

РАСЧЕТНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СБОРОК ДЛЯ НАРАБОТКИ АРГОНА-37

В.В. Головин, А.И. Карпенко, А.М. Тучков, И.А. Чернов

Белоярская АЭС, г. Заречный



В статье дано краткое описание основных этапов реакторных испытаний в реакторе БН-600 сборок для наработки аргона-37. Представлены итоги расчетов накопления целевого радионуклида и сравнение их с результатами измерений.

Ключевые слова: аргон, источник нейтрино, наработка, облучение, расчет.

Key words: argon, neutrino source, production, irradiation, calculation.

В 2001–2004 гг. в рамках международного проекта на Белоярской АЭС проводились работы по наработке аргона-37. Аргон-37 ($T_{1/2} \sim 35$ сут) является наиболее перспективным радионуклидом для изготовления источника, необходимого при калибровке детекторов солнечных нейтрино. Эффективное накопление активности данного радионуклида возможно по реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ при облучении большого количества оксида кальция в больших потоках нейтронов жесткого энергетического спектра. Получение этого изотопа производилось в боковой зоне воспроизводства (БЗВ) реактора БН-600 в специально разработанных экспериментальных сборках для наработки аргона-37 (ЭСА). После облучения ЭСА выгружались из активной зоны, отмывались по штатной технологии и через бассейн выдержки передавались в защитную камеру на разделку, где происходило извлечение нарабатывающих элементов. Нарбатывающие элементы транспортировались в Институт реакторных материалов (г. Заречный), где из них выделялся целевой радионуклид, проводились необходимые измерения и изготавливался калибровочный источник.

Проектные расчеты по наработке аргона-37 в ЭСА проводили в ФЭИ и ОКБМ. Однако при организации работ по производству радионуклида необходимо иметь методики оперативного расчета необходимых физических характеристик ЭСА в реальных условиях облучения как для сопровождения эксплуатации ЭСА, так и для безопасного послереакторного обращения с ЭСА и нарабатывающими элементами. Испытания ЭСА проводились в два этапа.

На первом этапе в реактор БН-600 устанавливались 2 ЭСА для отработки технологии обращения с ЭСА и выделения аргона-37, на втором (через одну микрокампанию (МК)) – в реактор устанавливались 19 ЭСА для получения прототипа источника нейтрино активностью не менее 400 кКи.

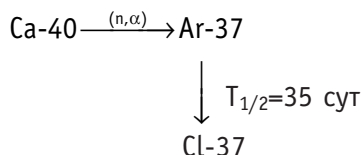
© В.В. Головин, А.И. Карпенко, А.М. Тучков, И.А. Чернов, 2009

ПЕРВЫЙ ЭТАП ИСПЫТАНИЙ ЭСА

Расчеты по моделированию облучения ЭСА велись на базе расчетов загрузки реактора в 44 микрокампании в комплексе программ ГЕФЕСТ [1].

Для прогноза количества наработанного радионуклида в реальных условиях облучения создана методика расчетного моделирования процесса накопления аргона-37 в активной зоне.

Схема образования Ar-37 из Ca-40 (96,94% – содержание в природной смеси изотопов):



Для расчета изменения концентраций изотопов интересующих нас радионуклидов был использован рекуррентный метод решения систем уравнений [2].

Для тестирования созданной методики был проведен расчет накопления аргона-37 для ЭСА, облучаемой в течение 160 суток на номинальной мощности в ячейке 25-13. Плотность потока нейтронов определена прямым нейтронно-физическим расчетом в комплексе ГЕФЕСТ заменой ТВС БЗВ на ЭСА в выбранной ячейке. Результаты расчетов активности аргона-37 хорошо совпали с приведенными в проекте данными [3] – 40,5 и 42 кКи соответственно.

На результирующее значение полной активности наработанного аргона-37 влияют отклонения от проектного режима облучения: изменение длительности МК, возможная работа при отключенной петле, БАЗ или др. Во время облучения ЭСА в 44 МК на блоке произошло два отключения петли. Результаты расчетов активности аргона-37 в ЭСА с учетом реальных условий облучения представлены в табл. 1. Отключения петли происходили примерно в середине МК и поэтому не привели к существенному снижению наработанной активности аргона. Расчеты показали, что при том же ресурсе облучения ЭСА (159,4 эфф.сут), но без отключений петли наработка аргона-37 была бы на ~ 1,5% больше.

Для оценки влияния различных режимов облучения на величину активности аргона-37 были проведены дополнительные сравнительные расчеты. Результаты расчетов представлены в табл.2.

Таблица 1

Основные параметры облучения и результаты численного моделирования наработки аргона-37 в ЭСА при облучении в 44 микрокампанию в реакторе БН600

Сборка	ЭСА-01	ЭСА-02
Ячейка реактора	09-21	25-13
Длительность облучения, эфф.сут	159,4	159,4
Максимальная плотность потока нейтронов с $E > 0.2$ МэВ, $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$:		
на начало микрокампании	$1,155 \cdot 10^{15}$	$1,169 \cdot 10^{15}$
на конец микрокампании	$1,145 \cdot 10^{15}$	$1,158 \cdot 10^{15}$
Максимальная плотность потока нейтронов с $E < 0.2$ МэВ, $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$:		
на начало микрокампании	$1,768 \cdot 10^{15}$	$1,778 \cdot 10^{15}$
на конец микрокампании	$1,797 \cdot 10^{15}$	$1,807 \cdot 10^{15}$
Расчетная активность аргона-37 на конец облучения (14.04.03 г.), кКи	39,3	39,6

Таблица 2

Результаты численного моделирования накопления ^{37}Ar при разных режимах облучения ЭСА в ячейке 25-13 реактора БН-600

№/п	Режим облучения	Полная активность ^{37}Ar в сборке, кКи (%)
1.	160 сут при $N=100\%N_{\text{ном}}$	40,5 (100%)
2.	30 сут при $N=70\%N_{\text{ном}}$, 130 сут при $N=100\%N_{\text{ном}}$	40,0 (99%)
3.	130 сут при $N=100\%N_{\text{ном}}$, 30 сут при $N=70\%N_{\text{ном}}$	34 (84%)
4.	150 сут при $N=100\%N_{\text{ном}}$	40,1 (99%)
5.	140 сут при $N=100\%N_{\text{ном}}$	39,6 (98%)
6.	170 сут при $N=100\%N_{\text{ном}}$	40,8 (101%)
7.	240 сут при $N=100\%N_{\text{ном}}$	41,8(103%)

Примечание: $N_{\text{ном}}$ - номинальная мощность реактора БН-600.

Из табл.2 видно, что при проектной продолжительности микрокампании 160 эфф.сут и изменении длительности микрокампании на 10 эфф.сут активность аргона-37 меняется на ~1%. Изменение длительности микрокампании до 240 эфф.сут приводит к увеличению активности только на ~3%.

Существенное влияние на активность аргона-37 могут оказать такие события как отключение петли или БАЗ, если они произойдут в конце периода облучения. Так работа в течение 1 месяца при отключенной петле в конце облучения ЭСА приводит к потере ~15% активности целевого радионуклида.

Проведенные позже исследования показали, что измеренная активность ^{37}Ar , выделенного из двух облучавшихся в БН-600 в 44 микрокампании ЭСА, оказалась меньше расчетной. Разные методы измерения показали различные результаты. По результатам калориметрического метода измерения активность составила ~ 85%, объеметрического метода ~ 89%, а метода изотопного разбавления ~ 92% от расчетной активности. Отличие расчетной и измеренных активностей обусловлено не только погрешностями расчетов и измерений, но и неизбежной потерей части аргона при выделении из нарабатывающих элементов (НЭЛ). Впоследствии это учитывалось при прогнозных расчетах активности аргона-37 на втором этапе испытаний ЭСА.

После выгрузки и отмывки две ЭСА были переданы в защитную камеру блока № 3, где сборки были разделаны и из них извлечены НЭЛ. Для НЭЛ были измерены мощности экспозиционной дозы, а для НЭЛ из ЭСА-02 были так же проведены гамма-спектрометрические исследования. В спектре γ -излучения были идентифицированы следующие линии (в скобках приведены соответствующие им радионуклиды):

- 320 кэВ (^{51}Cr);
- 511 кэВ (аннигиляционная линия);
- 811 кэВ (^{58}Co);
- 835 кэВ (^{54}Mn);
- 1100 кэВ (^{59}Fe);

- 1174 кэВ (^{60}Co);
- 1292 кэВ ($^{59}\text{Fe} + ^{41}\text{Ar}$);
- 1333 кэВ (^{60}Co).

Для этих линий были определены интегральные интенсивности пиков полного поглощения. В первом приближении можно считать, что измеренная мощность экспозиционной дозы полностью определяется линейным однородным источником из приведенных выше радионуклидов. Учитывая вышесказанное и то, что эффективность полупроводникового детектора обратно пропорциональна энергии γ -кванта, были получены оценки активностей основных γ -излучателей НЭЛ из ЭСА-02 на 19.04.2003:

- ^{51}C – 1313 Ки;
- ^{58}Co – 1511 Ки;
- ^{54}Mn – 257 Ки;
- ^{59}Fe – 51,6 Ки;
- ^{60}Co – 23,1 Ки;
- ^{41}Ar – 4,8 Ки.

По данным результатам можно отметить следующее:

- радиационная обстановка при операциях с НЭЛ в основном обусловлена продуктами активации стальной оболочки (исключение – ^{41}Ar);
- получены оценки эффективной активности радионуклидов (без учета самопоглощения в НЭЛ); при этом полная эффективная активность НЭЛ составила $1,17 \cdot 10^{14}$ Бк, что несколько ниже приведенной в проекте полной расчетной активности ($3,2 \cdot 10^{14}$ Бк);
- оценки активности ^{60}Co , проведенные по двум линиям гамма-спектра, отличались всего на 2,2%. В качестве окончательного результата использована средняя величина.

ВТОРОЙ ЭТАП ИСПЫТАНИЙ ЭСА

Загрузка активной зоны реактора БН600 в 46 микрокампанию отличалась от загрузки в 44 микрокампанию. В первую очередь, в боковой зоне воспроизводства вместо шести экспериментальных облучательных устройств для наработки ^{60}Co (ЭОУ), вносящих большое возмущение в нейтронное поле, осталось 3 ЭОУ.

Расчеты по моделированию облучения 19-ти ЭСА проводились на базе расчетов различных загрузок реактора в 46 микрокампанию в коде ГЕФЕСТ. Загрузка калыция в каждом из нарабатываемых элементов 19-ти ЭСА принята равной 12 кг, длительность 46 микрокампании – 160 эфф.сут.

В первом варианте расчетов ЭСА размещались в ячейки первого ряда БЗВ, освобождаемые при выгрузке отработавших ресурс ТВС. Результаты расчетов активности ^{37}Ar приведены в табл. 3. Очевидно, что при таком размещении ЭСА в активной зоне реактора БН600 необходимое количество целевого радионуклида не могло быть наработано.

Во втором варианте расчетов ЭСА размещались в ячейки первого ряда БЗВ, рекомендованные ФЭИ для максимальной наработки аргона-37 (см. табл.3). Из результатов расчетов видно, что этот вариант размещения ЭСА обеспечивал необходимую наработку аргона-37 даже с учетом прогноза, основанного на результатах калориметрических измерений активности.

Третий (окончательный) вариант размещения 19-ти ЭСА был выбран с учетом перестановок ЭОУ и из условия максимальной плотности потока нейтронов в месте размещения ЭСА при минимуме перегрузочных операций (перестановок в активной зоне). Результаты расчетов представлены в табл. 3. Из данных, приведенных в табл. 3, видно, что для этого варианта расчетная активность аргона-37 мень-

Таблица 3

Расчетная активность аргона-37 при различных вариантах установки ЭСА в БЗВ реактора БН-600

№№ варианта	Ячейки размещения ЭСА	Активность ^{37}Ar , кКи			
		без поправки	с поправкой на измерения (*)		
			1	2	3
1.	28-18, 16-06, 28-27, 06-07, 18-28, 07-18, 20-08, 29-20, 04-09, 08-05, 26-29, 09-22, 05-14, 14-26, 25-12, 22-30, 12-04, 30-25, 12-25	622,8	528,9	556,5	573,8
2.	25-13, 18-07, 16-27, 09-21, 07-06, 28-27, 28-18, 18-28, 29-25, 21-29, 09-05, 05-13, 21-09, 13-25, 25-29, 06-07, 16-06, 13-05, 27-16	739,8	628,2	661,0	681,6
3.	21-09, 27-16, 28-18, 16-06, 29-21, 13-05, 29-25, 09-05, 28-27, 07-06, 06-07, 25-29, 05-09, 21-29, 05-13, 18-28, 16-27, 07-18, 13-25	735,7	624,8	657,4	677,9
4.	Те же, что в варианте 3, реальный режим облучения	710,0	602,9	634,4	654,2

(* –
1 – калориметрические измерения
2 – объемометрические измерения
3 – измерения методом изотопного разбавления

ше на ~0,5%, чем для варианта, рекомендованного ФЭИ, что также обеспечивало необходимую наработку аргона-37.

После окончания облучения 19 ЭСА был проведен уточненный расчет активности аргона-37 с учетом реального режима облучения. Во время 46 микрокампании было два снижения мощности, связанные с отключением петли. Это привело к потере ~ 3,5% активности целевого нуклида, но задача наработки 600 кКи была выполнена. Результаты расчета приведены в табл. 3.

В пересчете на 30.04.2004 (дата отправки изготовленного источника нейтрино в ИЯИ РАН) с поправкой на калориметрические измерения активность источника по расчетам должна была составлять 430,7 кКи. Калориметрические измерения, проведенные в ИРМ и Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН при пересчете на 30.04.2004, показали несколько меньшие величины (405 и 427 кКи соответственно) [4].

В заключение можно отметить, что цель работы – изготовление источника нейтрино на основе аргона-37 активностью 400 кКи – была, безусловно, выполнена.

Литература

1. Альперович М.Н., Григорьева Н.М., Сысоева О.В., Селезнев Е.Ф., Яблоков С.Л. Аннотация комплекса программ ГЕФЕСТ//ВАНТ. Сер. «Физика ядерных реакторов». – М.: РНЦКИ, 1994. – Вып. 4. – С. 36-43.
2. Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Рудик А.П. Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Сборка экспериментальная для наработки аргона-37/Пояснительная записка. РНАТ.506249.009 ПЗ. ОКБМ.
4. Abdurashitov J.N., Gavrin V.N., Girin S.V. et al. Measurement of the response of a Ga solar neutrino experiment to neutrinos from a ^{37}Ar source//Physical Review C. – 2006. – V. 73. – P. 045805-1 to 045805-12.

Поступила в редакцию 30.03.2009

УДК 621.039.526

Experience of Utilization at BN-600 of the Methods of the Check and Failure Diagnosis of the Measurement Circuits of the In-Reactor Coolant Temperature Monitoring without their Dismantling/V.P. Zabegaev, A.I. Karpenko, E.L. Rozenbaum; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 tables. – References, 1 title.

The article presents the methods of the «current average» and «binary regressions» used to calibrate and diagnose the failures of the measurement circuits without dismantling of the temperature transducers for the BN600 reactor. The results of the calibration of the sodium temperature measurement circuits in the period from 2003 to 2008 are given. The positive experience of the methodology utilization has been assessed.

УДК 621.039.564.5

Methodology of the Location of the Failed Stage during the Development of the Water-Sodium Reaction in the Modular Steam Generator named PGN-200M/A.A. Kuznetsov, P.P. Govorov, Yu.V. Nosov, A.P. Karavaev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 2 titles.

The article considers the way of the location of the failed stage when the indications of the water-sodium reaction emerge in the PGN-200M modular staged steam generator of the BN600 power unit. The selection of the diagnostic parameters used to locate the failed stage is justified. Various alternative locations of the water-sodium reaction have been simulated.

УДК 621.039: 504.064

Radiation Safety of the General Public and Environment in the Area of the Beloyarsk NPP Site. A.V. Ladeishchikov, A.V. Shonokhov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 3 pages, 3 illustrations. – References, 4 titles.

The environmental radiation surveillance in the area of the Beloyarsk NPP site is traditionally given specified attention. The surveillance data quoted in this article show that the level of the Beloyarsk NPP radiation impact both upon general public and environment is within the limit of the unconditionally acceptable risk.

УДК 621.039.526: 621.039.51

Forming the Model of the BN-600 Reactor Core using the Hephaestus Fuel Archive for the SYNTES Code/ E.V. Balakhnin, A.V. Gavrilo, A.I. Karpenko, A.M. Tuchkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 4 pages, 4 illustrations. – References, 3 titles.

The article presents the first stage of the forming of the SYNTES software computational model of the BN600 reactor core, i. e. the organization of the transfer of the existing model of the core from the Hephaestus fuel archive to the temporal database.

УДК 621.039.526: 621.039.51

Support by Calculation to the Reactor Testing of the Test Sub-Assemblies for Production of argon-37/V.V. Golovin, A.I. Karpenko, A.M. Tuchkov, I.A. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 3 tables. – References, 4 titles.

In support to the BN600 in-reactor tests of the sub-assemblies for the production of argon-37 the computational and the experimental investigations were conducted. The goal of the work, i. e. the manufacture the neutrino source of 400 kCi activity, was achieved.

УДК 621.039.526: 621.039.51

Additional Method of the Determination of the Anticipated Position of Shimming Rod KS1-18 of the BN-600 reactor of the Beloyarsk NPP under the critical conditions/V.A. Zhyoltyshev, A.A. Lyzhin, V.A. Shamansky, Yu.S. Khomyakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika»