

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ КГО ПО ГАЗУ В РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

А.А. Кудряев, Д.А. Лукьянов, С.А. Гурьев, М.И. Степоржинская

АО «Научно-технический центр «Дианпром»

249031, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королёва, д. 6, пом. 22-23



Рассматриваются технические средства, методы и алгоритмы современной газовой системы контроля герметичности оболочек твэлов (КГО) реактора на быстрых нейтронах. Показана эффективность применения специализированного блока измерения суммарной объемной активности (ГС КГО-М) на основе ионизационной камеры. По результатам комплексного анализа результатов измерений объемной бета- и гамма-активности газа из газовой полости реактора БН-600 предложены методы и алгоритмы, позволяющие

- обнаруживать газовую разгерметизацию твэла на ранней стадии ее возникновения;
- проводить оценку суммарной объемной активности реперных радионуклидов в газовой полости реактора по результатам измерений на удаленном участке газовой петли;
- определять чувствительность измерительных каналов ионизационной камеры к бета-частицам.

Рассмотренные технические средства, методы и алгоритмы повышения эффективности систем КГО по газу предназначены для использования на энергоблоках и исследовательских реакторах на быстрых нейтронах типа БН, МБИР, БРЕСТ.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, контроль герметичности оболочек твэлов (КГО), система КГО, измерение объемной активности газа.

ВВЕДЕНИЕ

Система контроля герметичности оболочек твэлов (КГО) реакторов на быстрых нейтронах обеспечивает оперативный контроль состояния оболочек твэлов тепловыделяющих сборок (ТВС) в процессе эксплуатации реактора, а также неоперативный контроль ТВС на остановленном реакторе и вне реактора при проведении отмывки отработавших ТВС [1]. Соответственно, в состав комплекса систем КГО современного реактора на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем включены

- система КГО по запаздывающим нейтронам от осколков деления в теплоносителе первого контура;
- система КГО по активности газа в газовой полости реактора;
- система КГО по активности радионуклидов в теплоносителе первого контура;
- реакторная система обнаружения дефектных ТВС в активной зоне на остановленном реакторе, совмещённая с механизмом перегрузки;

© А.А. Кудряев, Д.А. Лукьянов, С.А. Гурьев, М.И. Степоржинская, 2022

– вне реакторная система обнаружения дефектных сборок в гнезде отмытки отработавших ТВС.

Физические методы, используемые при решении задач КГО, основаны на регистрации активности основных технологических сред (теплоноситель первого контура, защитный газ в газовой полости реактора), а также технологических сред, в которые могут выходить продукты деления ядерного топлива через дефекты в оболочке твэла.

Повышенные эксплуатационные требования к системам КГО реакторов на быстрых нейтронах обусловлены тем, что нормативные пределы (предел безопасной эксплуатации и эксплуатационный предел) повреждения твэлов реакторов типа БН в несколько раз более консервативны по сравнению с пределами, установленными для реакторов типа ВВЭР [2]. Кроме того, проектной документацией реакторов на быстрых нейтронах дополнительно устанавливается максимальный проектный предел повреждения твэлов – разрушение твэлов семи ТВС в локальном объеме активной зоны.

СИСТЕМА КГО ПО АКТИВНОСТИ ГАЗА В ГАЗОВОЙ ПОЛОСТИ РЕАКТОРА

Газовая система КГО реактора на быстрых нейтронах обеспечивает контроль герметичности твэлов как на начальной стадии образования дефекта оболочки твэла (газовая неплотность), так и на дальнейших стадиях развития дефекта, которые сопровождаются выходом из-под оболочки твэла газообразных и летучих осколков деления ядерного топлива.

В нормативном документе НП-082-07 [2] для действующих и проектируемых атомных станций с реакторными установками типа БН введены пределы повреждения твэлов – эксплуатационный предел и предел безопасной эксплуатации, согласно которым дефекты типа «газовая неплотность» должны составлять не более 0.05 и 0.1% от числа твэлов в активной зоне соответственно. На основании нормативных пределов формируются уставочные значения, с которыми сравниваются результаты измерений и по достижении которых газовая система КГО формирует предупредительные и аварийные сигналы.

Газовая система КГО обеспечивает контроль достижения нормативных переделов на основе измерения суммарной объемной активности (СОА) радионуклидов, а также определение объемной активности (ОА) реперных радионуклидов в пробах газа, отбираемого из газовой полости реактора (ГПР). Необходимо отметить, что в газе ГПР (далее «защитный газ») могут присутствовать газообразные и летучие радионуклиды, имеющие как осколочное происхождение (нуклиды ксенона, криптона, цезия), так и образующиеся при активации технологических сред (нуклиды аргона и неона) и не связанные с разгерметизацией твэлов.

В состав газовой системы КГО реактора БН-600 входит технологическая газовая петля для организации циркуляции газа из ГПР, на которой размещается блок измерения СОА газа и гамма-спектрометрическое оборудование для регистрации ОА реперных осколочных и активационных радионуклидов. Анализ нуклидного состава выходящего из твэлов газа позволяет в ряде случаев оценивать количество твэлов с поврежденными оболочками, определять зону реактора, в которой с наибольшей вероятностью произошла их разгерметизация (активная зона, боковая зона воспроизводства, внутриреакторное хранилище), выгорание и тип поврежденного топлива [3, 4].

Входящая в состав газовой системы КГО спектрометрическая система, имеющая достаточно высокую точность измерения ОА реперных радионуклидов при времени экспозиции около одного часа, не позволяет обеспечить своевременное реагирование на достижение аварийной уставки. Таким образом, достижение уставочных значений регистрируется по результатам измерения активности циркулирующего защитного газа из ГПР с помощью блоков измерения СОА газовых сред, имеющих более высокое быстродействие.

Необходимо отметить, что широко применяемые на ядерных реакторах блоки изме-

рения суммарной объемной активности газовых сред на основе бета-счетчиков Гейгера-Мюллера [5, 6] для решения задачи КГО реакторов на быстрых нейтронах недостаточно эффективны. В диапазоне регистрируемых энергий бета-частиц от 0.3 до 3.0 МэВ данные устройства не обеспечивают надлежащее измерение объемной активности основного осколочного радионуклида ^{133}Xe , имеющего «мягкий» спектр бета-частиц с максимальной энергией около 0.35 МэВ. При этом в рабочем диапазоне энергий обеспечивается эффективная регистрация активационного радионуклида ^{41}Ar (максимальная энергия бета-частиц 2.5 МэВ), высокая активность которого зависит от эксплуатационного режима и является изменяющимся фоном, маскирующим обнаружение осколочных радионуклидов на начальной стадии разгерметизации твэла.

Для использования в составе газовой системы КГО реактора БН-600 было разработано специализированное устройство измерения суммарной объемной активности газа ГС КГО-М. В отличие от блоков детектирования на основе бета-счетчиков Гейгера-Мюллера разработанный блок измерения СОА газа позволяет оперативно измерять суммарную объемную активность газовой среды в интервале от $1.0 \cdot 10^2$ до $1.0 \cdot 10^8$ МБк/м³ в диапазоне ожидаемых энергий регистрируемых бета-частиц.

Модернизированная газовая система контроля герметичности оболочек твэлов реактора БН-600 внесена в Государственный реестр средств измерения ГРСИ №62008-15 [7] и успешно эксплуатируется на блоке № 3 Белоярской АЭС с 2016 г.

Блок измерения СОА газа ГС КГО-М реализован на основе подвески с ионизационной камерой ПИКГ, разработанной специально для применения в системах газового КГО быстрых реакторов. ПИКГ содержит несколько ионизационных объемов, расположенных коаксиально. Внутренний проточный объем обеспечивает определение СОА газа во всем диапазоне ожидаемых значений энергий бета-частиц. Другие объемы герметичные, при этом ток, возникающий при ионизации среды в каждом из объемов, пропорционален интенсивности регистрируемого бета-излучения в соответствующем поддиапазоне энергии бета-частиц.

По результатам измерения тока ионизационных объемов суммарная объемная активность защитного газа определяется во всем диапазоне ожидаемых значений. Кроме того, появляется возможность обнаруживать газовую разгерметизацию на ранней стадии за счет разделения составляющих активности, вызванных осколочными и активационными радионуклидами, а также оценивать состав выходящего из негерметичных твэлов газа.

РЕГИСТРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ЗАЩИТНОМ ГАЗЕ ГПР

Параметры бета-излучения основных газообразных и летучих радионуклидов в защитном газе ГПР [8] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры бета-излучения газообразных и летучих радионуклидов в ГПР

№	Нуклид	Период полураспада	Граничная энергия β -распада, МэВ (выход, %)	Средняя энергия β -распада, МэВ
1	2	3	4	5
1	Xe-133 (O)	5.24 сут	0.346 (99.3 %)	0.101
2	Xe-133m (O)	2.19 сут	γ , затем β 0.346	0.101
3	Xe-135 (O)	9.14 ч	0.909 (96.1 %)	0.308
4	Xe-135m (O)	15.29 мин	γ , затем β 0.909	0.308
5	Kr-85 (O)	10.76 г.	0.687 (99.6 %)	0.251
6	Kr-85m (O)	4.48 ч	0.841 (78.6 %)	0.290
7	-< >-		0.711 (0.29 %)	0.238
8	Kr-88 (O)	2.84 ч	0.521 (67.0 %)	0.165

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5
9	Kr-88 (O)	2.84 ч	2.913 (14.0 %)	1.233
10	Kr-87 (O)	1.27 ч	3.486 (40.7 %)	1.502
11	-< >-		3.889 (30.4 %)	1.695
12	Xe-138 (O)	14.08 мин	0.713 (32.6 %)	0.231
13	-< >-		2.290 (20.1 %)	0.908
14	-< >-		2.328 (13.8 %)	0.925
15	-< >-		2.724 (9.0 %)	1.107
16	Ar-41 (A)	1.827 ч	1.198 (99.2 %)	0.459
17	-< >-		2.492 (0.8 %)	1.077
18	Ar-39 (A)	269 лет	0.565 (100 %)	0.219
19	Ne-23 (A)	37.24 с	4.376 (67.0 %)	-
20	-< >-		3.936 (32.0 %)	-
21	Cs-137 (O)	30.08 г.	0.514 (94.7 %)	0.174
22	-< >-		1.176 (5.3 %)	0.416
23	Cs-134 (O)	2.065 г.	0.658 (70.2 %)	0.210
24	-< >-		0.089 (27.3 %)	0.023

Примечание. В колонке «Нуклид» введены обозначения (O) – для осколочных радионуклидов, (A) – для радионуклидов, образующихся при активации технологических сред

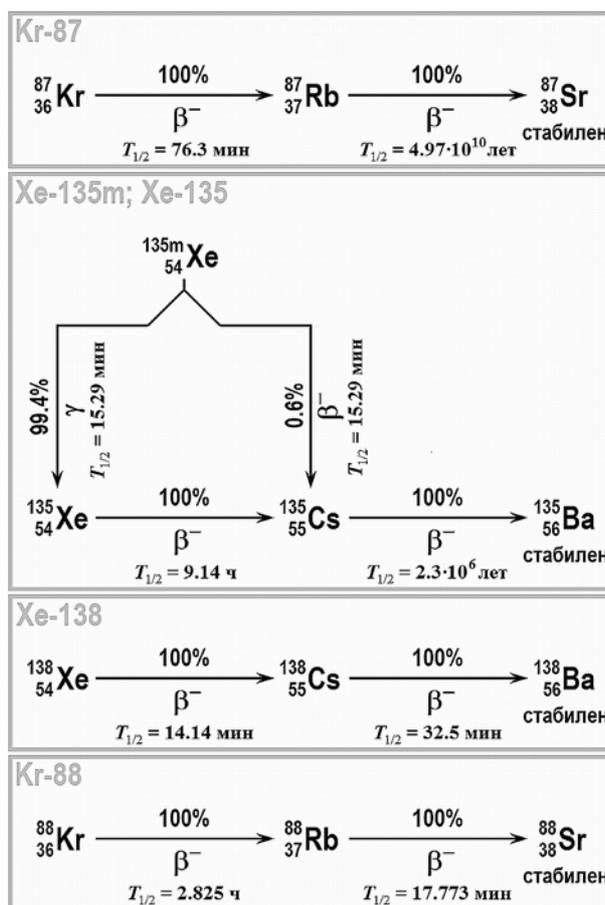


Рис. 1. Радионуклиды с дочерними нуклидами, претерпевающими бета-распад

Суммарная объемная бета-активность радионуклидов в пробах газа из ГПР, измеряемая при разгерметизации твэла, не исчерпывается суммой активностей газообразных и летучих реперных радионуклидов ксенона, криптона, аргона, цезия. На показания блока измерения СОА газа ГС КГО-М дополнительно оказывают влияние бета-активные радионуклиды, которые не регистрируются методом гамма-спектрометрии (например, ^{85}Kr , ^{39}Ar), а также дочерние бета-активные продукты распада осколочных радионуклидов.

