

УДК 378.147

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-11>

Дмитро СТЕПАНЧИКОВ

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та охорони праці, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська 40, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID ID: 0000-0003-2460-512X

SCOPUS-AUTHOR ID: 6507869772

Регіна ВАСИЛЬЄВА

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики та охорони праці, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська 40, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID ID: 0000-0002-8190-0048

Бібліографічний опис статті: Степанчиков, Д., Васильєва, Р. (2022). Моделювання процесу радіоактивного розпаду: статистичний підхід. *Фізика та освітні технології*, 1, 87–94, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-11>

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ: СТАТИСТИЧНИЙ ПІДХІД

Важливу роль у сучасних умовах під час вивчення фізики у закладах вищої освіти відіграє необхідність формування у студентів експериментальної компетентності, в тому числі і засобами інформаційно-комунікаційних технологій. Одним із можливих напрямків цього є розробка та застосування віртуальних комп'ютерних моделей. Розглянуто основні переваги та недоліки використання таких моделей при вивченні фізики.

Запропоновано віртуальну комп'ютерну модель установки для реєстрації радіоактивного випромінювання, що працює у реальному часі і враховує основні статистичні закономірності радіоактивного розпаду. В основу її роботи покладено розрахунок кількості спрацювання детектора за короткі проміжки часу, які підкоряються розподілу Пуассона. Програму було розроблено на мові програмування Delphi. Описано інтерфейс цієї програми та її можливості. Перелічено основні проблеми, пов'язані з необхідністю роботи вказаної програми у режимі реального часу, та шляхи їх вирішення.

Наведено результати віртуального експерименту, в ході якого 200 разів визначалася кількість зареєстрованих імпульсів за 10 с. Проведено дві серії дослідів, що відповідали в середньому 4,6 імпульсам та 46 імпульсам за 10 с. За результатами експерименту визначені середні значення кількості імпульсів за той же проміжок часу та їх абсолютні похибки. Одержані величини в межах похибок збігаються із даними, закладеними у програму. За результатами експерименту побудовано гістограму кількості подій $n_k(k)$, що відповідають певним кількостям імпульсів k . Одержані дані узгоджуються із результатами розрахунків на основі розподілу Пуассона. Продемонстровано, що у другому випадку розподіл Пуассона переходить у розподіл Гауса.

У цілому аналіз результатів показує коректність роботи програми для моделювання установки реєстрації радіоактивного випромінювання. Описано перспективи представленої методики у подальших розробках для створення інших моделей, що працюють у реальному часі.

Ключові слова: віртуальна фізична модель, радіоактивний розпад, радіоактивне випромінювання, розподіл Пуассона, розподіл Гауса.

Dmytro STEPANCHYKOV

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Physics and Labour Protection, Zhytomyr Ivan Franko State University, 40 Velyka Berdychivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID ID: 0000-0003-2460-512X

SCOPUS-AUTHOR ID: 6507869772

Regina VASYLEVA

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Physics and Labour Protection, Zhytomyr Ivan Franko State University, 40 Velyka Berdychivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID ID: 0000-0002-8190-0048

To cite this article: Stepanchikov, D., Vasileva, R. (2022). Modeliuvannia protsesu radioaktyvnoho rozpadu: statystychnyi pidkhid [Simulation of the radioactive decay process: a statistical approach]. *Physics and Educational Technology*, 1, 87–94, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-11>

SIMULATION OF THE RADIOACTIVE DECAY PROCESS: STATISTICAL APPROACH

An important role in modern conditions in the study of physics in universities is played by the need to form students' experimental competence, including using information and communication technologies. One of the possible directions is the development and application of virtual computer simulations. The main advantages and disadvantages of using such models in the study of physics are considered.

The proposed virtual computer simulation of radioactive radiation real-time registration setup takes into account the main statistical patterns of radioactive decay. The basis of this work is the calculation of the number of detector activations in short time intervals that obey the Poisson distribution. The application was developed in the Delphi programming language. The interface of this application and its main features are described. The main problems related to the need of real-time work of the mentioned application and ways to solve them are listed.

The results of a virtual experiment are presented, during which the number of registered pulses in 10 seconds was determined 200 times. Two series of experiments were conducted, corresponding to an average of 4.6 pulses and 46 pulses in 10 s. Based on the results of the experiment, the average number of pulses in the same time and their absolute errors were determined. The obtained numbers coincide within the error limits with the data embedded in the application. According to the experimental data, a histogram of the number of events $n_k(k)$ corresponding to certain numbers of pulses k was constructed. The obtained data is matched with the results of calculations based on the Poisson distribution. It is demonstrated that in the second case a Poisson distribution turns into a Gaussian distribution.

