

ОЦЕНКА СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ РЕАКТОРА БН-600 БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

М.В. Баканов*, В.А. Желтышев*, В.В. Мальцев*, В.Ф. Росляков*,

А.Л. Кочетков**, Ю.С. Хомяков**

**Белоярская АЭС, г. Заречный*

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



После модернизации активной зоны на реакторе БН-600 проводятся измерения по подтверждению основных проектных показателей и, в частности, измерения относительного энерговыделения. В статье рассмотрены составляющие погрешности измерения на примере измерения относительного энерговыделения в реакторе БН-600 после 44 перегрузки топлива, когда были использованы современные средства измерения. Кроме того, при проведении измерений после 44 перегрузки топлива был учтен опыт проведения предыдущих измерений, что повышает степень надежности результатов.

ВВЕДЕНИЕ

В течение 25 лет промышленной эксплуатации реактора БН-600 Белоярской АЭС постоянно ведутся работы по повышению технико-экономических показателей реакторной установки. Повышение технико-экономических показателей непосредственно связано с модернизациями активной зоны. После проведения модернизации активной зоны на реакторе БН-600 проводятся измерения по подтверждению основных проектных показателей и, в частности, проводятся измерения относительного энерговыделения. В последнее время появились современные средства измерений, средства обработки данных измерения, которые позволяют существенно уменьшить погрешность измерения. В статье рассмотрены составляющие погрешности измерения на примере измерения относительного энерговыделения в реакторе БН-600 после 44 перегрузки топлива, когда были использованы современные средства измерения. Кроме того, при проведении измерений после 44 перегрузки топлива был учтен опыт проведения предыдущих измерений, что повышает степень надежности результатов.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ

Метод измерения заключался в активации свежих ТВС, расположенных в различных (представляющих повышенный интерес) ячейках активной зоны (а.з.), внутренней и наружной боковой зоны воспроизводства (ВБЗВ и НБЗВ) и внутриреакторного

© М.В. Баканов, В.А. Желтышев, В.В. Мальцев, В.Ф. Росляков, А.Л. Кочетков, Ю.С. Хомяков, 2005

хранилища (ВРХ) с последующим измерением наведенной активности. Активация ТВС осуществлялась на малом уровне мощности в течение нескольких часов. После активации проводилась выдержка ТВС для накопления основного измеряемого продукта деления – La-140 .

Для проведения измерений ТВС последовательно извлекались из активной зоны с помощью штатных систем перегрузки реактора и выставлялись перед коллиматором, установленным в стене передаточного бокса. С противоположной стороны коллиматора был установлен полупроводниковый детектор.

Порядок проведения гамма-сканирования ТВС

Все ТВС сканировались по центру активной зоны по шести граням. Кроме этого, по центру ТВС первой грани сканировалась 10 раз мониторинная ТВС А.З., 3 раза мониторинная ТВС ВБЗВ, 2 раза мониторинная ТВС НБЗВ. Поскольку энерговыделение в активной зоне, боковом экране и ВРХ значительно различаются, измерения проводились следующим образом.

ТВС активной зоны измерялись с коллиматором (длина 495 мм, ширина 156 мм, высота 38 мм, длина щели 495 мм, ширина щели 40 мм, высота щели 6 мм) и со свинцовым фильтром толщиной 50 мм.

На мониторинной ТВС ВБЗВ из ячейки 20–29 была осуществлена нормировка, т.е. эта ТВС измерялась с коллиматором и со свинцовым фильтром толщиной 50 мм и без коллиматора и со свинцовым фильтром толщиной 10 мм; ТВС ВБЗВ из ячейки 20–29 при нормировке не опускалась, т.е. изменения геометрии не было.

ТВС ВБЗВ, ТВС ЗБЗ, облученные в ВРХ, ТВС НБЗВ из ячейки 21–07 измерялись без коллиматора и со свинцовым фильтром толщиной 10 мм.

На мониторинной ТВС НБЗВ из ячейки 19-05 была осуществлена еще одна нормировка, т.е. эта ТВС измерялась со свинцовым фильтром толщиной 10 мм и без свинцового фильтра; ТВС НБЗВ из ячейки 19-05 при нормировке не опускалась, т.е. изменения геометрии не было.

Остальные три ТВС НБЗВ измерялись без коллиматора и без свинцового фильтра.