После анализа цепочек распада газообразных и летучих радионуклидов, которые присутствуют в ГПР при разгерметизации твэлов, были отмечены радионуклиды, у которых дочерние нуклиды также претерпевают бета-распад; они показаны на рис. 1.

Поскольку периоды полураспада ^{87}Rb и ^{135}Cs велики, практического влияния на результаты измерения суммарной объемной бета-активности газа данные нуклиды не оказывают, и помимо влияния газообразных бета-активных осколочных радионуклидов на показания блока измерения СОА газа влияют аэрозоли ^{88}Rb и ^{138}Cs . Параметры дочерних радионуклидов в реакторном газе приведены в табл. 2 [8].

Таблица 2

Параметры бета-активных дочерних продуктов распада ИРГ

№	Нуклид	Период полураспада	Граничная энергия β -распада, МэВ (выход, %)	Средняя энергия β -распада, МэВ
1	Rb-87	$4.97 \cdot 10^{10}$ лет	0.282 (100%)	0.082
2	Cs-135	$2.3 \cdot 10^6$ лет	0.269 (100%)	0.075
3	Cs-138	32.5 мин	2.446 (44%)	1.200
4	Rb-88	17.773 мин	5.312 (76.51%)	2.371

Таким образом, контроль пределов повреждения твэлов, осуществляемый на быстрых реакторах по результатам измерения суммарной объемной бета-активности защитного газа ГПР, является не только более оперативным методом по сравнению с гамма-спектрометрией, но и носит более консервативный характер. Регистрируемая величина суммарной объемной бета-активности газа при разгерметизации твэлов должна превышать сумму объемных активностей газообразных гамма-активных радионуклидов, измеряемых по показаниям гамма-спектрометра.

ОБНАРУЖЕНИЕ ГАЗОВОЙ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТВЭЛА НА РАННЕЙ СТАДИИ

При отсутствии в быстром реакторе негерметичных по газу твэлов объемная активность газа в ГПР определяется преимущественно активностью ^{41}Ar , который образуется при активации технологических реакторных сред. В связи с малым периодом полураспада другого активационного нуклида ^{23}Ne при времени доставки пробы газа из ГПР до устройства измерения активности более 20-ти минут его объемная активность в точке измерения предельно низкая и практически не вносит вклад в результаты измерений СОА защитного газа.

На рисунке 2 представлен график тестовых данных, сформированных на базе результатов измерений объемной активности защитного газа ГПР по двум каналам блока измерения СОА газа ГС КГО-М и результатов измерения ОА радионуклида ^{41}Ar на гамма-спектрометре. По каналу 1 блока измерения СОА газа ГС КГО-М измеряется суммарная объемная активность газа во всем ожидаемом диапазоне энергии бета-частиц газообразных и летучих радионуклидов. По каналу 2 определяется ОА радионуклидов с энергией бета-частиц выше 1,0 МэВ.

Изменение ОА ^{41}Ar в процессе работы реактора связано, в первую очередь, с изменением мощности реактора. На участках данных I и III, представленных на рис. 2, мощ-

ность реактора составляла около 66% от номинальной мощности (W_H), на участках II и IV – около 100% W_H . При изменении мощности реактора ОА ^{41}Ar и показания каналов блока измерения СОА газа ГС КГО-М согласованно изменяются. Это обстоятельство позволяет проводить определение, контроль и корректировку коэффициентов чувствительности ионизационных измерительных каналов на основе сравнения их показаний с результатами спектрометрических измерений объемной активности ^{41}Ar .

