

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА НЕЙТРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ РФЯЦ-ВНИИТФ

**В. И. Литвин, А. А. Снопков, Д. В. Зайцев, В. В. Мироненко, А. Л. Подъезжих**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Статья поступила в редакцию 14.06.2019, после доработки – 28.09.2019, принята к публикации – 04.10.2019

Рассмотрены основные принципы и средства измерений метрологического обеспечения нейтронных измерений на ЯФУ РФЯЦ-ВНИИТФ. Приведена локальная поверочная схема средств измерений флюенса и плотности потока нейтронов ЯФУ. Описаны элементы поверочной схемы – опорное и моделирующее поле нейтронов на базе реактора ТИРАН, источники нейтронов на реакторах ЯГУАР, ИГРИК-2, ЭБР-Л, моделирующее поле на нейтронном генераторе НГ-12И, комплекс средств измерений числа реакций нейтронно-активационных и делительных детекторов нейтронов.

**Ключевые слова:** ядерно-физические установки, метрологическое обеспечение, флюенс нейтронов, нейтронно-активационные детекторы, погрешность измерений.

**ENSURING UNIFORMITY OF NEUTRON MEASUREMENTS ON NUCLEAR-PHYSICAL FACILITIES AT RFNC-VNIITF / V. I. LITVIN, A. A. SNOPKOV, D. V. ZAITSEV, V. V. MIRONENKO, A. L. PODYEZZHIKH** // Basic principles and instruments for metrological assurance of neutron measurements performed on nuclear-physical facilities at RFNC-VNIITF are considered. A local measurement chain for instruments to measure the neutron flux fluence and density on RFNC-VNIITF nuclear-physical facilities is also provided. Consideration is given to certain elements of the measurement chain, i.e. the reference and modeling neutron field in the TIRAN reactor, neutron sources in the JAGUAR, IGRIC-2, and EBR-L reactors, the modeling field in the NG-12I neutron generator, and the complex of instruments to measure the number of reactions in activation-neutron detectors and fission-neutron detectors.

**Key words:** nuclear-physical facilities, metrological assurance, neutron fluence, activation-neutron detectors, measurement error.

### Введение

Современные тенденции к усложнению и комплексности проведения научных исследований требуют надежного и точного знания характеристик полей нейтронного и гамма-излучений на ядерно-физических установках (ЯФУ). Поэтому очевидно, что для дозиметрического сопровождения работ, выполняемых на ЯФУ, необходимо их полное и всестороннее метрологическое обеспечение. Под мет-

рологическим обеспечением измерительных методик и аппаратных средств понимается комплекс научных, организационных и юридических мероприятий, направленных на согласованность результатов измерений, получаемых на разных установках, на уровне значений погрешностей, предписанных для данных экспериментов или испытаний [1]. Другими словами, метрологическое обеспечение создает, закрепляет и гарантирует единство нейтронных измерений на всех ЯФУ РФ.

В настоящее время экспериментальную базу ядерно-физических и моделирующих установок РФЯЦ-ВНИИТФ составляют [2, 3]:

- реактор с тремя активными металлическими зонами ТИРАН (БАРС-5М+РУН-2);
- реактор с активной зоной растворного типа ЯГУАР;
- реактор с активной зоной растворного типа ИГРИК-2 (в стадии физического пуска);
- исследовательские критические сборки в составе установки ФКБН-2;
- нейтронный генератор НГ-12И.

Эти ЯФУ применяются для решения следующих научно-исследовательских задач:

- градуировки нейтронных детекторов дозиметрического и реакторного контроля;
- исследований быстропротекающих физических процессов в образцах из ДМ, ВВ во время и после нейтронного воздействия на них;
- изучения масштабирования систем по прямому преобразованию энергии деления ядер в лазерное излучение;
- изучения нейтронно-физических, кинетических и динамических характеристик связанных в нейтронном отношении систем.

В последние годы ЯФУ также приобретают большое значение для проведения различного рода научных экспериментов фундаментального характера. В частности, это касается проведения экспериментов типа «benchmark», где требования к точности результатов экспериментов особенно велики [4], экспериментов по прямому измерению длины нейтронно-нейтронного рассеяния [5]. Особый интерес представляет использование ЯФУ для целей ядерной медицины: лечение онкологических заболеваний, изготовление фармацевтических препаратов [6].

Создание системы надежного нейтронно-дозиметрического сопровождения имеет свои особенности для каждого типа ЯФУ. Поля нейтронного и гамма-излучений, создаваемые разными ЯФУ, существенно отличаются из-за конструктивных особенностей активных зон, их окружения и размеров реакторного зала, от места, выбранного для размещения образцов и условий их облучения. Для корректной интерпретации получаемых данных, сопо-

ставления результатов экспериментов, проводимых на разных установках, необходима детальная, а главное, точная информация, получаемая системой нейтронно-дозиметрического сопровождения. Это пространственно-энергетические распределения нейтронов, флюенсы и плотность потока нейтронов, дозы и мощности доз, создаваемые излучением в исследуемых образцах и материалах.

### **Метрологическое обеспечение нейтронных измерений**

В качестве основного и опорного метода измерений нейтронно-физических характеристик ЯФУ, наиболее полно удовлетворяющего требованиям системы нейтронно-дозиметрического сопровождения, принят метод нейтронно-активационных измерений (АМНИ) [1]. Метрологическое обеспечение нейтронных измерений с помощью АМНИ включает следующие методики и аппаратурные средства измерений:

- стандартные наборы активационных детекторов, которые изготавливаются и аттестуются во ВНИИФТРИ, и детекторы, изготовленные в лабораторных условиях ВНИИТФ из особо чистых паспортизованных материалов;
- стандартные наборы делящихся детекторов и слои делящихся материалов трековых детекторов, изготовленных методом вакуумного напыления и аттестованных по числу ядер изотопов-мишеней в лабораторных условиях;
- аппаратурные средства и методики измерений активности нейтронно-активационных детекторов, числа делений в делящихся детекторах;
- математический и программный аппарат определения характеристик полей нейтронов по данным нейтронно-активационных измерений;
- базы справочных данных по сечениям реакций и ядерно-физическим константам;
- организационную систему государственной и ведомственной поверки средств и методов измерений (поверка аппаратуры, методик, межлабораторные сличения и т. п.).

Формирование системы метрологического обеспечения единства нейтронных измерений на ЯФУ РФЯЦ-ВНИИТФ началось одновременно с их эксплуатацией и развивалось параллельно с решением аналогичных задач в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Уже в 1974 году в результате совместных усилий обоих институтов были определены основные пути решения этой задачи. Но тогда эта работа велась только в рамках внутриведомственных метрологических стандартов. С 1980 года в работу по метрологической аттестации нейтронных измерений на ЯФУ включился ВНИИФТРИ как организация, уполномоченная Госстандартом, ответственная за обеспечение единства измерений ионизирующих излучений в масштабах всей страны. В РФЯЦ-ВНИИТФ с помощью специалистов ВНИИФТРИ была проведена аттестация поля нейтронов реактора БАРС-3, затем БАРС-5, прошел экспертизу и был аттестован ряд методик и средств измерений.

Для выполнения работ по нейтронно-дозиметрическому сопровождению работ на ЯФУ отдела ядерных реакторов ВНИИТФ в 2006 году на базе лаборатории импульсных ядерных реакторов «БАРС» была создана лаборатория радиационного контроля (ЛРК) ЛИЯР ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ». ЛРК аккредитована в системе аккредитации радиационного контроля в ранге испытательной лаборатории (центра) [САРК RU.0001.441639]. Областью аккредитации ЛРК является:

- измерение характеристик нейтронных полей на ядерно-физических установках;
- измерение активности (делений) нейтронно-активационных и делительных детекторов;
- измерение активности и изотопного состава источников альфа-излучения.

Все нейтронные измерения на ЯФУ в РФ базируются на Государственном первичном специальном эталоне (ГПСЭ) единиц плотности потока и флюенса нейтронов (ГОСТ 8.105-80). Эталон находится во ВНИИФТРИ и ориентирован на метрологическое обеспечение нейтронных измерений в стационарных, квазистационарных и импульсных полях излучения ядерных реакторов и ускорителей предприятий и институтов РФ. ГПСЭ является ключевым звеном Государственной поверочной схемы для средств измерений нейтронных полей на ЯФУ (ГОСТ 8.031-82).

