

# НЕЙТРОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА В РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТАХ

© 2022 г. А. М. Бакаляров<sup>1)\*</sup>, Г. В. Мурадян<sup>1)</sup>

Поступила в редакцию 20.01.2022 г.; после доработки 10.03.2022 г.; принята к публикации 15.03.2022 г.

Предлагается метод измерения объемного распределения водорода в различных объектах с помощью зондирования мечеными нейтронами. Существующие методы такого зондирования, позволяющие измерить распределение ряда элементов, к водороду неприменимы, так как основаны на регистрации реакции с испусканием  $\gamma$ -квантов, которая у водорода при энергии меченых нейтронов практически отсутствует. Между тем водород представляет большой интерес: он входит в состав многих веществ, включая органические соединения, в частности, взрывчатые вещества. В предлагаемом методе производится регистрация рассеянных на объекте нейтронов и измеряется время регистрации. Описан способ выделения из множества зарегистрированных нейтронов случаев рассеяния на водороде и определения координаты точки рассеяния. Проведено численное моделирование, и показано, что метод обеспечивает высокое пространственное разрешение и быстрый набор событий рассеяния на водороде. Его можно совместить с существующими методами измерения распределения других элементов, что позволит расширить круг идентифицируемых веществ и в разы сократить расход ресурса нейтронного источника.

DOI: 10.31857/S0044002722040031

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Основной интерес к измерениям объемного распределения элементов с использованием меченых нейтронов связан с выявлением скрытых веществ в исследуемых объектах без их вскрытия. Меченые нейтроны отличаются тем, что для каждого из них известны время испускания и вектор скорости. Источником меченых нейтронов является реакция  $T(d, n)^4\text{He}$ . Энергия нейтронов  $\sim 14$  МэВ. Время испускания и вектор скорости определяются по регистрации сопутствующей  $\alpha$ -частицы. Известны два метода измерения объемного распределения элементов с использованием меченых нейтронов. Оба они основаны на зондировании объекта мечеными нейтронами и регистрации реакции неупругого рассеяния  $A(n, n'\gamma)$ . В одном из них [1–9] регистрируются только  $\gamma$ -кванты ( $\gamma$ -метод), в другом, недавно предложенном [10], —  $\gamma$ -кванты и нейтроны ( $n$ -метод). Ядро, на котором произошла реакция, идентифицируется по характерному спектру  $\gamma$ -квантов и нейтронов соответственно. Местоположение ядра в обоих методах определяется по измерению задержки времени регистрации  $\gamma$ -кванта относительно времени испускания меченого нейтрона по известному вектору его скорости. К водороду эти методы неприменимы, так как они

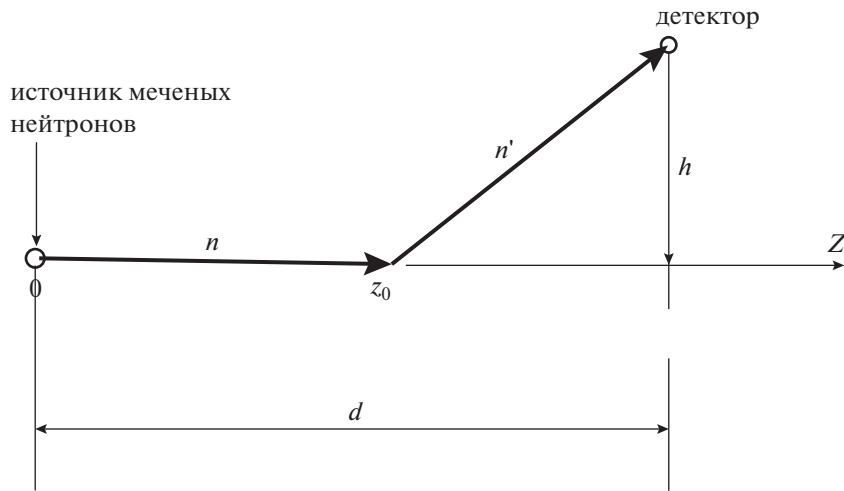
основаны на регистрации  $\gamma$ -квантов, которые у водорода при энергии нейтронов 14 МэВ практически отсутствуют. Для полноты отметим также работу [11], где рассматривается возможность выявления водорода в органических соединениях по его влиянию на высоту пиков в спектре  $\gamma$ -квантов неупругого рассеяния нейтронов на других элементах соединения. Метод может использоваться только для определения доли водорода в объекте в целом и только при условии однородности содержащегося в нем вещества. Измерение объемного распределения невозможно.

В настоящей работе предлагается метод измерения объемного распределения водорода в различных объектах. Объект зондируется мечеными нейтронами, и с помощью координатно-чувствительного детектора производится регистрация рассеянных нейтронов. При этом измеряется время регистрации меченого нейтрона, отсчитываемое от момента его испускания.

Описан способ выделения из множества зарегистрированных событий случаев рассеяния на водороде и нахождения координаты точки рассеяния. Проведено численное моделирование, и показано, что метод обеспечивает высокое пространственное разрешение и быстрый набор полезных событий. Его можно совместить с существующими методами, применимыми к другим элементам, что позволит значительно расширить круг идентифицируе-

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия.

\*E-mail: bakalyaram@yandex.ru



**Рис. 1.** Упрощенная схема установки для измерения объемного распределения водорода. Обозначения:  $Z$  — ось вдоль первичного направления движения нейтрона,  $d$  — расстояние между источником нейтронов и детектором вдоль оси  $Z$ ,  $h$  — расстояние между детектором и осью  $Z$ ,  $z_0$  — точка взаимодействия нейтрона с мишенью,  $n$  — первичный нейтрон,  $n'$  — рассеянный нейтрон.

мых веществ и в разы сократить расход ресурса нейтронного источника.

Для краткости описываемый здесь метод будем называть водородным методом.

## 2. ВОДОРОДНЫЙ МЕТОД

Рассмотрим сначала, как можно определить координаты точки рассеяния меченого нейтрона на водороде. На рис. 1 представлена упрощенная схема установки. Меченый нейтрон, испущенный из точки  $z = 0$ , движется вдоль оси  $Z$ , в некоторой точке  $z_0$  претерпевает упругое рассеяние на водороде и регистрируется точечным детектором. При этом измеряется время задержки регистрации  $t$  относительно момента испускания меченого нейтрона. Покажем, что время  $t$  позволяет с высокой точностью определить координату  $z_0$ . Время задержки складывается из двух слагаемых — времени пролета меченого нейтрона до точки рассеяния и времени пролета рассеянного нейтрона до точки его регистрации. Имеем

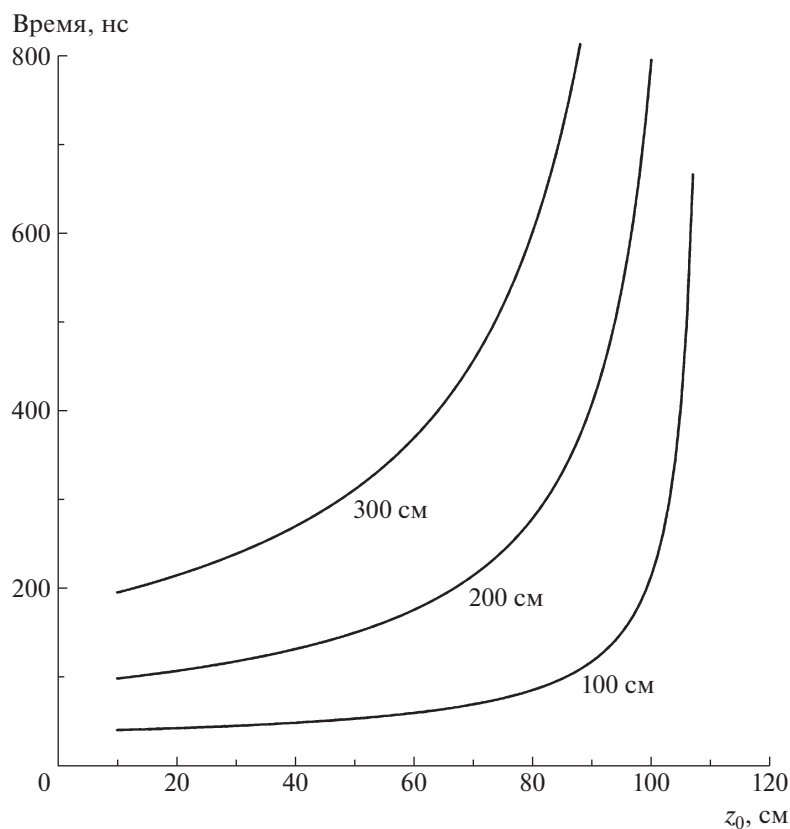
$$t = \frac{z_0}{V_0} + \frac{L}{V}, \quad L = \sqrt{(d - z_0)^2 + h^2}, \quad (1)$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2E_0}{m}}, \quad V = \sqrt{\frac{2E_0 \cos^2 \theta}{m}}, \quad \cos \theta = \frac{d - z_0}{L},$$

где  $E_0$  — энергия меченого нейтрона,  $V_0$  и  $V$  — скорость нейтрона до и после рассеяния,  $\theta$  — угол рассеяния,  $d$  и  $h$  определяют положение детектора относительно оси  $Z$ . На рис. 2 приведена зависимость  $t(z_0)$  при  $d = 110$  см и трех значениях  $h$ , равных 100, 200, 300 см. С ростом  $z_0$  время  $t$  монотонно растет, откуда и следует, что время

задержки позволяет однозначно определить местоположение точки рассеяния  $z_0$ . Неопределенность  $\Delta z_0$ , обусловленная погрешностью  $\Delta t$ , равна  $(\partial t / \partial z_0)^{-1} \Delta t$ . Производная  $\partial t / \partial z_0$  увеличивается с ростом  $z_0$  и при  $z \rightarrow d$ , что соответствует  $\theta \rightarrow 90^\circ$ , стремится к бесконечности (см. рис. 2). Например, если взять  $\Delta t = 0.7$  нс,  $h = 100$  см и  $d = 110$  см, то при  $z_0 = 60$  см получаем  $\Delta z_0 = 1$  см, а при  $z_0 = 90$  см —  $\Delta z_0 = 0.3$  см. Обратим внимание, что эта точность значительно лучше соответствующей точности измерения  $z_0$  в  $\gamma$ - и  $n$ -методах (для любого элемента, который может быть идентифицирован этими методами). Связано это с тем, что в  $\gamma$ - и  $n$ -методах время задержки определяется первым слагаемым формулы (1) и соответственно  $\Delta z_0 = V_0 \Delta t = 3.5$  см, а в водородном методе — в основном вторым слагаемым, которое из-за значительно меньшей скорости нейтрона более чувствительно к изменению  $z_0$ .

В реальной ситуации, кроме водорода, в объекте имеются и другие элементы. Рассеяние меченых нейтронов на этих элементах приведет к появлению фона. Так, например, в случае взрывчатого вещества TNT ( $C_7H_5N_3O_6$ ) вероятность рассеяния на  $C_7N_3O_6$  в  $\sim 6$  раз больше, чем на  $H_5$ . Покажем, что проблему фона можно решить на основе выделенности рассеяния нейтронов на водороде с помощью регистрации нейтронов координатно-чувствительным детектором. Выделенность водорода хорошо проявляется на графике зависимости энергии рассеянного нейтрона (определяющей время задержки) от угла рассеяния  $E_n(\theta)$ . На рис. 3 приведено сравнение  $E_n(\theta)$  водорода с углеродом. Начальная энергия нейтронов 14 МэВ. Жирная