In general, the analysis of the results shows the correctness of the application for simulation of radioactive radiation registration setup. The prospects of the presented methodology in further development for the creation of other real-time simulation are described.

Key words: virtual physical simulation, radioactive decay, radioactive radiation, Poisson distribution, Gaussian distribution.

Актуальність проблеми. На сучасному етапі модернізації системи освіти в Україні особливої актуальності набувають питання підвищення та розвитку професійної компетентності студентів при навчанні у закладах вищої освіти (ЗВО). Однією з основних компетентностей, що формуються у студентів при вивченні фізики, є експериментальна компетентність (Заболотний, 2015). Важливу роль у реалізації якісного навчання фізики у ЗВО в сучасних умовах відіграють інформаційно-комунікаційні технології, у тому числі моделювання фізичних процесів. Можна виділити такі основні напрямки використання комп'ютерного моделювання у ЗВО: мультимедійна лекція, телекомунікаційний проект та комп'ютерноорієнтований лабораторний практикум (Єчкало, 2016).

Використання віртуальних моделей при викладанні фізики у ЗВО містить ряд переваг: зміна параметрів моделі у значно ширшому діапазоні, ніж дозволяє реальний експеримент; візуалізація об'єктів, які у реальному експерименті спостерігати неможливо, наприклад рух електронів, що особливо важливо при демонстраційному експерименті; виконання віртуального експерименту у випадках, коли реаль-

ний експеримент у ЗВО провести складно або взагалі неможливо; можливість виконання лабораторних робіт студентами за відсутності доступу до обладнання (робота ЗВО під час карантину або військового стану, що є актуальним останні роки; навчання студентів за індивідуальним графіком; відпрацювання пропущених внаслідок хвороби лабораторних робіт).

При цьому ніколи не слід забувати, що віртуальний експеримент не є відображенням реальної фізичної картини світу, а тільки її імітацією. Тому він, не дивлячись на простоту реалізації, не повинен повністю замінити реальний експеримент при вивченні фізики, а тільки його гармонічно доповнити. Викладачу фізики потрібно завжди притримуватися простого правила: віртуальний експеримент використовується тільки у випадку, коли реальний експеримент з тих чи інших причин в заданих умовах є неможливим.

Серед різних розділів загальної фізики найбільше переваг, на наш погляд, дає використання віртуального експерименту при вивченні «Атомної та ядерної фізики», що відображено в роботах різних дослідників (Хомутенко та ін., 2015; Яремчук, 2008; Моклюк та ін., 2015; Козел та ін., 2004). Одним із базових явищ,

з якого власне і почався розвиток ядерної фізики, є радіоактивний розпад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У 1896 р. А. Беккерель виявив невідоме випромінювання ураніلسульфату калію, яке викликало засвічування фотопластинки, загорнутої у непрозорий для звичайного світла матеріал. Далі було показано, що випромінювання супроводжує радіоактивний розпад – спонтанне перетворення ядер одних елементів у ядра інших елементів (у розглянутому вище випадку спочатку розпаду зазнавали материнські ядра урану, а в подальшому і утворені нестабільні дочірні ядра). Резерфорд продемонстрував, що виявлене випромінювання розділяється на три типи: α -промені (потік ядер гелію ${}^4_2\text{Ra}$), β^- -промені (потік електронів) та γ -промені (потік квантів електромагнітного випромінювання високої енергії). При цьому спостерігається тільки два типи радіоактивного розпаду – α -розпад: ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\text{He}$ та β^- -розпад: ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_0^0e + \bar{\nu}_e$. Виникнення квантів відбувається при переході дочірніх ядер, утворених при α - та β^- -розпадах, у стани із меншою енергією без перетворення ядер. Подальші дослідження у першій половині 20-го сторіччя виявили і інші, більш екзотичні види радіоактивного розпаду: β^+ -розпад (супроводжується випромінюванням позитрона), К-захоплення (під час розпаду електрон захоплюється із внутрішньої К-оболонки), протонна радіоактивність (супроводжується випромінюванням протона), спонтанний поділ ядер (Кучерук та ін., 1999, с. 421–442).

Радіоактивний розпад може бути описаний законом радіоактивного розпаду, встановленим експериментально у 1903 р. Е. Резерфордом та Ф. Содді:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де N_0 та N – початкова та кінцева кількість радіоактивних ядер. Величину λ називають сталою радіоактивного розпаду і вона чисельно рівна імовірності розпаду радіоактивного ядра за одиницю часу. Стала радіоактивного розпаду пов'язана із періодом піврозпаду – часом, за який розпадається половина з великої кількості радіоактивних ядер $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$. Активністю радіоактивного препарату називають фізичну вели-

чину, що чисельно рівна кількості розпадів радіоактивних ядер за одиницю часу $A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$.

Можливості дослідження студентами закономірностей радіоактивного розпаду при виконанні лабораторних робіт пов'язані з рядом труднощів:

1. Наявність радіоактивних речовин. Фактично відносно вільний доступ до таких речовин є тільки в наукових установах, діяльність яких пов'язана із ядерними дослідженнями. Для усіх інших ЗВО найбільш розповсюдженим джерелом радіоактивних речовин можуть виступати фарби, що містять світлосуміші постійної дії (СПД). Такі фарби використовувалися раніше у індикаторах різноманітних приладів, що світилися у темряві, і найчастіше містять ізоотоп радію ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ з періодом піврозпаду $T_{1/2} = 1600$ р.

2. Необхідність дотримання усіх необхідних заходів безпеки при роботі з радіоактивними речовинами. При цьому ті ж СПД вважаються безпечними, тільки коли вони знаходяться всередині приладів. Так, наприклад, радій ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ при розпаді випромінює α -частинки, які майже повністю затримуються стінками приладу. Однак це не стосується γ -випромінювання, що супроводжує α -розпад і поглинається стінками приладу лише частково, а біля поверхні приладу може значно перевищувати фонові значення.

3. На першій погляд здається, що безпосередньо дуже легко дослідити закон радіоактивного розпаду (при розпаді одного типу ізоотопів), оскільки кількість імпульсів, що реєструє приймальна система, пропорційна активності радіоактивного препарату, яка, у свою чергу, пропорційна кількості радіоактивних ядер. Але для проведення дослідження в рамках однієї лабораторної роботи потрібно мати на момент початку роботи препарати з короткоживучими ізоотопами з періодом піврозпаду порядку однієї години. Навіть якщо ця умова буде виконана, то активність такого препарату у порівнянні з ${}^{228}_{88}\text{Ra}$ буде на сім порядків вище при однаковій кількості радіоактивних ядер за рахунок меншого періоду піврозпаду. Це призведе до необхідності застосування жорстких мір радіоактивного захисту, які важко виконати в умовах непрофільних ЗВО.

Використання комп'ютерного моделювання радіоактивного розпаду вивчалось як вітчизня-

ними, так і закордонними дослідниками. Були розроблені демонстраційні комп'ютерні моделі α -розпаду радію, закону радіоактивного розпаду (Моклюк та ін., 2015); анімаційна модель ланцюга радіоактивних розпадів від $^{238}_{92}\text{U}$ до $^{206}_{82}\text{Pb}$ (Bakri et al, 2021); механічна модель радіоактивного розпаду з використанням кидання монет (Вакаш et al, 2011); симуляції процесу радіоактивного розпаду у Microsoft Excel (Вакаш et al, 2011; Jesse, 2003). Однак динаміка процесу у реальному часі не розглядалася.

Під час проведення у ЗВО лабораторних робіт з курсу «Атомна та ядерна фізика» або аналогічних дисциплін часто пропонуються дослідження у реальному експерименті статистичного характеру процесу радіоактивного розпаду, якій добре проявляється при невеликих кількостях частинок, що фіксуються детектором за час реєстрації (Краснопольова, 2017, с. 27–42). При цьому додатково до вирішення вищеперелічених проблем бажано, щоб детектор не реєстрував фонове випромінювання, внесок якого може бути порівняним із випромінюванням радіоактивного джерела. Також накладаються додаткові умови на електронне обладнання – повинні бути повністю відсутні хибні спрацювання. Якщо усі проблеми одночасно вирішити не вдається, в якості заміни може бути використання комп'ютерної моделі.

