

## Проблемы метрологического обеспечения нейтронных измерений на ядерных реакторах

Р. Д. ВАСИЛЬЕВ

УДК 621.039.512.45

Одной из важнейших прикладных проблем в ядерной физике является создание экономичных, наиболее безопасных и удобных в эксплуатации реакторов различного назначения. Для ее решения необходима прежде всего информация о степени и равномерности выгорания ядерного горючего в активной зоне реактора, радиационной стойкости применяемых материалов, эффективности биологической защиты и пр. Для получения такой информации требуется определить характеристики полей нейтронов на действующих реакторах и критических стендах. При этом результаты измерений, полученные на разных реакторах с помощью одинаковых или различных методов и технических средств, должны согласовываться с необходимой достоверностью. Решение этого вопроса включает в себя задачи как научно-технического, так и организационно-административного характера и входит в компетенцию метрологии, составляя ее главное прикладное содержание.

В настоящей работе рассмотрены экспериментально-теоретические аспекты метрологического обеспечения измерений характеристик полей нейтронов в ядерных реакторах и в первую очередь внутриреакторные измерения как наиболее важные и сложные в экспериментальном отношении.

### Характеристики полей нейтронов и метрологическая классификация различных видов их измерений

Поля нейтронов характеризуются радиометрическими производными величинами, специфическими для нейтронного излучения, и их зависимостями от других величин (спектрами). Чаще всего измеряемыми радиометрическими

величинами являются плотность нейтронов — neutron density (*нейтр/см<sup>3</sup>*), плотность потока нейтронов — neutron flux density [*нейтр/(см<sup>2</sup>·сек)*] и перенос нейтронов — neutron fluence (*нейтр/см<sup>2</sup>*). К определяемым радиометрическим зависимостям относят дифференциальные и интегральные зависимости, характеризующие энергетическое, угловое, пространственное и временное распределения этих величин. В некоторых случаях требуется знать более сложные зависимости, например дифференциальную энергетическо-угловую зависимость плотности потока нейтронов [*нейтр/(см<sup>2</sup>·сек·эв·стер)*]. Кроме того, могут представлять интерес измеряемые непосредственно или вычисляемые по указанным выше зависимостям такие величины, как эффективная температура нейтронов, спектральный индекс и др.

Методы измерений данных величин и определения зависимостей обычно классифицируют с точки зрения способов обнаружения нейтронов, типа регистрирующих приборов и пр. Воспользуемся классификацией метрологического характера, в основе которой лежит способ получения результата измерения. Она заключается в подразделении измерений на три вида: прямые — direct, косвенные — indirect и совместные — joint [1]. Прямые и косвенные измерения применяют для нахождения значений отдельных величин, совместные измерения — для количественного определения зависимостей между различными величинами. Такой подход выбран потому, что объектами исследования метрологии являются величины и зависимости, их единицы измерений, способы измерений и достоверность результатов измерений. Достоверность принято характеризовать случайными и систематическими погрешностями. Случайные погрешности характеризуют точность

результата, а систематические — его правильность (результат тем точнее, чем меньше случайные погрешности, и тем правильнее, т. е. ближе к истинному, чем меньше систематические погрешности [2]). Очевидно, что снижение случайных погрешностей еще не решает вопроса получения достоверных результатов измерений. Более важными являются нахождение, учет и исключение систематических погрешностей, так как из-за них возникают отклонения результатов от истинных значений, нередко выходящие за пределы случайных погрешностей. Следовательно, обеспечение условий для снижения систематических погрешностей — наиболее важный путь решения проблемы метрологического обеспечения прямых измерений.

### Метрологическое обеспечение прямых измерений

Прямые измерения позволяют определять значения только некоторых радиометрических величин, характеризующих поля нейтронов (например, плотность потока, а в отдельных случаях и плотность нейтронов). Прямыми измерениями называют такие, при которых значения искомой величины определяют одним из двух способов: 1) путем сравнения ее с мерой непосредственно или с помощью компарирующего прибора; 2) по показаниям прибора, предварительно отградуированного при помощи мер. Для измерений на реакторах применяют только второй способ. В этом случае прибор градуируют в единицах искомой величины и устанавливают градуировочную зависимость, выражающую количественную взаимосвязь между показаниями прибора и значениями соответствующей величины. Для градуировки применяют поля нейтронов с изменяемым значением характеризующей его величины или совокупность стабильных полей нейтронов с разными значениями этой величины. Такие поля, именуемые градуировочными, с точки зрения метрологии представляют собой меры физических величин, т. е. материализованные (овеществленные, воспроизведенные) единицы измерений. Градуировке прибора предшествуют измерения величины, характеризующей градуировочное поле. Для получения наиболее достоверного значения этой величины используют различные методы косвенных измерений.

При измерениях с помощью отградуированного прибора в некотором исследуемом поле нейтронов показания прибора необходимо умно-

жить на так называемые влияющие величины. С помощью этих величин учитывают различие характеристик градуировочных и исследуемых полей, выражаемых соответствующими зависимостями (энергетическими, угловыми и другого вида распределениями величины, по которой осуществляется градуировка), а также различие внешних условий градуировки и измерений (температура окружающей среды, фон и т. п.). При прямых измерениях влияющие величины наряду с градуировочными зависимостями являются единственными источниками систематических погрешностей. Поэтому их необходимо учитывать, в противном случае это может привести к отклонению результатов измерений от истинных на десятки процентов или в несколько раз, а иногда на порядок и более.

Из изложенного следует, что для метрологического обеспечения прямых измерений необходимо прежде всего: 1) создать для соответствующих величин меры в виде градуировочных полей нейтронов и средств измерений аналогичных величин, характеризующих данные поля; 2) разработать методики градуировки приборов; 3) найти способы выявления и определения влияющих величин.

Рассмотренный подход в приложении к отдельным задачам реализуется во многих национальных метрологических лабораториях. В настоящее время разрабатывают меры только одной величины, характеризующей поле нейтронов — меры плотности потока нейтронов. Однако свойства данных мер таковы, что их можно применять для решения ограниченного круга задач. В качестве мер плотности потока часто применяют нейтронные поля от изотопных источников. В последнее время для создания мер все чаще стали использовать ускорители и реакторы, так как с их помощью можно получать наиболее интенсивные поля нейтронов [3, 4]. Для определения плотности потока нейтронов применяют методы косвенных измерений, обеспечивающие наименьшую погрешность результатов измерений, приближающуюся к 1—5%. Созданные поля нейтронов используют для градуировки приборов, предназначенных для прямых измерений, и входящих в них детекторов (счетчиков, ионизационных камер и пр.). Чтобы отградуированный прибор мог обеспечить требуемую достоверность результатов измерений в реальных полях нейтронов, разрабатывают рекомендации по оценке влияющих величин в приложении к таким случаям, которые интересуют основной контингент потребителей.

Наиболее высокая достоверность результатов прямых измерений возможна при условии, если влияющими величинами можно пренебречь или максимально уменьшить их влияние. Это возможно при использовании приборов, которые отличаются малой чувствительностью к влияющим эффектам. Поскольку такие приборы, которые можно применять для внутриреакторных измерений, отсутствуют, многие экспериментаторы вынуждены отказываться от изложенной выше традиционной схемы метрологического обслуживания. В этом случае они выбирают иной путь, позволяющий избежать необходимость учета большинства влияющих величин. Он заключается в том, что в качестве градуировочных полей используют непосредственно исследуемые поля нейтронов на реакторах. Для определения их характеристик экспериментаторы применяют различные средства и методики косвенных и совместных измерений. Методики градуировки приборов для прямых измерений разрабатывает каждая группа экспериментаторов самостоятельно. Такая ситуация диктует принципиально другой подход к проблеме метрологического обеспечения прямых измерений на реакторах, а следовательно, и решение иных задач [5]. Важнейшие из них: 1) разработка стандартных средств и методик косвенных и совместных измерений и соответствующих средств их аттестации; 2) создание стандартных методик градуировки приборов.

Естественно, что стандартные методики не могут охватить все многообразие условий измерений и градуировки, поэтому они должны содержать в основном рекомендации принципиального характера.

Сформулированный выше второй подход к проблеме метрологического обеспечения прямых измерений на реакторах также реализуется на практике. Примером могут служить работы по стандартизации, связанные, например, с градуировкой детекторов прямой зарядки и камер деления в полях нейтронов реакторов [3].

### Метрологическое обеспечение косвенных и совместных измерений

Косвенные измерения получили наибольшее распространение, так как в отличие от прямых измерений они позволяют определять практически любые производные величины и с наибольшей достоверностью. Результат косвенных измерений искомой производной величины нахо-

дят путем расчета на основании прямых измерений основных и других производных величин, связанных с искомой величиной известным математическим соотношением. Следует отметить, что косвенные измерения характеристик полей нейтронов (как и любых других производных величин) являются в известном смысле первичными по отношению к прямым измерениям, так как характеристики мер, используемых для прямых измерений, находят по результатам косвенных измерений.

Экспериментальные зависимости определяют по результатам совместных измерений двух и более величин, входящих в эти зависимости. Например, дифференциальную энергетическую плотность потока нейтронов определяют по совокупности взаимосвязанных значений плотности потока и энергии нейтронов, при этом плотность потока находят путем косвенных или прямых измерений, а энергию — только в результате косвенных измерений.

Проблема метрологического обеспечения косвенных и совместных измерений становится все более актуальной в связи с повышением требований к достоверности результатов измерений. Этим и объясняется тот интерес, который проявляют различные национальные метрологические лаборатории. В работе [5] выполнен метрологический анализ методов косвенных и совместных измерений. Из результатов анализа следует, что в основе этих методов лежат, с одной стороны, так называемые исходные величины и зависимости, а с другой, — влияющие величины. Исходными величинами и зависимостями в реакторных измерениях являются: 1) сечение или энергетическая зависимость сечения реакции; 2) число ядер определенного изотопа в образце вещества, предназначенного для регистрации нейтронов; 3) скорость реакции при взаимодействии нейтронов с ядрами образца или энергетическая зависимость скорости реакции. Сечение реакции представляет собой ядерно-физическую константу, которой чаще всего ограничивается достоверность результатов измерений в отсутствие влияющих величин. Число ядер в образце вещества характеризует его состав. Скорость реакции является характеристикой числа актов взаимодействия нейтронов с ядрами образца, преобразуемой в показания прибора за счет всевозможных эффектов, учитываемых с помощью поправочных коэффициентов, некоторые из этих коэффициентов могут зависеть от констант, например от периода полураспада активированных ядер. Часто именно этими константами, а не сечениями ограничи-

вается достоверность результатов измерений. Влияющие величины при косвенных и совместных измерениях учитывают влияние на результат измерений тех допущений, которые были приняты при выводе расчетной формулы того или иного метода, способа аппроксимации искомой зависимости, внешних условий измерений.

Исходные величины и зависимости, а также влияющие величины являются единственной причиной возможных неучитываемых систематических погрешностей, а следовательно, и единственной причиной несогласуемости результатов измерений. Отсюда следует, что вопрос о метрологическом обеспечении косвенных и совместных измерений сводится к разработке условий правильного определения данных величин и зависимостей. На основании этого была сформулирована конкретная программа работы по метрологическому обеспечению косвенных и совместных измерений характеристик полей нейтронов, главными вопросами которой являются:

- 1) анализ и установление наиболее достоверных стандартных (рекомендуемых) значений ядерно-физических констант, характеризующих стандартные образцы, экспериментальное определение новых констант и уточнение уже известных;
- 2) разработка стандартных образцов веществ и средств их метрологической аттестации по числу ядер, изотопному составу и пр.; при нейтронных измерениях такие образцы можно помещать либо отдельно от счетной аппаратуры (активационные вещества), либо в счетчик (газообразное или твердое вещество), либо около счетчика (радиатор около счетчика);
- 3) создание стандартных методик определения скорости реакций в образце вещества по показаниям измерительного прибора, способов выявления, учета и исключения влияющих величин, методик косвенных и совместных измерений, а также способов оценки достоверности результатов измерений.

Сравнительно недавно эту программу выполняли главным образом организации неметрологического профиля. Работы в этом направлении проводятся в четырех мировых центрах по ядерным данным (Обнинск, Брукхейвен, Сакле, Вена), в различных международных и национальных лабораториях, занимающихся созданием и анализом чистых веществ на основе стабильных и делящихся изотопов, применяемых для нейтронных измерений на реакторах. В последний период к таким работам все актив-

нее стали подключаться метрологические лаборатории. Наибольшее внимание они уделяют разработке и аттестации стандартных образцов веществ и стандартных методик измерений.

В проблеме метрологического обеспечения косвенных и совместных измерений важное место занимают сличения применяемых в экспериментальной практике измерительных средств и методик. В 1970 и 1971 гг. МАГАТЭ организовало и провело международные сличения результатов косвенных и совместных измерений на импульсных реакторах. В настоящее время в СССР выполняется более широкая программа сличений нейтронно-активационных средств и методик косвенных и совместных измерений [3]. Фактически сличения позволяют оценить не только истинное состояние работ, проводимых в данной области измерений, но и дают возможность выявить наиболее актуальные конкретные задачи по метрологическому обеспечению измерений.

### Погрешности измерений

В настоящее время требуемая погрешность измерения радиометрических величин, характеризующих поля нейтронов в ядерных реакторах, составляет 1% и менее [6, 7]. Необходимая погрешность радиометрических зависимостей, по-видимому, приближается к нескольким процентам.

Погрешность около 1% в принципе может быть достигнута лишь при определении плотности тепловых нейтронов методами косвенных измерений. Аналогичные измерения других величин в реакторных полях тепловых и надтепловых нейтронов имеют, как правило, погрешность не менее 5—10%. Точнее, эта погрешность даже несколько больше вследствие трудности учета отдельных влияющих величин и соответствующих им систематических погрешностей. В прямых измерениях можно добиться погрешности, незначительно превышающей погрешность косвенных измерений, только при условии, если градуировка прибора выполнена в исследуемом поле, характеристики которого найдены заранее путем косвенных и совместных измерений. Касаясь вопроса о погрешности зависимостей, определяемых по результатам совместных измерений (например, энергетических спектров нейтронов), необходимо отметить, что до настоящего времени нет единых приемов для ее оценки. В связи с этим можно лишь приблизительно судить о фактической погрешности опре-

деления зависимостей. По-видимому, даже при наиболее благоприятных обстоятельствах она превышает 10—20%.

Сличения измерений на реакторах, выполненных различными лабораториями, показывают, что при прецизионных косвенных и совместных измерениях экспериментаторы часто приводят погрешности, которые близки к теоретически достижимым. Однако при этом нередко наблюдается расхождение результатов измерений, выходящее за пределы указываемых ими погрешностей. При прямых измерениях расхождения существенно больше.

### Разработки метрологических лабораторий

Получение согласуемых результатов различного вида реакторных измерений на уровне все возрастающих требований практики возможно при соответствующем метрологическом обеспечении. Основные аспекты этой проблемы в приложении к области нейтронных измерений на реакторах были обсуждены на Первом всесоюзном совещании по метрологии нейтронного излучения [3]. На этом же совещании было сообщено о конкретных разработках отечественных метрологических лабораторий.

Как следует из опубликованных материалов [3], для обеспечения прямых измерений на реакторах созданы меры плотности потока тепловых нейтронов на основе низковольтного ускорителя НГ-160 и графитового реактора Ф-1. Они представляют собой стабильные поля нейтронов с регулируемой плотностью потока в пределах  $10^3$ — $10^7$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек  $\pm (1 \div 2)\%$  и  $10^5$ — $10^{10}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек  $\pm (2,5 \div 7)\%$  в случае ускорителя и реактора соответственно. Разрабатываются меры плотности потока моноэнергетических нейтронов с энергией в интервалах 0,01—3 и 12—17 Мэв. Для этих целей предназначены электростатические ускорители ЭГ-2,5 и ЭГ-2М и ускорители типа НГ; созданы соответствующие условия и установки для стабилизации поля нейтронов (плотность потока нейтронов поддерживается в течение дня постоянной в пределах  $\pm 0,5\%$ ). Разработана прецизионная аппаратура для измерения выхода и плотности потока нейтронов методами марганцевой ванны, активации мишени ускорителя, регистрации сопутствующих частиц и др. Промышленность выпускает приборы со счетчиками на основе водорода, He<sup>4</sup> (счетчики ядер отдачи) и He<sup>3</sup> для измерения спектра нейтронов с энергией до 1 Мэв.