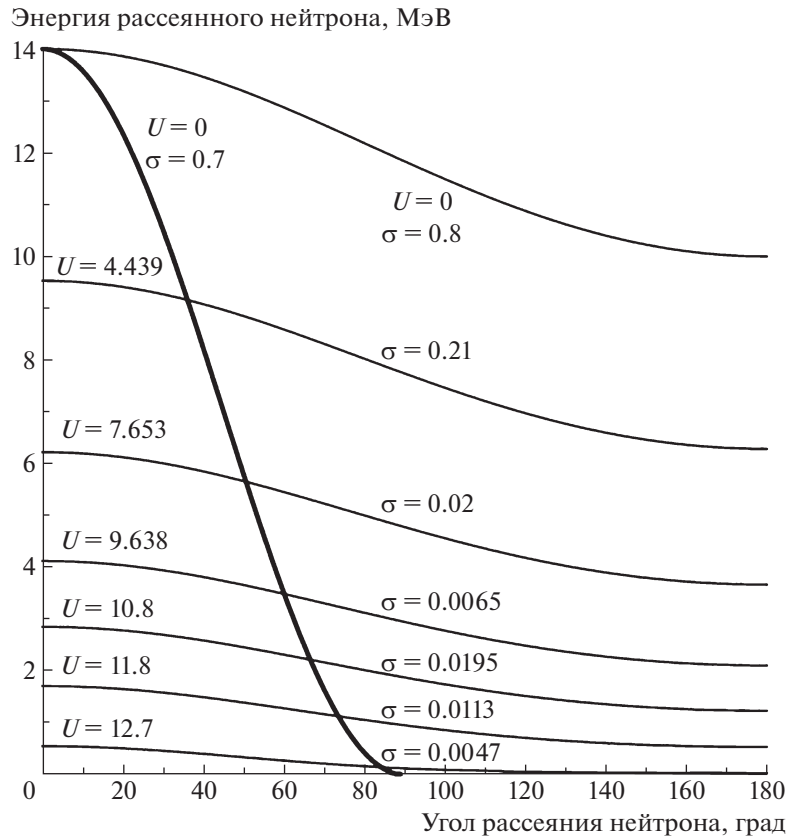


**Рис. 2.** Графики зависимости времени регистрации нейтрона  $t(z_0)$  при расположении точечного детектора на расстоянии  $d = 110$  см вдоль оси  $Z$  (см. рис. 1) для трех расстояний от оси  $Z$  ( $h = 100, 200$  и  $300$  см).

кривая соответствует рассеянию на водороде, тонкие кривые — рассеянию на углероде с образованием остаточного ядра с различными энергиями возбуждения ( $U$ ). В случае водорода кривая одна-единственная — упругое рассеяние ( $U = 0$ ), она исчерпывает все полное сечение рассеяния ( $\sim 0.7$  бн), с ростом  $\theta$  резко падает до  $E_n = 0$  и охватывает диапазон углов  $0^\circ - 90^\circ$ . В случае углерода полное сечение рассеяния ( $\sim 1.2$  бн) раздроблено во множество способов рассеяния с различными  $U \geq 0$ , с ростом  $\theta$  падает медленно и охватывает весь диапазон углов ( $0^\circ - 180^\circ$ ). Качественно картина такая же и для других ядер.

Рассмотрим, как выделенность водорода сказывается на отношении эффект/фон. Для простоты сначала по-прежнему будем считать, что нейтроны регистрируются точечным детектором. Заметим, что безотносительно того, на каком элементе происходит рассеяние, точка рассеяния в действительности определяется по формуле (1), справедливой, однако только в случае рассеяния на водороде. Поэтому при рассеянии на водороде расчетная точка ( $z$ ) совпадает с реальной точкой ( $z_0$ ) рассеяния так, что всегда  $z = z_0$ , а при рассеянии на других элементах  $z_0 \neq z$ . На рис. 4 приведена зависимость  $z$  от  $z_0$  для углерода при различных значениях

энергии  $U$  (тонкие кривые) и для водорода ( $z = z_0$ , жирная прямая). Кривые углерода получены путем вычисления зависимости  $t(z_0)$  по формуле (1) с постановкой в нее  $V = f_c(\theta)$  для углерода, и затем с помощью формулы (1) для водорода (т.е. с постановкой  $V = f(\theta)$ , см. формулу (1)) вычисляется  $z(z_0)$ . На рис. 4 указаны соответствующие значения энергии ( $U$ ) и сечения рассеяния ( $\sigma$ ). Расчет проведен при  $h = 100$  см и  $d = 110$  см. Рисунок позволяет оценить отношение эффект/фон. Пусть, например, объект состоит из смеси атомов водорода и углерода в равных количествах и охватывает интервал  $z_0 = 60 - 90$  см (обозначен штрихами). Все события рассеяния нейтронов на углероде, попадающие в интервал  $z = 60 - 90$  см, являются фоновыми событиями. Видно, что фон обусловлен лишь двумя кривыми  $U = 10.8$  МэВ и  $U = 11.8$  МэВ. Их суммарное сечение составляет  $0.031$  бн, тогда как полное сечение рассеяния —  $1.2$  бн, т.е. лишь  $2.5\%$  нейтронов, рассеянных на углероде, могут создавать фон. Отношение эффект/фон равно  $2(0.7/0.031) = 45$ , где  $0.7$  — сечение рассеяния водорода, фактор  $\sim 2$  связан с различием угловых диапазонов рассеяния на водороде ( $0^\circ - 90^\circ$ ) и углероде ( $0^\circ - 180^\circ$ ). Полученное



**Рис. 3.** Сравнение графиков зависимостей энергии рассеяния нейтронов с начальной энергией 14 МэВ на водороде и углероде от угла рассеяния. Толстая кривая — рассеяние на водороде (упругое рассеяние, энергия возбуждения  $U = 0$ ). Остальные кривые — рассеяние на углероде с различными энергиями возбуждения. На каждой кривой показаны энергии возбуждения ( $U$ ) и сечения взаимодействия нейтронов с энергией 14 МэВ по каждому из каналов рассеяния.