Мета дослідження – розробка віртуальної комп'ютерної моделі установки для реєстрації радіоактивного випромінювання, що працює у реальному часі і враховує основні статистичні закономірності радіоактивного розпаду.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Нехай є радіоактивне джерело з періодом піврозпаду, для якого виконується умова $t_{\text{досл}} \ll T_{1/2}$, де $t_{\text{досл}}$ – загальний час проведення експерименту. Тоді можна вважати, що за весь час проведення експерименту кількість радіоактивних ядер практично не змінюється. Результат розпаду ядер реєструється у вигляді одиничних імпульсів детектором, наприклад лічильником Гейгера-Мюлера. Для спрощення будемо вважати, що спрацювання детектора викликає один тип частинок, наприклад γ -кванти. Час реєстрації імпульсів Δt також малий $\Delta t \ll T_{1/2}$. За цей час у середньому за результатами великої кількості однотипних вимірювань повинно бути зареєстровано таку кількість імпульсів:

$$\mu = C \left| \frac{dN}{dt} \right| \Delta t = C \lambda \Delta t N = pN, \quad (2)$$

де $0 < \square < 1$ – коефіцієнт, що чисельно рівний імовірності спрацювання детектора частинок при розпаді одного ядра. Він враховує, що не всі частинки, які виникають під час радіоактивного розпаду, досягнуть детектора, і тільки частина з останніх може викликати спрацювання детектора. Величина $p = C \lambda \Delta t$ представляє собою імовірність розпаду за час Δt та подальшої реєстрації детектором певного ядра. Оскільки за зазначеною вище умовою період піврозпаду повинен бути великим, то p буде дуже малим. Водночас кількість радіоактивних ядер N є дуже великою, а середня кількість імпульсів μ за час Δt згідно з (2) може бути скінченною величиною, порівняною з одиницею. Тоді імовірність реєстрації детектором k імпульсів за час Δt може бути визначена за формулою Пуассона (Кушлик-Дивульська, 2014):

$$p_k = \frac{\mu^k}{k!} e^{-\mu}. \quad (3)$$

При цьому повинно виконуватися співвідношення $\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1$.

При проведенні достатньо великої кількості n однотипних вимірювань повинно виконуватися співвідношення $\mu = \bar{k}$. Дисперсія величини k у випадку розподілу Пуассона також становить $D(k) = \bar{k}$, а середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного рівне:

$$\Delta k = \sigma(\bar{k}) = \sqrt{\frac{D(k)}{n}} = \sqrt{\frac{\bar{k}}{n}}. \quad (4)$$

Якщо виконується умова $\mu > 9$, імовірність реєстрації детектором k імпульсів за час Δt може бути наближено описана за допомогою функції розподілу Гауса $\phi(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}} e^{-\frac{(k-\mu)^2}{2\mu}}$:

$$p_k = \int_k^{k+1} \phi(k) dk. \quad (5)$$

Для програмної реалізації мультимедійної комп'ютерної моделі установки для реєстрації радіоактивного випромінювання була використана мова програмування Delphi (пакет RAD Studio 10.4). При запуску програми з'являється вікно, у якому студент може вибрати номер варіанту, з яким у програмі зв'язано певне зна-

чення величини μ_0 (з розрахунку на час $\Delta t_0 = 10$ с). Величини μ_0 задаються у вигляді масиву і після компіляції програми змінюватися не можуть, але варіантів можна передбачити багато (в оригінальній програмі варіантів було 10, але цим числом їх кількість не обмежується). Після вибору варіанту автоматично з'являється основне вікно програми (рис. 1). У ньому представлено схематичне зображення лічильника Гейгера-Мюлера. В основному вікні програми студент може зробити дві дії: змінити час роботи лічильної системи $\Delta t_{\text{вим}}$ (за замовчуванням 10 с) та запустити її натиснувши кнопку «Старт». Після цього починається рахунок імпульсів. Назва кнопки «Старт» змінюється на «Стоп», і при натисканні на неї роботу лічильника можна зупинити. При початку розрахунку біля поля «Залишилось» вказується час повного виміру і починається зворотній відлік часу. При реєстрації нового імпульсу значення у полі «Кількість імпульсів» збільшується на одиницю (на початку відліку автоматично встановлюється нульове значення). Одночасно із цим спалахує індикатор «Лічильник імпульсів».

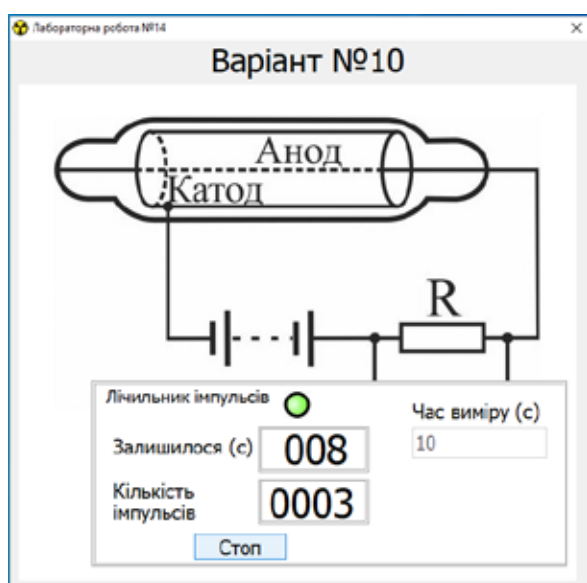


Рис. 1. Основне вікно програми моделювання установки для реєстрації радіоактивного випромінювання

Для реалізації роботи в реальному часі було створено 4 об'єкти TTimer, які можуть ініціювати через заданий проміжок часу у мілісекундах переривання для виконання спеціальної підпрограми. Один із таймерів використовувався тільки для зупинки відліку через заданий

на початку проміжок часу, другий спрацьовував через 1 с та використовувався для зміни стану поля «Залишилось» при зворотному відліку часу.

Для моделювання реєстрації окремих імпульсів, що можна спостерігати візуально, час відліку повинен бути достатньо малим. Нами він задавався у $\Delta t_{\text{відл}} = 50$ мс. Через цей проміжок спрацьовував третій таймер. Розраховувалося середнє значення кількості імпульсів за цей проміжок:

$$\mu_{\text{відл}} = \frac{\Delta t_{\text{відл}}}{\Delta t_0} \mu_0, \quad (6)$$

і на основі цього визначалася імовірність появи 0, 1, 2, ..., k_{max} імпульсів згідно із співвідношенням (5). Хоча значення k_{max} теоретично може прямувати до нескінченності, у програмі ставилося обмеження $k_{\text{max}} = 100$. Оскільки в даній моделі значення μ_0 не перевищувало 100, то $\mu_{\text{відл}}$ не перевищувало 0,5. Отже, імовірність реєструвати за цей час більше 10 імпульсів була близька до нуля, а значення k_{max} вибрано з великим запасом, розрахованим на значно інтенсивніший потік частинок.

Далі розраховувалася сумарна імовірність

$$P_k \text{ появи не більше } k \text{ імпульсів } P_k = \sum_{k=0}^{k_{\text{max}}} p_k.$$

Нами приймалося, що $P_{k_{\text{max}}+1} = 1$. У Delphi є вбудована функція random(), яка видає випадкове число $x \in [0,1]$. За одержаним значенням x визначалася кількість зареєстрованих імпульсів k на даному інтервалі часу. Для шуканого k повинна виконувалася умова $P_k \leq x < P_{k+1}$.

У першій реалізації програми після розрахунку k при його ненульовій величині запалювався індикатор «Лічильника імпульсів» (на наступному перериванні за відсутності нових імпульсів переводився у вимкнутий стан) та збільшувалися покази «Кількості імпульсів» на величину k . Тестування показало, що значення μ за 10 с, одержане в експерименті з моделлю, було на 30-40% меншим, ніж задано у самій моделі. Це свідчило про те, що або імпульси рахуються некоректно, або реальний час $\Delta t_{\text{відл}}$ неправильно визначається.

Дійсно малі часи переривання таймерів можуть відрізнятися від заданого, що пов'язано з реалізацією відносно довготривалих дій у підпрограмі обробки переривань, а також залежить від зовнішніх дій, що виконує комп'ютер

за межами переривання. У такому випадку пропонують винести за межі тіла переривання усі некритичні дії. Тому нами в тілі обробки третього таймера було залишено лише те, що пов'язано з розрахунком кількості імпульсів за вказаний проміжок часу. Обробка усіх візуальних ефектів проводилася в перериванні четвертого таймера через кожні 100 мс.

Розбіжність між виміряним та заданим значенням μ зменшилася, але значно перевищувала похибку експерименту. Це свідчило про необхідність розрахунку реальних проміжків часу між перериваннями. Для цього була використана спеціальна процедура *QueryPerformanceCounter* (Z), яка повертає у значенні Z кількість «тіків» (синхроімпульсів внутрішнього таймера) з моменту включення комп'ютера. Вбудована змінна *QueryPerformanceFrequency* визначає частоту цього таймера. Це дало можливість більш точно визначити час між двома сусідніми перериваннями:

$$\Delta t_{\text{відл}} = \frac{Z_i - Z_{i-1}}{\text{QueryPerformanceFrequency}}, \quad (7)$$

та під час кожного переривання проводити розрахунки з урахуванням скоригованого часу згідно (7), (6) та (3).

Під час виконання лабораторної роботи студентами проводилося n разів вимірювання кількості імпульсів, що реєструє система за однаковий час $\Delta t_{\text{вим}}$, вказаний викладачем. Аналізуючи одержані дані, визначали кількість подій n_k , яка відповідала реєстрації за час $\Delta t_{\text{вим}}$ k частинок, де $k = 1, 2, 3, \dots$. При цьому повинно виконуватися співвідношення $\sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} n_k = n$, де k_{max} – найбільше значення кількості частинок, зареєстрованих під час усього експерименту за час $\Delta t_{\text{вим}}$.

За результатами експерименту також обчислюється середнє значення кількості зареєстрованих за час $\Delta t_{\text{вим}}$ частинок:

$$\bar{k}_{\text{експ}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} n_k k, \quad (8)$$

та абсолютна похибка, в ролі якої бралася середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного:

$$\Delta k_{\text{експ}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} n_k (k - \bar{k}_{\text{експ}})^2}. \quad (9)$$

Далі будується гістограма залежності кількості подій n_k від значення k . На ній же для порівняння наводять побудований по точках графік теоретично розрахованих кількостей подій $n_k^{\text{теор}} = p_k n$, де p_k розраховується для $\mu = \bar{k}_{\text{експ}}$ за формулою Пуассона (3). Для наочності точки можна з'єднувати плавною лінією, але фізичний зміст мають саме точки, оскільки значення $k \in Z$.

Для демонстрації можливостей моделі був проведений віртуальний експеримент для двох різних значень μ . При $\mu = 4,6$ за результатами $n = 200$ вимірювань за проміжок часу $\Delta t_{\text{вим}} = 10$ с було отримано, що $\mu_{\text{експ}} = k_{\text{експ}} = \bar{k}_{\text{експ}} \pm \Delta k_{\text{експ}} = 4,68 \pm 0,16$. Теоретичне значення середнього квадратичного відхилення середнього арифметичного згідно з (4) $\Delta k_{\text{теор}} = 0,15$, що також є близьким до експериментального. На рис. 2 представлена гістограма залежності кількості подій n_k від кількості зареєстрованих частинок k та результати розрахунку (точки) за формулою Пуассона.

При $\mu = 46$ за результатами $n = 200$ вимірювань за проміжок часу $\Delta t_{\text{вим}} = 10$ с, було отримано близьке експериментальне значення $\mu_{\text{експ}} = 45,5 \pm 0,5$. Теоретичне значення середнього квадратичного відхилення середнього арифметичного збігається з експериментальним $\Delta k_{\text{теор}} = 0,5$. На рис. 3 представлена відповідна гістограма за даними експерименту та результати розрахунку (точки) за формулою Пуассона. Також для порівняння наведено результати розрахунку (точки) за на основі розподілу Гауса (5), які майже збігаються з розрахунком за формулою Пуассона.

Одержані результати у другому випадку свідчать про те, що кількість вимірювань $n = 200$ можна вважати достатнім для визначення $\mu_{\text{експ}}$. Але для більш якісного аналізу залежності кількості подій $n_k(k)$ загальну кількість вимірювань бажано збільшити.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Одержані результати показують, що запропонована віртуальна комп'ютерна модель установки для реєстрації радіоактивного випромінювання відображає основні статистичні закономірності радіоактивного розпаду та може бути ефективно використана як для проведення лабораторних робіт, так і для демонстраційного експерименту.

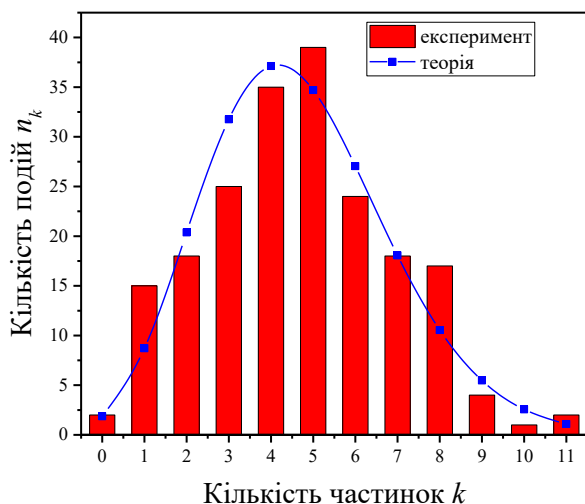


Рис. 2. Залежність кількості подій n_k від кількості зареєстрованих частинок k при наступних параметрах експерименту $\mu=4,6$, $n=200$, $\Delta t_{\text{вим}}=10$ с.

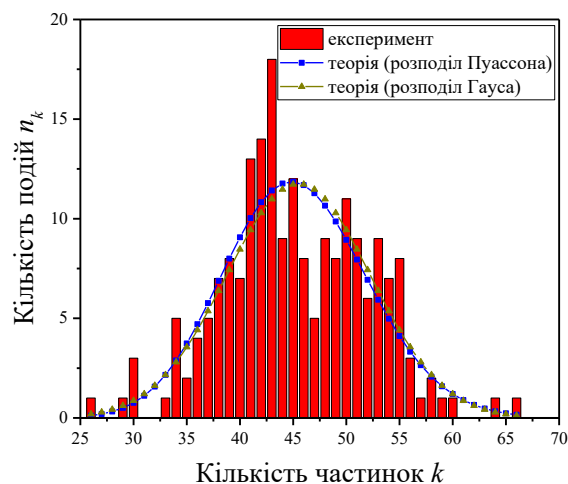


Рис. 3. Залежність кількості подій n_k від кількості зареєстрованих частинок k при наступних параметрах експерименту $\mu=46$, $n=200$, $\Delta t_{\text{вим}}=10$ с.

У подальшому планується використати її як базу для розробки віртуальних лабораторних робіт, в основі яких лежить реєстрація радіоактивного випромінювання – моделювання дослі-

дів Резерфорда з розсіяння α -частинок тонкою металевією фольгою, вивчення особливостей роботи лічильника Гейгера-Мюлера, дослідження поглинання α - та β -випромінювання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Заболотний В.Ф., Демкова В.О. Експериментальна компетентність як складова професійної підготовки студентів. *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки*. 2015. Вип. 127. С. 49–52.
2. Єчкало Ю.В. Методи навчання комп'ютерного моделювання фізичних процесів і явищ у вищій школі. *Вісник Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького. Серія: Педагогічні науки*. 2016. № 7. С. 127–134.
3. Хомутенко М.В., Садовий, М.І, Трифонова О.М. Комп'ютерне моделювання процесів в атомному ядрі. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2015. № 45, вип. 1. С. 78–92.
4. Яремчук О.М. Педагогічні ідеї вивчення штучної радіоактивності (з використанням засобів комп'ютерного моделювання). *Наукові праці Миколаївського державного гуманітарного університету ім. Петра Могили комплексу Києво-Могилянська академія. Сер.: Педагогічні науки*. 2008. № 97, вип. 84. С. 36–39.
5. Моклюк М., Моклюк О., Лисий, М. Вивчення явища радіоактивності за допомогою засобів комп'ютерного моделювання. *Наукові записки [Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка]. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*. 2015. Вип. 8(2). С. 115–119.
6. Козел В.М., Степанчиков Д.А., Федьович М.В. Демонстраційний експеримент на екрані комп'ютера. *Вісник ЖДПУ*. 2004. № 14. С. 95–100.
7. Bakri F., Sumardani D., Mulyati, D. Radioactive decay model based on augmented reality. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1869, No. 1, P. 012192.
8. Bakaç M., Taşoğlu A. K., Uyumaz G. Modeling radioactive decay. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 2011. Vol. 15, P. 2196–2200.
9. Jesse K. E. Computer Simulation of Radioactive Decay. *The Physics Teacher*. 2003. Vol. 41. P. 542–543.
10. Загальний курс фізики. Т. 3. Оптика. Квантова фізика / І.М. Кучерук та ін. ; за ред. І.М. Кучерука. Київ : Техніка, 1999. 520 с.
11. Краснопольова А.П., Юхно Г.Д. Лабораторний практикум. Основи радіохімії та радіоекології: методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів хімічного факультету. Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2017. 106 с.
12. Теорія ймовірностей та математична статистика : навч. посіб. / О.І. Кушлик-Дивульська та ін. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 212 с.

REFERENCES:

1. Zabolotnyi, V.F., & Demkova, V.O. (2015). Eksperymentalna kompetentnist yak skladova profesiinoi pidhotovky studentiv [Experimental competence as a component of professional training of students]. *Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu. Serii: Pedahohichni nauky – Bulletin of the Chernihiv National Pedagogical University. Series: Pedagogical sciences*, 127, 49-52 [in Ukrainian].
2. Iechkalo, Yu.V. (2016). Metody navchannia kompiuternoho modeliuvannia fizychnykh protsesiv i yavyshech u vyshchii shkoliy [Methods of teaching computer modeling of physical processes and phenomena in higher education]. *Visnyk Cherkaskoho natsionalnoho universytetu imeni Bohdana Khmelnytskoho. Serii: Pedahohichni nauky – Bulletin of the Cherkasy National University named after Bohdan Khmelnytskyi. Series: Pedagogical sciences*, 7, 127-134 [in Ukrainian].
3. Khomutenko, M.V., Sadovyi, M.I., & Tryfonova O.M. (2015). Kompiuterne modeliuvannia protsesiv v atomnomu yadri [Computer simulation of processes in the atomic nucleus]. *Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia – Information technologies and teaching aids*, 45(1), 78-92 [in Ukrainian].
4. Iaremchuk, O.M. (2008). Pedahohichni idei vyvchennia sztuchnoi radioaktyvnosti (z vykorystanniam zasobiv kompiuternoho modeliuvannia) [Pedagogical ideas for studying artificial radioactivity (using computer simulation tools)]. *Naukovi pratsi Mykolaivskoho derzhavnoho humanitarnoho universytetu im. Petra Mohyly kompleksu Kyievo-Mohylianska akademiia. Ser.: Pedahohichni nauky – Scientific works of Mykolaiv State Humanitarian University named after Peter Mohyla of the Kyiv-Mohyla Academy complex. Series: Pedagogical sciences*, 97(84), 36-39 [in Ukrainian].
5. Mokliuk M., Mokliuk O., & Lysyi, M. (2015). Vyvchennia yavyshecha radioaktyvnosti za dopomohoiu zasobiv kompiuternoho modeliuvannia [Study of the phenomenon of radioactivity using computer simulation tools]. *Naukovi zapysky [Kirovohradskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Vynnychenka]. Serii: Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnolohichnoi osvity. – Scientific Notes [Kirovohrad State Pedagogical University named after Volodymyr Vinnichenko]. Series: Problems of the methodology of physical, mathematical and technological education*, 8(2), 115-119 [in Ukrainian].
6. Kozel, V.M., Stepanychov, D.A., & Fedovych, M.V. (2004). Demonstratsiinyi eksperyment na ekrani kompiutera [Demonstration experiment on the computer screen]. *Visnyk ZhDPU – Bulletin of the ZSPU*, 14, 95-100 [in Ukrainian].
7. Bakri F., Sumardani D., & Mulyati, D. (2021). Radioactive decay model based on augmented reality. *Journal of Physics: Conference Series*, 1869(1), 012192 [in English].
8. Bakaç, M., Taşoğlu, A.K., & Uyumaz G. (2011). Modeling radioactive decay. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 15, 2196-2200 [in English].
9. Jesse K.E. (2003) Computer Simulation of Radioactive Decay. *The Physics Teacher*, 41, 542-543 [in English].
10. Kucheruk, I.M., & Horbachuk I.T. (1999) Zahalnyi kurs fizyky. T.3. Optyka. Kvantova fizyka [General course of physics. Vol.3. Optics. Quantum physics] I.M. Kucheruk (Ed.). Kyiv: Tekhnika [in Ukrainian].
11. Krasnoporova, A.P., & Yukhno, H.D. (2017). Laboratornyi praktykum. Osnovy radiokhimii ta radioekolohii [Laboratory practice. Basics of radiochemistry and radioecology]. Kharkiv: KhNU im. V.N. Karazina [in Ukrainian].
12. Kushlyk-Dyvulska, O.I., Polishchuk N.V., Orel, B.P., & Shtabaliuk P. I. (2014). Teorii ymovirnostei ta matematychna statystyka [Probability theory and mathematical statistics]. Kyiv: NTUU "KPI" [in Ukrainian].