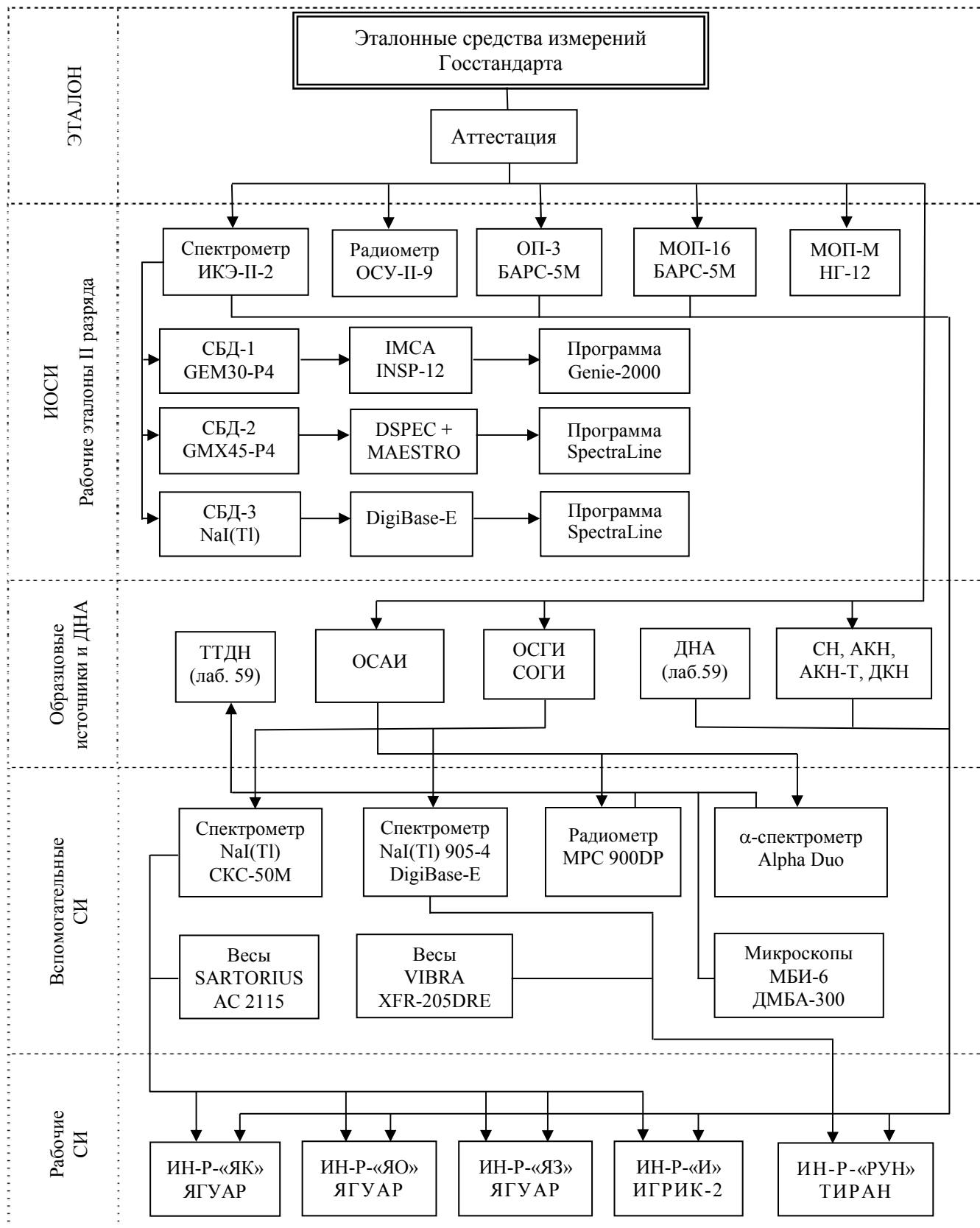
В рамках обеспечения единства нейтронных измерений непосредственно на предприятиях создаются аналоги Государственной поверочной схемы – локальные поверочные схемы. Такая локальная поверочная схема для средств измерений плотности потока и флюенса нейтронов ЯФУ РФЯЦ-ВНИИТФ приведена в табл. 1. Из поверочной схемы видно, что метрологическое обеспечение нейтронных измерений основано на принципе создания вторичных и рабочих эталонных средств измерений (источников, полей нейтронов, радиометров нейтронов) [7].

Согласно локальной схеме на основе эталонных средств измерений Госстандарта созданы исходные образцовые средства измерений (ИОСИ) РФЯЦ-ВНИИТФ – рабочие эталоны II разряда. В состав ИОСИ входят следующие средства измерений (в скобках указаны погрешности основных измеряемых ими величин при доверительной вероятности 0,95):

- опорное нейтронное поле ОП-3 на базе реактора БАРС-5 ( $\delta_{\text{сп.н-в}} = 5 \dots 15 \%$ ,  $\delta F_n = 4 \%$ );
- моделирующее опорное поле МОП-16 на базе реактора БАРС-5 ( $\delta_{\text{сп.н-в}} = 5 \dots 15 \%$ ,  $\delta F_n = 5 \%$ );
- моделирующее поле МОП-М на базе НГ-12И ( $\delta_{\text{сп.н}} = 5 \dots 10 \%$ ,  $\delta F_n = 5 \%$ );
- гамма-спектрометрический измерительный комплекс ИКЭ-II-2 ( $\delta_{\text{Eff}} \gamma\text{-квантов} = 3 \dots 5 \%$ );
- радиометрическая установка ОСУ-II-9 ( $\delta_{\text{Eff}} \beta\text{-частиц } ^{32}\text{P} = 4 \%$ );
- спектрометрические нейтронно-активационные детекторы нейтронов ( $\delta N_{\text{ядер}} = 1 \dots 3 \%$ );
- спектрометрические трековые детекторы нейтронов на основе ДМ ( $\delta N_{\text{ядер}} = 3 \%$ ).

ИОСИ позволяют воспроизводить единицы величин активности нейтронно-активационных детекторов (ДНА) двумя независимыми способами. Первый основан на расчете размера единиц величин по известному энергетическому спектру нейтронов ОП-3, сечениям реакций и ядерно-физическим константам. Мониторирование флюенсов нейтронов осуществляется штатными средствами реактора. Второй способ использует рабочие эталоны 2-го разряда ИКЭ-II-2 и ОСУ-II-9. Таким образом, выполняется внутренний контроль воспроизведения размеров единиц величин.

Локальная поверочная схема ЯФУ РФЯЦ-ВНИИТФ для средств измерений флюенса и плотности потока нейтронов



Измерительные средства, входящие в состав ИОСИ, поверяются во ВНИИФТРИ. Периодичность поверки – два года.

В табл. 2 приведены основные характеристики нейтронов для опорных и моделирующих полей нейтронов ЯФУ: средние энергии, полуширины импульсов, флюенсы и плотность потока нейтронов при максимально допустимых энерговыделениях в АЗ, средние сечения реакций для расчета флюенсов нейтронов.

Следующим элементом локальной схемы являются вспомогательные измерительные устройства средства измерений (СИ):

- полупроводниковый спектрометр гамма-излучения на основе ОЧГ детектора GEM20-P4, используемый для различного рода спектральных измерений нейтронного излучения;

- сцинтилляционные спектрометры гамма-излучения СКС-50, DigiBase-E 905-4, спектрометр на основе монокристалла LaBr<sub>3</sub>:Ce, используемые для воспроизведения флюенсов нейтронов и мониторингования энерговыделений в АЗ реакторов;

- радиометр альфа-бета-излучения MPC 900DP для измерений альфа-активности делящихся слоев твердотельных трековых детекторов нейтронов (ТТДН);

- спектрометр альфа-излучения Alpha Duo с детекторами ULTRA для определения и контроля изотопного состава делящихся слоев ТТДН;

- микроскопы МБИ-6 и ДМБА-300 для подсчета треков в регистраторах облученных ТТДН;

- прецизионные весы VIBRA XFR-205DRE и SARTORIUS AC 2115 для взвешивания ДНА.

В фонд образцовых источников и ДНА входят наборы образцовых спектрометрических источников гамма-излучения ОСГИ и СОГИ, образцовые источники альфа-излучения ОСАИ, наборы стандартных делительных и активационных детекторов СН, ДКН, АКН, АКНТ и детекторы, изготовленные в лабораторных условиях.

Таблица 2

Основные параметры нейтронных полей ЯФУ РФЯЦ-ВНИИТФ

ЯФУ	$E_{\text{среднее}}$ , МэВ	$W_m^*$ , дел./МДж	$F_{>0,1}$ , %	$Y_{>0,1}$ , см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	$\sigma^{58\text{Ni}}_{>0,1}$ , мбарн
ОП-3 БАРС-5 (центральный канал)	1,27	$2,5 \cdot 10^{17}$ 7,3	0,952	$2,5 \cdot 10^{19}$	59,6
МОП-16 БАРС-5 (5 см от АЗ)	1,34	$2,5 \cdot 10^{17}$ 7,3	0,955	$3,0 \cdot 10^{18}$	68,1
ИН-Р-«РУН» РУН-2 (центральный канал)	1,17	$5,0 \cdot 10^{17}$ 14,6	0,926	$9,0 \cdot 10^{18}$	47,0
ИН-Р-«ЯК» ЯГУАР (центральный канал)	0,84	$9,7 \cdot 10^{17}$ 28	0,577	$\sim 1,1 \cdot 10^{18}$	61,3
ИН-Р-«ЯО» ЯГУАР (5 см окно)	0,94	$9,7 \cdot 10^{17}$ 28	0,767	$\sim 1,2 \cdot 10^{17}$	43,0
ИН-Р-«ЯЗ» ЯГУАР (9 см Pb)	0,76	$9,7 \cdot 10^{17}$ 28	0,754	$\sim 6,5 \cdot 10^{16}$	25,2
МОП-«М» НГ-12И (R = 86 см)	11,5	$P$ , н/с $2 \cdot 10^{12}$	$F_{>0,1} - 95$ $F_{>14} - 73$	$2,1 \cdot 10^7$ $1,6 \cdot 10^7$	$\sigma^{27\text{Al}}_{>0}$ 84,2

\* $1 \cdot 10^{17}$  дел. = 2,9 МДж

В состав рабочих средств измерений поверочной схемы входят источники нейтронов:

- ИН-Р-«Я» на базе реактора ЯГУАР;
- ИН-Р-«И» на базе реактора ИГРИК-2 (планируется);
- ИН-Р-«Р» на базе реактора-умножителя РУН-2 комплекса ТИРАН.

Замыкают поверочную схему вспомогательные СИ, используемые для мониторинга энерговыделений в АЗ реакторов и измерения флюенсов нейтронов источников нейтронов.

В табл. 2 приведены основные характеристики нейтронов для опорных и моделирующих полей нейтронов ЯФУ: средние энергии, флюенсы и плотность потока нейтронов при максимально допустимом энерговыделении в АЗ, средние сечения реакций детекторов-мониторов флюенсов нейтронов.

В АМНИ используются 15 активационных детекторов тепловых и резонансных нейтронов, 23 пороговых детектора и 5 делящихся детекторов. Сюда входят стандартизованные наборы детекторов ВНИИФТРИ и детекторы, изготовленные в лабораториях ВНИИТФ и ВНИИЭФ. Выбор ядерных реакций и конструкция детекторов позволяют охватить энергию нейтронов в диапазоне от тепловых значений до 18 МэВ, значения флюенсов тепловых нейтронов – более  $10^7 \text{ см}^{-1}$ , быстрых – более  $10^9 \text{ см}^{-1}$ .

Для обработки аппаратурных спектров полупроводниковых и сцинтилляционных гамма-спектрометров используется современное программное обеспечение Genie-2000 и SpectraLine. Подпрограммы численных расчетов Монте-Карло, входящие в состав SpectraLine, также позволяют определять эффективность регистрации, поправки на каскадное суммирование и размеры активационных детекторов. Все это в целом существенно повысило точность активационных измерений.