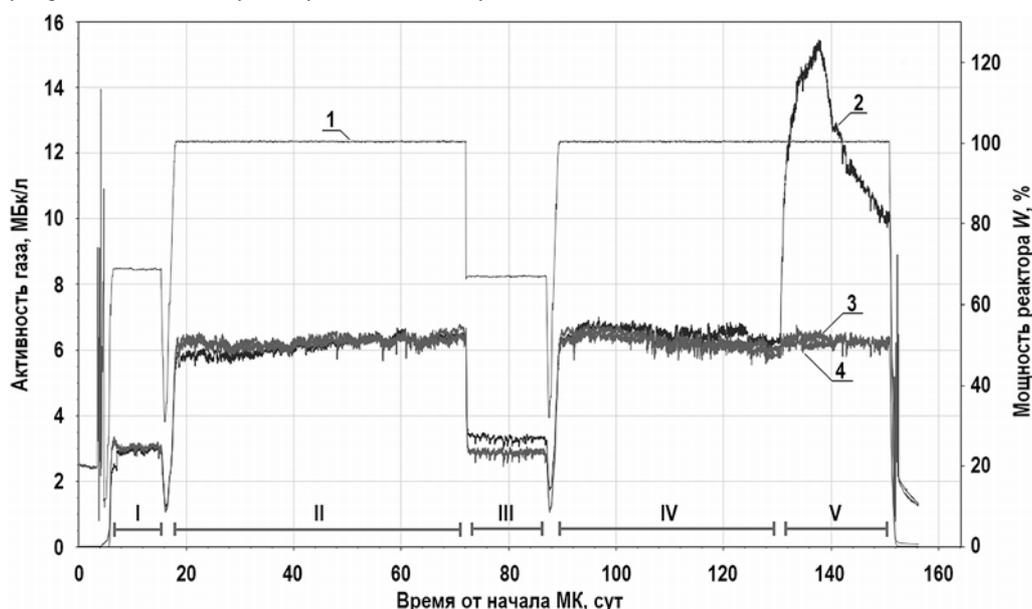


Рис. 2. Тестовые результаты измерения объемной активности проб газа из ГПР: 1 – мощность реактора W , %; 2 – СОА по каналу 1; 3 – ОА по каналу 2; 4 – ОА Ar-41 (спектр.)

Результаты измерения объемной активности на участке V рис. 2 соответствуют работе реактора с газовым дефектом оболочки твэла. Наблюдается рост суммарной объемной активности газа по каналу 1. По каналу 2 рост объемной активности газа существенно меньше. Результаты спектрометрических измерений объемной активности активационного радионуклида ^{41}Ar при разгерметизации твэла не изменяются.

Суммарная объемная активность газа из ГПР определяется по показаниям канала 1 A_1 и включает в себя объемные активности осколочных и активационных радионуклидов. Изменение активности осколочных радионуклидов при разгерметизации твэла (участок V) влияет на показания канала 2 A_2 существенно меньше, что определяется наличием у измерительного объема ПИКГ, который формирует показания канала 2, порога по энергии бета-частиц выше 1.0 МэВ. Таким образом, разность показаний измерительных каналов блока измерения СОА газа ГС КГО-М можно использовать как комплексный диагностический параметр, позволяющий обнаруживать появление осколочных радионуклидов в газе на ранней стадии возникновения разгерметизации твэла.

На рисунке 3 приведен график диагностического параметра A_0 – разности показаний измерительных каналов 1 и 2 блока измерения СОА, представленных на рис. 1:

$$A_0(t) = A_1(t) - A_2(t). \quad (1)$$

Видно, что значение диагностического параметра A_0 при отсутствии дефектов оболочки твэла близко к нулю, при газовой разгерметизации твэла наблюдается рост данного параметра. Также по графику, приведенному на рис. 3, можно отметить отсутствие значимых изменений параметра A_0 при изменении мощности реактора, что позволяет проводить эффективный контроль возникновения газового дефекта при работе реактора на различных уровнях мощности.