При измерениях всех ТВС для уменьшения фона детектор с боковой и торцевой поверхности экранировался свинцом толщиной 10 мм и кадмием толщиной 0,3 мм.

В процессе измерений три раза производилась заливка азота в сосуд Дьюара. Заливка азота производилась после измерения мониторинной ТВС а.з. из ячейки 19–19 и опускания ее вниз до положения рейки механизма передачи пакетов (МПП) ~ 3400 мм по указателю положения (УП). После заливки азота производились повторные измерения мониторинной ТВС. После заливки азота возможно было изменение положения детектора относительно коллиматора.

Описание средств измерения

При измерении площади пика полного поглощения гамма-квантов La^{140} с энергией 1596 кэВ (S) использовался полупроводниковый германиевый детектор типа GC2818 со встроенным предусилителем. Для охлаждения детектора использовался жидкий азот из сосуда Дьюара типа 7BigMAC. В качестве анализатора импульсов использовался прибор InSpector типа IMCA 1200 с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) на 8192 канала. Пользовательский интерфейс осуществлялся через персональный компьютер Notebook IBM ThinkPad 380DX. Программное обеспечение позволяло автоматически производить измерения в течение заданного («живого») времени измерения, т.е. времени, когда InSpector действительно производит регистрацию гамма-квантов. Реальное время измерения больше «живого» времени измерения на величину «мертвого» времени (времени, в течение которого InSpector не производит регистрацию гамма-квантов).

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Суть обработки заключается в получении из измеренных площадей фотопиков интересующих физических величин и оценке их погрешностей.

Основные расчетные соотношения

«Активность грани»

Величину a_{ik} , пропорциональную потоку гамма-квантов от распада осколка La-140 через грань i будем условно называть «активностью грани» ТВС:

$$a_{ik} = G_k \cdot D_{ik} \cdot \frac{1}{n_{ik}} \cdot \sum_{j=1}^{n_{ik}} \frac{S_{ikj}}{\Delta t_j} \cdot T(t_0, t_{aikj}), \quad (1)$$

где S_{ikj} – площадь фотопика; Δt_j – время (длительность) замера; n_{ik} – количество замеров; $T(t_0, t_{aikj})$ – поправка на накопление–распад La^{140} , временная поправка к условиям «насыщения»; Δt_0 – время (длительность) облучения; Δt_{aikj} – время выдержки после облучения; G_k – геометрический фактор для приведения результатов измерений к одной геометрии; D_{ik} – поправка на «мертвое время» установки; k – индекс ТВС; i – индекс грани ТВС; j – индекс замера (измерения).

Данная величина пропорциональна реальной активности ТВС, но зависит еще и от ее распределения по сечению. За счет ослабления потока гамма-квантов материалами ТВС в отклик детектора вносят несколько больший вклад гамма-кванты, рожденные в твэлах, расположенных ближе к грани, ориентированной на детектор. Этот эффект может быть использован для оценки не только активности ТВС, но и неравномерности распределения энерговыделения.

«Активность ТВС»

Среднюю величину

$$A_k = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 a_{ik} \quad (2)$$

будем называть «активностью» ТВС. Эта величина пропорциональна суммарному (или среднему по сечению ТВС) количеству осколков La-140 в ТВС.

Энерговыделение в ТВС за счет деления

Величине

$$F_k = \frac{A_k}{A_m} \cdot \frac{\eta_k}{\eta_m} \cdot \frac{\bar{Y}_k}{\bar{Y}_m}, \quad (3),$$

где \bar{Y}_k, \bar{Y}_m – средний выход цепочки $^{140}\text{Ba} \rightarrow ^{140}\text{La}$, можно придать ясный физический смысл как величине средней относительной скорости делений в ТВС «к» по отношению к ТВС «м», которая обычно называется мониторинной; η_k, η_m являются коэффициентами пропорциональности между количеством ядер ^{140}La в ТВС и средним количеством γ -квантов, вылетающим за ее пределы. Отношение η_k/η_m , в основном, определяется поглощением γ -квантов материалами ТВС, поэтому его можно назвать «поправкой на самопоглощение». Ввиду полной пропорциональности скорости делений энерговыделению в ТВС, величины F_k можно называть «энерговыделением» в ТВС k .

Расчет временной поправки

Для расчета временной поправки были рассмотрены три компоненты (назовем их «распад La-140», «распад Ba-140», «прямой выход La-140»).

