системи координат

Зробимо розмітку так, як показано на рисунку, і виконаємо лінійне перетворення координат:

$$\begin{aligned} x' &= \alpha x + \beta; \\ y' &= \gamma y + \delta. \end{aligned}$$

Якщо відомі роздільна здатність екрана –  $M$  точок по осі  $x'$  і  $N$  точок по осі  $y'$ , то для знаходження коефіцієнтів  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  достатньо зв'язати будь-які дві точки в різних системах координат, наприклад

$$\begin{aligned} (x = x_{\min}, y = y_{\min}) &\Rightarrow (x' = 10, y' = N - 10); \\ (x = x_{\max}, y = y_{\max}) &\Rightarrow (x' = M - 10, y' = 10) \end{aligned}$$

(відступ на 10 позицій від межі екрана дасть можливість створювати підписи, розмітку осей та ін.). Маємо:

$$\begin{cases} 10 = \alpha \cdot x_{\min} + \beta \\ M - 10 = \alpha \cdot x_{\max} + \beta, \end{cases}$$

звідки

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{M - 20}{x_{\max} - x_{\min}}, \\ \beta &= \frac{10x_{\max} - (M - 10)x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}. \end{aligned}$$

$$\begin{cases} N - 10 = \gamma \cdot y_{\min} + \delta \\ 10 = \alpha \cdot y_{\max} + \delta. \end{cases}$$

Маємо:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{20 - N}{y_{\max} - y_{\min}}, \\ \delta &= \frac{(N - 10)y_{\max} - 10y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}. \end{aligned}$$

Отже, переведення одних координат в інші здійснюється за формулами:

$$x' = \frac{(M - 20)x + 10x_{\max} - (M - 10)x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

$$y' = \frac{(20 - N)y + (N - 10)y_{\max} - 10y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}.$$

Тепер достатньо поставити точку з потрібною координатою  $(x, y)$  за допомогою процедури *Pixels*, а ввівши її в цикл, зобразити графік або траєкторію. Якщо ж потрібно зобразити рух тіла, перед виведенням на екран зображення тіла достатньо стерти попереднє або скористатися іншими відомими прийомами програмування.

*Ізолінії.* У задачах моделювання часто виникає стандартна проблема побудови ліній (поверхонь), уздовж яких деяка функція має однакове значення, т. зв. ізоліній (ізоповерхонь). Це дуже поширена задача візуалізації характеристик деякого скалярного поля в наближенні суцільного середовища: ізотерми – лінії рівної температури; ізобари – лінії рівного тиску; ізолінії функції струму рідини або газу, за якими легко можна уявити собі їх потоки тощо.

Проаналізуємо типову процедуру побудови ізоліній на екрані комп'ютера. Нехай ми маємо двомірну таблицю значень деякої величини  $A$ , отриману в ході математичного моделювання; числа в цій таблиці відповідають значенням цієї величини у вузлах просторової сітки (рис. 2).

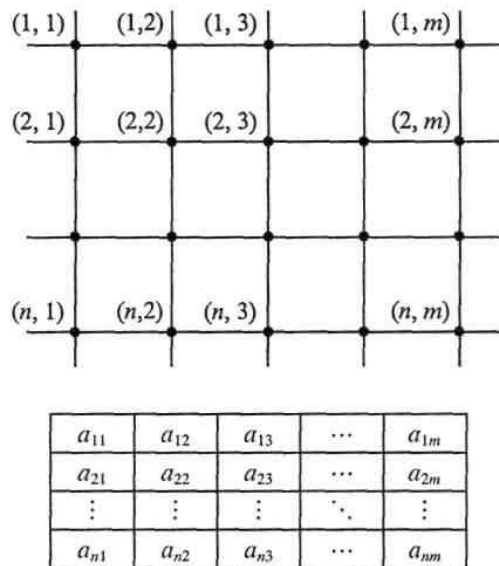


Рис. 2. Просторова сітка і відповідна їй таблиця значень величини  $A$

Задамо деякий, абсолютно умовний, просторовий крок  $h$  між сусідніми вузлами по горизонталі й допоміжну систему координат, у якій вузол  $(1, 1)$  має координату  $(0, 0)$ ; вузол  $(1, 2)$  – координату  $(h, 0)$ ; вузол  $(1, 3)$  – координату  $(2h, 0)$  і т. д. Якщо крок по вертикалі  $h^*$ , то вузол  $(i, j)$  в цій системі має координату  $((j - 1) \cdot h, (i - 1) \cdot h^*)$ .

Заздалегідь знайдемо в таблиці найбільше й найменше значення величин  $a_{ij}$  – припустимо – це  $a_{\min}$  і  $a_{\max}$ . Нехай  $b$  – деяке проміжне значення  $a_{\min} < b < a_{\max}$ . Розглянемо в загальних рисах, як побудувати ізолінію  $A = b$ . Будемо для цього (в циклі) проглядати спочатку всі пари найближчих чисел у першому рядку таблиці в пошуках такої пари, для якої  $b$  знаходиться «всередині». Припустимо, число  $b$  знаходиться між  $a_{1,k}$  і  $a_{1,k+1}$ , тобто або  $a_{1,k} < b < a_{1,k+1}$ , або  $a_{1,k} > b > a_{1,k+1}$ .

