

МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ^{16}N ДЛЯ ПОВЕРКИ РАДИАЦИОННЫХ КАНАЛОВ КОНТРОЛЯ НА АЭС ТИПА ВВЭР

В.А. Хрячков*, И.П. Бондаренко*, П.А. Дворников*, Б.В. Журавлев*, С.Н. Ковтун*, Т.А. Хромылева*, А.В. Павлов, Н.Г. Роцин****

**ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*

***Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-сервисный центр диагностики оборудования АЭС НИКИЭТ», г. Москва*



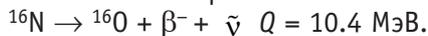
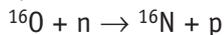
Проанализированы преимущества использования ядерной реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ при генерации ^{16}N для проверки радиационных каналов контроля на энергетических реакторах типа ВВЭР. Для уточнения энергетической зависимости сечения реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ выполнены измерения, в которых использован ряд новых методических приемов, позволяющих существенно снизить фон и улучшить надежность определения количества событий, соответствующих реакции.

Ключевые слова: радиационный контроль течи теплоносителя, активность, ядерные реакции, калибровка датчика радиоактивности, энергетические установки.

Key words: radiation control of coolant leak, radioactivity, nuclear reaction, radioactivity detector calibration, power stations

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов контроля течи в трубопроводах первого контура реакторов типа ВВЭР является радиационный контроль активности ^{16}N в остром паре. При прохождении теплоносителя (H_2O) через активную зону реактора происходит взаимодействие быстрых нейтронов с кислородом, приводящее к образованию ^{16}N , который распадается обратно в кислород с испусканием жестких γ - и β -излучений.



Экспозиционная доза вблизи поверхности трубы первого контура практически полностью определяется активностью ^{16}N и составляет порядка 15 Р/ч при номинальной мощности реакторной установки. При аварийной утечке воды из первого контура вся просочившаяся наружу вода практически мгновенно превращается в пар, так как температура трубы составляет приблизительно 350°C . При этом атомы изотопа ^{16}N также окажутся в атмосфере помещения вблизи трубопровода, и регистрация их активности будет индикатором протечки. Для того, чтобы такая система использовалась в качестве расходомера течи, требуется калибровка системы детектирования ^{16}N , который является достаточно короткожи-

© В.А. Хрячков, И.П. Бондаренко, П.А. Дворников, Б.В. Журавлев, С.Н. Ковтун, Т.А. Хромылева, А.В. Павлов, Н.Г. Роцин, 2012

вущим ($T_{1/2} = 7.11$ с) и не может быть приготовлен в качестве стандартного источника.

Однако калибровка системы радиационного контроля активности может быть осуществлена на стенде с использованием ускорителя заряженных частиц или стандартного источника нейтронов. Возможна наработка ^{16}N в следующих ядерных реакциях:

- $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$, $Q = -10.4$ МэВ;
- $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$, $Q = -1.52$ МэВ.

Реакция $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ вследствие более низкого значения ее энергии позволяет использовать для производства ^{16}N как стандартные нейтронные источники, такие как ^{252}Cf или Pu-Be, так и доступные низковольтные ускорители заряженных частиц (< 2 МВ) с дейтериевой мишенью для производства нейтронов. К тому же, сечение реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ в диапазоне энергий нейтронов 4,5–7,5 МэВ существенно больше сечения реакции $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ при энергии нейтронов порядка 14 МэВ.

Наиболее важной характеристикой при наработке радионуклидного изотопа является сечение ядерной реакции, но имеющиеся на данный момент экспериментальные данные [1–3] имеют большой разброс до $\sim 1,5$ раз в диапазоне энергий нейтронов 5,0–7,5 МэВ. Поэтому нами были предприняты новые измерения с использованием цифровых методов регистрации событий, позволяющих существенно снизить фон и улучшить надежность определения количества событий, соответствующих реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения сечения реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ были выполнены на ускорителе ЭГ-1 ГНЦ РФ-ФЭИ. Нейтроны генерировались в реакции $\text{D}(d, n)$ на твердой титановой мишени толщиной 0.97 мг/см². Измерения были проведены в интервале энергий нейтронов от 4.0 до 7.35 МэВ.

Исследования сечения проводились с помощью детектора, представляющего собой двойную ионизационную камеру. Одна часть камеры представляла собой ионизационную камеру с сеткой Фриша и служила для спектрометрии продуктов изучаемой реакции. Дополнительная плоскопараллельная камера, содержащая слой урана-238, служила для мониторинга нейтронного потока (рис. 1).

Сигналы с различных электродов камеры усиливались и затем оцифровывались с помощью оцифровщика формы импульсов LeCroy 2262. Извлечение физической информации из цифровых сигналов проводилось программным путем. В процессе обработки извлекалась информация об амплитудах анодного и катодного сигналов, а также моментах начала и окончания этих сигналов. Анализ этой информации позволил определить энергию заряженных частиц, положение места возникновения события в межэлектродном пространстве и тип регистрируемой частицы.

Камеры заполнялись смесью $95\% \text{Kr} + 5\% \text{CF}_4$, находящейся под давлением четырех атмосфер (абсолютных). Фтор, содержащийся в рабочем газе, служил мишенью для налетающих нейтронов. Использование газовой мишени позволило значительно увеличить число ядер в изучаемом образце и, следовательно, сократить время измерений. Использование методов коллимации быстрых нейтронов в сочетании с методами цифровой обработки сигналов позволило отбирать для анализа только те события, для которых место рождения находилось внутри газовой ячейки, находящейся внутри чувствительного объема камеры. Преимуществом такого подхода является, в частности, то, что при правильном выборе размеров и положения газовой ячейки удается почти полностью подавить стеночный эффект. Кроме того, для фиксированной ячейки число атомов фтора в мишени может быть легко определено с использованием простейших газовых законов.

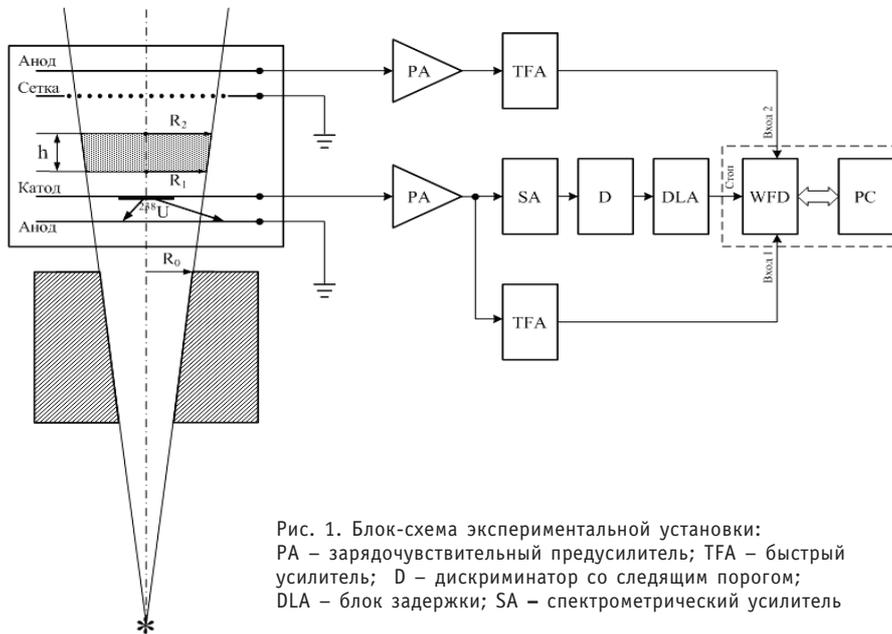


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:
 PA – зарядочувствительный предусилитель; TFA – быстрый усилитель; D – дискриминатор со следящим порогом; DLA – блок задержки; SA – спектрометрический усилитель

Время нарастания анодного сигнала несет в себе информацию о типе регистрируемой частицы. Действительно, если взять, например, α -частицу и протон одной энергии, то длина пробега и время собирания заряда для протона окажутся значительно больше, чем для α -частицы. В данной работе удалось использовать этот принцип для разделения частиц по типу и за счет этого фон, обусловленный паразитными реакциями, протекающими на рабочем газе и электродах детектора, заметно уменьшить. На рисунке 2 показан спектр анодных сигналов, снимаемых с детектора (рис. 2а), и тот же спектр после подавления фона (рис. 2б). В полученном после подавления фона спектре наблюдается ряд линий, соответствующих разным каналам реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$. Отметим, что наблюдаемые пики соответствуют случаю вылета α -частицы в направлении движения падающих нейтронов. Функция отклика спектрометра при регистрации продуктов реакции, протекающей на легком ядре, имеет сложную форму. Кинетическая энергия продуктов реакции всегда равна сумме энергии падающих нейтронов и энергии реакции.

Однако в зависимости от угла разлета α -частицы и остаточного ядра (^{16}N) эта энергия по-разному распределяется между продуктами реакции. В процессе работы было обнаружено, что сигнал, производимый α -частицей, всегда пропорционален ее энергии, в то время как для остаточного ядра велик амплитудный дефект, и много энергии теряется в упругих столкновениях, не приводящих к ионизации среды, в которой она движется. При этом, если α -частица испускается в направлении движения падающих нейтронов, то она уносит большую часть кинетической энергии, а на долю остаточного ядра, для которого велик амплитудный дефект, приходится лишь небольшая доля энергии. Такие события формируют отчетливый пик в энергетическом спектре. Если же в направлении движения нейтронов испускается остаточное ядро, то значительная часть энергии не пойдет на ионизацию и амплитуда сигнала окажется меньше. Такие события, также принадлежащие изучаемому каналу реакции, будут лежать левее указанного четкого пика, и их также необходимо учитывать при определении сечения реакции.

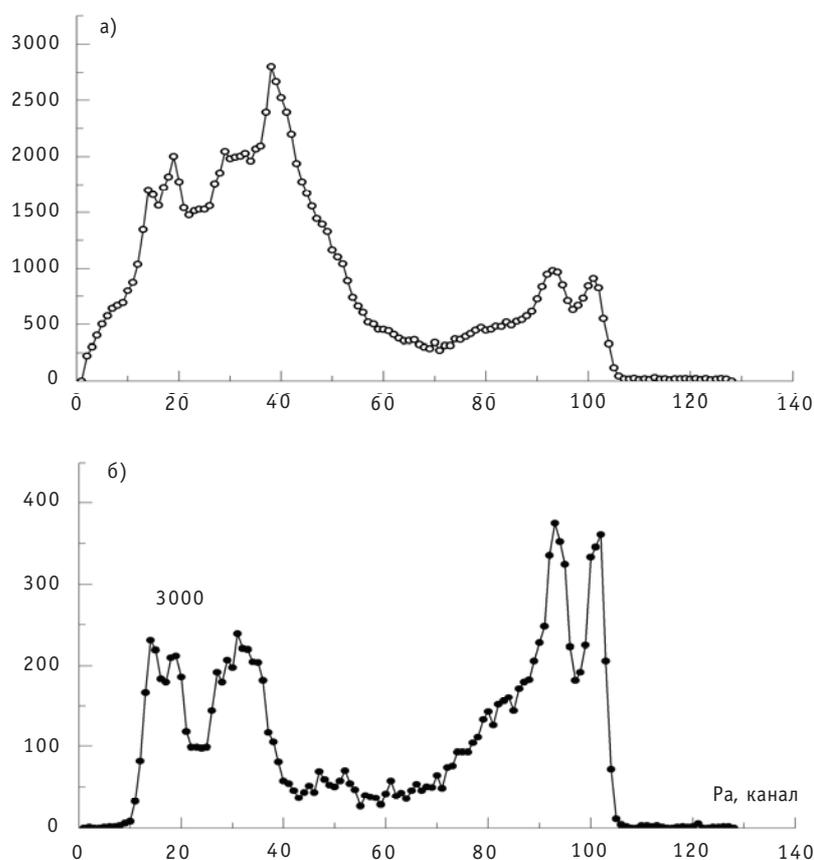


Рис. 2. а) – спектр сигналов, снимаемых с анода ионизационной камеры; б) – тот же спектр после отбора событий; 110–108 каналы – $^{19}\text{F}(n, \alpha_0 + \alpha_1)$; 108–90 каналы – $^{19}\text{F}(n, \alpha_2 + \alpha_3)$; 40–23 каналы – $^{19}\text{F}(n, \alpha_4)$; 23–10 каналы – $^{19}\text{F}(n, \alpha_5)$ и паразитные реакции

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 3 показаны значения сечения реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$, полученные в работе, и приведено сравнение этих данных с результатами [1–3]. Следует отметить существенно более высокую точность измерения, достигнутую в настоящей работе, по сравнению с результатами других измерений (точность измерений в [2, 3] сравнима с представленными погрешностями работы [1]).

Для энергий нейтронов ниже 6 МэВ наши данные согласуются в пределах ошибок измерений, полученных в работе [1]. Для энергий нейтронов выше 6 МэВ в нашем эксперименте наблюдается резкий рост сечения, который не воспроизводится другими авторами, включая данные работы [1]. Предварительный анализ показал, что за возрастание полного сечения в этом диапазоне энергий ответственны каналы, связанные с заселением верхних уровней возбуждения остаточного ядра (α_4 и более высокие). Сечение же каналов реакции, связанных с заселением низколежащих состояний, в этой области ведет себя плавно с тенденцией к понижению сечения с увеличением энергии нейтронов, в целом повторяя ход сечения, приведенный в [1].

Проведенный анализ работы [1] показал, что авторы, по-видимому, не могли учитывать каналы, проявляющиеся в низкоэнергетической части спектра α -частиц, из-за большого фона от паразитных реакций, а также регистрации продуктов ре-

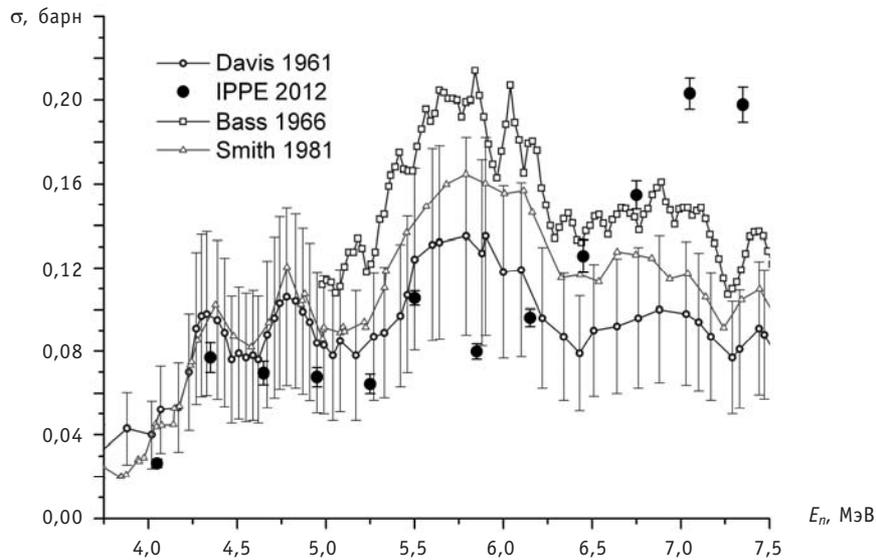


Рис. 3. Сравнение измеренных данных для $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ с представленными в EXFOR данными работ [1–3] акций, протекающих на боре-10, так как в работе [1] использовался газ VF_3 в отличие от использованного нами CF_4 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе использован ряд новых методических приемов, позволяющих существенно снизить фон и улучшить надежность определения количества событий, соответствующих реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$. Разработанный метод позволил напрямую регистрировать продукты изучаемой реакции. Получены данные о величине сечения реакции $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ для $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ - и $\alpha_4 + \alpha_5$ -каналов реакции. Показано, что расхождение полученных данных с данными других авторов обусловлено тем, что в предыдущих экспериментальных работах было недооценено влияние каналов реакции, связанных с заселением высоковозбужденных состояний остаточного ядра.