отношение соответствует среднему по интервалу (30 см) значению фона. Но, как видно из рис. 4, среднее значение совершенно не передает характер фона — двух узких участков — около  $z \approx 78$  см с шириной  $\Delta z \sim 1.5$  см и около  $z \sim 65$  см с шириной  $\Delta z \sim 3$  см. Обычно в объекте присутствуют несколько элементов, и соответственно число пиков значительно больше. Их невозможно отличить от эффекта, обусловленного неравномерным распределением водорода в объекте.

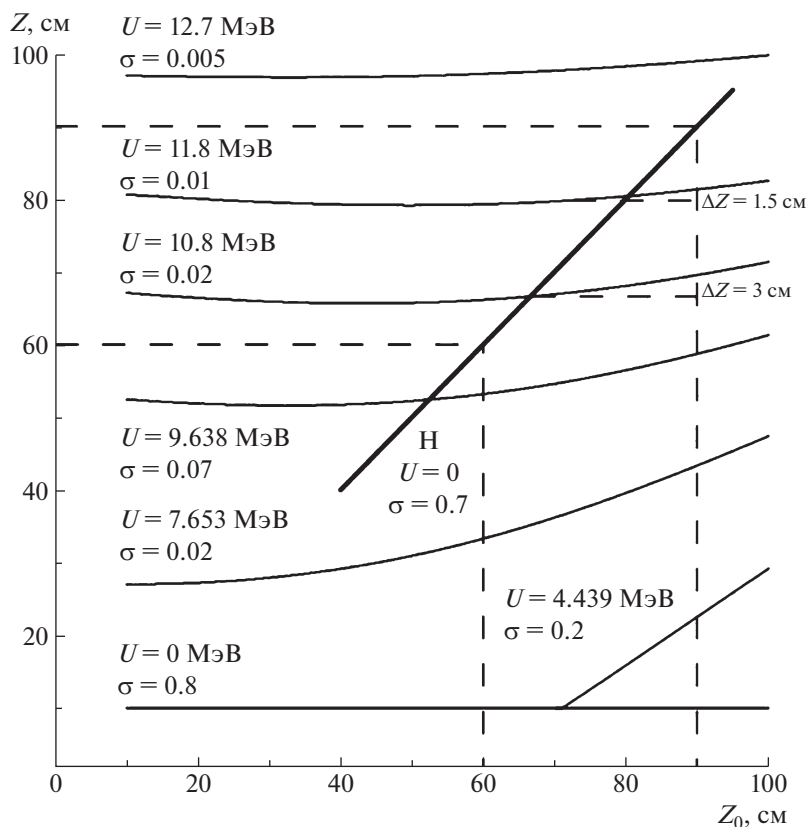
Покажем, что фон усреднится и станет гладким, если для регистрации нейтронов использовать координатно-чувствительный детектор. При этом усреднение не коснется эффекта. Это следует из того, что при переносе точечного детектора (рис. 1) на другое расстояние  $d$  линия водорода ( $z = z_0$ ) останется неизменной (рис. 4), а кривые других элементов (в данном случае — углерода) переместятся вдоль оси  $z$ . Так, например, если вместо  $d = 110$  см (рис. 4) взять  $d = 160$  см (рис. 5), кривые углерода переместятся на  $\sim 50$  см. Это означает, что при любой данной точке рассеяния ( $z_0$ ) координата  $z$  с изменением  $d$  от 110 до 160 см в случае рассеяния на водороде не будет меняться

(всегда  $z$  совпадает с  $z_0$ ), а в случае рассеяния на углероде  $z$  будет перемещаться от  $z_1$  при  $d_1 = 110$  см до  $z_2 \approx z_1 + 50$  при  $d = 160$  см. Поэтому при суммировании событий, зарегистрированных в различных точках, использование координатно-чувствительного детектора увеличивает как эффект, так и фон, но фон при этом усредняется и сглаживается, а эффект увеличивается без какого-либо размытия. Уровень сглаженного фона в интервале  $z = 60-90$  см можно оценить по числу событий вне этого интервала, где регистрация рассеяния на водороде заведомо отсутствует. Там присутствует только фон.

Для более точного рассмотрения и наглядной иллюстрации водородного метода было проведено численное моделирование.

### 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА

Моделирование проводилось методом Монте-Карло с помощью программного пакета GEANT-CALOR [12]. Схема моделируемой установки приведена на рис. 6. Для регистрации нейтронов используется сцинтилляционный детектор



**Рис. 4.** Сравнение графиков зависимостей расчетной точки рассеяния на водороде ( $z$ ) от реальной точки рассеяния ( $z_0$ ) для водорода и углерода. Толстые кривые — рассеяние на водороде, тонкие кривые — рассеяние на углероде. Расчет приведен для  $d = 110$  см и  $h = 100$  см (см. рис. 1). На графиках указаны энергии уровней и сечения взаимодействия для каждого из каналов рассеяния для первичной энергии нейтрона 14 МэВ.

в виде кольцевого цилиндрического слоя толщиной 2 см, длиной 50 см и внутренним радиусом 49 см. Объект — мишень в форме диска — помещается в центре детектора. Источник меченых нейтронов (14 МэВ) расположен на расстоянии 100 см от центра мишени. Рассматривалось два варианта моделирования. В первом варианте нейтроны распространялись строго вдоль оси  $Z$  (диаметр пучка  $D = 0$ ). Во втором варианте нейтроны распространялись изотропно внутри узкого конуса, охватывая в центре мишени круг диаметром  $D = 3$  см. При моделировании информация сохранялась в событийном файле, где записывались: выделенная в детекторе энергия; время регистрации нейтрона; координаты  $(x'y'z')$  точки, являющейся пересечением прямой движения рассеянного нейтрона с цилиндрической поверхностью  $R = 50$  см в детекторе; кратность взаимодействия нейтрона в мишени; сведения о первом взаимодействии меченого нейтрона с ядрами мишени — атомный номер ядра и координаты взаимодействия. Рассеянный нейтрон считался зарегистрированным, если выделенная в детекторе энергия с учетом коэффициента Биркса превышает 10 кэВ. Для

обработки результатов моделирования была написана отдельная программа, которая позволяет по измеренным времени задержки и координатам регистрации определить точку рассеяния  $z_0$  на оси  $Z$  в предположении, что рассеяние произошло на водороде. Временная неопределенность регистрации имитировалась размытием времени регистрации нейтрона по Гауссу с шириной на полувысоте  $\Delta t = 0.7$  нс. Учет неопределенности местоположения точки регистрации проводился следующим, достаточно точным, способом. В качестве места регистрации бралась случайная точка на пространственной сфере с центром с координатами  $(x'y'z')$  и с радиусом, имеющим распределение Гаусса с шириной на полувысоте, равной  $\Delta r = 1$  см.

Результатом моделирования является распределение по  $z$  всевозможных событий ( $N$ ), представляющих сумму эффект + фон, и фоновых событий ( $\Phi$ ). Последние получают отбрасыванием событий эффекта, идентифицируемых как однократное взаимодействие нейтрона в мишени, при условии, что это взаимодействие происходит на водороде.

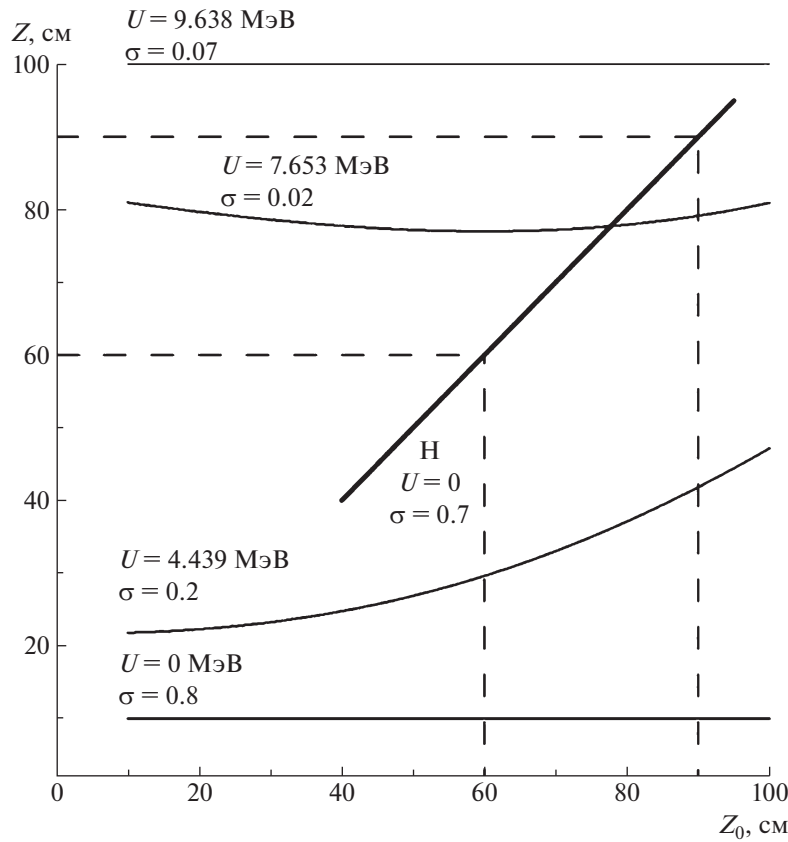


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для  $d = 160$  см и  $h = 100$  см (см. рис. 1).

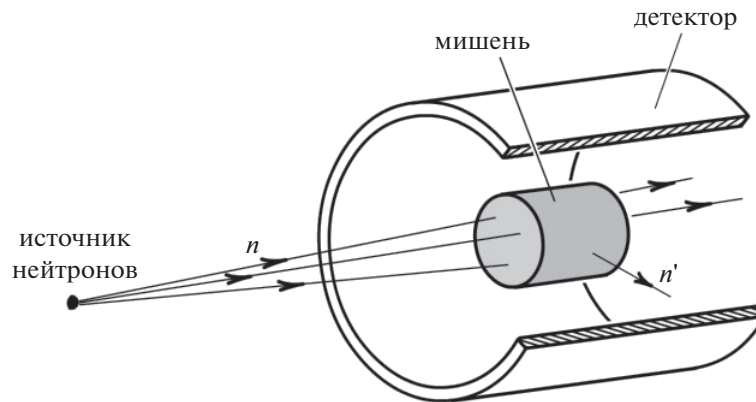


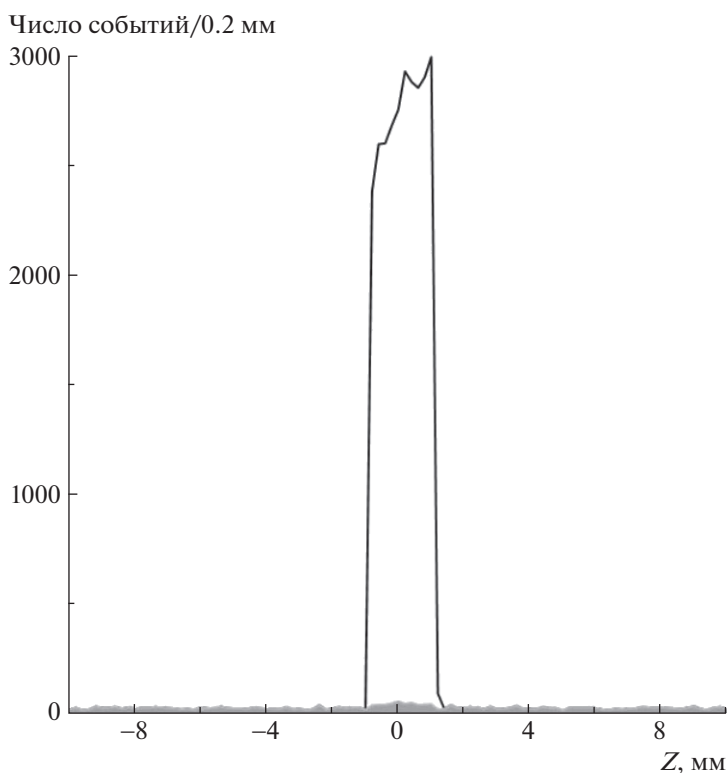
Рис. 6. Схема моделируемой установки.  $n$  — падающий нейтрон с энергией 14 МэВ,  $n'$  — рассеянный нейтрон.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет проводился для двух дисков из TNT (плотность  $1.6 \text{ г/см}^2$ ) диаметром 4 см, существенно различающихся по толщине — 2 мм и 50 мм — и одного диска из воды диаметром 4 см и толщиной 50 мм. Можно ожидать, что многократные взаимодействия нейтронов и самоэкранировка в случае тонкого диска практически не повлияют на результаты расчета; в случае толстого диска приведут к увеличению эффекта, но к ухудшению

отношения эффект/фон, что характерно для метода зондирования. В каждом расчете было разыграно  $2 \times 10^8$  первичных нейтронов.

На рис. 7 приведена зависимость числа событий от координаты  $z$  (отсчитываемой от центра диска) для тонкого диска при нулевых неопределенностях ( $\Delta t = 0, \Delta r = 0$  и  $D = 0$ ). Черная кривая ( $N$ ) соответствует числу всех зарегистрированных событий (эффект + фон), серым наполнением выделен фон ( $\Phi$ ). На рис. 8а приведен тот же график в широком



**Рис. 7.** Графики зависимости числа событий от координаты  $z$  (отсчитываемой от центра диска) для тонкого диска (толщина 2 мм) при нулевых неопределенностях ( $\Delta t = 0$ ,  $\Delta r = 0$  и  $D = 0$ ). Черная кривая соответствует числу всех зарегистрированных событий (эффект + фон), серым наполнением выделен фон.

диапазоне по  $z$ . Видно, что эффект ( $N-\Phi$ ) имеет прямоугольную форму и точно передает расположение диска и его толщину. Фон гладкий и пренебрежимо мал. Это позволяет найти фон по числам отсчетов вне объекта. Включение неопределенностей  $\Delta t = 0.7$  нс,  $\Delta r = 1$  см ( $D = 0$ ) приводит к увеличению полуширины пика до 12 мм (рис. 8б). В случае  $D = 3$  см,  $\Delta t = 0$  и  $\Delta r = 0$  полуширина составляет 35 мм (рис. 8в). Подключение неопределенностей  $\Delta t = 0.7$  нс,  $\Delta r = 1$  см практически не влияет на полуширину (рис. 8г).

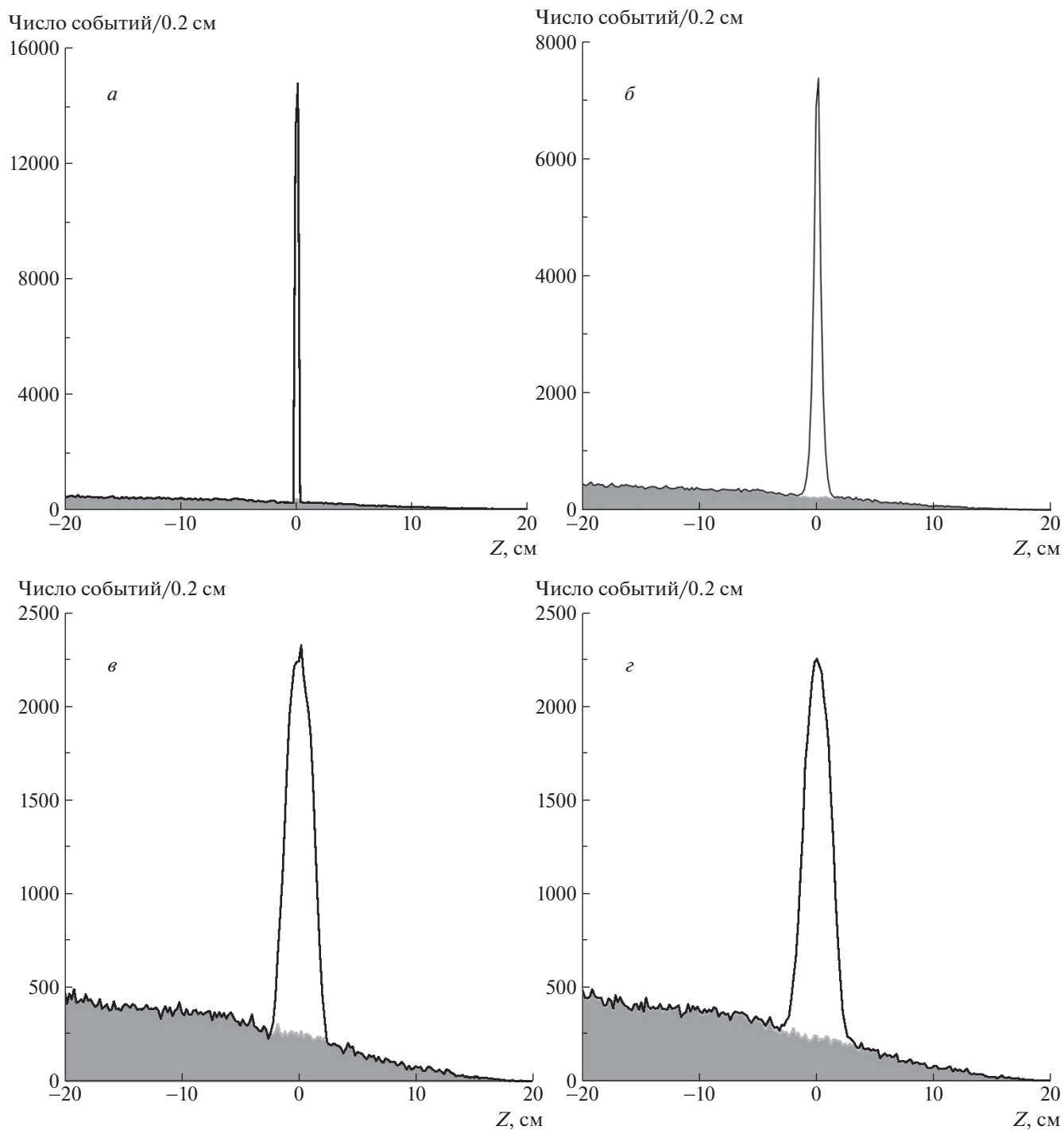
На рис. 9 приведены результаты расчета с толстым (50 мм) диском при учете всех трех неопределенностей для диска из воды (рис. 9а) и диска из TNT (рис. 9б). Видно, что неопределенности увеличивают полуширину пика немного — на  $\sim 1$  см. Из сравнения рис. 8г и 9б следует, что площадь пика с толстым диском в  $\sim 13$  раз больше площади пика с тонким диском (2 мм), и при этом отношение эффект/фон уменьшится лишь в  $\sim 2.5$  раза.