Накопление La-140 идет как в процессе облучения, так и при последующей выдержке после облучения. В приведенном ниже выражении t_0 – время облучения, t_b –

времени выдержки после облучения. В процессе облучения La-140 накапливается как за счет прямого выхода при делении, так и за счет распада короткоживущих предшественников, образующихся при делении в Ba-140, и распада последнего в La-140. Затем накопившийся La-140 достаточно быстро распадается ввиду своего относительно небольшого периода полураспада.

В процессе облучения накапливается Ba-140, который затем после облучения распадается в La-140. И эта компонента, как показывают расчеты, является основной. Как правило, компонентой от прямого выхода La-140 пренебрегают и итоговое соотношение между активностью La-140 после облучения t_0 и выдержки t_b , учитывающее все компоненты, выглядит следующим образом:

$$T(t_0, t_b) = \left[\frac{\lambda_2 e^{-\lambda_1 t_b} (1 - e^{-\lambda_1 t_0}) - \lambda_1 e^{-\lambda_2 t_b} (1 - e^{-\lambda_2 t_0})}{\lambda_2 - \lambda_1} \right]^{-1}. \quad (4)$$

В работах [1–3] приведены значения периодов полураспада для ^{140}Ba и ^{140}La . На основании этих данных для оценок были приняты следующие величины: ^{140}Ba : $T_{1/2} = 12,79 \pm 0,03$ сут; ^{140}La : $T_{1/2} = 40,22 \pm 0,10$ ч. В качестве погрешностей приняты наиболее консервативные величины. Время облучения согласно протоколу измерений составило (приписана заведомо максимальная погрешность, примерно соответствующая времени подъема мощности) $t_0 = 7,9 \pm 1,2$ ч. Время выдержки контролировалось с точностью до 2–3 минут (и связано это с временем конца облучения) и составило от $\sim 90,4$ ч до ~ 253 ч.

Проведем анализ погрешности поправки $[T(t_0, t_b)]^{-1}/[T(t_0, t_{\text{BM}})]^{-1}$. На рис. 1 приведены результаты расчета относительной поправки (отношения поправок при времени выдержки t_b к величине той же поправки при времени выдержки мониторной ТВС t_{BM} при варьировании периодов полураспада на величину принятой их погрешности ($\pm 0,03$ сут для ^{140}Ba и $0,1$ ч для ^{140}La). Предположение о нескоррелированности ошибок этих периодов полураспада не кажется весьма убедительным, поэтому оценка максимальной погрешности из-за периодов получается при одновременной их вариации (100% корреляция).

По результатам анализа можно сделать вывод о том, что погрешность относительной временной поправки за счет констант радиоактивного распада во временных диапазонах, соответствующих эксперименту, не превышает 0,25%. Вариация време-

Оценка влияния неопределенности периодов полураспада на величину относительной временной поправки (нормировочное время 90,4 ч)

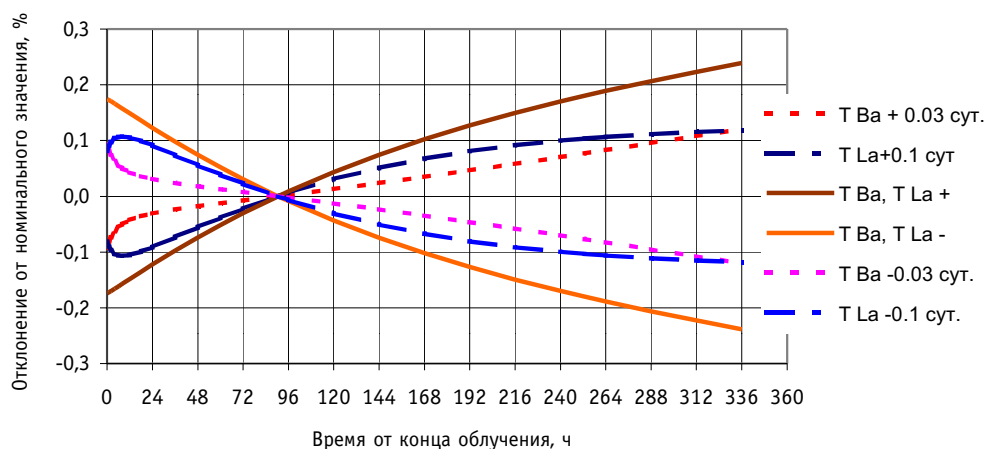


Рис. 1. Влияние неопределенностей периода полураспада на расчет временной поправки

ни облучения на 1,2 ч (~15%) приводит к существенно другой величине абсолютной поправки $[T(t_o, t_b)]^{-1}$ – в пределе на эти же ~15%. Однако, имеющая для относительных измерений гораздо большее значение относительная поправка $[T(t_o, t_b)]^{-1} / [T(t_o, t_{bm})]^{-1}$ при нормировке на время выдержки в диапазоне 90–300 ч изменяется не более, чем на 0,35% (при нормировке на время выдержки 90,4 ч).

Оценка поправки на «мертвое время»

Измерения проводились на последней мониторинной ТВС НБЗВ. Проводилась серия измерений с различной загрузкой тракта. Дополнительная нагрузка создавалась с помощью источников ОСГИ. Для параметризации использовалась оценка загрузки тракта по отношению реального времени к «живому». Тем не менее, при больших нагрузках автоматическая поправка времени измерения не полностью компенсировала соответствующие просчеты. Полученная поправка, по сути, является экспериментально полученной поправкой на «мертвое время» после введения поправки самим прибором. Основную долю поправки прибор вычисляет совсем неплохо – например, при загрузке около 26% с точностью на уровне 3–4%; погрешность определения поправки на «мертвое время» измерительной установки (с учетом ее величины и влияния на конечный результат) – менее 1%;

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ

Одним из главных источников погрешности является погрешность определения площади фотопика. Для оценки погрешности проводится серия замеров одного и того же источника гамма-излучения, а в качестве оценки погрешности принимается получаемый при этом разброс данных. Количественным параметром является несмещенная оценка дисперсии, точнее, более удобная линейная величина – корень из дисперсии:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n-1}} \text{ – для единичного измерения,}$$

$$\bar{\sigma}_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}} \text{ – для средней величины из } n \text{ измерений.}$$

Для определения доверительного интервала с вероятностью 0,95 могут быть использованы оценки: $\delta(0,95) = 2 \bar{\sigma}_s$ или $\delta(0,95) = t_s(n-1) \bar{\sigma}_s$, где $t_s(n-1)$ – коэффициенты Стьюдента, зависящие от $(n-1)$ степеней свободы. При разумном количестве измерений обе оценки дают близкие результаты. Как показали измерения, средний разброс площадей фотопиков обычно составляет от 1 до 2%. Например, среднее значение среднеквадратичных ошибок при измерениях ТВС активной зоны составило 1,3%, для мониторинных ТВС бокового экрана – 1,6%. Для того, чтобы убедиться в статистической природе отклонений и получить численную оценку дисперсии была осуществлена обработка всех проведенных измерений (около 900). По результатам обработки получена оценка плотности распределения площадей фотопиков от средних значений в виде гистограммы с шагом 0,5%. Гистограмма приведена на рис. 2.

На гистограмме также приведена нормальная плотность распределения с нулевым средним и различными дисперсиями. Полученная картина свидетельствует о том, что экспериментальное распределение весьма близко к нормальному и достаточно хорошо им аппроксимируется. Распределение с параметром $\sigma = 1,3\%$ делает это наилучшим способом, а вот при использовании параметра $\sigma = 1,1\%$ или $\sigma = 1,5\%$ можно увидеть ухудшение качества аппроксимации. Таким образом, можно констатировать,

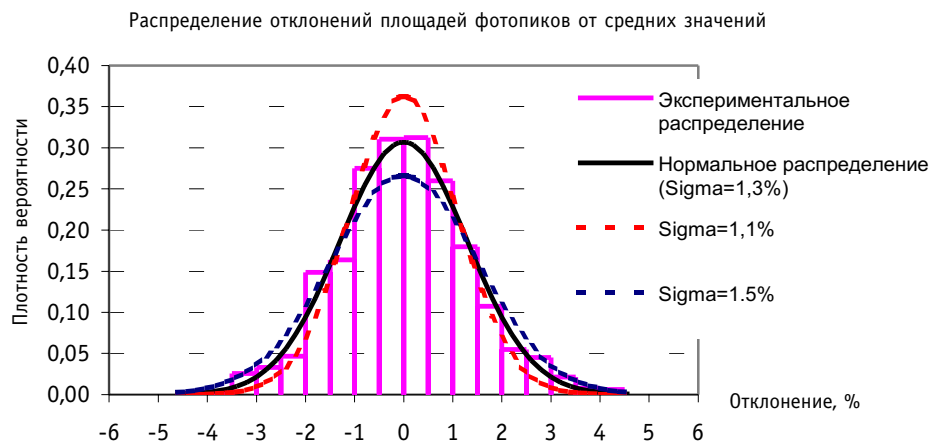


Рис. 2. Сравнение экспериментального распределения отклонений площадей фотопиков (порядка 900 замеров) с нормальным