Для восстановления спектров нейтронов используется программный алгоритм NSpNSpl, разработанный на основе метода направленного расхождения (МНР) [8, 9]. В качестве начальных приближений спектров используются данные численных расчетов Монте-Карло, спектры из библиотеки классифицированных спектров нейтронов БКС-2, спектры

из атласа [10]. В программе сечения ядерных реакций вводятся из библиотек РОСФОНД, ENDF/B-VII.1, IRDF-90. Погрешности восстанавливаемых спектров оцениваются методом статистических испытаний (вариации погрешностей активационных интегралов и спектров начального приближения).

## Заключение

В соответствии с локальной поверочной схемой для средств измерений полей нейтронов ЯФУ РФЯЦ-ВНИИТФ и на основе комплекса эталонных средств измерений, которые поверяются во ВНИИФТРИ, лаборатории радиационного контроля ЛИЯР ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» предоставлено право проведения аттестации нейтронных полей ЯФУ института и других организаций в ранге рабочих средств измерений. Так на основе реакторов ЭБР-Л, ТИРАН, ЯГУАР, ИГРИК были созданы источники нейтронов в ранге рабочих средств измерений. Каждый такой источник нейтронов имеет одну и более рабочих точек (областей) с аттестованными характеристиками нейтронного поля.

Большой объем нейтронных исследований, проведенный на нейтронном генераторе НГ-12И, стал основой для создания моделирующего опорного поля МОП-М (НГ12) с энергией нейтронов 14,7 МэВ. МОП-М (НГ12) позволяет проводить с высокой степенью надежности дозиметрическое сопровождение процедур лучевой нейтронной терапии.

С помощью разработанного и периодически совершенствуемого комплекса эталонных и рабочих СИ характеристик нейтронных полей ЯФУ возможно выполнять большой объем научных и прикладных работ в лабораторных условиях, полигонных исследованиях и испытаниях, проводимых в РФЯЦ-ВНИИТФ. Так, например, многие нейтронные спектры в справочнике [10] рассчитаны во ВНИИФТРИ на основе переданных ему в порядке информационного обмена активационных и делительных интегралов реакций, измеренных с помощью СИ ЛРК на различных реакторных установках РФЯЦ-ВНИИТФ.

## Список литературы

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

2. Леваков Б. Г., Лукин А. В., Магда Э. П. и др. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ // Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002.

3. Магда Э. П., Погребов И. С., Снопков А. А. и др. Импульсные реакторы в институте технической физики // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2003. Вып. 1–2. С. 3–6.

4. Соколов Ю. А., Литвин В. И., Лукин А. В. и др. Критические «benchmark» эксперименты и измерения чисел реакций с цилиндрическими системами из урана, плутония и полиэтилена на стенде ФКБН-М: Препринт № 159. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 1999.

5. Шарапов Э. И., Боуман С. Д., Крауфорд Б. Е. и др. Текущее состояние экспериментального проекта по прямому измерению длины нейтрон-нейтронного рассеяния на импульсном реакторе ЯГУАР // III Международная конференция «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». – Снежинск. 2003. С. 644–648.

6. Литвин В. И., Мокичев Г. В., Прасоленко И. В. Дозиметрические характеристики пучка излучения установки НГ-12 // Применение нейтронов в онкологии. – Томск: НТП. 1998. С. 28.

7. Севастьянов В. Д. Моделирующие опорные поля нейтронов для метрологического обеспечения нейтронных измерений на ядерно-физических установках РФ. – Менделеево: ВНИИФТРИ. 2015.

8. Ларцев В. Д., Литвин В. И., Чернухин Ю.И. и др. Измерения нейтронных спектров реакторов БАРС-5, ИГРИК, ЯГУАР активационным методом: Препринт № 217. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 2005.

9. Исламгулов Р. Ф., Ларцев В. Д. Восстановление нейтронных спектров по активационным измерениям в виде N-сплайнов: Препринт № 218. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 2005.

10. Севастьянов В. Д., Кошелев А. С., Маслов Г. Н. Характеристики полей нейтронов. Справочник. – Менделеево: ВНИИФТРИ. 2014.

Контактная информация –

Литвин Виктор Иванович,  
e-mail: dep5@expd.vniitf.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 134–140.