

# Автоматизированная система обнаружения разгерметизации отработавших тепловыделяющих сборок при проведении отмывок в реакторах на быстрых нейтронах

Рассмотрены структура и принцип работы современной вне реакторной системы обнаружения дефектных тепловыделяющих сборок в гнездах отмывки для применения в реакторах на быстрых нейтронах. Представлен новый подход к идентификации состояния отработавшей тепловыделяющей сборки (ОТВС). Приведено описание алгоритма и программного обеспечения автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора системы обнаружения дефектных сборок в гнезде отмывки (СОДС-ГО).

Показано, что применение АРМ в реальных условиях помогает повысить эффективность работы оператора систем, а также проводить развернутый анализ состояния ОТВС.

**Ключевые слова:** система обнаружения дефектных сборок, реакторы на быстрых нейтронах, контроль герметичности оболочек твэлов, автоматизированное рабочее место, КГО, АРМ.

**О.И.Албутова, С.А.Гурьев,  
А.А.Кудряев, Д.А.Лукьянов,  
В.В.Шешукова**

Акционерное общество «Научно-технический центр «Диапром» (АО «НТЦД»), г.Обнинск  
Калужской обл.

Система обнаружения дефектных сборок в гнезде отмывки (СОДС-ГО) в реакторах на быстрых нейтронах осуществляет контроль герметичности оболочек твэлов, как правило, во время отмывки ОТВС. Проведение измерений и анализ результатов контроля проводится в соответствии с аттестованными методиками проверки на герметичность отработавших ТВС (МВИк СОДС-ГО) [1], разработанными авторами статьи.

Ранее негерметичность оболочек твэлов ОТВС определялась по критерию превышения показаний объемной активности газа из ГО над фоновыми показаниями перед проведением измерений ОТВС более чем в три раза. Простой для практического применения критерий является чрезмерно консервативным, и его применение существенно снижало чувствительность системы. Отличительной особенно-

стью нового подхода, реализованного в МВИк СОДС-ГО, является формирование верхней границы допуска G (допустимых результатов контроля) на основе «скользящего» стандартного образца, формируемого по выборке из 39 последних показаний СОДС-ГО для ОТВС, признанных герметичными. Разработанный алгоритм контроля подробно описан в разделе 2 и обеспечивает проведение многократной проверки каждой ОТВС, включенной в «скользящий» образец.

В процессе отмывки оператор СОДС-ГО вводит данные по результатам измерений и получает оперативный результат контроля ОТВС. Оперативность в данном случае необходима, так как от результатов контроля зависит способ помещения ОТВС в бассейн выдержки для дальнейшего хранения. ОТВС, которые после отмывки однозначно идентифицируются как дефектные, хранятся в бассейне выдержки в специальных пеналах.

Для обеспечения эффективности и надежности контроля авторами разработано программное обеспечение (ПО) АРМ СОДС-ГО для поддержки оператора СОДС-ГО реакторов БН-600 и БН-800. ПО обеспечивает удобный ввод данных при проведении контроля, статистическую обработку показаний системы СОДС-ГО в соответствии с методикой контроля, отображение результатов контроля, ведение архива измерений.

### **Система КГО современного реактора на быстрых нейтронах**

Внереакторная система обнаружения дефектных тепловыделяющих сборок в гнездах отмывки (СОДС-ГО) входит в состав системы контроля герметичности оболочек твэлов (КГО) современных реакторов на быстрых нейтронах [2].

Система КГО предназначена для контроля состояния (герметичности) оболочек твэлов ТВС как в процессе эксплуатации реактора

(оперативная часть), так и на остановленном реакторе и при отмывке отработавших ТВС (неоперативная часть). Система КГО обеспечивает контроль целостности базового барьера безопасности – оболочки твэла – и является системой, важной для безопасности.

Цели и задачи современной системы КГО – повышение безопасности эксплуатации реакторной установки (РУ) и хранения отработанного топлива в бассейне выдержки, способствование обеспечению высоких эксплуатационных показателей энергоблока.

Оперативная часть системы КГО реактора на быстрых нейтронах включает в себя следующие независимые системы:

- система КГО по запаздывающим нейтронам в теплоносителе первого контура;
- система КГО по активности газа в газовой полости реактора;
- система КГО по активности радионуклидов в жидкометаллическом теплоносителе первого контура.

Неоперативная часть системы КГО включает в себя следующие системы:

- реакторная система обнаружения дефектных ТВС на остановленном реакторе (совмещенная с перегрузочной машиной);
- внереакторная система обнаружения дефектныхборок в гнезде отмывки (СОДС-ГО), которая рассматривается в данной статье.

Система СОДС-ГО осуществляет контроль герметичности оболочек твэлов на остановленном реакторе во время отмывки ОТВС в гнездах пароводяной отмывки перед загрузкой ОТВС в бассейн выдержки. Автоматизированная часть СОДС-ГО обеспечивает измерение суммарной объемной активности газовой среды для определения дефекта оболочки твэла типа газовой неплотности [3] – **контроль по газу** и спектрометрический контроль отмывочных вод для поиска дефекта типа прямой контакт топлива с теплоносителем – **контроль по воде** (рис.1).

### Алгоритм контроля ОТВС

Контроль ОТВС по газу или воде проводится на основе результатов измерения диагностических параметров. При контроле по газу это активность газовой среды (азота или аргона), в которой выдерживается ОТВС, измеренная устройством детектирования типа УДГБ-201Е или аналогичным. При контроле по воде диагностическими параметрами являются скорости счета пиков полного поглощения радионуклидов  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{95}\text{Nb}$ , измеренные гамма-спектрометром. Полученные значения сравниваются с верхней границей допуска  $G$ , с учетом результата идентификации формируется заключение о герметичности проверяемой ОТВС.

### Контроль по газу

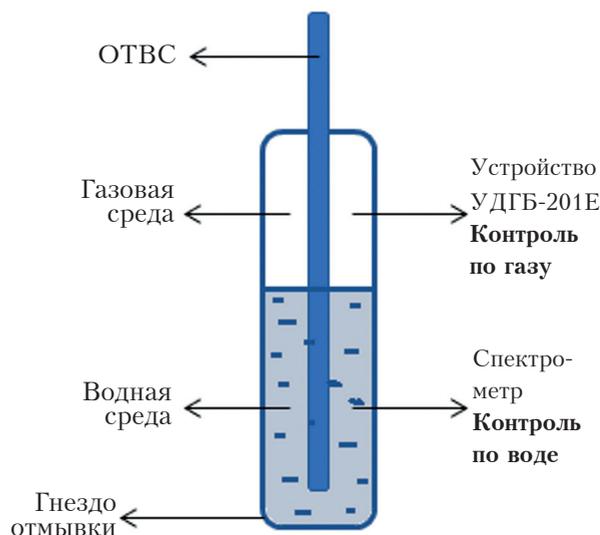
Размеры газового дефекта меньше, чем топливного, что создает трудности его определения. Для повышения надежности контроля по газу при определении верхней границы допуска применяется стандартный образец герметичной ОТВС.

#### *Формирование стандартного образца герметичной ОТВС при контроле по газу*

Стандартный образец герметичной ОТВС формируется на основе множества признанных герметичными ОТВС, диагностические параметры которых используются для определения верхней границы поля допуска  $G$ . Стандартный образец формируется при каждом новом измерении на основе показаний последних  $n$  ОТВС, признанных герметичными. По мере проведения измерений число ОТВС в стандартном образце увеличивается до объема 39 ОТВС (до  $n = 39$ ).

#### *Проведение идентификации ОТВС на герметичность при контроле по газу*

В качестве верхней границы допуска  $G$  при контроле по газу используется критерий



**Рис.1.** Схема измерений в гнезде отмывки системы СОДС-ГО.

Граббса с показателем достоверности контроля равного 0,05%. Соответствующие критические значения представлены в табл.1. Критерий Граббса рассчитывается как наибольшее по абсолютной величине отклонение от среднего в долях среднеквадратического отклонения (СКО) по формуле:

$$G_n = \max_i \frac{|A_i - \bar{A}_n|}{S_n}, \quad (1)$$

где:  $i$  – порядковый номер ОТВС;  $A_i$  – показание СОДС-ГО для  $i$ -й ОТВС (2);  $\bar{A}_n$  – среднееарифметическое значение показаний СОДС-ГО по выборке объема  $n$  (3);  $S_n$  – СКО показаний СОДС-ГО (4).

Расчет показания СОДС-ГО для  $i$ -й ОТВС производится по формуле:

$$A_i = N_i - N_i^\phi, \quad (2)$$

где:  $N_i$  – показание устройства детектирования (УД) во время контроля по газу  $i$ -й ОТВС;  $N_i^\phi$  – показание УД во время контроля собственного фона УД перед контролем  $i$ -й ОТВС.

В случае проведения многократного измерения фона УД, в качестве  $N_i^\phi$  принимается среднее значение результатов измерений.

**Табл.1.** Критические значения ( $G_n^T$ ) при уровне значимости 0,05 для наибольшего нормированного выборочного отклонения в зависимости от количества элементов анализируемой совокупности ( $n$ ) [5].

$n$	$G_n^T$	$n$	$G_n^T$	$n$	$G_n^T$	$n$	$G_n^T$
3	1,155	13	2,975	23	3,506	33	3,772
4	1,500	14	3,052	24	3,540	34	3,791
5	1,785	15	3,122	25	3,572	35	3,810
6	2,026	16	3,186	26	3,602	36	3,828
7	2,229	17	3,243	27	3,630	37	3,845
8	2,402	18	3,296	28	3,657	38	3,862
9	2,549	19	3,345	29	3,682	39	3,878
10	2,677	20	3,390	30	3,706	40	3,893
11	2,789	21	3,431	31	3,729	-	-
12	2,887	22	3,470	32	3,751	-	-

Если фон измерительной емкости существенно не изменился, то при формировании стандартного образца могут использоваться результаты измерений СОДС-ГО, полученных для предыдущей партии проверенных на герметичность ОТВС. При замене устройства детектирования или его дезактивации, а также иных изменений условий выполнения измерений и проведения проверок ОТВС, которые могут влиять на результаты измерений, создается новый стандартный образец ОТВС.

Среднеарифметическое значение показаний СОДС-ГО по выборке объема  $n$  рассчитывается по формуле:

$$\bar{A}_n = \sum_{i=1}^n A_i. \quad (3)$$

СКО показаний СОДС-ГО рассчитывается по формуле:

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A}_n)^2}. \quad (4)$$

Алгоритм отбраковки негерметичных ОТВС состоит из следующих шагов:

Выборка из первых трех показаний СОДС-ГО  $\{A_1; A_2; A_3\}$  представляется в графическом и табличном виде в хронологической последовательности в таблице Excel. По выборке вычисляется статистика  $G_i$ , которая сравнивается с соответствующим теоретическим значением

критерия Граббса  $G_i$  при выбранном уровне значимости:

- если  $G_i > G_i^T$ , то соответствующее  $A_i$  исключают из выборки стандартного образца как маловероятное значение. **При этом наличие положительного выброса в показаниях СОДС-ГО интерпретируется как признак наличия негерметичных твэлов в соответствующей ОТВС.** К оставшимся элементам выборки добавляют следующий в хронологической последовательности элемент, и анализ повторяется;
- если  $G_i \leq G_i^T$ , то на следующем этапе анализируется совокупность из первых четырех показаний СОДС-ГО: сравнивается вычисленное значение  $G_i$  и табличное  $G_i^T$  и т. д.

В целях сохранения оперативности принятия решения, при анализе выборки результатов измерений по газу с числом элементов менее или равным пяти, соответствующая ОТВС признается негерметичной, если показание УД во время ее контроля более чем в 3 раза превышает собственный фон УД перед ее контролем. Более того, при фиксации указанного события решение о негерметичности ОТВС принимается вне зависимости от наличия или отсутствия положительного выброса в показаниях СОДС-ГО на соответствующем шаге проведения идентификации ОТВС по критерию Граббса.

Максимальная по объему анализируемая выборка состоит из  $n$  показаний СОДС-ГО для герметичных ОТВС с присоединением следующего в хронологической последовательности элемента: сравнивается вычисленное значение  $G_n$  и табличное  $G_n^T$ . Если выполняется условие  $G_n \leq G_n^T$ , то присоединенный элемент остается в анализируемой совокупности, а из выборки стандартного образца удаляется первый в хронологической последовательности элемент.

Важно, что использование «скользящего» стандартного образца позволяет проводить

Рис.2. Форма ввода и предварительной обработки результатов измерений «по газу».

многократную проверку каждой признанной при первой контрольной процедуре герметичной ОТВС, так как при последующих 39 контрольных процедур эта ОТВС будет входить в состав различных стандартных образцов.

### Программная реализация

Для демонстрации работы АРМ СОДС-ГО в данной статье приводятся тестовые данные, полученные по результатам измерений.

При контроле по газу данные вводятся оператором в пользовательскую форму, приведенную на рис.2.

Число, вносимое на основной бланк, представляет собой среднее арифметическое серии периодических измерений. Измерения последовательно заносятся в соответствующие поля (1). Предварительно оценить текущее значение среднего арифметического без занесения в основной бланк можно в любой момент набора данных при нажатии на кнопку «Расчет среднего» (2). Перед занесением на основной бланк среднего значения необходимо удостовериться в отсутствии отклонения выборки вводимых данных от нормального распределения – кнопка «Нормальность» (3):

*H* – нормальное распределение;

*A* – отклонение по симметрии;

*Э* – отклонение по эксцессу;

*АЭ* – отклонение по симметрии и эксцессу.

Отклонение распределения от нормального может свидетельствовать об опечатке при вводе данных, резкому росту показаний вследствие неисправности оборудования и др. Функция проверки на нормальность позволяет избежать ошибок при вводе и отслеживать измерения в динамике.

После ввода исходных данных вывод результатов контроля производится на форме «Основной бланк» (рис.3).

«ОБ, фон, Бк/м<sup>3</sup>» – объемная активность в отмывочном боксе.

«ИЕ, фон, Бк/м<sup>3</sup>» – объемная активность в измерительной емкости ( $N_i^{\phi}$ ).

«ТВС, фон, Бк/м<sup>3</sup>» – объемная активность измерительной емкости при нахождении ОТВС в гнезде отмывки ( $N_i$ ).

При принятии решения о герметичности или негерметичности оболочки твэлов контролируемой ОТВС, в программном обеспечении АРМ СОДС-ГО предусмотрены следующие варианты диагнозов (колонка «Результаты контроля по газу» на рис.3):

- «Герметична» – ОТВС однозначно герметична;
- «?Герметична» – условно герметичная ТВС.

Пересчет															Экспорт								
Контроль по газу, А*10 <sup>4</sup>										Ввод		Контроль по воде, А										Ввод	
№ оп.	Об. фон, Бк/м <sup>3</sup>	ИЕ, фон, Бк/м <sup>3</sup>	ТВС, Бк/м <sup>3</sup>	ТВС / ИЕ, фон	Результат контроля по газу	Результат контроля качества измерений	Фон Cs137	ТВС Cs137	Фон Nb95	ТВС Nb95	Фон Cs134	ТВС Cs134	Фон Tm	ТВС Tm	Результат контроля по воде								
17	42,1	5,0	16,0	3,23	? Герметична	Норма	0,43	1,31	0,29	0,31	0,28	0,29	2,89	2,98	Не герметична								
18		4,0	6,8	1,70	Герметична	Норма	0,44	0,45	0,31	0,31	0,29	0,29	2,95	3,11	Герметична								
19		4,1	7,3	1,79	Герметична	Норма	0,47	0,46	0,32	0,31	0,29	0,29	3,27	3,15	Герметична								
20	37,6	6,1	6,7	1,10	Герметична	Норма	0,45	0,85	0,32	0,31	0,29	0,29	3,11	3,20	Герметична								
21			11,9	-	Сбой	Норма	0,45	0,85	0,30	0,33	0,29	0,31	3,09	3,44	Герметична								
22		5,9	11,3	1,92	Герметична	Норма	0,45	0,48	0,31	0,32	0,30	0,31	3,22	3,46	Герметична								
23	32,1	6,0	7,6	1,27	Герметична	Норма	0,46	0,47	0,32	0,33	0,30	0,30	3,36	3,40	Герметична								
24		5,5	11,1	2,01	Герметична	Норма	0,47	0,48	0,32	0,33	0,30	0,32	3,34	3,62	Герметична								
25		7,3	4,1	0,56	Герметична	Норма	0,48	0,48	0,33	0,33	0,31	0,31	3,39	3,45	Герметична								
26	27,6	4,5	100,0	22,00	Не герметична	Норма	0,47	0,48	0,32	0,33	0,30	0,31	3,37	3,51	Герметична								
27		4,9	20,0	4,11	? Герметична	Норма	0,47	0,46	0,32	0,31	0,30	0,32	3,34	3,62	Герметична								
28		9,2	10,0	1,08	Герметична	Норма	0,45	0,68	0,31	0,31	0,29	0,29	3,11	3,11	Герметична								
29	27,3	11,8	8,4	0,71	Герметична	Норма	0,44	0,79	0,31	0,31	0,29	0,29	3,01	3,10	Герметична								
30		8,0	9,0	1,13	Герметична	Норма	0,44	0,46	0,31	0,31	0,29	0,30	3,05	3,20	Герметична								
31		9,7	7,2	0,74	Герметична	Норма	0,46	0,44	0,31	0,30	0,29	0,28	3,15	2,92	Герметична								
32	21,0	7,2	7,7	1,07	Герметична	Норма	0,43	0,44	0,29	0,29	0,28	0,28	2,86	2,86	Герметична								
33	23,4	6,37	13,5	2,12	Герметична	Отклонение	0,43	0,44	0,29	0,31	0,28	0,30	2,84	3,07	Герметична								

Рис.3. Форма «Основной бланк».

Табл.2. Алгоритм формирования результата контроля герметичности ОТВС.

Диагноз	Объем выборки результатов измерений, $m$	Результат контроля по отношению показаний УД к фону УД (норма, если $N_i / N_i^{\text{ф}} < 3$ )	Результат контроля по критерию Граббса	Добавить результат измерения ОТВС в состав стандартного образца
Герметична	$m < 3$	норма	-	да
?Герметична (условно герметична)	$m < 3$	выше нормы	-	да
Герметична	$3 \leq m < n$	норма	норма	да
?Герметична	$3 \leq m < n$	выше нормы	норма	да
?Герметична	$3 \leq m < n$	норма	выше нормы	да
Негерметична	$3 \leq m < n$	выше нормы	выше нормы	нет
Сбой	$3 \leq m < n$	норма	ниже нормы	нет
Сбой	$3 \leq m < n$	выше нормы	ниже нормы	нет
Герметична	$m \geq n$	норма	норма	да
?Герметична	$m \geq n$	выше нормы	норма	да
Негерметична	$m \geq n$	норма	выше нормы	нет
Негерметична	$m \geq n$	выше нормы	выше нормы	нет
Сбой	$m \geq n$	норма	ниже нормы	нет
Сбой	$m \geq n$	выше нормы	ниже нормы	нет

С данным диагнозом ОТВС входит в стандартный образец. Но по мере того, как показания данной ТВС будут входить в разные стандартные образцы, диагноз может измениться;

- «Сбой» – недостаточно данных, либо отклонение по Граббсу ниже минимума;

- «Негерметична» – ОТВС однозначно негерметична.

Алгоритм формирования результата контроля герметичности ОТВС для различных объемов выборки результатов измерений ОТВС  $m$  и принятым объемом стандартного образца  $n$  приведен в табл.2. Также в таблице

№ операции	ОБ, фон, Бк/м <sup>3</sup> · 10 <sup>4</sup>	ИЕ, фон, Бк/м <sup>3</sup> · 10 <sup>4</sup>	Дисперсия ИЕ, фон, Бк/м <sup>3</sup> · 10 <sup>4</sup>	ТВС, Бк/м <sup>3</sup> · 10 <sup>4</sup>	Дисперсия ТВС, Бк/м <sup>3</sup> · 10 <sup>4</sup>	Показания СОДС-ГО по газу, Бк/м <sup>3</sup>	ТВС/ИЕ, фон	Результаты контроля по отношению к фону УД (норма, если A/Δφ < 3)	Результаты контроля по критерию Граббса	Включить в стандартный образец? 1 – да, 0 – нет
21				11,88	9,49	11,88	-	-	-	0
22		5,87	6,02	11,31	2,03	5,43	1,92	Норма	Норма	1
23	32,05	5,97	6,13	7,59	4,78	1,62	1,27	Норма	Норма	1
24		5,54	12,67	11,14	15,24	5,61	2,01	Норма	Норма	1
25		7,34	10,13	4,08	5,07	-3,26	0,56	Норма	Норма	1
26	27,55	4,55	13,21	100,00		95,46	22,00	Выше нормы	Выше нормы	0
27		4,87	2,79	20,00		15,13	4,11	Выше нормы	Норма	1
28		9,23	1,11	6,97	13,96	-2,26	0,76	Норма	Норма	1
29	27,27	11,79	10,43	8,38	10,38	-3,41	0,71	Норма	Норма	1
30		7,96	22,47	8,98	1,14	1,02	1,13	Норма	Норма	1
31		9,65	4,63	7,18	4,32	-2,47	0,74	Норма	Норма	1
32	21,00	7,20		7,70		0,50	1,07	Норма	Норма	1
33	23,40	6,37	1,39	13,52		7,15	2,12	Норма	Норма	1

Рис.4. Фрагмент листа «История\_и\_анализ». Основной блок.

указано – включать ли результаты контроля ОТВС в состав стандартного образца.

История измерений и результатов их статистической обработки заносится на отдельный лист «История\_и\_анализ». Наличие архива данных позволяет в начале новой отмывки в качестве стандартного образца использовать результаты прошлых измерений.

Процесс формирования выборки стандартного образца представлен на рис.5. В случае, если измерение не отнесено к стандартному образцу, оно записывается на лист «История\_и\_анализ», но не учитывается в расчетах по критерию Граббса. На отдельном листе по мере накопления информации автоматически выводится график результатов измерений при контроле по газу (рис.6).

### Внутренний контроль качества измерений

Внутренний контроль качества измерений проводится в соответствии с ОСТ 95 10289-2005 и предусматривает организацию оперативного контроля сходимости результатов измерений.

Оперативный контроль сходимости по газу проводится перед проведением намеренной к отмывке партии ОТВС на основе сравнения результатов измерений собственного фона УД в 6-и

последовательных сериях, состоящих из 6-и последовательных показаний УД в каждой серии. При отсутствии заметного радиоактивного загрязнения устройства детектирования стационарный источник излучения создается при заполнении измерительной камеры УД газом из ОБ в отсутствие его дальнейшего сброса в спецвентиляцию. Предлагается следующий алгоритм реализации контроля сходимости результатов измерений.

За результат измерения (фона УД, активности газа из ОБ) принимается среднее из шести последовательных показаний УД, полученное по формуле:

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i,j}, \quad (5)$$

где:  $j$  – номер измерения (серии)  $j = 1; 2; 3; 4; 5; 6$ ;  $i$  – номер показания УД в  $j$ -й серии;  $n$  – число показаний УД в серии,  $n = 6$ ;  $N$  – число измерений (серий),  $N = 6$ . При проведении серии из  $k$  измерений сходимость результатов измерений признается удовлетворительной, если выполняется следующий критерий:

$$\bar{X}_{max} - \bar{X}_{min} \leq d = Q(P, k) \cdot \sigma_{cx}, \quad (6)$$

где:  $\bar{X}_{max}$  – максимальный результат из  $k$  результатов измерений  $(\bar{X}_1; \bar{X}_2; \bar{X}_3; \bar{X}_4; \bar{X}_5; \bar{X}_6)$ ;

$\bar{X}_{min}$  – минимальный результат из  $k$  результатов измерений  $(\bar{X}_1; \bar{X}_2; \bar{X}_3; \bar{X}_4; \bar{X}_5; \bar{X}_6)$ ;  $d$  – норматив оперативного контроля сходимости;  $Q(P, n)$  – коэффициенты из табл.2;  $\sigma_{cx}$  – показатель сходимости результатов измерений.

Дополнительно проводится расчет выборочной дисперсии по выборке:

$$\{\bar{X}_1; \bar{X}_2; \bar{X}_3; \bar{X}_4; \bar{X}_5; \bar{X}_6\}.$$

$$D = \frac{1}{(N-1)} \sum_{j=1}^N (\bar{X}_j - \bar{X})^2, \quad (7)$$

Показатель сходимости  $\sigma_{cx}$  рассчитывается по множеству элементов ( $m = n \cdot N = 36$ ) обобщенной выборки показаний УД:

$$\{x_{i,1}\} \cup \{x_{k,2}\} \cup \{x_{l,3}\} \cup \{x_{m,4}\} \cup \{x_{p,5}\} \cup \{x_{r,6}\}:$$

$$\sigma_{cx} = \sqrt{\frac{1}{6(m-1)} \cdot \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{X})^2}, \quad (8)$$

где  $\bar{X}$  – обобщенное среднее по выборке  $\{\bar{X}_1; \bar{X}_2; \bar{X}_3; \bar{X}_4; \bar{X}_5; \bar{X}_6\}$ .

Провести сравнение выборочных дисперсий  $D$  и  $D_{cx} = (\sigma_{cx})^2$  с применением  $F$ -критерия [6]. Отличие максимальной и минимальной сравниваемых дисперсий не должно быть статистически значимым при уровне значимости ( $\alpha$ ) 0,05:

**Контроль показаний СОДС-ГО по критерию Граббса**

Включать в стандартный образец? (1=да, 0=нет)	Выборка стандартного образца	Размер выборки, n	Среднее значение, Бк/м <sup>3</sup>	СКО, Бк/м <sup>3</sup>	Минимальное значение, Бк/м <sup>3</sup>	Отклонение минимума от среднего, в СКО	Максимальное значение, Бк/м <sup>3</sup>	Отклонение максимума от среднего, в СКО	Критерий Граббса (0,05%)
1	11,04	1	-	0,00	11,04	-	11,04	-	-
1	2,80	2	6,92	5,83	2,80	0,71	11,04	0,71	-
1	3,25	3	5,70	4,64	2,80	0,62	11,04	1,15	1,15
1	0,61	4	4,43	4,56	0,61	0,84	11,04	1,45	1,50
0		5	5,92	5,17	0,61	1,03	11,88	1,15	1,79
1	5,43	5	4,63	3,97	0,61	1,01	11,04	1,61	1,79
1	1,62	6	4,13	3,76	0,61	0,93	11,04	1,84	2,03
1	5,61	7	4,34	3,48	0,61	1,07	11,04	1,93	2,23
1	-3,26	8	3,39	4,19	-3,26	1,59	11,04	1,83	2,40
0		9	13,62	30,94	-3,26	0,55	95,46	2,65	2,55
1	15,13	9	4,69	5,54	-3,26	1,44	15,13	1,88	2,55
1	-2,26	10	4,00	5,67	-3,26	1,28	15,13	1,96	2,68
1	-3,41	11	3,32	5,82	-3,41	1,16	15,13	2,03	2,79

Рис.5. Фрагмент листа «История\_и\_анализ». Контроль показаний СОДС-ГО по критерию Граббса.

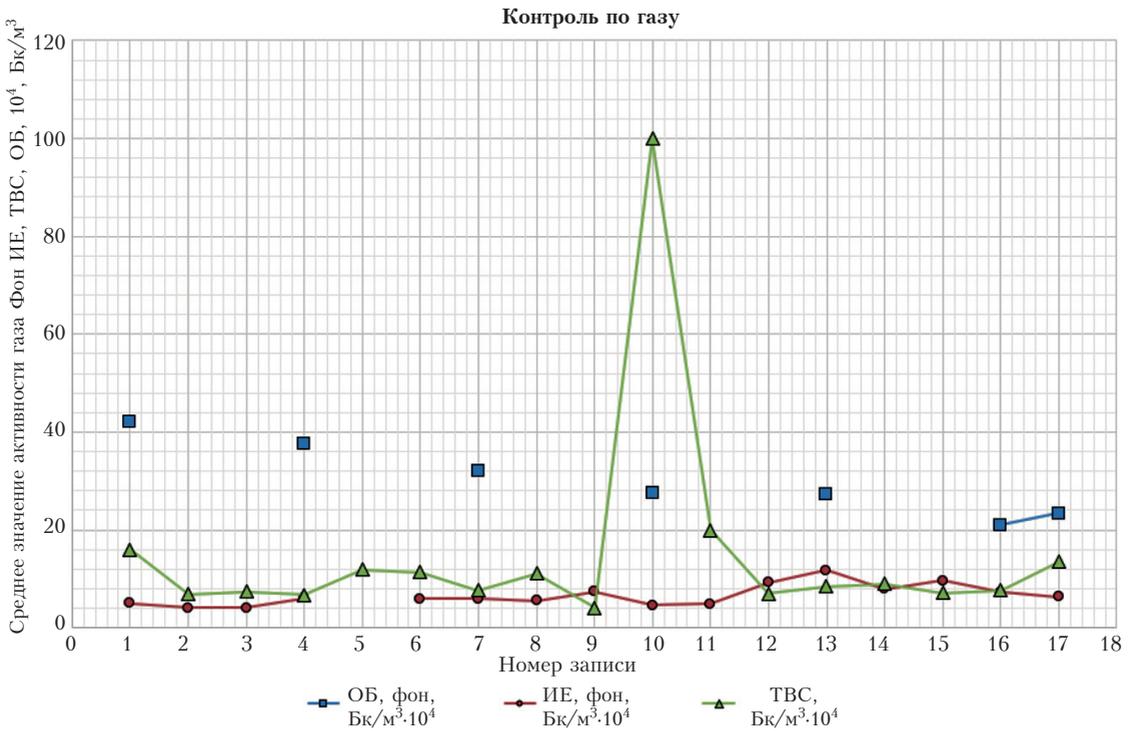


Рис.6. График показаний по газу.

#### Контроль по воде

|
22.07.2019
МК
ОГ

Ввод данных для Cs137

Фон Cs137 <input style="width: 90%;" type="text"/>	Расчет среднего	Нормальность
Ввод значений через пробел		
ТВС Cs137 <input style="width: 90%;" type="text"/>	Расчет среднего	Нормальность
Ввод значений через пробел		

---

Фон Nb95 <input style="width: 90%;" type="text"/>	Расчет среднего	Нормальность
Ввод значений через пробел		
ТВС Nb95 <input style="width: 90%;" type="text"/>	Расчет среднего	Нормальность
Ввод значений через пробел		

---

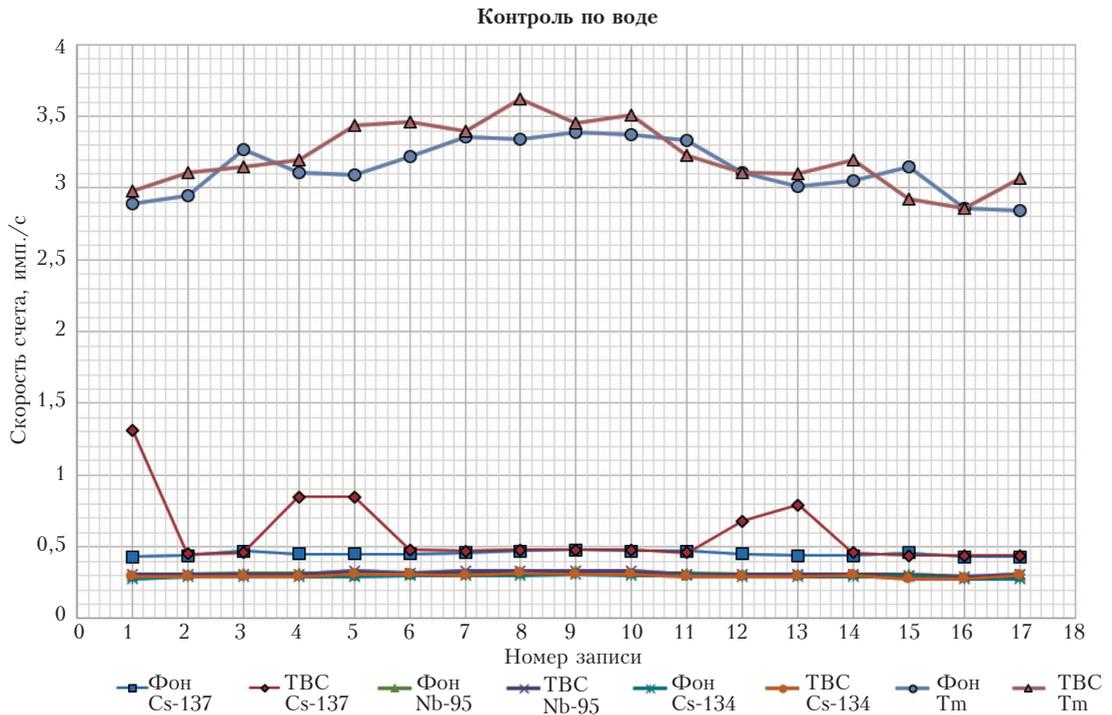
Фон Cs134 <input style="width: 90%;" type="text"/>	Расчет среднего	Нормальность
Ввод значений через пробел		
ТВС Cs134 <input style="width: 90%;" type="text"/>	Расчет среднего	Нормальность
Ввод значений через пробел		

---

Фон Tm <input style="width: 90%;" type="text"/>	Расчет среднего	Нормальность
Ввод значений через пробел		
ТВС Tm <input style="width: 90%;" type="text"/>	Расчет среднего	Нормальность
Ввод значений через пробел		

ОК
Отмена

Рис.7. Форма для ввода результатов измерений СОДС-ГО «по воде».



**Рис.8.** График показаний по воде.

$$\frac{D_{max}}{D_{min}} \leq F_{1-\alpha}(m-1; N-1) = F_{0,95}(35; 5) = 4,36, \tag{9}$$

либо

$$\frac{D_{max}}{D_{min}} \leq F_{1-\alpha}(N-1; m-1) = F_{0,95}(5; 35) = 2,48.$$

(Одно из двух приведенных критических значений выбирается в зависимости от числа степеней свободы у дисперсии, находящейся в числителе анализируемого соотношения), где:  $F_{1-\alpha}$  – соответствующий квантиль распределения Фишера;  $D_{min}$ ,  $D_{max}$  – минимальное и максимальное значения выборочных дисперсий.

При превышении норматива оперативного контроля качества измерения приостанавливаются для выяснения и устранения причины произошедшего изменения.

При проведении проверки ОТВС по воде критичным может оказаться ухудшение разрешения гамма-спектрометра. Контроль разрешения проводится при каждом измерении

программным обеспечением спектрометра по всегда присутствующей в спектре гамма-линии 835 кэВ  $^{54}\text{Mn}$ .

### Контроль по воде

При контроле герметичности по воде измеряемыми величинами являются скорости счета пиков полного поглощения реперных продуктов деления, содержащихся в обмывочной воде:  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . Данные нуклиды могут поступать в обмывочную воду в случае ее контакта с открытым топливом, что позволяет определить дефект типа контакт топлива с теплоносителем.

Данные измерения вводятся через отдельную форму (рис.7) и сохраняются в таблице результатов измерений вместе с измерениями по газу в строке с соответствующим номером операции (рис.3).

По результатам архивирования информации автоматически строятся графики для проведения визуального контроля результатов (рис.8).

Контроль качества измерений по воде проводится с использованием программного обеспечения, которое входит в состав спектрометра. Результатом работы программы по контролю качества измерений является исчерпывающий статистический анализ параметров системы с возможностью просмотра отчетов и графиков параметров системы.

ОТВС идентифицируется как содержащая негерметичные твэлы с открытым топливом, если:

- ОТВС идентифицирована как негерметичная по газу;
- все реперные ППП достоверно зарегистрированы в спектре обмывочной воды контролируемой ОТВС;
- появление активности других ПД, зарегистрированных в обмывочной воде, дополнительно свидетельствует о контакте топлива с теплоносителем.

ОТВС, которые после отмывки однозначно идентифицируются как дефектные по топливу, хранятся в бассейне выдержки в специальных пеналах.

## Заключение

Представлен универсальный подход к идентификации состояния оболочки твэлов в составе ОТВС реактора на быстрых нейтронах по результатам комплекса измерений системы обнаружения дефектныхборок в гнезде отмывки (СОДС-ГО).

Разработан алгоритм контроля герметичности ОТВС на основе применения критерия Граббса к стандартному образцу выборки результатов измерений. Разработанный алгоритм является более точным за счет многократной проверки каждой ОТВС.

Представлена структура и экранные формы автоматизированного рабочего места оператора АРМ СОДС-ГО, функционирующее на основе разработанного алгоритма контроля ОТВС. АРМ СОДС-ГО позволяет оперативно производить расширенный статистический анализ данных, что позволяет определять состояние ОТВС непосредственно при проведении отмывки.

Программное обеспечение АРМ СОДС-ГО разрабатывалось в сотрудничестве со специалистами Белоярской АЭС и в настоящее время применяется при отмывках ОТВС на 3 и 4 блоках Белоярской АЭС.

## Литература

1. Методика проверки на герметичность отработавших ТВС на энергоблоке №3 Белоярской АЭС (МВИк СОДС-ГО). АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». г. Обнинск. ФР.3.38.2019.00084.
2. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А., Лукьянов Д.А., Шутов С.С., Хрячков В.А., Албутова О.И., Болтунов А.Н. (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), Зверев И.Д., Керекеша А.В., Саляев А.В., Староверов А.И., Осипов С.Л. (АО «ОКБМ Африкантов»). Современные системы КГО перспективных реакторов на быстрых нейтронах // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2017. № 2. С. 2-12.
3. НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций.
4. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
5. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 208 с.
6. ГОСТ Р 50779.10-2000 (ИСО 3534.1-93). Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения.

## Automated System for Detecting Depressurization of Spent Fuel Assemblies During Washing in Fast Reactors

Albutova Olga, Guryev Sergey, Kudryaev Andrey, Lukyanov Dmitry, Sheshukova Viktoria  
Joint-Stock Company Scientific and Technical Center «Diaprom» (JSC «STCD»), Kaluga region, Obninsk,  
Russia

**Abstract.** The structure and operating principle of a modern out-of-reactor system for detecting defective fuel assemblies in wash nests for use in fast reactors are considered. A new approach to identifying the state of a spent fuel assembly (SFA) is presented. The description of the algorithm and software of the automated workstation (AWS) of the operator of the system for detecting defective assemblies in the cleaning nest (SODS-GO) is given.

It is shown that the use of the AWS in real conditions helps to increase the efficiency of the system operator, as well as to conduct a detailed analysis of the state of spent fuel assemblies.

**Keywords:** *system for detecting defective assemblies, fast neutron reactors, fuel cladding tightness control, automated workstation, AWS.*

*О.И.Албутова (к.т.н., вед.инж.), С.А.Гурьев (вед.инж.), А.А.Кудряев (зам.ген.директора, тех.директор), Д.А.Лукьянов (к.т.н., нач.отд.), В.В.Шешукова (инж.)*

*Акционерное общество «Научно-технический центр «Диапром» (АО «НТЦД»), г.Обнинск  
Калужской обл.*

*Контакты: sheshukovaov@diaprom.ru*