Рассмотрим возможность использования водородного метода для обнаружения вложений в объекте. Очевидно, что измерения содержания одного лишь водорода недостаточно для идентификации вещества вложения. Однако водородный метод

можно аппаратно совместить с методом измерения содержания других элементов, в частности, с  $\gamma$ -методом, что позволит значительно расширить круг идентифицируемых веществ, повысить надежность и эффективность их обнаружения. Это обусловлено с подключением в анализ столь распространенного элемента, как водород, и — что также важно — высокой скоростью набора статистики в водородном методе по сравнению с  $\gamma$ -методом.

Для сравнения скорости набора эффекта в этих методах были вычислены площади соответствующих пиков при одинаковых мишенях TNT и потоке меченых нейтронов. Площадь  $\gamma$ -пиков оценивалась с использованием результатов работы [10], в которой проведен расчет  $\gamma$ -метода для установки с 12 сцинтилляторами ВГО  $\varnothing 7.6 \times 7$  см, расположенных на расстоянии 30 см от центра мишени. Площадь водородного пика оказалась в 50 раз больше площади  $\gamma$ -пика углерода (4.4 МэВ), в 580 раз — пика азота (5.1 МэВ) и в 120 раз — пика кислорода (6.1 МэВ).

Заметим, что в совмещенном методе площадь нейтронного детектора можно взять на порядок меньше, например, вместо кольцевого детектора взять четыре детектора длиной по 50 см и шириной  $\sim 8$  см. При этом скорость счета в водородном методе будет все еще большей, в  $\sim 50$  раз по отноше-

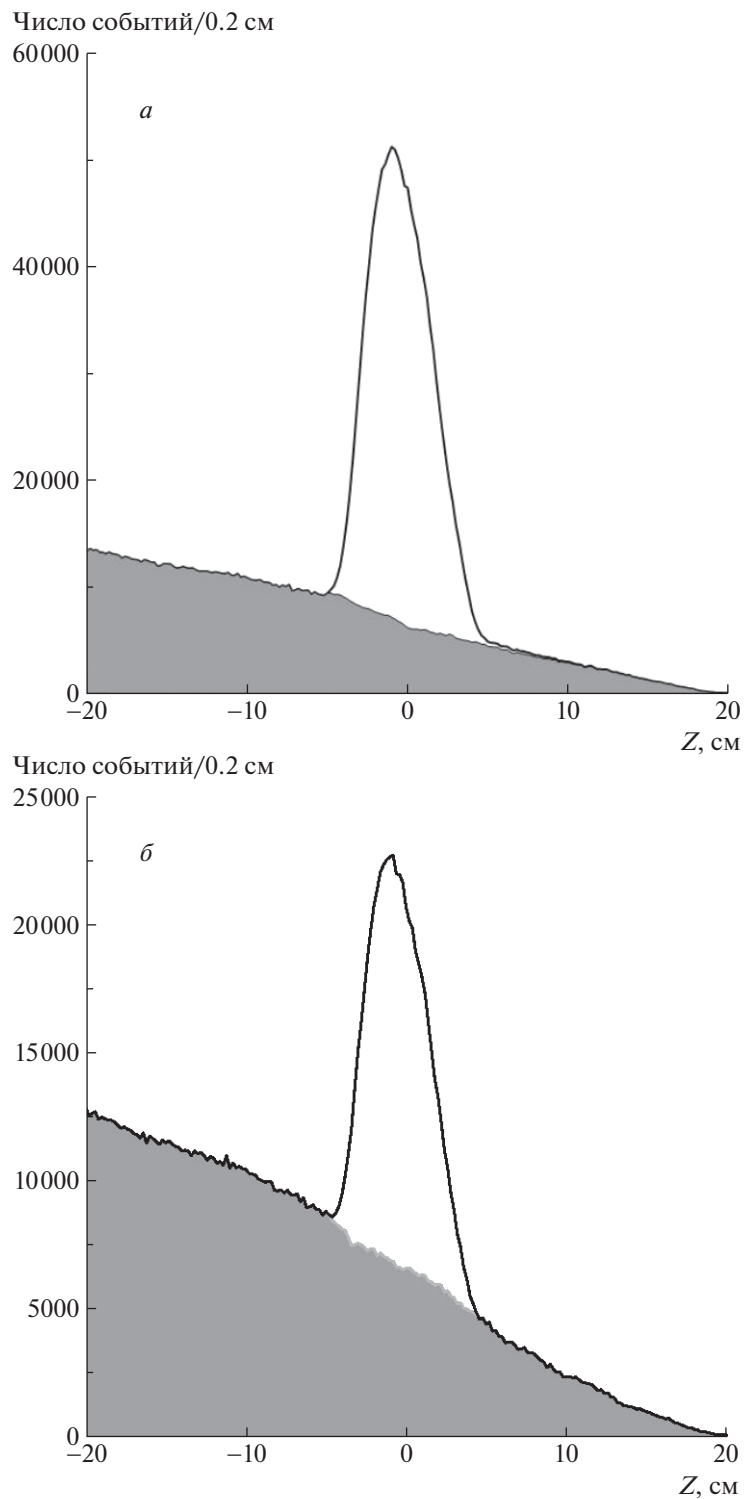


**Рис. 8.** Графики зависимости числа событий от координаты  $z$  (отсчитываемой от центра диска) для тонкого диска (толщина 2 мм). Черная кривая соответствует числу всех зарегистрированных событий (эффект + фон), серым наполнением выделен фон. *а* — неопределенности  $\Delta t = 0$ ,  $\Delta r = 0$  и  $D = 0$ . *б* — неопределенности  $\Delta t = 0.7$  нс,  $\Delta r = 1$  см и  $D = 0$ . *в* — неопределенности  $\Delta t = 0$ ,  $\Delta r = 0$  и  $D = 3$  см. *г* — неопределенности  $\Delta t = 0.7$  нс,  $\Delta r = 1$  см и  $D = 3$  см.

нию к азоту. Обратим внимание, что именно слабостью азотного пика обусловлена большая длительность измерений в  $\gamma$ -методе. В совмещенном же методе во многих случаях может оказаться доста-

точным измерение содержания водорода, углерода и/или кислорода, и соответственно не потребуются длительных измерений. В случае необходимости





**Рис. 9.** Графики зависимости числа событий от координаты  $z$  (отсчитываемой от центра диска) для толстого диска (толщина 50 мм) из воды (*а*) и TNT (*б*). Черная кривая соответствует числу всех зарегистрированных событий (эффект + фон), серым наполнением выделен фон. Координата  $z$  изменяется от  $-20$  до  $+20$  см. Неопределенности  $\Delta t = 0.7$  нс,  $\Delta r = 1$  см и  $D = 3$  см.

проверки наличия азота можно проводить более длительные измерения. Такой подход позволит в разы сократить среднюю продолжительность из-

мерений и соответственно сократить расход ресурса нейтронного источника. Это откроет возможность широкого внедрения метода зондирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Beyerle, J. P. Hurley, and L. Tunnell, Nucl. Instrum. Methods A **299**, 458 (1990).
2. S. Mitra, J. E. Wolff, and R. Garrett, Appl. Radiat. Isot. **49**, 537 (1998).
3. T. Gozani, Nucl. Instrum. Methods B **213**, 460 (2004).
4. B. Perot, C. Carasco, S. Bernard, A. Mariani, J.-L. Szabo, E. Mercier, G. Sannie, G. Viesti, G. Nebbia, S. Pesente, M. Lunardon, S. Moretto, D. Fabris, A. Zenoni, G. Bonomi, A. Donzella, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B **261**, 295 (2007).
5. В. М. Быстрицкий, В. В. Герасимов, Н. И. Замятин, Е. В. Зубарев, В. Г. Кадышевский, А. П. Кобзев, А. Р. Крылов, А. А. Ноздрин, В. Л. Рапацкий, Ю. Н. Рогов, А. Б. Садовский, А. В. Саламатин, М. Г. Сапожников, А. Н. Сисакян, В. М. Слепнев, Письма в ЭЧАЯ **6**, 831 (2009).
6. M. D. Karetnikov, A. I. Klimov, K. N. Kozlov, E. P. Bogolyubov, S. A. Korotkov, V. I. Nazarov, V. I. Ryzhkov, and T. O. Khasaev, Instrum. Exp. Tech. **52**, 497 (2009).
7. Y. Rogov, V. Kremenets, M. Sapozhnikov, and M. Sebele, Instruments **4**(4), 33 (2020).
8. I. Bolshakov, M. Kolesnik, M. Sorokin, V. Kremenets, E. Razinkov, Y. Rogov, and M. Sapozhnikov, Int. J. Mineral Proc. Extract. Metall. **5**(4), 54 (2020).
9. B. Pérot, C. Carasco, C. Eléon, S. Bernard, A. Sardet, W. El Kanawati, C. Deyglun, G. Perret, G. Sannié, V. Valkovic, D. Sudac, J. Obhodas, S. Moretto, G. Nebbia, C. Fontana, F. Pino, *et al.*, EPJ Nuclear Sci. Technol. **7**, 6 (2021).
10. А. М. Бакаляров, Г. В. Мурадян, ЯФ **81**, 592 (2018) [Phys. At. Nucl. **81**, 645 (2018)].
11. C. Carasco, B. Pérot, and A. Sardet, Nucl. Instrum. Methods A **951**, 163030 (2020).
12. C. Zeitnitz and T. A. Gabriel, Nucl. Instrum. Methods A **349**, 106 (1994).
13. <http://www-nds.iaea.org/public/endl/>

## NEUTRON METHOD FOR MEASURING THE VOLUME DISTRIBUTION OF HYDROGEN IN VARIOUS OBJECTS

A. M. Bakalyarov<sup>1)</sup>, G. V. Muradian<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

A method for measuring the volume distribution of hydrogen in various objects using tagged neutron sensing is proposed. The existing methods of such probing, which allow measuring the distribution of a number of elements, are not applicable to hydrogen, because they are based on the registration of a reaction with the emission of gamma quanta, which is practically absent in hydrogen at the energy of tagged neutrons. Meanwhile, hydrogen is of great interest — it is part of many substances, including organic compounds — in particular, explosives. In the proposed method, neutrons emitted from the object are registered and the registration time is measured. A method is described for isolating hydrogen scattering cases from a set of registered neutrons and determining the coordinates of the scattering point. Numerical simulation is carried out and it is shown that the method provides high spatial resolution and a fast set of hydrogen scattering events. It can be combined with existing methods of measuring the distribution of other elements, which will expand the range of identifiable substances and significantly reduce the consumption of the neutron source resource.