что измеряемая площадь фотопика представляет собой случайную величину, распределенную по нормальному закону с параметром $\sigma_s = 1,3\%$. Из полученной оценки σ_s следует следующее: при характерном количестве в 5 измерений в серии на одну грань можно получить оценки среднеквадратичных ошибок (корень из дисперсии) и доверительных интервалов средних величин, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Оценка характерных погрешностей определения площади фотопика ^{140}La

Оценка погрешности фотопика	грань	ТВС (6 граней)
среднеквадратичная ошибка (корень из дисперсии)	0,6%	0,2%
доверительный 95-процентный интервал	1,2 – 1,6%	0,4%

Именно такой уровень погрешности измерений следует ожидать в том случае, если неопределенность площади фотопика имеет доминирующее значение.

Результаты измерения активности первой грани реперной ТВС активной зоны, облученной в яч. 19–19 в течение более 100 ч, приведены на рис. 3.

Первое измерение было выполнено через $\sim 90,4$ ч после окончания облучения в реакторе БН-600, последнее – после завершения измерений активности ТВС а.з. – через ~ 195 ч после окончания облучения. Видно, что за пределы 95% доверительного интервала в $\pm 1,6\%$ вышло более трети замеров. Абсолютно все индивидуальные измерения укладываются в интервал $\pm 4,8\%$, соответствующий 2 «сигмам». Таким образом, существует другой (и гораздо более существенный) источник погрешности, корень из дисперсии которого составляет около $\bar{\sigma}_g = \sqrt{2,4^2 - \bar{\sigma}_s^2} = 2,36\% \approx 2,4\%$.

Первый вопрос состоит в том, является ли эта погрешность проявлением неучета некоего систематического фактора, изменяющегося во времени или носит чисто статистический характер. Обработка методом наименьших квадратов дает линейную функцию с небольшим наклоном относительно среднего значения и показала, что, по большому счету, учет такого предположительного систематического изменения активности 1-ой грани первой реперной ТВС мало что меняет. Разброс данных относительно аппроксимационной прямой примерно тот же самый $\sim 2,2\%$, тем самым существенное количество измерений выходят за пределы, ограниченные погрешностью

Результаты измерений активности ТВС яч. 19–19 (в качестве погрешности – оценка только погрешности площади фотопика с $p=0,95$)

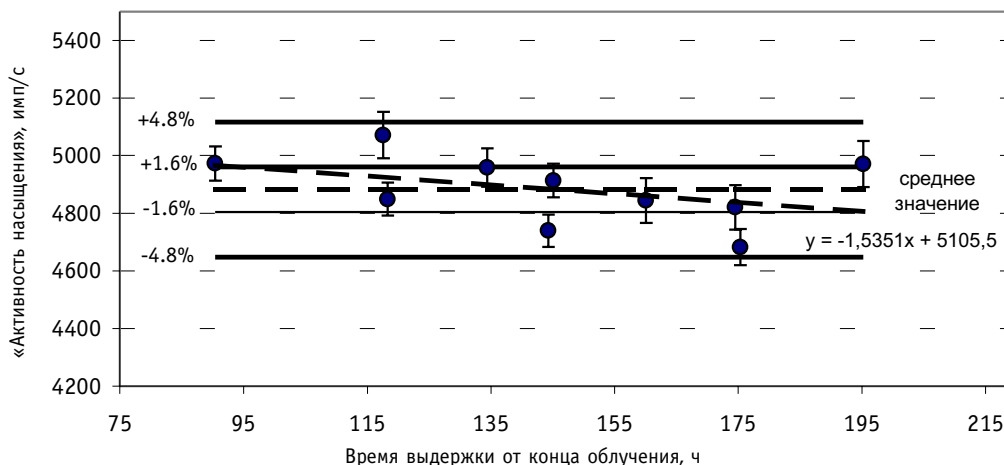


Рис. 3. Результаты измерений активности 1-ой грани мониторинг ТВС яч.19–19

измерения площади фотопика. В целом полученная прямая находится в пределах погрешности, определяемой только фотопиком. Вопрос о систематическом характере в пределах этой погрешности, по-видимому, требует дальнейшего исследования. Интересно также отметить, что при сканировании экранов реперных ТВС разброс данных существенно ниже и не превышает 1%, т.е. полностью укладывается в погрешность фотопика.

Следующий вопрос заключается в определении природы (причины) такого разброса данных для реперной ТВС активной зоны. Можно высказать следующие гипотезы:

- нарушения геометрии измерений;
- долговременная нестабильность работы электронной аппаратуры (которая проявляется только при проведении измерений, разделенных относительно большим промежутком времени).

Наиболее правдоподобной является первая гипотеза. Реальными причинами могут быть неточности в установке ТВС перед коллиматором, изменение геометрии за счет колебаний самого детектора, например, при заливке азота и пр. Применение в экспериментах с ТВС БЗВ более широкой щели коллиматора, сглаживающей геометрические погрешности, также является подтверждением правильности выявленной причины погрешности.

В измерениях применялся полупроводниковый детектор, обладающий высокой стабильностью. Область фотопика постоянно контролировалась, а сам фотопик не дрейфовал. Фон в области энергий ~1,6 МэВ практически отсутствует, поэтому даже смещение пика не может приводить к заметным погрешностям (при условии, что область обработки не меньше реальной ширины пика). Тем не менее, измерения проводились в достаточно тяжелых для аппаратуры температурных условиях (более 30°C), причем не стабильных. Поэтому погрешности, связанные с нестабильностью аппаратуры, все же отвергать полностью нельзя и необходимо также исследовать. В дальнейшем предлагается использовать максимальную (худшую) оценку среднеквадратичной погрешности (условно назовем ее «геометрической») в $\bar{\sigma}_g = 2,3\%$ (оценку дисперсии $2,3^2\%$) (табл. 2).

Полученные оценки позволяют оценить погрешности распределения скоростей деления по (1) ТВС активной зоны, (2) ТВС ВБЗВ и ВРХ, (3) ТВС НБЗВ (внутри каждой

Таблица 2

Оценка «геометрической» погрешности для ТВС а.з.

Параметр	грань	ТВС (6 граней)
среднеквадратичная ошибка (корень из дисперсии)	2.3%	0.94%
доверительный 95-процентный интервал	4.6%	1.9%

группы измерений, проводившихся в одной геометрии). Они фактически являются квадратичной суммой погрешности фотопика и «геометрической погрешности» (для ТВС активной зоны). Этих данных вполне достаточно, чтобы оценить и все остальные погрешности. Скорость деления экранных ТВС ВБЗВ и НБЗВ, ТВС ВРХ по отношению к мониторной ТВС активной зоны можно представить в следующем виде:

$$\frac{F_I}{F_{\text{МАЗ}}} = \left[\frac{F_I}{F_{\text{МБЗВ}}} \right]_2 \left[\frac{F_{\text{МБЗВ}}}{F_{\text{МАЗ}}} \right]_1 = \frac{[F_I]_2}{[F_{\text{МАЗ}}]_1} \frac{[F_{\text{МБЗВ}}]_2}{[F_{\text{МБЗВ}}]_1} = \frac{[F_I]_1}{[F_{\text{МАЗ}}]_2} G_{2/1},$$

$$\frac{F_I}{F_{\text{МАЗ}}} = \left[\frac{F_I}{F_{\text{МНБЗВ}}} \right]_3 \left[\frac{F_{\text{МНБЗВ}}}{F_{\text{МБЗВ}}} \right]_2 \left[\frac{F_{\text{МБЗВ}}}{F_{\text{МАЗ}}} \right]_1 = \frac{[F_I]_3}{[F_{\text{МАЗ}}]_1} \frac{[F_{\text{МБЗВ}}]_1}{[F_{\text{МБЗВ}}]_2} \frac{[F_{\text{МНБЗВ}}]_2}{[F_{\text{МНБЗВ}}]_3} =$$

$$= \frac{[F_I]_1}{[F_{\text{МАЗ}}]_3} G_{2/1} G_{3/2} = \frac{[F_I]_1}{[F_{\text{МАЗ}}]_3} G_{3/1},$$

$$G_{3/1} = G_{2/1} G_{3/2}$$

где I – индекс текущей ТВС БЗВ или ВРХ, МАЗ МБЗВ, МНБЗВ – индекс мониторных ТВС активной зоны, ВБЗВ, НБЗВ, индекс квадратной скобки является индексом геометрии, в которой данное отношение измерялось. Тем самым погрешность $F_I/F_{\text{МАЗ}}$ является квадратичной суммой погрешностей измерения отношений $F_I/F_{\text{МБЗВ}}$, $F_{\text{МБЗВ}}/F_{\text{МАЗ}}$ и $F_{\text{МНБЗВ}}/F_{\text{МАЗ}}$. Однако традиционно результаты по гамма-сканированию представляются с использованием коэффициентов «перевязки» геометрий $G_{2/1}$, $G_{3/1}$, смысл которых понятен из представленных выражений – отношение скоростей счета детектора в геометрии 2(3) по отношению к геометрии 1. Погрешность коэффициентов «перевязки» геометрий по результатам измерений составила: $G_{2/1} = 4,9\%$, $G_{3/2} = 3,1\%$.

Для определения коэффициентов «перевязки» геометрий использовались результаты измерений ТВС 20–29 в геометрии 1 (геометрия измерения ТВС а.з.) и среднее значение по трем замерам в геометрии 2 (геометрия измерений ТВС ВБЗВ и ВРХ). Большой уровень погрешности измерения первого коэффициента $G_{2/1}$ связан с повышенным уровнем погрешностей измерений в первой геометрии. Для вычисления $G_{3/2}$ использовались результаты измерений ТВС 19–05 в геометрии 2 и среднее значение по двум сериям измерений в геометрии 3.

Следует отметить, что на вычисление G -коэффициентов оказывает влияние оценка поправки на «мертвое время», т.к. измерения одной и той же ТВС в различных геометриях неизбежно проходят при разной загрузке измерительного тракта. Так измерения мониторной ТВС ВБЗВ в первой геометрии (геометрии ТВС активной зоны) проходили при фоновой загрузке (порядка 6% по «мертвому времени»), во второй – загрузке около 26% по «мертвому времени».

Уровень итоговых оценок погрешностей относительных скоростей деления (для доверительной вероятности 0,95) приведен в табл. 3.

Уровень итоговых оценок погрешностей относительных скоростей деления

Параметр	Оценка погрешности
грань ТВС активной зоны/ среднее значение мониторинной ТВС активной зоны	5%
среднее значение ТВС активной зоны/ среднее значение мониторинной ТВС активной зоны	3%
грань ТВС ВБЗВ и ТВС ВРХ/ среднее значение мониторинной ТВС активной зоны	6%
среднее значение ТВС ВБЗВ и ТВС ВРХ/ среднее значение мониторинной ТВС активной зоны	5%
грань ТВС НБЗВ/ среднее значение мониторинной ТВС активной зоны	7%
среднее значение ТВС НБЗВ/ среднее значение мониторинной ТВС активной зоны	6%
грань ТВС ВБЗВ и ТВС ВРХ/ среднее значение мониторинной ТВС ВБЗВ	2%
среднее значение ТВС ВБЗВ и ТВС ВРХ/ среднее значение мониторинной ТВС ВБЗВ	1%
грань ТВС НБЗВ и ТВС ВРХ/ среднее значение мониторинной ТВС ВБЗВ	4%
среднее значение ТВС НБЗВ и ТВС ВРХ/ среднее значение мониторинной ТВС ВБЗВ	3%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ условий эксперимента по измерению распределения энерговыделения в активной зоне реактора БН-600 после 44 перегрузки может быть рассмотрен как один из самых надежных и достоверных.

Выявлены следующие основные источники погрешностей и оценены их величины:

- неопределенность площади фотопика, включая его обработку соответствующими программными средствами ~1,3%;
- погрешность, связанная с воспроизведением условий измерений различными ТВС, условно названная «геометрической» погрешностью ~2,4%;
- погрешность определения поправки на «мертвое время» измерительной установки, с учетом ее величины и влияния на конечный результат – менее 1%;
- погрешность расчета временной поправки для приведения результатов измерения к единому времени (условиям насыщения) за счет неопределенности констант распада Ba-140, La-140 и времени облучения – не более 0,5%.

Суммарная погрешность определения средней по ТВС относительной скорости делений для доверительной вероятности 0,95 составила:

- ~3% – для ТВС активной зоны;
- ~5% – для ТВС внутренней боковой зоны воспроизводства (по отношению к ТВС активной зоны);
- ~6% – для ТВС внешней боковой зоны воспроизводства (по отношению к ТВС активной зоны).

Литература

1. Гусев Н.Г., Дмитриев П.П. Радиоактивные цепочки: Справочник. - М.: Атомиздат, 1978.
2. Физические величины: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Голашвили Т.В., Чечев В.П., Лбов А.А. и др. Справочник нуклидов-2. - М.: ФГУП «ЦНИИАТО-МИНФОРМ», 2002.

Поступила в редакцию 14.02.2005

УДК 621.039.526

Evaluation of the Radiation Risks Related to the Beloyarsk NPP BN600 Power Unit Operation on General Public | I.I. Koltik, N.N. Oshkanov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 3 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.

The basic criterion used to evaluate the radiological danger related to an NPP operation is general public exposure to radiation. The article presents the results of the analysis of the annual doses taken by general public for the period of the BN600 unit operation. The data on the individual and collective doses received by the critical groups of general public due to the atmospheric and liquid discharges from the BN600 power unit are given. The data on the standardized collective doses for other reactor types are presented. The results of the calculation of the individual and collective risks on general public show that the risks for the fast reactors are lower by about two orders than the risk for the graphite-moderated water-cooled reactors and PWR's and beyond an absolutely acceptable risk of $1 \cdot 10^{-6} \text{ yr}^{-1}$.

УДК 621.039.526

Justification of the Tritium Radiation Safety of the Beloyarsk NPP BN600 Power Unit Personnel | N.N. Oshkanov, M.V. Bakanov, E.M. Rafikov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 5 tables. – References, 6 titles.

On the basis of the conducted measurements of the volume tritium concentration in Beloyarsk NPP BN600 power unit room air the personnel tritium radiation safety has been justified. The method of the personnel dose calculation is presented.

УДК 621.039.526

Assessment of the Partial Errors of the Beloyarsk NPP BN600 Reactor Relative Power Measurements | M.V. Bakanov, V.A. Zhyoltyshev, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, A.L. Kochetkov, Yu.S. Khomyakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 9 pages, 3 tables, 3 illustrations. – References, 3 titles.

In this article the composite and partial errors of the Beloyarsk NPP BN600 reactor relative power measurements are considered and justified.

УДК 621.039.526

Assessment of the Minimum Possible Worth of the BN600 Reactor Control Rods | M.V. Bakanov, V.A. Zhyoltyshev, A.A. Lyzhin, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 7 pages, 2 illustrations. – References, 6 titles.

In this article the estimates of the minimum possible worth of the BN600 reactor control rods are reported and the criteria of the ultimate condition of the control rods as well as the indications of the achievement of the ultimate condition in terms of physical worth are considered and justified.

УДК 621.059.526

Computational Support to the BN600 Reactor Operation | V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, Kh.F. Gizzatuln; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 6 pages, 2 tables. – References, 4 titles.

The article presents the main features of the core modifications implemented during the BN600 reactor operation. The neutron physics calculations of the BN600 reactor using the software packages named Uran and Hephaestus are analyzed. The effect of the BN600 reactor calculation method using the Hephaestus software package on the results of the calculation of the fuel characteristics has been evaluated.

УДК 621.039.526

The Influence of Change of the BN-600 Core Composition on Value of Sodium Void Reactivity Effect | E.V. Balahnin, A.M. Tuchkov, I.A. Chernov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 4 tables. – References, 7 titles.

The influence of change of the BN-600 core composition on value of Sodium Void Reactivity Effect (SVRE) is presented in this article. The procedure of the design models preparation and calculation results of the SVRE for different of the BN-600 core composition's are presented.

УДК 621.039.526

Research into BN600 Reactor Irradiated Fuel Decay Heat Released in the Irradiated Fuel Cooling Pond | A.I. Karpenko, E.L. Rozenbaum, V.P. Zabegaev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 8 pages, 1 table, 5 illustrations.