Данная статья подготовлена при выполнении Государственного контракта от 05.08.2011 №16.526.11.6006 в рамках федеральной целевой программы.

Литература

1. Davis E.A., Gabbard F., Bonner T.W. et al. // Nucl. Phys. – 1961. – № 27. – P. 448.
2. Bass R., Haug P., Kruger K., Staginnus B. // Report from Euratom-countries + Euratom to EANDC. – 1966. – № 66. – P. 6.
3. Smith D.L., Meadows J.W., Whalen J.F. // Nuclear Science & Eng. – 1981. – V.77. – P. 256.

Поступила в редакцию 26.10.2012

ABSTRACTS OF THE PAPERS**УДК 621.039.51**

New Technique to Reformat Multigroup Cross-Sections for Monte-Carlo Calculation \I.R. Suslov, I.V. Tormyshev, K.G. Mel'nikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 21 titles.

New method to calculate equiprobability bins from Legendre expansion scattering cross-sections is proposed. The method uses a correction of equiprobability bins boundaries to provide a conservation of the first angular moment. The code CRSRD-ST to reformat cross sections from DTF to ACE format with proposed technique is developed. Numerical results shows the method proposed significantly improves an agreement between deterministic and Monte-Carlo calculations.

УДК 621.039.51

Boundary Resonance Effects in the Fast Reactor with the Heterogeneous Core \A.A. Bezborodov, E.V. Dolgov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 10 titles.

Boundary resonance effects is considering with the application of the high-speed subgroup approximation technique employment in practical tasks for description of neutron cross-sections interactions with media nuclides nuclei in resonance part of energy for physical simulation of the fast reactor plants with the heterogeneous core.

УДК 621.039.51

Energy Deposition Evaluation in the Target with Uranium-Containing Material for the ^{99}Mo Production in WWR-C Reactor with the Improved Design of Target \O.Yu. Kochnov, V.V. Kolesov, R.V. Fomin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

Increased production of the ^{99}Mo in the context of rising global demand is an urgent task. The new type of target for ^{99}Mo producing in WWR-c reactor technological channels was developed. A series of calculations to estimate energy deposition for standard and modified target were done. A considerable energy deposition increasing in modified target was found.

УДК 621.039.56

Method of ^{16}N Generation for Test of Radiation Controlled Channels on Nuclear Power Stations with Water-Cooled Reactors \V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, P.A. Dvornikov, B.V. Zhuravlev, S.N. Kovtun, T.A. Khromyleva, A.V. Pavlov, N.G. Roschin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.

The preferences of $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ nuclear reaction use for radiation control channels test on water-cooled power reactors are analyzed. The new measurements for more accurate determination of $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ reaction cross section energy dependence have been carried out. A set of new methods for background reducing and improvement of events determination reliability was developed.

УДК 621.039.524.44:697.93

Calculation-based Justification for the Algorithm of Pipelines Leak Control by Air Humidity \P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, A.A. Budarin, V.P. Polionov, N.N. Titarenko, D.M. Shvetsov, N.G. Roshchin, A.L. Matveev, E.L. Matveev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 9 tables, 3 illustrations. – References, 9 titles.

Dynamic processes in thermal insulation of power plants pipelines caused by depressurization are the goal of the research. Simulation of various leaks was realized by using adapted computer code KUPOL-M developed in SSC RF IPPE.

УДК 621.039.58

Analysis of the Errors Committed by NPP MCR Operators during Implementation of Operating Procedures \N.V. Pleshakova, A.N. Anokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya