
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 539.1

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_43

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙТРОНОВ

А.А. Басов

ORCID: 0000-0002-9249-1788 e-mail: basov-aa@ya.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Г.М. Соколова**

ORCID: 0000-0002-3193-2391 e-mail: sokolovagm@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Н. Яшина**

ORCID: 0000-0002-5641-7521 e-mail: alla.nic.yashina@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Анализируется возможность исследования характеристик нейтронов и процессов их распространения в веществе без использования радиоактивных препаратов и дорогостоящего радиометрического оборудования. Поставленная задача решается созданием виртуального практикума с применением имитационного компьютерного моделирования исследуемых процессов. Это позволяет, с одной стороны, организовать практикум по физике элементарных частиц при разумных материальных затратах, с другой – создает возможность наглядного представления явлений микромира. Предлагается виртуальный эксперимент по изучению процесса распространения нейтронов в веществе. В результате определяется сечение их поглощения, а также энергия нейтронов, испускаемых источником. Разработан виртуальный лабораторный комплекс для исследования важных характеристик нейтронов и их взаимодействия с веществом; наблюдается хорошая корреляция с натурными экспериментами.

Ключевые слова: физика элементарных частиц, нейтроны, радиоактивные препараты, энергия нейтронов, сечение рассеяния и поглощения, взаимодействие нейтронов с веществом, компьютерное моделирование, виртуальный лабораторный комплекс.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Басов, А.А. Компьютерное моделирование натурального эксперимента по определению характеристик нейтронов / А.А. Басов, Г.М. Соколова, А.Н. Яшина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2. С. 43-49. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_43

COMPUTER SIMULATION OF NEUTRONS PARAMETERS DETERMINATION FULL-SCALE EXPERIMENT

A.A. Basov

ORCID: 0000-0002-9249-1788 e-mail: basov-aa@ya.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

G.M. Sokolova

ORCID: **0000-0002-3193-2391** e-mail: **sokolovagm@gmail.com**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.N. Yashina

ORCID: **0000-0002-5641-7521** e-mail: **alla.nic.yashina@gmail.com**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The possibility of studying neutron parameters and processes of propagation therefore in a substance without use of radioactive preparations and expensive radiometric equipment, is analyzed. The posed problem is solved by creating a virtual practicum which involves computer simulation of the processes under study. This makes it possible, on the one hand, to organize a workshop on elementary particle physics at reasonable material costs, and on the other hand, it creates the possibility of microcosm phenomena visual representation. A virtual experiment is proposed to study the process of neutron propagation in substance. As a result, cross section of absorption therefore is determined, as well as energy of neutrons emitted by the source. Virtual laboratory complexes are developed to study important parameters of neutrons and interaction therefore with substances. A good correlation with full-scale experiments is observed.

Key words: particle physics, neutrons, scattering and absorption cross section, energy of neutrons, radioactive products, interaction of neutrons with the substance, computer simulation, virtual laboratory complex.

FOR CITATION: Basov A.A., Sokolova G.M., Yashina A.N. Computer simulation of neutrons parameters determination full-scale experiment. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №2. P. 43-49.
DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_43

Цель предлагаемой работы – показать, что в ряде случаев сложный натуральный физический эксперимент можно осуществить, заменив его компьютерной моделью, имитирующей лабораторные установки. В частности, это касается исследования характеристик нейтронов и их взаимодействия с веществом. Знание характеристик источников нейтронов и процессов взаимодействия нейтронного излучения с веществом необходимо не только при разработке физических основ реакторов, но и при разработке ядерно-физических приборов для обеспечения безопасности, методов анализа вещества, методов нейтронного каротажа и многих других прикладных нейтронных технологий.

В рамках исследований субатомной структуры материи физические явления, происходящие на сверхмалых расстояниях за сверхмалые времена, можно изучать только по столкновениям и распадам атомных ядер и элементарных частиц. Как правило, в этих процессах принимают участие частицы высоких энергий. В частности, оценка нижней границы энергии нейтронов, с помощью которых можно исследовать строение атомных ядер, дает величину порядка 30 МэВ. Поэтому в ядерной физике вопрос о методах измерений имеет принципиальное значение. Частицы с высокой энергией могут настолько нарушить ход исследуемых процессов, что недостижимой окажется нужная точность измерения, или оно вообще утратит смысл. Кроме того, при наличии нейтронного излучения всегда существует вероятность активации изотопов элементов, из которых состоят окружающие вещества. В большинстве случаев активация окружающих тел проявляется в виде появления в их составе короткоживущих радиоактивных изотопов. Для предупреждения нежелательного облучения персонала в процессе работы необходимо предусмотреть проверку уровня мощности гамма-излучения, исходящего от элементов установки. Поэтому создание и использование лабораторной базы таких исследований сопряжено с большими материальными затратами.

Для изучения столкновений микрочастиц необходимо иметь стабильно работающий источник частиц-снарядов, мишени с заранее известными свойствами и регистрирующее устройство для частиц, являющихся продуктами столкновений.

Работа источников нейтронов может быть основана на различных ядерных реакциях.

1. В генераторах быстрых нейтронов используются т.н. термоядерные реакции (d,d) и (d,t) . Реакция (d,n) сводится к «переходу» протона из бомбардирующего дейтрона в бомбардируемое ядро, в результате чего освобождается нейтрон. Энергия реакции равна разности энергии связи протона в конечном ядре и в дейтроне. Энергия связи протона (и нейтрона) в дейтроне очень мала – 2,23 МэВ. В большинстве других ядер энергия связи нейтрона значительно выше, поэтому для многих ядер энергия реакции (d,n) положительна и такие реакции могут наблюдаться уже при небольших энергиях падающих дейтронов.

2. Источники на основе реакции деления. В таких источниках нейтроны, испускаемые радионуклидными источниками, возникают вследствие протекания в материале источника различных ядерных реакций. Наиболее распространенные из них – реакции спонтанного деления и (α,n) . (α,n) – источники нейтронов представляют собой комбинацию источника α -частиц (радий, полоний, плутоний) с элементом, у которого малая энергия связи нуклонов. В результате взаимодействия α -частицы с таким ядром получают поток нейтронов. Спектр нейтронов (α,n) -источника непрерывен, энергия нейтронов меняется от 0,1 до 12 МэВ.

3. Большинство важных в прикладном отношении нейтронных реакций наиболее интенсивно идет при низких энергиях нейтронов, например, нейтронография, медицина, исследование фундаментальных симметрий взаимодействия, активационный анализ изотопов и т.д. В связи с этим, необходимо замедлить нейтроны. Нейтрон теряет энергию при рассеянии на ядрах. При неупругом рассеянии происходит возбуждение ядра, с которым произошло столкновение нейтрона; часть кинетической энергии нейтрона превращается во внутреннюю энергию ядра-мишени. При упругом рассеянии кинетическая энергия нейтрона переходит (частично или полностью) в кинетическую энергию ядра-мишени, возбуждения последнего не происходит. Известно, что наибольшие потери энергии нейтрон претерпевает при упругом рассеянии на легких ядрах. Поэтому в качестве замедлителя используется вода или парафин. Таким образом, нейтроны замедляются до энергий порядка электрон-вольт.

В качестве мишеней используются ядра и частицы с достаточно большим временем жизни (не менее нескольких минут), т.е., стабильные и достаточно долго живущие ядра. Принципиальная трудность измерений характеристик микрочастиц состоит в том, что детектор – это макросистема, воздействие на которую со стороны микрочастицы является очень слабым. Для преодоления этой трудности конструкция детекторов такова, что слабое воздействие используется только для стимуляции вторичных процессов, формирующих сигнал макроскопической величины. Для этого рабочее пространство детектора заполняется веществом в метастабильном состоянии, для изменения которого достаточно малых возмущений, производимых микрочастицей. Чтобы зарегистрировать нейтральные частицы, в частности – нейтроны, используют реакции с участием атомных ядер, протекающие с образованием заряженных частиц (в основном, электронов) и γ -квантов, которые впоследствии обнаруживаются. При этом, как правило, наиболее важной оказывается ионизационная способность этих частиц. В частности, регистрирующим устройством может быть счетчик Гейгера или сцинтилляционный детектор. Нейтроны, уловленные сцинтилляционным детектором, возбуждают кристаллическую структуру, которая переизлучает фотон. Фотон попадает в фотоэлемент. Детектор может регистрировать как число вылетевших в результате фотоэффекта электронов, так и их энергию.

Таким образом, в ядерных исследованиях методические вопросы весьма существенны в связи с тем, что экспериментальные комплексы очень сложны и дороги. Они, как правило, потребляют много энергии и нуждаются в обслуживании квалифицированными специали-

стами многих профилей. Поэтому создание и использование лабораторной базы таких исследований сопряжено с большими интеллектуальными и материальными затратами.

Для исследования результатов взаимодействия нейтронов с веществом можно использовать установку, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

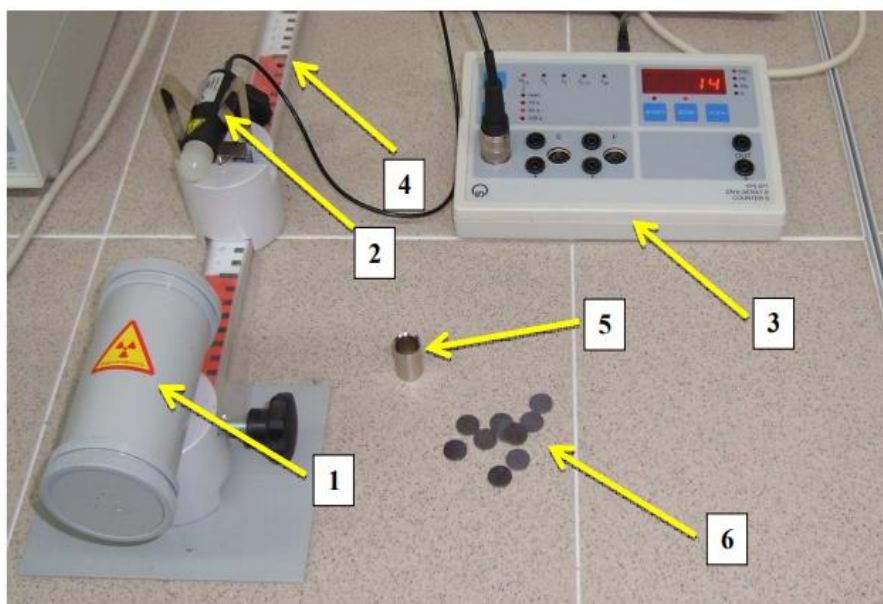


Рис. 1. Схема установки

- 1 – контейнер с радиоактивным препаратом;
 2 – сцинтилляционный детектор с фотоумножителем;
 3 – пересчетное устройство с индикатором режима работы
 (счетчик импульсов и индикатор времени); 4 – линейка;
 5 – кювета для исследуемых материалов; 6 – исследуемые пластины

Fig. 1. Installation diagram

- 1 – container with radioactive preparation; 2 – scintillation detector with photomultiplier;
 3 – scaling unit with operating mode indicator (pulse counter and time indicator);
 4 – ruler; 5 – cuvette for tested materials; 6 – tested plates

Источник представляет собой таблетку из диоксида плутония с радионуклидом плутоний-238 и слоя порошка бериллия. Плутониевый источник α -частиц окружен бериллием, у которого малая энергия связи нуклонов. В результате поглощения α -частиц бериллием получают поток нейтронов. Нейтроны, получаемые в таком источнике, имеют широкий энергетический спектр с энергией нейтронов до 5 МэВ. Далее они замедляются в органическом замедлителе до энергий порядка электрон-вольт. Испускаемые источником нейтроны проходят через фильтры (6) из пластин исследуемого материала и регистрируются детектором (2). Импульсы от детектора через формирователь поступают на счетный прибор (3). Аналогичные исследования проводятся, например, в лабораториях НИЯУ МИФИ [1]. В рамках данных работ экспериментально определяются угловые и энергетические характеристики источников нейтронов, исследуются характеристики взаимодействия нейтронов с веществом, проводятся эксперименты по изучению наведенной быстрыми нейтронами активности. Используются изотопные источники и компактные генераторы нейтронов. Экспериментальная база включает в себя современное радиометрическое и спектрометрическое оборудование, в том числе – уникальное спектрометрическое оборудование, разработанное в НИЯУ МИФИ [1]. Поскольку для постановки экспериментов с источниками радиоактивных излучений требуется дорогостоящее оборудование и радиоактивные препараты, для работы с кото-

рыми необходимо соблюдение норм радиационной безопасности (НРБ) [2–8], что часто бывает затруднительным, возможен другой подход к решению поставленной задачи.

Бурное развитие в последнее время информационных технологий привело к созданию компьютерных моделей экспериментальных установок. Такое моделирование, с одной стороны, создает возможность наглядного представления о явлениях, происходящих в микромире, а с другой – позволяет получить результаты, достаточно хорошо коррелирующие с натурным экспериментом. Данный подход, в частности, является весьма продуктивным при создании лабораторий физического практикума в вузах. Позволяя расширить круг рассматриваемых задач и сократить продолжительность выполнения измерений в эксперименте, он способствует лучшему усвоению изучаемого вопроса и особенно актуален при изучении характеристик нейтронов и их взаимодействия с веществом. Блок-схема виртуальной установки эксперимента по взаимодействию нейтронов с атомами некоторого вещества приведена на рис. 2.

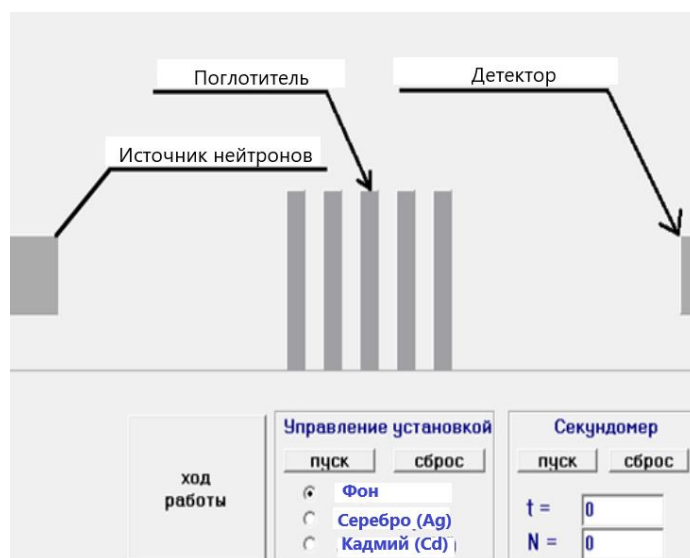


Рис. 2. Блок-схема виртуальной установки

Fig. 2. Virtual installation flow chart

При загрузке исполняемого файла в рабочем окне появляется изображение схемы установки: «источника нейтронов», таймера и регистрирующего устройства. Выполняется имитация установки пластин поглотителя. Расчетная часть программы позволяет выбирать материал и толщину пластинки, поглощающей нейтроны. Программа позволяет задавать толщину мишени от 10 до 50 см. Количество частиц, зарегистрированных счетчиком, моделируется в соответствии с законом поглощения излучения веществом, поскольку учитывается экспоненциальная зависимость числа выбывающих из потока частиц от материала поглотителя. Для этого в программе задается, что толщина пластинки-поглотителя обратно пропорциональна коэффициенту поглощения в данном материале. Таким образом, показания счетчика зависят от материала и толщины пластинок, поставленных между источником и детектором.

Поскольку на нейтроны не действуют кулоновские силы, они взаимодействуют непосредственно с ядрами атомов. За счет такого взаимодействия они либо поглощаются, либо изменяют направление движения (рассеиваются). Поэтому полное сечение взаимодействия нейтрона с ядром складывается из двух слагаемых. При уменьшении энергии нейтронов сечение упругого рассеяния, которое пропорционально площади сечения ядра, остается примерно постоянным на уровне нескольких барн, а сечение радиационного захвата растет по закону $1/V$, где V – скорость налетающего нейтрона. Таким образом, для тепловых нейтронов основной характеристикой является сечение поглощения. Нейтроны, испускаемые ис-

точником, проходят через систему фильтров и регистрируются детектором, показания которого отображаются на схеме. В предложенной работе фильтры представляют собой пластины, изготовленные из серебра и кадмия ($^{107}_{47}\text{Ag}$ и $^{113}_{48}\text{Cd}$). Зарегистрировав количество нейтронов, испущенных источником, и число нейтронов, прошедших сквозь пластины, можно найти коэффициент поглощения. В работе также учитывается естественный фон. Для этого регистрируют показания детектора в отсутствии работы источника.

Число нейтронов, поглощенных слоем вещества, при прохождении поглотителя толщиной dx , пропорционально dx и числу нейтронов N , падающих на слой вещества dx . Таким образом, изменение числа нейтронов в пучке равно (1):

$$dN = -\mu N dx \quad (1)$$

Коэффициент поглощения $\mu = n\sigma$, где n – концентрация ядер поглотителя, σ – сечение поглощения. Концентрацию ядер можно найти как $n = \frac{\rho N_A}{M}$, где ρ – плотность материала поглотителя, M – его молярная масса, N_A – число Авогадро.

Из равенства (1) следует, что коэффициент поглощения равен относительному изменению нейтронного пучка при прохождении слоя единичной толщины (2):

$$\mu = \frac{dN}{N dx} \quad (2)$$

При интегрировании выражения (1) получим (3)-(4):

$$N = N_0 e^{-\mu x}, \quad (3)$$

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{N_0}{N}. \quad (4)$$

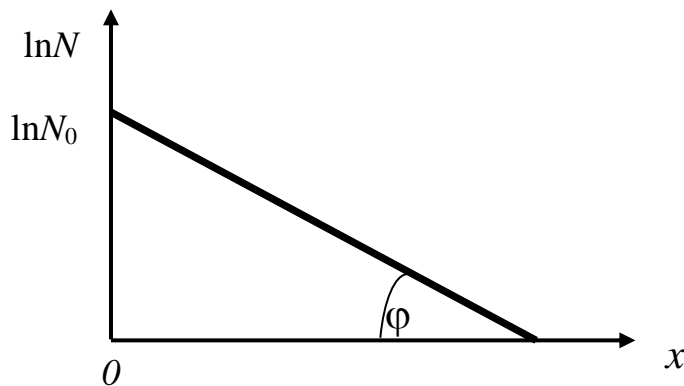


Рис. 3. График для определения коэффициента поглощения

Fig. 3. Graph for absorption coefficient determination

Из соотношения (4) следует, что, построив в полулогарифмическом масштабе график зависимости числа зарегистрированных импульсов от толщины поглотителя (рис. 3), можно найти коэффициент поглощения по тангенсу угла наклона линии графика к оси x , а используя его значение – сечение поглощения (5):

$$\sigma = \frac{\mu M}{\rho N_A} \quad (5)$$

При малых энергиях нейтронов сечение поглощения обратно пропорционально их скорости. Тогда, используя данные для соотношения между сечением поглощения σ_T и энергией E_T для тепловых нейтронов [9], можно найти энергию E нейтронов, испускаемых заданным источником (6):

$$\sigma = \sigma_T \frac{V_T}{V} = \sigma_T \sqrt{\frac{E_T}{E}}, \quad E = E_T \left(\frac{\sigma_T}{\sigma} \right)^2. \quad (6)$$

При построении модели использована программа, разработанная с помощью среды *Visual Studio 2017*, а также *Net Framework* и включенной библиотеки *Windows Forms*. Графический интерфейс реализован с помощью методов из библиотеки *Windows Forms*, вычислительные алгоритмы написаны на языке *C#* для *NET Framework 4.5*, что позволяет запускать данную программу на версиях ОС *Windows* (начиная с *Windows XP*) и *Linux*.

Рассматриваемая программа позволяет выбирать различные поглощающие материалы и толщину пластинок. Для уменьшения статистической погрешности необходимо набрать достаточное количество зарегистрированных детектором нейтронов. Это достигается увеличением времени проведения эксперимента. По предложенной методике были сделаны, в частности, оценки энергии и сечения поглощения нейтронов для $^{107}_{47}\text{Ag}$, которые показали хорошую корреляцию с натурным экспериментом [10].

Заключение

Предложенный виртуальный практикум с применением имитационного компьютерного моделирования исследуемых процессов дает возможность исследовать характеристики нейтронов и их взаимодействие с веществом без использования радиоактивных препаратов и дорогостоящего радиометрического оборудования. Не заменяя традиционные методы исследования, применение компьютерных моделей в физическом практикуме открывает новые перспективы решения исследовательских и прикладных задач в области ядерной физики. Целесообразно внедрение этих технологий в процесс обучения студентов физических специальностей в условиях невозможности проведения натуральных экспериментов.

Библиографический список

1. **Кадилин, В.В.** Взаимодействие нейтронов с веществом / В.В. Кадилин, Е.В. Рябева, В.Т. Само-садный // Прикладная нейтронная физика: учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ.
2. **Антонова, И.А.** Определение энергии нейтронов по протонам отдачи / И.А. Антонова, А.Н. Бояркина, Н.Г. Гончарова и др. // Практикум по ядерной физике. Учеб. пособие для студ. естеств. спец. вузов. М., МГУ, 1988. Лаб. работа 10. – С. 145.
3. **Schneider, W.** Kernphysik Unterricht mit einer Neutronenquelle // Math. und naturwiss. Unterricht. Vol.12. № 6.1959. С 255-262.
4. **Veit, J.J.** Use of a neutron generator in an undergraduate laboratory / J.J. Veit, R.H. Lindsay // «Amer. J. phys.». Vol. 36. № 5. 1968. P. 432-440.
5. **Кадилин, В.В.** Взаимодействие нейтронов с веществом / В.В. Кадилин, Е.В. Рябева, В.Т. Само-садный // Прикладная нейтронная физика: учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011.
6. **Мухин, К.Н.** Экспериментальная ядерная физика. Т.2 / К.Н. Мухин. – СПб. Лань, 2009.
7. **Авданина, Э.А.** Практикум по взаимодействию ионизирующих излучений с веществом / Э.А. Авданина, А.Р. Барткевич, М.Д. Дежурко и др. – Минск: БГУ, 2014. [Электронный ресурс]: URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/149155>.
8. **Рябева, Р.Ф.** Прикладная нейтронная физика: Лабораторный практикум / Е.В. Рябева, Р.Ф. Ибрагимов, В.В. Кадилин – М.: Буки Веди, 2019. – 110 с.
9. Справочник по ядерной физике под ред. Л.А. Арцимовича// ФИЗМАТЛИТ, М. 1963.
10. **Minor, T.C.** Undergraduate experiment to find nuclear sizes by measuring total cross sections for fast neutrons/ T.C. Minor, F.D Martin., H.E Montgomery, u.a // Amer. J. Phys. 1969. 37. № 6. P. 649.

*Дата поступления
в редакцию: 20.10.2020*