Меры плотности потока нейтронов и аппаратура для измерения их характеристик предназначены для градуировки радиометрических, дозиметрических и спектрометрических приборов, аттестации нейтронных счетчиков и камер, аттестации стандартных образцов веществ по числу ядер методом нейтронно-активационного взвешивания, прецизионного измерения сечений (в первую очередь опорных сечений). Очевидно, что эти проблемы связаны с метрологическим обеспечением не только прямых, но также косвенных и совместных измерений.

Для решения задач обеспечения косвенных и совместных измерений проводят работы по созданию средств и методик нейтронно-активационных измерений характеристик полей нейтронов с энергией от тепловой до 20 Мэв. К числу таких средств относятся наборы стандартных нейтронно-активационных детекторов и детекторов с делящимся слоем, градуировочных радиоактивных  $\gamma$ -,  $\beta$ - и  $\alpha$ -источников: нейтронных детекторов сопровождения (НДС); активационных комплектов нейтронов (АКН); активационных детекторов нейтронов (АДН); образцовых спектрометрических  $\gamma$ -источников (ОСГИ) и др. Входящие в наборы средства аттестуют с помощью эталонных и образцовых установок, представляющих собой прецизионную аппаратуру для измерения активности и спектров различного вида излучений, эталонных полей нейтронов и пр. Номенклатура стандартных детекторов и источников непрерывно возрастает. Значительное внимание уделяют их метрологической аттестации по соответствующим величинам (числу ядер, изотопному составу, активности, равномерности распределения ядер по объему и др.). Наряду со стандартными детекторами и источниками создают стандартные методики косвенных и совместных измерений эффективной температуры, спектрального индекса, плотности потока и плотности тепловых нейтронов, а также методики измерений переноса, плотности потока, спектрального коэффициента и энергетического спектра промежуточных и быстрых нейтронов. Разрабатывают стандартные методики градуировки приборов в реакторных полях нейтронов с применением косвенных и совместных измерений, стандартные методики оценки достоверности и пр., исследуют экспериментальные и теоретические способы оценки влияющих величин, рассматривают вопросы единой терминологии.

Современные требования к погрешности и согласуемости результатов внутриреакторных измерений не всегда удовлетворяются с помощью

серийно выпускаемых средств. Решению этого вопроса может способствовать дальнейшее развитие метрологических исследований. Следует ожидать, что направления, в которых будут развиваться метрологические исследования в ближайшие годы, будут аналогичны направлениям, реализуемым в настоящее время. При этом, вероятно, большее внимание будет уделено метрологическому обеспечению косвенных измерений как наиболее точных и совместных измерений как менее изученных с метрологической точки зрения.

Поступила в редакцию 18/V 1972 г.  
В окончательной редакции 16/X 1972 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Метрология. Термины и определения. ГОСТ 16263—70. М., «Стандарты», 1970.
2. М. Ф. М а л и к о в. Основы метрологии. М., Изд-во стандартов, 1949.
3. Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. Труды Первого всесоюзного совещания по метрологии нейтронного излучения (Москва, 1971). Т. 1, 2. М., «Стандарты», 1972.
4. E. A x t o n. Neutron Monitoring. Vienna, IAEA, 1967, p. 669.
5. Р. Д. В а с и л ь е в. Основы метрологии нейтронного излучения. М., Атомиздат, 1972.
6. Proc. of First Intern. Conf. on Nucl. Data for Reactors (Paris, 1966). Vienna, IAEA, 1967.
7. Proc. of Second Intern. Conf. on Nucl. Data for Reactors (Helsinki). Vienna, IAEA, 1970.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф.С.СКОРИН