

## К ВОПРОСУ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НЕКОТОРЫХ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ В ПОЛЯХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

А. С. Кошелев, В. Д. Севастьянов<sup>1</sup>

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

<sup>1</sup>ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево Московской обл.

Статья поступила в редакцию 19.05.2021, после доработки – 21.06.2021, принята к публикации – 18.11.2021

Для использования на реакторных установках предлагается внедрить специальные термины, словесные и функциональные определения *потока нейтронов источника, потока нейтронов поля, плотности потока нейтронов поля и флюенса нейтронов поля*, которые позволяют исключить терминологические неопределенности, содержащиеся в действующих русскоязычных рекомендациях РМГ 78-2005, МИ 2630-2000 ГСИ, и обосновать физическое соответствие понятий *плотность потока нейтронов* и *fluence rate neutron* англоязычной рекомендации ICRU REPORT No.85, не затрагивая форм использования функционирующих государственных эталонов потока, плотности потока и флюенса нейтронов.

**Ключевые слова:** поток нейтронов источника, поток нейтронов поля, плотность потока нейтронов поля, флюенс нейтронов поля, словесные и функциональные определения понятий.

**ON TERMINOLOGY AMBIGUITY OF SOME UNITS OF MEASUREMENT IN THE FIELDS OF REACTOR PLANTS / A. S. Koshelev, V. D. Sevast'yanov** // It is proposed to introduce to the sphere of reactor plants special terms, verbal and functional definitions of a source neutron flux, a field neutron flux, neutron field flux density and neutron field fluence that make it possible to exclude terminology ambiguity available in currently in force guidelines developed in Russian RMG 78-2005, MI 2630-2000 GSI and substantiate physical correspondence between the concepts of neutron flux density and neutron fluence rate available in guidelines ICRU REPORT No.85 developed in English. The application forms of the functioning national standards of flux, flux density and neutron fluence would not be touched on.

**Key words:** source neutron flux, field neutron flux, flux density of neutron field, neutron field fluence, verbal and functional definition of concepts.

При проведении измерений параметров излучений реакторных установок, соответствующих требованиям Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ), возникает необходимость оперировать такими физическими величинами и их единицами, как поток нейтронов, плотность потока нейтронов, флюенс нейтронов. Для воспроизводства единиц указанных величин в стране функционируют два Государственных эталона

в рамках соответствующих государственных поверочных схем [1–4] и два основополагающих документа ГСИ по систематизации физических величин и их единиц [5, 6] в соответствии с требованиями закона РФ «Об обеспечении единства измерений» [7].

Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений потока и плотности потока [1, 2] входят в состав метрологического оборудова-

ния ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»; государственный первичный специальный эталон (ГПСЭ) и поверочная схема для средств измерений плотности потока нейтронов и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках (ЯФУ) [3, 4] – в состав метрологического оборудования ФГУП «ВНИИФТРИ».

В таблице представлены словесные и функциональные определения понятий *поток нейтронов, плотность потока нейтронов, флюенс нейтронов*, рекомендуемые в [5, 6] для применения в документации всех видов,

научно-технической, учебной и справочной литературе. В таблице представлены также словесные и функциональные определения указанных понятий из наиболее известной англоязычной версии рекомендаций [8].

Анализ материалов, представленных в [1, 2], показывает, что Государственный эталон ВНИИМ им. Д. И. Менделеева обеспечивает воспроизведение единицы потока нейтронов и передачу ее размера с размерностью «с<sup>-1</sup>» и воспроизведение единицы плотности потока нейтронов и передачу ее размера с размерностью «с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>».

*Действующие формы определения рассматриваемых физических величин  
согласно рекомендациям [1–3, 5, 6, 8]*