За допомогою лінійної інтерполяції знайдемо відповідну горизонтальну координату точки, у якій  $A = b$ :

$$x = (k - 1) \cdot h + \frac{b - a_{1,k}}{a_{1,k+1} - a_{1,k}} h$$

(координата у визначається номером горизонтальної лінії; у цьому разі  $y = 0$ ).

Знайдені координати запам'ятаємо й переглянемо перший рядок у таблиці до кінця, потім проглянемо другий рядок і т. д. Закінчивши з переглядом рядків, ми отримаємо частину точок, які відповідають ізолінії  $A = b$ .

Після цього займемося переглядом стовпців. Припустимо, у другому стовпці знайшлася пара чисел, для якої число  $b$  знаходиться між  $a_{p,2}$  і  $a_{p+1,2}$ . Вона дає наступну точку ізолінії. Закінчивши перегляд усіх стовпців, ми отримаємо максимально можливий набір координат точок, які належать цієї ізолінії. Вивівши їх на екран у потрібному масштабі, отримаємо точкове зображення ізолінії  $A = b$ , після чого можемо, узявши інше значення  $b$ , побудувати наступну ізолінію.

*Умовні кольори, умовне контрастування.* Ще один цікавий прийом сучасної наукової графіки – умовне розфарбовування. Він знаходить широке застосування в різних застосуваннях науки і є набором прийомів максимально зручної, хоча й дуже умовної, візуалізації результатів комп'ютерного моделювання.

Наведемо приклади. У різних дослідженнях температурних полів постає проблема наочного представлення результатів. Найпростіший – представити карту (креслення, план), у деяких точках якої позначені значення температури.

Інший спосіб – набір ізотерм – набагато ефективніший; до нього вдаються деякі газети, які подають стан і прогноз погоди. Але можна добитися ще більшої наочності, враховуючи, що більшості людей властиво, порівнюючи різні кольори, сприймати червоний як «гарячий», голубий як «холодний», а всі інші – між ними. Припустимо, що на деякій території температура в певний момент має в різних місцях значення від  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Розділимо цей діапазон на ділянки з кроком, який дорівнює, наприклад,  $5^{\circ}$   $[-25, -20]$ ,  $[-20, -15]$ ...,  $[+10, +15]$ , і зафарбуємо перший із них у яскраво-голубий, останній – у яскраво-червоний, а всі інші – у проміжні відтінки голубого й червоного кольорів. У результаті отримаємо наочну картину температурного поля. Те саме можна робити, ілюструючи температурне поле і на поверхні оброблюваної на верстаті деталі, і на поверхні далекої планети. До подібного прийому візуалізації вдаються під час моделювання явища теплопровідності у стрижні, розподілу електричних полів.

Умовне розфарбовування може бути ще абстрактнішим, ніж в описаних вище випадках. При моделюванні складних органічних молекул комп'ютер може видавати результати у вигляді різнобарвної картини, на якій атоми водню зображено одним кольором, вуглецю – іншим і т. д., причому атом зображено кулькою (кружечком), у межах якої густина кольору змінюється відповідно до розподілу електронної густини.

Зображення в умовних кольорах і контрастах є потужним прийомом наукової графіки, який дає змогу зрозуміти будову не тільки плоских, а й об'ємних (тримірних) об'єктів. Зокрема, під час пошуку корисних копалин методами аерофотознімання з літаків або космічних супутників комп'ютери будують умовні кольорові зображення розподілу густини під поверхнею Землі. Подібних прикладів можна навести дуже багато.

**Висновки.** Комп'ютерне моделювання є потужним інструментом пізнання якісних і кількісних закономірностей природи. Важливим його етапом після завершення обчислень є усвідомлення результатів, представлення їх в максимально наочній і зручній для сприйняття формі. Візуалізація характеристик полів в наближенні суцільного середовища, зображення в умовних кольорах, представлення результатів у вигляді графіків, діаграм, траєкторій руху динамічних об'єктів дозволяє виділити й відобразити найважливіші для пізнання зв'язки в явищах, які часто бувають недоступними для безпосереднього спостереження, осмислити суть багатьох фізичних процесів.

1. Калапуша Л. Р. Комп'ютерне моделювання фізичних явищ і процесів / Л. Р. Калапуша, В. П. Муляр, А. А. Федонюк / Навч. посіб. для студ. вищих навч. закл. – Луцьк: РВВ «Вежа» Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки, 2007. – 192 с.

2. Бурсиан Э. В. Задачи по физике для компьютера: Учеб. пособие для студ. физ.-мат. пед. ин-тов / Э. В. Бурсиан. – М.: Просвещение, 1991. – 256 с.

3. Майер Р. В. Компьютерное моделирование: Учеб. пособие для студ. пед. вузов / Р. В. Майер. – Глазов, ГГПИ: 2014. – 531 с.

4. Булавин Л. А. Компьютерное моделирование физических систем / Л. А. Булавин, Н. В. Выгорницкий, Н. И. Лебовка. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2011. – 352 с.

5. Могилев А. В. Информатика: Учеб. пособие для студ. пед. вузов / А. В. Могилев, Н. И. Пак, Е. К. Хеннер; Под ред. Е. К. Хеннера. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 816 с.