

УДК 372.51

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2024-1-7>

**Микола САДОВИЙ**

доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри математики та цифрових технологій, Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, вул. Шевченко, 1, м. Кропивницький, Україна, 25006

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0001-6582-6506>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 57217117696

**Олена ТРИФОНОВА**

доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри математики та цифрових технологій, Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, вул. Шевченко, 1, м. Кропивницький, Україна, 25006

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-6146-9844>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 57217117658

**Бібліографічний опис статті:** Садовий, М., Трифонова, О. (2024). Особливості методики формування віртуальних дослідів із вивчення розподілу молекул за швидкостями. *Фізика та освітні технології*, 1, 57–62, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2024-1-7>

## ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДИКИ ФОРМУВАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ДОСЛІДІВ ІЗ НАВЧАННЯ РОЗПОДІЛУ МОЛЕКУЛ ЗА ШВИДКОСТЯМИ

Стаття присвячена мало дослідженій в методиці навчання проблемі – навчання газових явищ. Розкрито один із варіантів методики та її особливостей у формуванні віртуальних дослідів із навчання розподілу молекул за швидкостями. Акцент не робиться на можливості постановки експериментального завдання з підтвердження висновків Дж. Максвелла, та яка роль при цьому відводиться фізичним величинам: маса частинок, температура газу, швидкостям та ін. Не розглядаються можливі методи дослідження, зокрема віртуальні в середовищі просторового розподілу різношвидкісних частинок.

Виокремлено, що при виводі рівняння ідеального газу розглядається постійна, однакова за величиною швидкість всіх молекул і відповідно не розглядається настільки відхиляються одержані результати у формулах від тих, що розглядає Дж. Максвелл, Р. Клаузіс. Пропонується цю плутаницю розв'язати. Запропоновано один з віртуальних експериментальних методів просторового поділу частинок за швидкостями заснований на впливі сили тяжіння на дальність польоту молекул, що вилетіли, наприклад, із посудини. Реалізація ідеї віртуального експерименту ґрунтується на відомих теоретичних та практичних висновках: маємо ідеальний газ; відомі експериментальні результати значень середньоарифметичної, середньоквадратичної та ймовірнісної швидкостей; реальним є створення постійної концентрації газу в посудині; рух молекул у посудині є рівноймовірним. Аналіз одержаних у віртуальному досліді даних показує досить виокремлені три частини: ліворуч осідають молекул із середньоарифметичною швидкістю, в середній частині – найбільш ймовірнісною і праворуч – середньоквадратичною швидкістю, що якісно підтверджує математичну модель розподілу молекул Максвелла.

У подальшому дослідження доцільно проводити в напрямку модернізації такого виду дослідів та з'ясування фізичної суті понять імпульсу, тиску кінетичної енергії молекул газу.

**Ключові слова:** фундаментальні досліді, віртуальний, розподіл молекул, частинки, швидкість.

**Mykola SADOVYI**

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mathematics and Digital Technologies of Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, 1 Shevchenko Str., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0001-6582-6506>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 57217117696

**Olena TRYFONOVA**

*Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of the Department of Mathematics and Digital Technologies of Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, 1 Shevchenko Str., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006*

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-6146-9844>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 57217117658

**To cite this article:** Sadovyi, M., Tryfonova, O. (2024). Osoblyvosti metodyky formuvannya virtual'nykh doslidiv iz navchannya rozpodilu molekul za shvydkostyamy [Peculiarities of the method of forming virtual experiments on learning the distribution of molecules by velocities]. *Physics and Educational Technology*, 1, 57–62, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2024-1-7>

## PECULIARITIES OF THE METHOD OF FORMING VIRTUAL EXPERIMENTS ON LEARNING THE DISTRIBUTION OF MOLECULES BY VELOCITIES

*The article is devoted to a little researched method of teaching gas phenomena. One of the variants of the technique and its features in the formation of virtual experiments on the study of the distribution of molecules by velocities is revealed. The emphasis is not placed on the possibility of setting up an experimental task to confirm J. Maxwell's conclusions, and what role is given to physical quantities: mass of particles, gas temperature, velocities, etc. Possible research methods, in particular virtual ones in the environment of spatial distribution of particles with different speeds, are not considered.*

*It is highlighted that when deriving the equation of an ideal gas, a constant, equal velocity of all molecules is considered and, accordingly, the obtained results in the formulas are not considered so different from those considered by J. Maxwell, R. Clausius. It is proposed to resolve this confusion. One of the virtual experimental methods of spatial separation of particles based on velocities is proposed, based on the influence of gravity on the flight range of molecules that have flown out, for example, from a vessel. The implementation of the idea of a virtual experiment is based on known theoretical and practical conclusions: we have an ideal gas; known experimental results of arithmetic mean, root mean square and probabilistic velocities; the creation of a constant gas concentration in the vessel is real; the movement of molecules in the vessel is equally probable. The analysis of the data obtained in the virtual experiment shows three rather distinct parts: on the left, molecules settle with the average arithmetic speed, in the middle part – the most probable, and on the right – with the mean square speed, which qualitatively confirms Maxwell's mathematical model of the distribution of molecules.*

*In the future, it is advisable to carry out research in the direction of modernization of this type of experiments and clarification of the physical essence of the concepts of momentum, pressure, kinetic energy of gas molecules.*

**Key words:** *fundamental experiments, virtual, distribution of molecules, particles, speed.*

**Актуальність проблеми.** Методика навчання розподілу молекул ідеального газу за швидкостями передбачає ознайомлення суб'єктів навчання з теоретичними висновками Дж. Максвелла та дослідом О. Штерна. Проте акцент не робиться на можливості постановки експериментального завдання з підтвердження висновків Дж. Максвелла, та яка роль при цьому відводиться фізичним величинам: маса частинок, температура газу, швидкостям та ін. Не розглядаються можливі методи дослідження, зокрема, віртуальні в середовищі просторового розподілу різношвидкісних частинок.

У навчальній і методичній літературі знайомство студентів і школярів із подібними фундаментальними дослідженнями проводиться в описовому вигляді. Це пояснюється, насамперед, відсутністю обладнання та приладів для постановки таких дослідів. Заклади освіти не мають необхідного технічного і фінансового потенціалу для їх проведення навіть

в демонстраційному варіанті. Такого характеру досліді повинні мати високу доказовість, так як вони є наочними через неможливість спостерігати рух частинок із різними швидкостями в приладі. У таких випадках використовується метод аналогій або віртуальні досліді. Зокрема, в методичній літературі описується механічна модель, що дозволяє візуалізувати розподіл Максвелла.

Виникає суперечність, яку в методичній і спеціальній літературі не аналізують. Традиційно величина швидкості розглядається лише як функція траєкторії. Крім цього, здійснюється не зовсім коректний перехід до введення поняття квадрату середнього значення швидкості, а потім і середньоквадратичної швидкості запозичивши її у Л. Больцмана. На окремі аспекти проблеми вказували лише окремі вчені. Є неоднозначність із розподілом газових молекулярних швидкостей та їх траєкторій, а відповідно – імпульсу, тиску, енергії та ін.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Щоб бути більш близьким до реалізації висловленої ідеї доцільно простежити шлях становлення висновків учених щодо розподілу молекул за швидкостями. У 1738 р. Даніель Бернуллі опублікував модель, яка містить основні рамки сучасної кінетичної молекулярної теорії. Рудольф Клаузіус продовжив дослідження моделі й у 1857 р. запровадив концепцію середнього вільного шляху пробігу частинок. Ці ідеї були надалі розвинені Максвеллом у 1873 р. у його розподілі молекул за швидкостями. Після теоретичного обґрунтування Дж. Максвеллом математичної моделі розподілу молекул за швидкостями його теоретичні результати підтвердив Л. Больцман.

Дослідник О. Штерн (1920) експериментально підтвердив математичну модель Максвелла. В наступному більш досконалі досліди з підтвердження цієї моделі провели Е. Елдрідж (1927), Б. Ламмерт (1926–1929), І. Естерман (1947), Д. Міллер та П. Куш (1955) та ін., де використовувалося зміщення молекулярного пучка у полі тяжіння.

Методичні особливості навчання розподілу молекул за швидкостями в курсі теоретичної фізики вивчав О. Школа (Школа, 2013). О. Харитонова, Г. Борисова розглянули методiku навчання розподілу Максвелла у закладах фахової передвищої освіти (Харитонова, 2016). Обґрунтування математичного моделювання поняття розподілу молекул за швидкостями розглянуто Th. Krobthong, F. Rivadulla, Ftáčnik J., Lichard P., Písút J. (Krobthong, 2015; Ftáčnik, 1983).

**Мета дослідження.** При виводі рівняння ідеального газу розглядається постійна, однакова за величиною швидкість усіх молекул і відповідно не розглядається настільки відхиляються одержані результати у формулах від тих, що розглядає Дж. Максвелл, Р. Клаузіс. Виникає суперечність, яку в методичній і спеціальній літературі не аналізують. Традиційно величина швидкості розглядається лише як функція траєкторії. Крім цього, здійснюється не зовсім коректний перехід до введення поняття квадрату середнього значення швидкості, а потім і середньоквадратичної швидкості запозичивши її у Л. Больцмана. На деякі аспекти проблеми вказували лише окремі вчені. Є неоднозначність із розподілом газових молекулярних швидкостей та їх траєкторій, а відповідно імпульсу, тиску,

енергії та ін. Ми вважаємо, що цю плутаницю необхідно розв'язати, що й склало мету статті.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У більшості навчальної літератури розподіл Максвелла за швидкостями аналізується за рівноважного стану газу. Це означає, що число молекул, швидкість яких при зіткненні збільшується, дорівнює числу молекул, швидкість яких при зіткненні зменшується. Тобто, якщо газ виведено з рівноважного стану, то розподіл молекул за швидкостями буде відрізнятися від розподілу Максвелла. Однак молекули хаотично рухаються і постійно зіштовхуються. Через невеликий час газ згідно з принципом самоорганізації сам собою переходить у стан рівноваги. Такий процес буде неперервним. Виходячи з таких міркувань можна дати визначення поняття хаотичності теплового руху: рух молекул газу хаотичний, якщо молекули розподіляються за швидкостями у відповідності з законом Максвелла.

Доцільно здійснювати аналіз складових швидкостей у розподілі. Загальновідома функція математичного розподілу молекул за швидкостями Максвелла складається з трьох

складових: константи нормалізації  $\sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}$

(виводиться з умови нормування  $\int_{-\infty}^{\infty} f(v_x) dv_x = 1$ ),

швидкості ( $v^2$ ), експотенціального виразу, куди входить вираз кінетичної енергії.

Р. Флемінг, який займається молекулярним моделюванням для аналізу швидкостей молекул виділяє поняття об'єм зіткнень  $V = l_x \Delta S$ , де  $l_x$  – пройдений шлях групи молекул,  $\Delta S$  – площа, на яку потрапляють молекули,  $\Delta t$  – час проходження молекулою визначеного шляху із швидкістю  $v_x$ . Тоді  $V = v_x \Delta t \Delta S$ , а кількість частинок, що зіткнуться з площею перепони складає

$$N = \frac{1}{2} N_V \frac{V}{V_{заг}} = \frac{1}{2} N_V \frac{v_x \Delta t \Delta S}{V_{заг}} \quad (\text{Krobthong, 2015}).$$

Один із віртуальних експериментальних методів просторового поділу частинок за швидкостями заснований на впливі сили тяжіння на дальність польоту молекул, що вилетіли, наприклад, з посудини. Рух частинок у полі сили тяжіння є рівноприскореним. У загальному випадку дальність польоту  $x$  частинки, що влетіла в досліджуване поле сили тяжіння під кутом  $\phi$  до горизонту на висоті  $h$ , залежить від її початкової швидкості  $v$ . Математично такий рух описується рівняннями  $gx^2 - v^2 \sin^2\phi$ ;

$x = 2hv^2 \cos^2 \alpha$ . З цих рівнянь випливає, що чим більша початкова швидкість  $v$  руху частинки в полі сили тяжіння, тим більша її дальність польоту  $x$ . За дальністю польоту частинок, що вилетіли з виокремленої посудини під певним кутом до горизонту, можна розрахувати їхні

швидкості в посудині:  $v = \sqrt{\frac{gx^2}{h + h \cos 2\alpha + x \sin 2\alpha}}$ .

Щоб частинка, що вилетіла з посудини, потрапила на горизонтальну ділянку  $[x_{i-1}, x_i]$  потрібно, щоб у посудині ця частинка мала швидкість в околі  $[v_{i-1}, v_i]$ . Враховуємо, що розподіл молекул за швидкостями у посудині має відповідати розподілу Максвелла.

Реалізація методу просторового розподілу частинок, що мають різні швидкості, за рахунок впливу сили тяжіння на дальність польоту пов'язана з низкою технічних труднощів. Молекули реальних газів мають велику середньоквадратичну швидкість ( $v_{\text{кв}} \sim 10^2 - 10^3$  м/с при кімнатній температурі). При цьому їхня дальність польоту в полі сили тяжіння могла б скласти  $\sim 10^4 - 10^5$  м (у вакуумі). Реалізація цих умов ні в науковій, ні в навчальній лабораторії неможлива. Тому доцільно скористатися віртуальною комп'ютерною моделлю досліду з демонстрації розподілу Максвелла.

Розташування отвору на поверхні судини (рис. 1) дозволяє розглянути ще одну особливість запропонованого комп'ютерного методу. Розглянемо випадок, коли частинки вилітають з посудини горизонтально ( $\alpha = 0$ ). Дальність польоту лінійно залежить від швидкості  $v$ . В інших випадках ( $\alpha > 0$ ) дальність польоту залежить від модуля швидкості нелінійно. Тобто осередку, розташованого далеко від посудини, буде відповідати більший діапазон швидкостей, ніж осередку

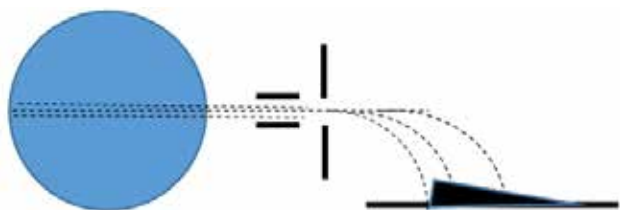


Рис. 1. Принципова схема досліду

тієї ж довжини поблизу судини. Ця особливість методу не перешкоджає отриманню інформації про статистичний розподіл і не перешкоджає отриманню інформації про статистичний розподіл часток «газу» за швидкостями. На це необхідно звернути увагу, щоб сформувати повне уявлення про використання обраного методу. Дана комп'ютерна лабораторна робота надає для цього необхідні дидактичні можливості.

Для підтримки постійного розподілу часток «газу» за швидкостями в посудині обрана модель повністю не взаємодіючих одна з одною матеріальних точок (зіткнення між частинками відсутнє), що дозволяє уникнути перерозподілу кінетичної енергії між частинками в посудині після того, як частина частинок покинула посудину. В умовах комп'ютерної реалізації ідеальної теоретичної моделі цього легко досягти.

Реалізація ідеї віртуального експерименту ґрунтується на відомих теоретичних та практичних висновках: маємо ідеальний газ; відомі експериментальні результати значень середньоарифметичної, середньо-квадратичної та ймовірнісної швидкостей; реальним є створення постійної концентрації газу в посудині; рух молекул у посудині є рівноймовірним.

Головною частиною фізичної частини моделі комп'ютерної експериментальної установки є посудина з газом, наприклад, водяною парою, вуглекислим газом, азотом тощо. Кожна група рухомих молекул створює тиск на стінки посудини. Якщо у такій посудині зробити тонкий отвір, то через нього перпендикулярно до площини посудини буде виходити частина молекул і рухатися у просторі. Щоб не порушувати рівновагу в кількості молекул у посудині доцільно створити умови для їх поповнення. Зокрема, якщо

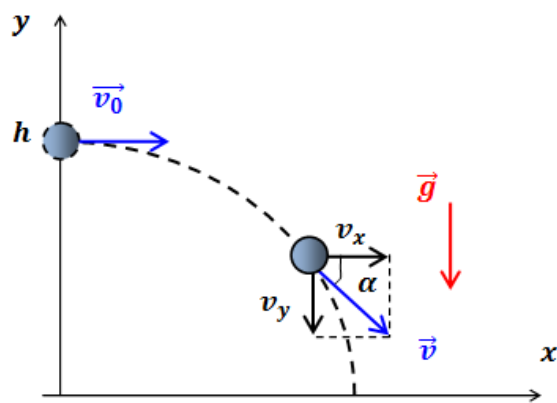


Рис. 2. Зображення руху

використати водяну пару як ідеальний газ, то поповнення молекул можна забезпечити поміщенням у посудину частини води, яка буде випаровуватися. Для забезпечення незмінної концентрації частинок водяної пари у посудині необхідно підтримувати постійність його температури.

Дослідна частина полягає у наступному. Для спрощення ми обрали варіант горизонтального руху частинок, де дальність польоту буде пропорційною швидкості. В інших випадках така залежність не буде пропорційною. Частина рухомих молекул через отвір у посудині вилітають в навколишній простір. Щоб утворився вузький і горизонтально спрямований пучок молекул скористаємося обмежувальними діафрагмами: попарними паралельними пластинками – одну пару горизонтально розміщеними, а другу – вертикально (рис. 1).

Розглядаємо ту частину виділеного пучка молекул, які пройшли своєрідний відбір діафрагмами та потрапили у поле земного тяжіння. Завдяки різній швидкості молекули мають різну кінетичну енергію, а тому і різну траєкторію руху (рис. 2). Маємо класичний випадок руху тіла горизонтально.

За формулою  $L = v_0 \sqrt{\frac{2H}{g}} = C v_0$  визначається

дальність польоту молекули, що вилітає з посудини горизонтально зі швидкістю  $v_0$  під дією сили тяжіння (Жихарев, 2017). Вираз під коренем є постійною величиною за незмінної висоти та позначений  $C$ . Так як швидкості молекул, які вилітають з отвору посудини підлягають розподілу Максвелла, то доцільно визначити дальність польоту молекул, що окремо мають середньоарифметичну, середньоквадратичну та найбільш ймовірну швидкості. Температуру забезпечуємо незмінною.

Для реєстрації частинок, що падають на горизонтальну площину, а відповідно і дальність польоту є декілька способів. Візьмемо за робоче тіло водяну пару. Виріжемо з промокального паперу прямокутну форму і покриємо її речовиною, яка при взаємодії з водяною парою змінює свій колір або просто змочується. У такий спосіб виокремлюємо площу досліджуваної поверхні, місце, куди потрапили частинки, яка показує густину розподілу їх на цій поверхні. Найбільш густіший шар припадає на частину поверхні з найбільш ймовірною швидкістю, зліва поверхня, куди потрапляють



Рис. 3. Розподіл молекул на площині

частинки з середньоарифметичною, а справа – з середньоквадратичною швидкістю (рис. 3).

Аналіз одержаних у віртуальному досліді даних показує досить виокремлені три частини: зліва осідають молекули з середньоарифметичною швидкістю, в середній частині – найбільш ймовірнісною і справа – середньоквадратичною швидкістю, що якісно підтверджує математичну модель розподілу молекул Максвелла.

Головне виділити місця, куди будуть потрапляти молекули, що мають різну швидкість. Віртуальні досліді можна запропонувати суб'єктам навчання для різних речовин. Так для азоту 28,0134 г/моль, середньоарифметична швидкість дорівнює 476,28 м/с, середньоквадратична швидкість – 516,82 м/с; найбільш ймовірнісна – 422,8 м/с. Для вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  – 44,01 г/моль, середньоарифметична – 363 м/с, середньоквадратична – 410 м/с, найбільш ймовірнісна – 557 м/с; кисень  $\text{O}_2$  – 32 г/моль, середньоарифметична – 425 м/с, середньоквадратична – 480 м/с, найбільш ймовірнісна – 393 м/с; повітря – 29 г/моль, середньоарифметична – 467 м/с, середньоквадратична – 508 м/с, найбільш ймовірнісна – 414 м/с; водяна пара – 18,016 г/моль, середньоарифметична – 566 м/с, середньоквадратична – 640 м/с, найбільш ймовірнісна – 525 м/с.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Запропоновані віртуальні досліді можна виконати в комп'ютерному варіанті. Код програми не є складними. Одержані результати запропонованого варіанту досліді є переконливими у наочному зображенні розподілу молекул за швидкостями, наочно розкривають фізичний зміст середньоарифметичної, найбільш ймовірної та середньоквадратичної швидкостей.

У подальшому дослідження доцільно проводити в напрямку модернізації такого виду дослідів та з'ясування фізичної суті понять імпульсу, тиску кінетичної енергії молекул газу.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Жихарев В. М. Молекулярна фізика і термодинамічні властивості речовин. Ч. 1: Молекулярно-кінетична теорія ідеального газу: навч.-метод. посібник. Ужгород, УжНУ, 2017. 102 с.
2. Конспект лекцій з курсу «Молекулярна фізика і термодинаміка» для студентів напрямку 6.040203 «Фізика» /Укл. Харитоновна О.А., Борисова Г.В. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016. 82 с.
3. Садовий М. І., Трифонова О. М. Історія фізики з перших етапів становлення до початку ХХІ століття: навч. посібн. 2-ге вид. переробл. та доп. Кіровоград: ПП «ЦОП «Авангард», 2013. 436 с.
4. Садовий М. І., Резіна О. В., Трифонова О. М. Використання комп'ютерної графіки під час навчання фізики і технічних дисциплін в педагогічних університетах. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2020. Вип. 80 (6). С. 188–206. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v80i6.3740>.
5. Хомутенко М. В., Садовий М. І., Трифонова О. М. Комп'ютерне моделювання процесів в атомному ядрі. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2015. Вип. 45 (1). С. 78–92. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v45i1.1191>.
6. Школа О. В. Методичні підходи до вивчення розподілу Максвелла-Больцмана в курсі теоретичної фізики. *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Педагогічні науки*. 2013. Вип. 109. С. 294–298.
7. Ftáčnik J., Lichard P., Písút J. A simple computer simulation of molecular collisions leading to Maxwell distribution. *European Journal of Physics*. 1983. vol. 4, pp. 68–71. DOI: <https://doi.org/10.1088/0143-0807/4/2/002>.
8. Krobthong Th. Teaching University Physics by Using Interactive Science Simulations Methods. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2015. vol. 197. P. 1811–1817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.07.240>.
9. LibreTexts. URL: <https://ukrayinska.libretexts.org>.
10. Sadovyi M. Digitization of the experiment in natural sciences as a means of information and digital competence formation of specialists in professional education. *Modern Technologies in the Education System: monograph*. Katowice, 2019. P. 203–210. URL: <http://surl.li/elare>.

**REFERENCES:**

1. Zhykharyev, V.M. (2017). Molekulyarna fizyka i termodinamichni vlastyvosti rehovyn [Molecular physics and thermodynamic properties of substances]. Uzhhorod: UzhNU. 102 s [in Ukrainian].
2. Kharytonova, O.A., & Borysova, H.V. (2016). Konspekt lektsiy z kursu «Molekulyarna fizyka i termodinamika» dlya studentiv napryamu 6.040203 «Fizyka» [Synopsis of lectures from the course «Molecular physics and thermodynamics» for students of the direction 6.040203 «Physics»]. Dniprodzerzhyn'sk: DDTU. 82 s [in Ukrainian].
3. Sadovyy, M.I., & Tryfonova, O.M. (2013). Istoriya fizyky z pershykh etapiv stanovlennya do pochatku XXI stolittya [The history of physics from the first stages of formation to the beginning of the 21st century]. Kirovohrad: Avanhard. 436 s [in Ukrainian].
4. Sadovyi, M.I., Rezina, O.V., & Tryfonova, O.M. (2020). Vykorystannya komp'yuternoyi hrafiky pid chas navchannya fizyky i tekhnichnykh dystsyplin v pedahohichnykh universytetakh [he use of computer graphics during the teaching of physics and technical disciplines in pedagogical universities]. *Informatsiyeni tekhnolohiyi i zasoby navchannya*. 80 (6). 188–206. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v80i6.3740> [in Ukrainian].
5. Khomutenko, M.V., Sadovyi, M.I., & Tryfonova, O.M. (2015). Komp'yuterne modelyuvannya protsesiv v atomnomu yadri [Computer modeling of processes in the atomic nucleus]. *Informatsiyeni tekhnolohiyi i zasoby navchannya*. 45 (1). 78–92. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v45i1.1191> [in Ukrainian].
6. Shkola, O.V. (2013). Metodychni pidkhody do vyvchennya rozpodilu Maksvella-Bol'tsmana v kursi teoretychnoyi fizyky [Methodical approaches to the study of the Maxwell-Boltzmann distribution in the course of theoretical physics]. *Visnyk Chernihivs'koho natsional'noho pedahohichnoho universytetu. Pedahohichni nauky*. 109. 294–298 [in Ukrainian].
7. Ftáčnik J., Lichard P., & Písút J. (1983). A simple computer simulation of molecular collisions leading to Maxwell distribution. *European Journal of Physics*. vol. 4, pp. 68–71. DOI: <https://doi.org/10.1088/0143-0807/4/2/002>.
8. Krobthong, Th. (2015). Teaching University Physics by Using Interactive Science Simulations Methods. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. vol. 197. P. 1811–1817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.07.240>.
9. LibreTexts. Retrieved from <https://ukrayinska.libretexts.org> [in Ukrainian].
10. Sadovyi, M. (2019). Digitization of the experiment in natural sciences as a means of information and digital competence formation of specialists in professional education. *Modern Technologies in the Education System: monograph*. Katowice. P. 203–210. Retrieved from <http://surl.li/elare> [in Ukrainian].