Определение, рекомендуемое в [5]	Определение, рекомендуемое в [6]	Определение, рекомендуемое в [8]
<p>3.5. Поток частиц [фотонов]; <math>\dot{N}</math>: Отношение числа частиц <math>dN</math>, пересекающих заданную поверхность за интервал времени <math>dt</math>, к величине этого интервала,</p> $\dot{N} = \frac{dN}{dt},$ <p>единица: с<sup>-1</sup></p>	<p>9.1.4. Поток частиц <math>F</math>: Отношение приращения числа частиц <math>dN</math> за интервал времени <math>dt</math> к этому интервалу,</p> $F = \frac{dN}{dt},$ <p>единица: с<sup>-1</sup></p>	<p>3.1.2. The flux, <math>\dot{N}</math>, is the quotient (<i>отношение</i>) of <math>dN</math> by <math>dt</math>, where <math>dN</math> is the increment (<i>приращение</i>) of the particle number in the time interval <math>dt</math>,</p> $\dot{N} = \frac{dN}{dt}.$ <p>Unit: s<sup>-1</sup></p>
<p>3.6. Флюенс частиц [фотонов]; <math>\Phi</math>: Отношение числа частиц <math>dN</math>, проникающих в элементарную сферу, к площади поперечного сечения этой сферы <math>dS</math>,</p> $\Phi = \frac{dN}{dS},$ <p>единица: м<sup>-2</sup></p>	<p>9.1.5. Флюенс частиц <math>\Phi</math>: Отношение числа частиц <math>dN</math>, проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения этой сферы <math>dS</math>,</p> $\Phi = \frac{dN}{dS},$ <p>единица: м<sup>-2</sup></p>	<p>3.1.3. The fluence, <math>\Phi</math>, is quotient of <math>dN</math> by <math>da</math>, where <math>dN</math> is the number of particles incident (<i>падающих</i>) on a sphere of cross-sectional area <math>da</math>,</p> $\Phi = \frac{dN}{da},$ <p>Unit: m<sup>-2</sup></p>
<p>3.7. Плотность потока частиц [фотонов]; <math>\varphi</math>: Отношение числа частиц <math>dN</math>, пересекающих заданную поверхность за интервал времени <math>dt</math>, к площади этой поверхности <math>dS</math> и величине временного интервала,</p> $\varphi = \frac{dN}{dS dt},$ <p>единица: м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup></p>	<p>9.1.6. Плотность потока частиц <math>\varphi</math>: Отношение потока ионизирующих частиц <math>dF</math>, проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения <math>dS</math> этой сферы,</p> $\varphi = \frac{dF}{dS} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2N}{dS dt},$ <p>единица: м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup></p>	<p>3.1.4. The fluence rate, <math>\dot{\Phi}</math>, is the quotient of <math>d\Phi</math> by <math>dt</math>, where <math>d\Phi</math> is the increment of the fluence in the time interval <math>dt</math>,</p> $\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt},$ <p>Unit: m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup></p>

Воспроизведение и передачу размера единицы потока нейтронов обеспечивают входящие в состав эталона эталонные установки

УЭН-1, УЭН-2, УЭН-3. В установке УЭН-1 точечный источник нейтронов на основе реакций  $T(d, n)^4\text{He}$  с энергией нейтронов 14 Мэв

и  $D(d, n)^3\text{He}$  с энергией нейтронов 2,5 МэВ окружен графитовой сферой диаметром 4 м с центральной полостью 0,4 м. Принимается, что в процессе длительной стационарной работы источника нейтронов в результате замедления и диффузии в графитовом шаре формируется устойчивое распределение тепловых нейтронов, общее количество которых пропорционально потоку нейтронов источника. В установке УЭН-2 источник на основе реакций  $T(d, n)^4\text{He}$  и  $D(d, n)^3\text{He}$  окружен сосудом квазисферической формы диаметром 1,0 м, заполненным водным раствором сульфата марганца. Вода формирует устойчивое поле тепловых нейтронов, активация марганца используется для определения общего количества этих нейтронов в квазисфере. В установке УЭН-3 источник на основе реакций  $T(d, n)^4\text{He}$  и  $D(d, n)^3\text{He}$  размещается в центре цилиндрического бака высотой и диаметром 1,1 м, заполненного дистиллированной водой. Для определения общего количества тепловых нейтронов используется метод активации золотых фольг.

Воспроизведение и передачу размера единицы плотности потока нейтронов обеспечивают входящие в состав эталона эталонные установки УЭППН и УЭПТН. Установка УЭППН служит для воспроизведения единицы плотности потока нейтронов и передачи ее размера в поле быстрых нейтронов. Используются адекватные точечным ускорительные источники на основе реакций  $T(d, n)^4\text{He}$ ,  $D(d, n)^3\text{He}$  и радионуклидные источники следующих типов:  $^{124}\text{Sb}(\gamma, n)\text{Be}$ ,  $^{228}\text{Ra}(\gamma, n)\text{Be}$ ,  $^{252}\text{Cf}$ ,  $\text{Po}(\alpha, n)\text{B}$ ,  $\text{Ra}(\alpha, n)\text{Be}$ ,  $\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ . Нейтронное поле в воздушном пространстве вокруг источника нейтронов аттестуют по плотности потока в рабочем диапазоне расстояний и углов для данного типа источника. Установка УЭПТН служит для воспроизведения единицы плотности потока нейтронов и передачи ее размера в поле тепловых нейтронов. В состав установки входят составной блок полиэтиленового замедлителя в форме куба с ребром 0,33 м и центральной сферической полостью диаметром 0,12 м, окруженный отражателем из оргстекла толщиной 0,18 м; комплект из шести радионуклидных источников быстрых

нейтронов типа  $\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ , активационные детекторы с держателями. Источники нейтронов размещают в специальных каналах по центру граней куба на расстоянии 0,02 м от края полости. Значения плотности потока нейтронов находят по активации золотых фольг, измеренных методом  $\beta$ - $\gamma$ -совпадений на установке УМФ.

Анализ материалов, представленных в [3, 4], с привлечением материалов книги [9], показывает, что ГПСЭ ВНИИФТРИ обеспечивает воспроизведение единицы плотности потока нейтронов и передачи ее размера с размерностью « $\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ » и воспроизведение единицы флюенса нейтронов и передачи ее размера с размерностью « $\text{м}^{-2}$ ». Эталон обеспечивает воспроизведение единиц флюенса и плотности потока нейтронов в опорном поле со спектром тепловых и замедляющихся нейтронов, формируемых в сборке с тяжелой водой и спектром нейтронов источника на основе реакции  $T(d, n)^4\text{He}$ .

Для полноты информации следует отметить, что еще в 1972 году в книге [10] сотрудника ВНИИФТРИ Р. Д. Васильева обстоятельно рассмотрены физические величины и зависимости, характеризующие поля и источники нейтронов, взаимосвязи между ними, а также даны определения величин и зависимостей в рамках обсуждения терминологии. В книге убедительно показано различие понятий *поток нейтронов источника* и *поток нейтронов поля*.

Для источника нейтронов поток нейтронов определен как число нейтронов, испускаемых точечным источником в углу  $4\pi$ . Оговорено, что поток нейтронов также можно рассматривать как выход нейтронов с размерностью «нейтрон/с».

Для поля нейтронов поток нейтронов определен как число нейтронов, проникающих в элементарную сферу за единицу времени; размерность «нейтрон/с». Как производные потока нейтронов поля даны определения *плотности потока нейтронов* – числа нейтронов, проникающих в элементарную сферу с единичной площадью центрального сечения за единицу времени (размерность «нейтрон/( $\text{см}^2\cdot\text{с}$ )») – и *флюенса нейтронов* –

числа нейтронов, проникающих в элементарную сферу с единичной площадью центрального сечения за выбранный интервал времени (размерность «нейтрон/(см<sup>2</sup>)»). Показано, что плотность потока нейтронов поля – это поток нейтронов поля, нормированный на площадь центрального сечения элементарной сферы, а флюенс нейтронов поля – это интеграл плотности потока нейтронов поля за выбранный интервал времени. Материалы, представленные в [10], позволяют однозначно констатировать физическое различие понятий *поток нейтронов источника* и *поток нейтронов поля*.

Сравнение сопоставимых понятий, представленных в [10] и таблице, показывает, что авторы работ [5, 6 и 8] либо не имели возможности ознакомиться, либо не сочли нужным обратить внимание на изложенное в [10]. Во всех трех работах [5, 6, 8] в словесной форме определения понятия *поток частиц* отсутствует конкретизация характера движения частиц: испускание из одной точки пространства в угол  $4\pi$ , как у источника частиц, или проникновение в элементарную сферу, как в случае поля частиц. Только из текста работы [6] (п. 3.8) становится ясно, что имеет место однозначность понятий *поток частиц* и *внешнее излучение источника нейтронов*. Согласно п. 3.8, внешнее излучение источника нейтронов [поток частиц] – это отношение полного числа нейтронов  $dN$ , испускаемых источником за интервал времени  $dt$ , к величине этого интервала. Разночтение п. 3.5 и 3.8 в словах «пересекающих заданную поверхность» и «полного» не вносит принципиально значимых различий в определения потока и внешнего излучения источника.

Вероятнее всего, что и авторы работ [6, 8] «по умолчанию» в использованном словесном определении понятия *поток частиц* (the flux) имеют ввиду поток частиц источника с соответствующим характером движения частиц, испускаемых из единой точки пространства в  $4\pi$ -геометрии.

Во всех трех работах [5, 6, 8] отсутствует и словесное, и функциональное определение понятия *плотность потока частиц поля*. Несмотря на то, что авторы всех трех работ опо-

средованно используют понятие *поток частиц поля* при определении понятий *плотность потока частиц*, *флюенс частиц*, *fluence* и *fluence rate*, они все явно не видят необходимости конкретизировать понятие потока частиц поля, неявно предполагая достаточность определения только потока частиц источника.

В отсутствие определения потока поля совершенно абсурдно выглядит определение плотности потока частиц в [5] как отношения числа частиц  $dN$ , пересекающих заданную (?) поверхность к площади этой поверхности. Словосочетание «заданная поверхность» явно отсылает к определению потока частиц в п. 3.5 [5], а само определение вообще не содержит упоминания о какой-либо элементарной сфере и ее центральном сечении. Складывается впечатление, что авторы [5] искренно уверены, что в п. 3.7 и 3.5 речь идет об одном и том же потоке частиц.

В вышедшей на четыре года ранее работе [6], авторами которой, как и авторами работы [5], являются сотрудники ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, также отсутствует определение потока частиц поля и также абсурдно выглядит определение плотности потока частиц. Только слагаемые этой абсурдности другие. В п. 9.1.6 [6] уверенно говорится об отношении потока частиц, проникающих в элементарную сферу к площади центрального сечения этой сферы, однако явно имеется ввиду поток  $F$  в определении, данном ранее в п. 9.1.4, в котором об элементарной сфере вообще не упоминается, а «по умолчанию» предполагается испускание по лучу в  $4\pi$ -пространство, окружающее точку локализации источника.

Не требуют особого комментария определения флюенса частиц, представленные в п. 3.6 [5] и в п. 9.1.5 [6]. Практически очевидно, что и термин, и словесное определение, и функциональное определение просто позаимствованы с англоязычного *the fluence*, представленного в п. 3.1.4 [8]. Значительно интереснее построение англоязычного определения *the fluence* в [8]. Во-первых, для английского языка слово *fluence* – искусственное слово, не имеющее явных источников происхожде-

ния в английской лексике. Во-вторых, словесное определение понятия *fluence* тщательно обходит все смысловые аналогии, позволяющие связать его с определением *the flux*, представленным в п. 9.1.5 [8]. Складывается впечатление, что авторы [8], с одной стороны, сомневаются в возможности расширительного толкования понятия *the flux*, а с другой – не находят подходящего аналога для варианта с проникновением частиц в элементарную сферу. Поэтому они просто постулируют словесный термин *fluence* и словесное определение флюенса как отношения числа частиц, проникающих в элементарную сферу с единичной площадью центрального сечения. Определение практически исчерпывающее при внесении небольшого уточнения о временной координате, а именно: «в выбранном интервале времени», так как, согласно [10], флюенс – это интеграл плотности потока нейтронов поля за выбранный интервал времени.

Не требует особых комментариев переход от определения *fluence* к определению *fluence rate*. Простота смыслового перехода от интегральной формы представления к дифференциальной для «одноименной» физической величины вызывает желание у русскоязычных исследователей ввести в употребление русскоязычный вариант термина *fluence rate* типа *интенсивность флюенса, темп роста флюенса* и т. п. Далее по тексту будет показано, что при введении определения понятия потока нейтронов поля и формирование с опорой на него определения плотности потока нейтронов поля можно говорить о полном совпадении физических величин *fluence rate* и плотность потока нейтронов поля.

Учитывая сказанное, для использования на реакторных установках предлагается внедрить специальные термины, словесные и функциональные определения следующих физических величин:

- *поток нейтронов источника*  $P_s$  – отношение числа нейтронов  $dN$ , испускаемых из единой геометрической координаты вакуумированного пространства в углу  $4\pi$  в интервале времени  $dt$ , к длительности временного интервала,

$$P_s = \frac{dN}{dt},$$

единица в системе СИ –  $c^{-1}$ ,  
десятичная дробная и кратная единица в системе СИ –  $c^{-1} \times$  [системный множитель по необходимости],

специализированная единица – нейтрон/с, нейтрон/мс, нейтрон/мкс и т. п. по наличию конкретной необходимости;

- *поток нейтронов поля*  $P_f$  – отношение числа нейтронов  $dN$ , проникающих в элементарную сферу в материальном пространстве в интервале времени  $dt$ , к длительности этого временного интервала,

$$P_f = \frac{dN}{dt},$$

единица в системе СИ –  $c^{-1}$ ,  
десятичная дробная и кратная единица в системе СИ –  $c^{-1} \times$  [системный множитель по необходимости],

специализированная единица – нейтрон/с, нейтрон/мс, нейтрон/мкс и т. п. по наличию конкретной необходимости;

- *плотность потока нейтронов поля*  $\phi_f$  – отношение числа нейтронов  $dN$ , проникающих в элементарную сферу в материальной среде с площадью центрального сечения  $dS$  в интервале времени  $dt$ , к площади центрального сечения и длительности временного интервала,

$$\phi_f = \frac{dN}{dS dt},$$

единица в системе СИ –  $m^{-2} \cdot c^{-1}$ ,  
десятичная дробная и кратная единица в системе СИ –  $m^{-2} \cdot c^{-1} \times$  [системный множитель по необходимости],

специализированная единица – нейтрон/( $cm^2 \cdot c$ ), нейтрон/( $cm^2 \cdot ms$ ) и т. п. по наличию конкретной необходимости;

- *флюенс нейтронов поля*  $\Phi_f$  – отношение числа нейтронов  $dN$ , проникающих в элементарную сферу в материальном пространстве с площадью центрального сечения  $dS$  в выбранном интервале времени, к площади центрального сечения,

$$\Phi_f = \frac{dN}{dS},$$

единица в системе СИ –  $m^{-2}$ ,  
дольная и кратная единица в системе СИ –  $m^{-2}$  × [системный множитель по необходимости],

специализированная единица – нейтрон/см<sup>2</sup> и т. п. по наличию конкретной необходимости;

При выборе обозначений  $P_s$ ,  $P_f$ ,  $\Phi_f$ ,  $\Phi_f$  принимались во внимание обозначения, использованные в [10] для подобных физических величин. Индекс  $s$  обозначает принадлежность физической величины источнику (от англ. *source*), индекс  $f$  – полю (от англ. *field*). В случае практической реализации предлагается рассматривать составляющие обозначений  $P$ ,  $\Phi$ ,  $\Phi$  как произвольно выбираемые при обязательном указании связи между термином и обозначением. Предлагается также не использовать индекс  $f$  в обозначениях плотности потока и флюенса нейтронов при условии однозначной трактовки указанных физических величин как величин поля нейтронов.

Использование предлагаемых специальных терминов, словесных и функциональных определений *потока нейтронов источника*, *потока нейтронов поля*, *плотности потока нейтронов поля* и *флюенса нейтронов поля* позволяет **исключить** терминологические неопределенности, содержащиеся в рекомендациях [5, 6] и **обосновать** физическое соответствие понятий *плотности потока нейтронов* и *fluence rate neutron* [8], **не затрагивая** форм использования функционирующих государственных эталонов потока, плотности потока и флюенса нейтронов.

## Список литературы

1. ГОСТ 8.031-82. ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения потока и плотности потока нейтронов. – М.: Гос. комитет СССР по стандартизации, 1982.

2. Щеболев В. Т., Рамендик З. А., Стуков Г. М., Кутеева Т. М. Государственный первичный эталон единиц потока и плотности потока нейтронов // Измерительная техника, 1984, № 2, с. 21–23.

3. Васильев Р. Д., Ярына В. П., Севастьянов В. Д. Государственный специальный эталон единицы плотности потока для области измерений на ядерно-физических установках // Измерительная техника, 1974, № 7, с. 10–14.

4. Государственная поверочная схема для средств измерения плотности потока нейтронов и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках. – Росстандарт. www.gost.ru.

5. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 78-2005. Государственная система обеспечения единства измерений. Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2006.

6. МИ 2630-2000 ГСИ. Метрология. Физические единицы и их измерение. Госстандарт России. Рекомендации. – Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 2002.

7. Об обеспечении единства измерений РФ. Федеральный закон № 102-ФЗ, 2008.

8. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. The international commission on radiation units and measurements. April 2011 // Journal of the ICRU. 2011. Vol. 11, N 1 Published by Oxford University Press (ICRU REPORT, N 85).

9. Брегадзе Ю. И., Степанов Э. К., Ярына В. П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

10. Васильев Р. Д. Основы метрологии нейтронного излучения. – М.: Атомиздат, 1972.

Контактная информация –

Кошелев Александр Сергеевич,  
ведущий научный сотрудник ИЯРФ  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
e-mail: otd4@exped.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2021, вып. 4, с. 94–99.