

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ СВРК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА НА ОСНОВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ИДЕОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Ю.Л. Цоглин

Научно-инженерное общество, г. Дрезден, Германия

Представлены результаты расчётных и экспериментальных исследований, обосновывающих возможность создания системы внутриреакторного контроля (СВРК) корпусного водо-водяного энергетического реактора на основе измерения интенсивности гамма-излучения активной зоны посредством оригинального калориметрического гамма-детектора со встроенным градуировочным элементом.

История вопроса и постановка задачи

В начале 80-х годов Институт ядерных исследований Академии наук Украины (ИЯИ) начал разработку системы ВРК для II блока Армянской АЭС. Изначально в основу физической идеологии системы ВРК был положен нетрадиционный принцип контроля энерговыделения (ЭВ) – посредством мониторинга поля гамма-излучения активной зоны. Поэтому система получила статус экспериментальной и была названа по принадлежности «Севан» – ЭСВРК «Севан».

Для постановки такой задачи имелись следующие предпосылки:

1. В проекте блока не предусматривалась постановка штатной системы ВРК – «Гиндукуш», уже разработанной тогда для реакторов ВВЭР-440 в ИАЭ им. Курчатова и СНИИП'е под руководством В.И. Митина на внутризонных родиевых детекторах прямой зарядки (ДПЗ), изобретенных М.Г. Мительманом и Н.Д. Розенблюм (ВНИИ-источников тока – ВНИИТ) еще в начале 60-х годов.

2. Выбор идеологии мониторинга гамма-излучения АЗ и отказ от широко распространенных нейтронных детекторов (а можно было сделать и нейтронный калориметр – с бором) был связан с известными трудностями в интерпретации информации, получаемой от нейтронных детекторов [1], главные из которых:

- выгорание чувствительного материала детектора
- выгорание топлива
- различия потоков в топливе и в месте расположения детектора
- возмущение детектором локального нейтрона потока
- изменение спектра нейтронов с выгоранием топлива

Эти трудности преодолеваются сегодня огромными усилиями разработчиков штатных СВРК привлечением сложнейшего математического аппарата и серьезных аппаратно-вычислительных средств.

Коренная же причина трудностей состоит в том, что нейтроны – это лишь инициаторы деления и «эффективность их действия», т.е. скорость делений зависит очень сильно от состояния объекта воздействия – топлива –, являющегося сложной динамической системой. В то время, как гамма-излучение – это точно нормируемое следствие акта деления и численное сопоставление между ними представляется более простой процедурой.

3. В конце 60-х – начале 70-х годов, НИКИЭТ’ом (Л.В.Константинов, В.В.Постников, Ю.М.Серебренников) была сделана успешная попытка реализовать контроль АЗ на основе измерений гамма-поля. Так в 1969 году на II-м блоке Белоярской АЭС ими проводились сравнительные эксперименты по контролю мощности топливных каналов (ТК) гамма-камерами (ГК) НИКИЭТ’а и родиевыми детекторами -ДПЗ, разработанными во ВНИИТ. Мы были свидетелями экспериментов.

Оба детектора функционировали нормально и выдавали достоверную информацию. Однако ГК были отвергнуты персоналом АЭС, так как размещение камеры в ТК снижало на 10% мощность канала. Тем не менее, в 1970 году те же авторы опубликовали[2] обоснованный материал о возможности мониторинга мощности реактора с помощью гамма-детекторов.

4. К моменту начала работ в распоряжении разработчиков ЭСВРК «Севан» имелись созданные в ИЯИ, хорошо отработанные в реакторных экспериментах калориметрические детекторы – **калориметры интегрального теплового потока (КИТП)**, которые могли быть «настроены» на любой вид реакторного излучения, в частности, на гамма-излучение. Поэтому в качестве внутризонных детекторов для ЭСВРК «Севан», на основе КИТП, были разработаны специальные калориметрические гамма-детекторы (**КГД**), в которых в качестве детекторного образца использовался цирконий, как чистый гамма-поглотитель. Особенность КГД состояла в том, что, имея все атрибуты и свойства калориметра интегрального теплового потока, они имели габаритный размер всего лишь 4,9 мм

Калориметрический гамма-детектор

Метрически КГД основан на принципе интегрирования тепловых потоков, проходящих через замкнутую поверхность.

Использовать этот принцип для реализации калориметра интегрального теплового потока (КИТП) предложил в 1963 году – тогда молодой специалист – ныне д.т.н., профессор С.С. Огородник (Киев, ИЯИ). Конструктивно, калориметр представляет собой замкнутую измерительную оболочку произвольной формы и габаритов, состоящую из идентичных, расположенных вплотную один к другому дифференциальных термоэлементов – датчиков локального теплового потока, соединенных электрически последовательно. Таким образом, в конструкции калориметра непосредственно реализуются условия измерения тепловых потоков в соответствии с теоремой Остроградского-Гаусса. Принцип действия калориметра описывается уравнением

$$W = \sum_{j=1}^{\infty} W_j = \int_V \operatorname{div} \vec{q} dV = \oint_S \vec{q} d\vec{s} = \sum_{i=1}^N q_i \Delta S_i = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\lambda}{\delta} \right)_{\text{Эфф}} \Delta t_i \Delta S_{\text{эл}} = \left(-\frac{\lambda}{\delta} \right)_{\text{Эфф}} \frac{\Delta S_{\text{эл}}}{\alpha} \sum_{i=1}^N \Delta E_i = k E_0. \quad (1)$$

Термо-э.д.с., развиваемые каждым термоэлементом, пропорциональные элементарному тепловому потоку через оболочку в данном элементе поверхности, складываются в интегральную сумму. Последняя, в стационарном случае эквивалентна (согласно теореме) суммарной мощности источников тепла в контролируемом объеме. Контролируемый объем в реальной конструкции – это калориметрический образец внутри измерительной оболочки калориметра (рис. 1).

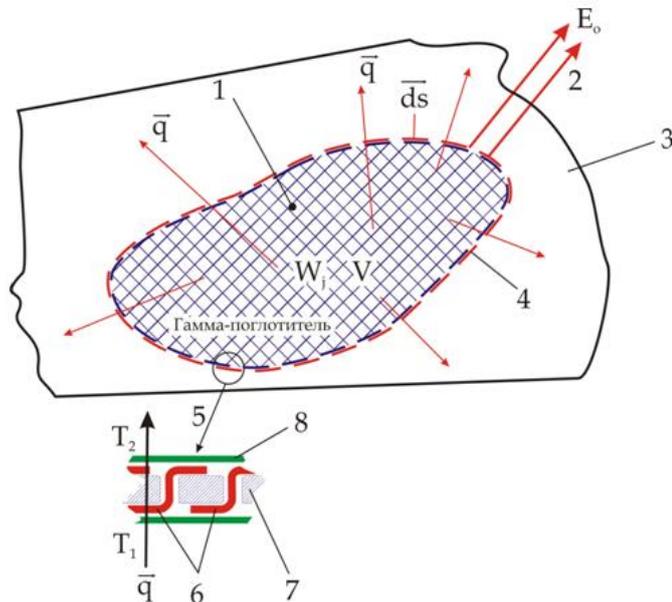


Рис.1. Принцип действия калориметра интегрального теплового потока:

- 1 – контролируемый объем тепловыделения; 2 – измерительные выводы;
 3 – внешняя среда; 4 – измерительная оболочка; 5 – дифференциальный термоэлемент; 6 – термоэлектрод – Алюмель.; 7 – термоэлектрод – Хромель;
 8 – электроизоляция

Реализованный в КИТП принцип измерения приводит к существенным достоинствам детектора. Его показания не зависят от расположения источников тепла и распределения тепловых потоков в пространстве. Форма и размеры образца и оболочки принципиально могут быть любыми. КИТП не требует применения, обычных для других типов и конструкций калориметров термостатирующих блоков, охранных нагревателей и т.д. – т.е. дополнительных конструктивных элементов. Благодаря этим свойствам, калориметрические детекторы интегрального теплового потока имеют высокие метрологические и конструктивные характеристики.

- Высокую точность и чувствительность, зависящие только от корректности составления интегральной суммы из локальных тепловых потоков на измерительной оболочке, т.е. числа и миниатюрности термоэлементов.
- Высокий коэффициент использования объема, т.е. отношение объема калориметрического образца ко всему объему калориметра, что открывает широкие возможности для миниатюризации их конструкции и достижения достаточно малой инерционности.

Различные модификации КИТП успешно применялись и на критических сборках при измеренных очень малых значений энерговыделения $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Вт, и на высокопоточных исследовательских реакторах с достижением ресурса до 8×10^{20} Н/см², в ресурсных испытаниях термоэмиссионных ТВЭЛов при температуре до 900 °С, и в каналах энергетического реактора 2-го блока Белоярской АЭС при температуре до 850 °С.

И, наконец, для каналов контроля ЭВ реакторов ВВЭР-440 был разработан микрокалориметр с габаритным размером 4,9 мм, чувствительностью ~ 4 мВ/Вт, достаточной для измерений ЭВ, начиная с МКУ, и рабочей температурой до 400 С. На его основе для измерительных зондов разрабатываемой ЭСВРК был создан калориметрический гамма-детектор. Его важнейшим элементом являлся **встроенный градуировочный**

нагреватель, позволявший проводить градуировки детектора в рабочих условиях и, тем самым, обеспечивать его высокие метрологические характеристики.

Калориметрические зонды «Севан», реакторные испытания

Создание КГД и на их основе основе внутрореакторных калориметрических зондов для каналов контролера энерговыделения реактора ВВЭР-440 явилось одним из решающих факторов успешного продвижения проекта ЭСВРК «Севан» на 2-м блоке Армянской АЭС.

Габаритные размеры зонда $\varnothing 6,1$ и длина 9,5 метра позволяют помещать его в штатных каналах – трубка $\varnothing 8 \times 0,8$ мм – контролера энерговыделения реактора ВВЭР-440. Чувствительными элементами зонда являются 5 миниатюрных гамма-калориметров, размещённых на жестких связях, с шагом 500 мм по всей высоте активной зоны. Измерительные провода КГД выполнены из термостойкого высокотемпературного кабеля КТМС с хромель-алюмелевыми проводниками в чехле из нержавеющей стали диаметром 1 мм с керамической засыпкой из окиси магния (рис. 2).

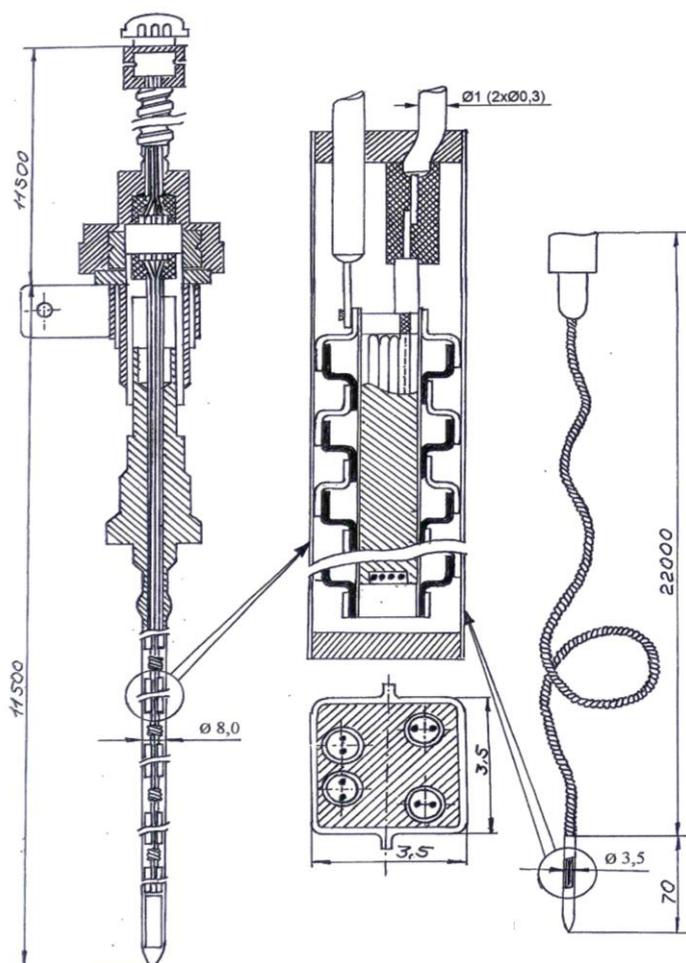


Рис. 2. ЭСВРК «Севан». Калориметрический γ -зонд для каналов контроля энерговыделения активной зоны ВВЭР-440 Армянской АЭС

В верхней части зонда, в герметичной конструкции, имеется электрический разъём для соединения с линией связи. Рабочая температура зонда – до 400 °С. Натурные испытания непосредственно на 2-м блоке Армянской АЭС показали их работоспособность в процессе всей кампании, адекватность показаний детекторов ситуации в активной зоне, хорошие динамические характеристики – постоянная времени составляла ~ 2 сек. Это иллюстрируется рис. 3, где представлена синхронная запись сигналов детекторов зонда и штатного ДПЗ при сбросе стержней АЗ.

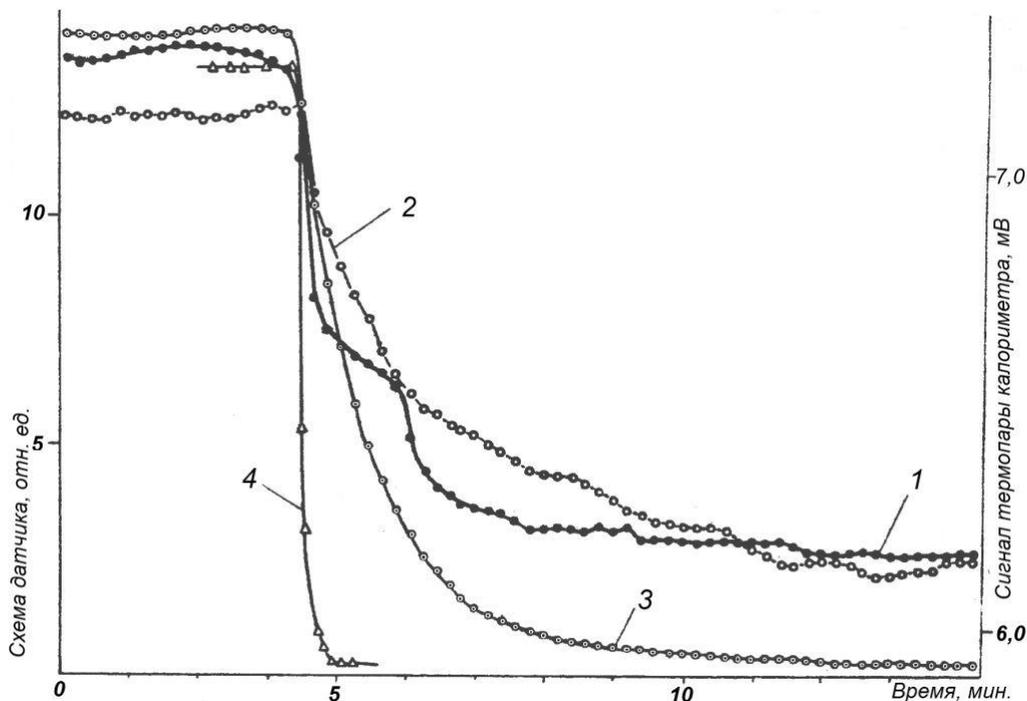


Рис. 3. Снижение показаний при сбросе аварийной защиты калориметра с образцом циркония (1), термопары (2), ДПЗ (3) и калориметра с образцом бора (4)

Проводившиеся периодически в процессе натуральных испытаний зондов градуировки детекторов на работающем реакторе (рис. 4) показали сохранение их градуировочных характеристик в течение всей кампании, что и подтвердило высокую метрологическую надёжность будущих первичных датчиков ЭСВРК «Севан».

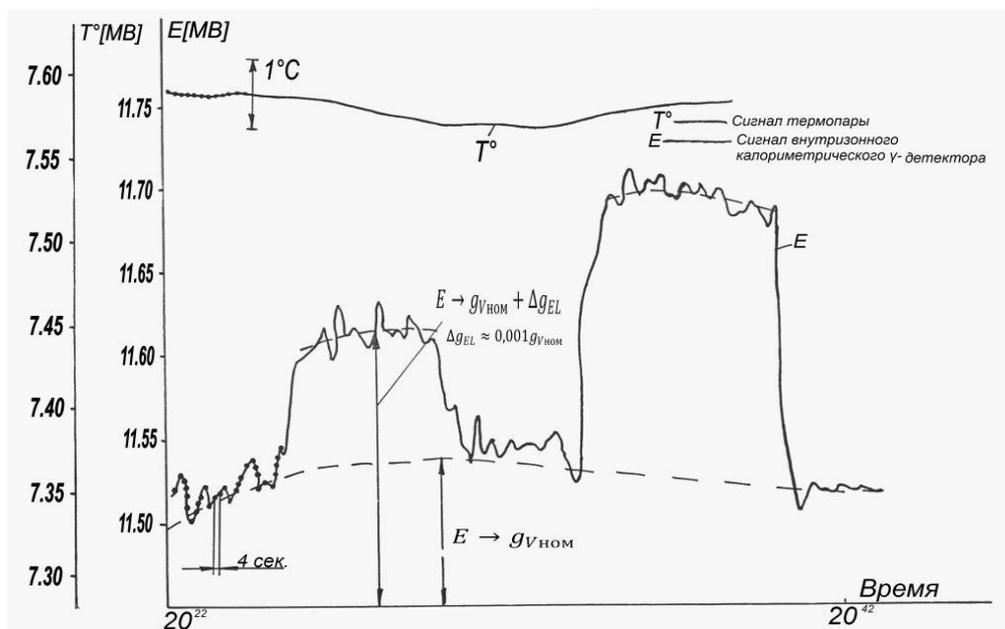


Рис.4 Градуировка внутризонного калориметрического γ -детектора ЭСВРК «Севан» в процессе работы реактора ВВЭР-440 на номинальной мощности

Хорошие динамические характеристики зондов «Севан», высокая информативность и надёжность их показаний были продемонстрированы в синхронных измерениях тепловой мощности реактора по тепловому балансу и по КГД, рассчитанных по алгоритмам и программам матобеспечения ЭСВРК «Севан» (рис. 5).

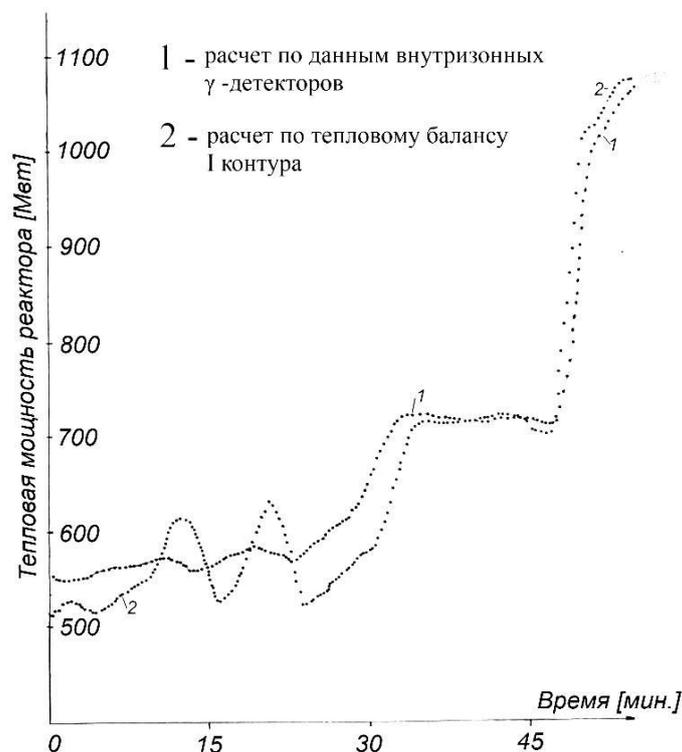


Рис. 5. Регистрация тепловой мощности реактора системой ВРК «Севан» в процессе выхода блока на номинальный режим

Эти эксперименты были первым подтверждением правильности алгоритма перехода от показаний калориметрических гамма-детекторов к энерговыделению в касетах, разработанного для матобеспечения ЭСВРК.

Расчётно-экспериментальное обоснование матобеспечения ЭСВРК «Севан»

Для полного, прямого подтверждения надёжности алгоритмов перехода и всей физической идеологии системы ВРК был проведен комплекс расчётов и специальных экспериментов на реакторе 2-го блока Армянской АЭС.

Расчётные исследования основывались на рассмотрении и расчёте источников гамма-излучения в реакторе и расчёте их пространственно-энергетического распределения в активной зоне. К рассмотрению были приняты две основные группы γ -излучения, важные для задач ВРК, первичное и вторичное. К первичному относятся мгновенное и запаздывающее гамма-излучение, ко вторичному – захватное, возникающее при (n, γ) реакции на уране-238, уране-235, плутонии-239, конструктивных материалах, шлаках, а также γ -излучение – тормозное, активационное и неупругого рассеяния нейтронов. Для каждой группы рассчитывался выход энергии и спектр гамма-квантов [3].

Далее, на основе нейтронно-физических расчётов [4-5] по программе БИПР-5 были рассчитаны интегралы деления и захвата и удельная мощность источников гамма-

излучения каждой группы. Это позволило определить суммарное значение удельной мощности γ -излучения и установить её связь с мощностью реактора.

Суммарное значение удельной мощности q_Σ всех источников γ -излучения, в момент времени t в точке r активной зоны можно записать как

$$q_\Sigma(\vec{r}, E, t) = [\chi_M(E) + \chi_\tau(E, t_s)] J_f(\vec{r}, t) + \sum_i \chi_c^i(E) \cdot J_c^i(\vec{r}, t) \quad , \quad (2)$$

где $\chi_M, \chi_\tau, \chi_c^i$ - выход энергии γ -квантов мгновенных, запаздывающих и захватных, $J_f(\vec{r}, t)$ и $J_c^i(\vec{r}, t)$ - интегралы деления и захвата. Для временных интервалов, в пределах которых все характеристики реактора остаются неизменными, отношение интегралов деления и захвата можно считать величиной постоянной в данной точке активной зоны

$$C_n = \frac{J_c^i(\vec{r}, \Delta t)}{J_f(\vec{r}, \Delta t)} \approx const \quad . \quad (3)$$

Значения C_n были рассчитаны для кассет разного обогащения и зашлакования и введены в итоговое расчётное уравнение

$$q_\Sigma(\vec{r}, E, t) = \left[\chi_M(E) + \chi_\tau(E, t_s) + \sum_i \chi_c^i(E) \cdot C_n^i \right] N_0 \cdot K_V(\vec{r}) \frac{N_{менл}(t)}{V_T} \quad (4)$$

$$J_f(\vec{r}, t) = N_0 \omega_T(\vec{r}, t) \quad , \quad (5)$$

где $N_0 = 3,07 \cdot 10^{10} \left[\frac{\text{дел}}{\text{см}^3 \cdot \text{сек}} \right]$ число делений в U^{235} , необходимых для высвобождения энергии 1 Вт за 1 секунду, а $\omega_T(\vec{r}, t) \left[\frac{\text{Вт}}{\text{см}^3 \cdot \text{сек}} \right]$ - удельное энерговыделение в топливе в момент времени t , в точке r активной зоны,

$$\omega_T(\vec{r}, t) = k_V(\vec{r}) \cdot \bar{\omega}_T(t) \quad (6)$$

$$\bar{\omega}_T(t) = \frac{N_{менл}(t)}{V_T} \quad (7)$$

$N_{менл}(t)$ - тепловая мощность реактора в момент t

V_T - объем топлива в активной зоне

$k_V(\vec{r})$ - объёмный коэффициент неравномерности в точке r .

Таким образом возможность использования КГД в системах ВРК обусловлена тем, что значительная часть мощности источников γ -излучения пропорциональна мощности реактора в рассматриваемый момент времени.

Согласно описанной выше методике были проведены расчёты по определению энергораспределения в кассетах с калориметрическими зондами и проведены сравнительные эксперименты измеренных и рассчитанных величин энерговыделения в калориметрических гамма-детекторах, расположенных в кассетах с различным выгоранием для 5-й и 6-й загрузок 2-го блока Армянской АЭС. Координаты кассет, обогащение и выгорание топлива в каждой из них и результаты сравнения приведены в таблицах 1, 2 и 3.

Экспериментальные и расчетные удельные энерговыделения в Таблица 1
образцах КГД (5-я загрузка 2 - го блока Армянской АЭС, N = 50% Nном.)

Координаты кассет	Обогащение %	Выгорание кг.шл/ту	q-эсп. вт/см ³	q-расч. вт/см ³	Отклонение %
11 - 42	3,6	27,4	5,65	5,42	-4,2
07 - 48	3,6	22,8	5,14	5,03	-2,1
15 - 32	3,6	14,7	4,97	5,07	+1,9
04 - 43	3,6	15,6	4,29	4,72	+9,0
16 - 27	3,6	4,0	4,98	4,85	+2,6
17 - 58	3,6	10,6	4,56	4,60	+0,8
01 - 42	3,6	2,6	4,12	4,28	+3,8
05 - 58	3,6	2,1	4,11	4,32	+5,1

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные удельные энерговыделения в
образцах КГД (6-я загрузка 2 - го блока Армянской АЭС, N = 38% Nном)

Координаты кассет	Обогащение %	Выгорание кг.шл/ту	q-эсп. вт/см ³	q-расч. вт/см ³	Отклонение %
07 - 48	3,6	9,8	3,81	3,68	-3,5
09 - 44	3,6	7,3	3,24	3,21	-0,8
04 - 43	3,6	24,4	3,89	3,69	-5,3
11 - 42	3,6	13,3	2,95	2,49	-15,5
06 - 41	3,6	12,8	3,53	3,12	-12,0
15 - 32	3,6	12,4	3,38	3,07	-9,3
01 - 42	3,6	0,5	1,79	1,79	0,0
17 - 58	3,6	0,8	2,39	2,52	+5,3
16 - 47	3,6	1,0	2,72	2,79	+8,5

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные удельные энерговыделения
в образцах КГД (6-я загрузка 2 - го блока Армянской АЭС. N=Nном)

Координаты кассет	Обогащение %	Выгорание кг.шл/ту	q-эсп. вт/см ³	q-расч. вт/см ³	Отклонение %
07- 48	3,6	9,8	12,01	9,15	-24,0
09 - 44	3,6	7,3	10,78	10,99	+2,0
04 - 43	3,6	24,4	8,78	8,57	-2,4
11 - 42	3,6	13,3	10,88	10,54	-3,2
06 - 41	3,6	12,8	10,84	10,63	-2,0
15 - 32	3,6	12,4	10,44	10,50	+0,6
01 - 42	3,6	0,5	5,91	6,13	+3,7
17 - 58	3,6	0,8	9,77	10,09	+3,3
16 - 47	3,6	1,0	10,37	9,56	-7,8

Из таблиц видно, что отклонения расчётных и экспериментальных значений энерговыделения в кассетах лежат в пределах погрешности расчётов и измерений.

Для полной проверки надёжности алгоритма перехода от показаний КГД к энерговыделению в кассете был разработан и реализован на 2-м блоке ААЭС длительный эксперимент, схема эксперимента представлена на рис. 6. в котором в одном и том же месте одновременно прямыми измерениями определялся поток быстрых нейтронов

спектра деления с энергией $E_n \geq 8$ МэВ и поток тех же нейтронов, рассчитанный по скорости делений в данной кассете, полученной по измеренным значениям энерговыделения в калориметрическом образце циркония через «алгоритм перехода...».



Рис. 6. Схема эксперимента по проверке надёжности алгоритма перехода от показаний детектора к энерговыделению в кассете

С этой целью было создано специальное экспериментальное устройство, устанавливаемое на входном раструбе пустого канала контроля ЭВ. В этом устройстве на входе в канал размещались одновременно две измерительных сборки. Одна, «Сборка-А» – с набором пороговых активационных детекторов для $E_{пор} \geq 8$ МэВ, другая сборка представляла собой подвижный калориметрический зонд «Севан-П» с одним КГД штатного исполнения. Обе сборки поочерёдно могли быстро перемещаться в активную зону и, либо сканировать энергораспределение, в случае зонда «Севан-П», либо облучать в течение нескольких минут активационные детекторы – «Сборка-А». Привод сборок размещался под защитным колпаком «верхнего блока» реактора.

Результаты эксперимента по проверке надёжности основного алгоритма ЭСВРК «Севан»

Таблица 4

Выгорание Н мм	80 МВт.сут/ Т урана		204 МВт.сут/ Т урана		236 МВт.сут/ Т урана		264 МВт.сут/ Т урана		336 МВт.сут/ Т урана	
	2500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	4,9E11	4,8E11	5,4E11	5,6E11	7,0E11	7,1E11	5,8E11	5,9E11	6,2E11	6,1E11
1500	6,0E11	6,1E11	8,1E11	7,7E11	8,2E11	8,6E11	6,7E11	6,7E11	6,7E11	6,8E11
1000	7,7E11	7,2E11	8,4E11	8,5E11	1,0E12	9,7E11	6,7E11	6,6E11	6,5E11	6,4E11
500	7,8E11	7,8E11	-	-	8,6E11	8,7E11	6,8E11	6,9E11	6,7E11	6,9E11
0	3,7E11	3,6E11	4,3E11	4,3E11	4,5E11	4,8E11	3,7E11	3,7E11	3,8E11	3,6E11
Детектор	„Севан“	Активаци	„Севан“	Активаци	„Севан“	Активаци	„Севан“	Активаци	„Севан“	Активаци

Результаты экспериментов, как это следует из таблицы, получены для кассеты при различном выгорании и для 2-х разных загрузок. Хорошее совпадение данных свидетельствует о надёжности разработанного алгоритма.

Выводы

ЭСВРК «Севан» была введена в опытную эксплуатацию на 2-м блоке Армянской АЭС в середине 1985 года и успешно работала, с перерывами, до конца 1988 года. После землетрясения в Спитаке ААЭС была остановлена. Останов и расхолаживание 2-го блока надёжно контролировалось системой «Севан». В течение эксплуатации была полностью подтверждена правильность заложенных в ней решений как в части детекторов, так и в части выбранной идеологии. В процессе разработки и наладки системы были получены интересные данные по качеству гамма-контроля. Например было установлено, что энерговыделение в циркониевом образце КГД непосредственно от кассеты с измерительным зондом составляет от 82% до 89 %, а параметры алгоритма очень мало зависят от месторасположения детектора и мало меняются в кассетах различного обогащения и зашлакования.

Высокие метрологические показатели калориметрических гамма-детекторов, связанные с наличием в них градуировочного элемента и, следовательно, с возможностью градуировки в рабочих условиях, а также природа самой измеряемой величины – энерговыделение, позволяют утверждать, что полученные результаты действительно открывают новые возможности создать совершенную СВРК на качественно новом, хорошем уровне.

В заключение мне хотелось бы вспомнить и поблагодарить за прекрасную плодотворную и напряжённую совместную работу моих коллег и друзей – сотрудников отдела «Методов и средств внутриреакторных измерений» ИЯИ: **И.А.Дурицкого**, **В.А.Семёнова**, – одних из идеологов и главных разработчиков направления внутриреакторной калориметрии; **А.И. Блановского**, **В.Н. Герасько**, **С.Б.Кумшаева**, **Ирину Лобач**, – разработчиков алгоритмического и программного обеспечения системы; **В.А.Матуру**, **В.П. Барильченко**, – разрабатывавших и налаживавших аппаратуру и вычислительные средства; **В.Д.Кудрявцева** и **А.С. Демского**, – разрабатывавших конструкцию и технологию калориметров и зондов; **С.Е.Беринбейна**, **В.И.Беляева**, **В.О.Самойленко**, **В.С.Федуна** и **В.Торгашова**, – техников-лаборантов физических испытаний нашей макетной группы, собиравших и налаживавших эти миниатюрные изделия и принимавших активное участие, вместе с инженерами, на всех этапах реакторных исследований и испытаний, которые, скажем прямо, были делом совсем не простым.

Особая благодарность **В.И.Митину** – многолетнему другу и коллеге, заведомо ИАЭ им.И.В.Курчатова, благодаря инициативе которого эта работа вообще состоялась.

Литература: 1. Н. Weiss, Atomkernenergie, 15, Nr.4, 1970. – 249 p.

2. Емельянов И.Я., Константинов Л.В., Постников В.В., Потапкин В.И., Серебренникоов Ю.М., Безынерционный контроль мощности реактора по интенсивности γ -излучения, Атомная энергия т. 29, вып. 4, 1970
3. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. «Защита от ионизирующих излучений» М., Атомиздат, 1980. – 540 с.
4. Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхутов М.С. «Основы теории и методы расчёта энергетических реакторов» М. Энергоиздат, 1982.
5. Шишков Л.К. «Методы расчёта диффуз.уравнений ядерного реактора» М. Атомиздат, 1976