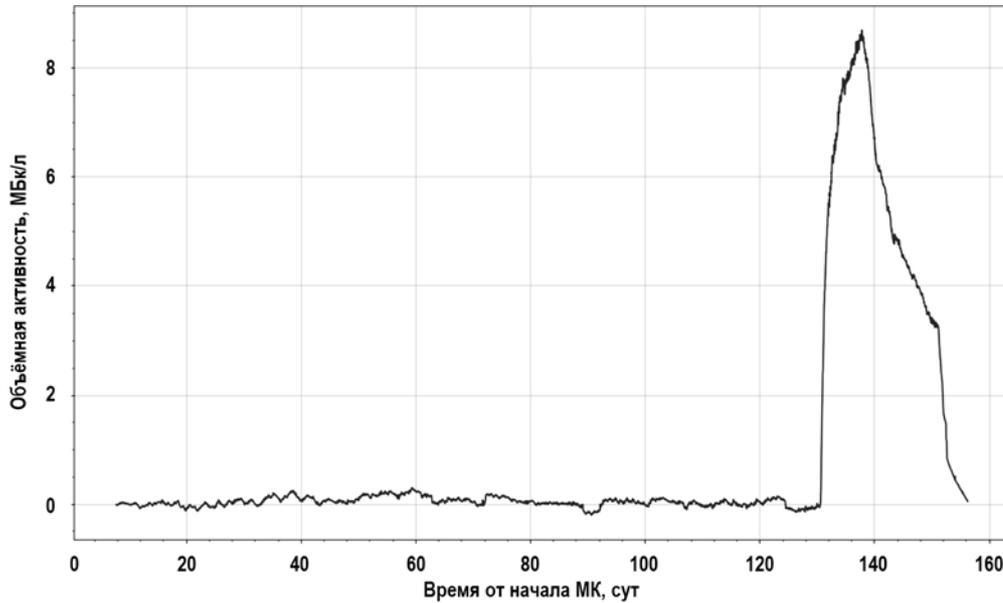


Рис. 3. Диагностический параметр A_0 – разность показаний двух измерительных каналов блока измерения СОА газа

Предлагаемый алгоритм оперативного контроля возникновения разгерметизации твэла учитывает сравнение разности показаний измерительных каналов блока измерения СОА с контрольной уставкой ~ 0.5 МБк/л (значение уставки может уточняться). При превышении контрольной уставки автоматически формируется предупредительный сигнал об открытии дефекта твэла.

ПРИВЕДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ К УСЛОВИЯМ ГПР

Достижение нормативных пределов повреждения твэлов определяется по сравнению результатов измерений СОА газа с уставочными значениями. При этом уставки рассчитываются для защитного газа в ГПР, что требует пересчета результатов измерений активности газа в удаленных точках контроля к условиям ГПР.

Для учета изменения плотности газа за счет различия температуры и давления в ГПР и на измерительных участках газовой петли КГО используется режимный коэффициент

$$K = [(1 + P_{ГПР}) / (1 + P_{ИУ})] \cdot T_{ИУ} / T_{ГПР}, \quad (2)$$

где $P_{ИУ}$, $P_{ГПР}$ – избыточные давления газа в измерительном участке и газовой полости реактора, бар; $T_{ИУ}$, $T_{ГПР}$ – абсолютные температуры газа в измерительном участке и газовой полости реактора, К.

Для короткоживущих нуклидов необходимо учитывать радиоактивный распад за время транспорта газа из ГПР до измерительной емкости спектрометрического участка газовой петли. Таким образом, полученная по результатам спектрометрических измерений объемная активность i -го реперного радионуклида $A_{ИЭ}^i$ в измерительной емкости может быть пересчитана к ОА в ГПР $A_{ГПР}^i$ по формуле

$$A_{ГПР}^i = (A_{ИЭ}^i / K) \exp(\lambda_i \cdot \tau), \quad (3)$$

где τ – транспортное время; λ_i – постоянная распада i -го радионуклида.

При приведении к условиям ГПР показаний измерительных каналов блока измерения СОА газа учет изменения плотности среды также производится с использованием режимного коэффициента (2). Однако при наличии в защитном газе смеси газообраз-

ных и летучих радионуклидов с различными периодами полураспада проведение учета транспортного времени по формуле (3) не представляется возможным, что приводит к различию результатов определения активности защитного газа в ГПР на спектрометрическом участке и ГС КГО-М.

Для оценки суммарной объемной активности реперных радионуклидов в ГПР по результатам измерений на удаленном участке газовой петли предлагается следующий подход.

1. Суммарная объемная активность газа в ГПР A_{COA} включает в себя суммарные объемные активности осколочных $A_{ОСК}$ и активационных $A_{АКТ}$ радионуклидов:

$$A_{COA}(t) = A_{ОСК}(t) + A_{АКТ}(t). \quad (4)$$

2. Для определения $A_{АКТ}$ используются результаты спектрометрических измерений ОА ^{41}Ar (A_{Ar41}), которые приводятся к условиям ГПР по формуле (3):

$$A_{АКТ}(t) = (A_{Ar41}(t)/K)\exp(\lambda_{Ar41}\cdot\tau). \quad (5)$$

3. Суммарная объемная активность осколочных радионуклидов $A_{ОСК}$ определяется по результатам измерения суммарной объемной активности газа в точке контроля A_1 за вычетом ОА ^{41}Ar с учетом режимного коэффициента. Поскольку изменение объемной активности основной части осколочных радионуклидов в защитном газе за счет транспортного времени незначительно (см. табл. 1), то дополнительного пересчета величины $A_{ОСК}$ к условиям ГПР не требуется.

$$A_{ОСК}(t) = (A_1(t) - A_{Ar41}(t))/K. \quad (6)$$

4. С учетом выражений (4) – (6) комплексный параметр A_{COA} , позволяющий оценивать суммарную объемную активность газа в ГПР, рассчитывается как

$$A_{COA}(t) = [A_1(t) - A_{Ar41}(t)\cdot(1 - \exp(\lambda_{Ar41}\cdot\tau))] / K. \quad (7)$$

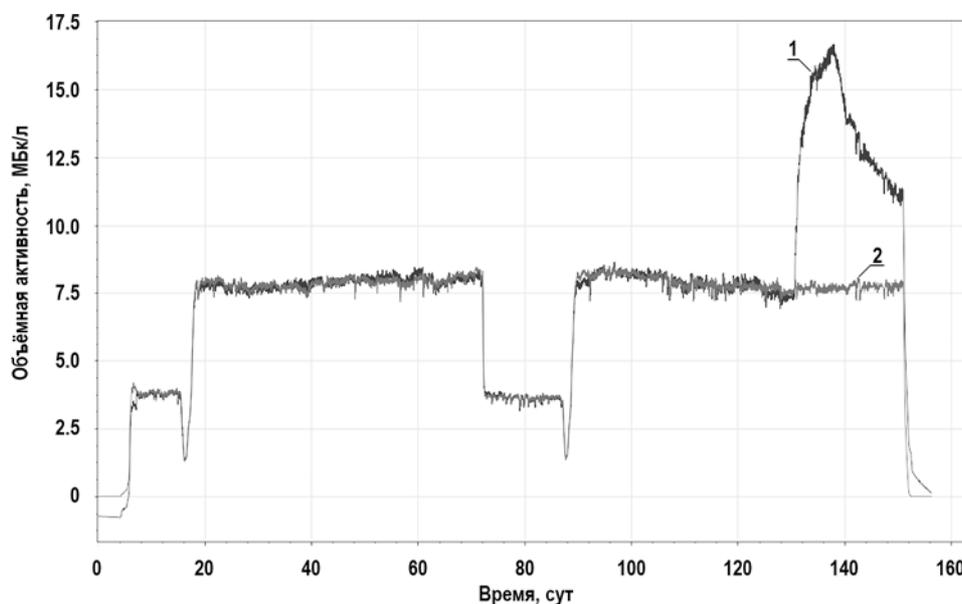


Рис. 4. Комплексная оценка суммарной объемной активности реперных нуклидов в ГПР и результаты спектрометрических измерений ОА ^{41}Ar : 1 – комплексный параметр COA в ГПР; 2 – ОА Ar-41

На рисунке 4 приведены графики комплексного параметра A_{COA} , рассчитанного по тестовым показаниям блока измерения COA газа ГС КГО-М (см. рис. 1) и результатам спектрометрических измерений ОА ^{41}Ar в ГПР.

Можно отметить хорошее согласие оценки COA реперных нуклидов и результатов

определения ^{41}Ar в ГПР. При возникновении дефекта оболочки твэла и появления в защитном газе осколочных радионуклидов значения комплексного параметра A_{COA} ожидаемо превышают значения ^{41}Ar в ГПР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование современных технических средств измерения суммарной объемной бета-активности радионуклидов на основе ионизационной камеры ПИКГ обеспечивает эффективное функционирование газовой системы КГО реактора на быстрых нейтронах и позволяет обнаружить разгерметизации твэла на ранней стадии за счет разделения составляющих активности, вызванных осколочными и активационными радионуклидами.

Комплексный анализ результатов измерения суммарной объемной активности защитного газа из ГПР при различных диапазонах энергии бета-частиц и результатов измерения объемной активности реперных нуклидов в газе методом гамма-спектрометрии позволяет

- обнаруживать газовую разгерметизацию твэла на ранней стадии ее возникновения;
- по результатам измерений на удаленном участке газовой петли проводить оценку суммарной объемной активности реперных радионуклидов в газовой полости реактора;
- определять чувствительность измерительных каналов ионизационной камеры к бета-частицам.

Рассмотренные в статье технические средства и методы повышения эффективности систем КГО по газу могут быть использованы на энергоблоках и исследовательских реакторах на быстрых нейтронах типа БН, МБИР, БРЕСТ.

Литература

1. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А., Лукьянов Д.А. и др. Современные системы КГО перспективных реакторов на быстрых нейтронах. // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2017. – № 2 (89). – С. 2-11. Электронный ресурс: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29237482> (дата доступа 25.04.2022). eLIBRARY ID: 29237482, EDN: YPUXDJ.
2. НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. – № 1. – С. 52-77. Электронный ресурс: http://gostrf.com/norma_data/52/52470/index.htm (дата доступа 25.04.2022).
3. Росляков В.Ф., Лисицын Е.С., Гурьев С.А., Зобнин Н.А. Спектрометрическая система КГО реактора БН-600. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – № 1. – С. 13-17. Электронный ресурс <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2005/01.pdf> (дата доступа 25.04.2022).
4. Lukyanov D.A., Skomorokhov A.O. Bayes Diagnostic System to Locate the Defected Fuel Assembly Zone on BN-600 Reactor. // BgNS Transactions. – 2005. – Vol. 10. – No 1. – PP. 305-310.
5. Устройство детектирования УДГБ-201Е. Электронный ресурс: <https://www.imf.ru/section/bloki-i-ustroystva-detektirovaniya-nepriyvnogo-kontrolya/ustroystvo-detektirovaniya-udgb-0> (дата доступа 25.04.2022).
6. Устройство детектирования УДГБ-202Е. Электронный ресурс: <https://www.imf.ru/section/bloki-i-ustroystva-detektirovaniya-nepriyvnogo-kontrolya/ustroystvo-detektirovaniya-udgb> (дата доступа 25.04.2022).
7. Система контроля герметичности оболочек твэлов газовая ГС КГО. Описание типа СИ. Электронный ресурс: <https://all-pribors.ru/opisanie/62008-15-gs-kgo-69873> (дата доступа 25.04.2022).
8. Сайт МАГАТЭ – Секция ядерных данных. Электронный ресурс: <https://nds.iaea.org/relnd/vcharhtml/VChartHTML.html#dcy2> (дата доступа 25.04.2022).

Поступила в редакцию 30.04.2022 г.

Авторы

Кудряев Андрей Алексеевич, первый заместитель генерального директора – технический директор

E-mail: kudryaev@diaprom.ru

Лукьянов Дмитрий Александрович, начальник отдела, канд. техн. наук

E-mail: dluk@diaprom.ru

Гурьев Сергей Александрович, ведущий инженер

E-mail: gurev@diaprom.ru

Степоржинская Маргарита Игоревна, инженер

E-mail: steporginskaya@diaprom.ru

UDC 621.039.564.5

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE FUEL CLADDING FAILURE DETECTION SYSTEM WITH RESPECT TO GAS IN LIQUID-METAL FAST BREEDER REACTORS

Kudryaev A.A., Lukyanov D.A., Guryev S.A., Steporzhinskaya M.I.

STC Diaprom JSC

6, Rooms 22, 23, Korolyov Str., 249031 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

The article discusses technical means, methods and algorithms of modern gas systems for detecting fuel cladding failures in liquid-metal fast breeder reactors (LMFBRs). These systems provide fuel cladding failure detection from the initial stage (gas leakage) to the further stages of defect development accompanied by the release of gaseous nuclear fuel fission fragments from the fuel cladding.

A typical gas system includes a loop through which the reactor cover gas circulates. The loop is equipped with units for measuring the total gas volumetric activity and spectrometric units for measuring the volumetric gamma-activity of reference noble gases. Modern gamma-spectrometers actually provide high measurement accuracy, but the exposure time is about 1 hour. Thus, the control of warning and emergency settings during the fuel cladding failure detection is provided by specialized detection blocks that work more quickly.

The developed gas-monitoring unit is based on an ionization chamber. It works in continuous mode and provides measurement of the total volumetric beta activity of the gaseous medium from $1.0 \cdot 10^2$ to $1.0 \cdot 10^8$ MBq/m³ for the entire range of expected energies of detected beta particles. It is shown that the specialized gas-monitoring unit is highly efficient for measuring the total volumetric activity of radioactive noble gases in the LMFBRs. According to the results of a comprehensive analysis of volumetric measurements of beta and gamma activity, the proposed methods and algorithms make it possible:

- to detect gas depressurization of fuel elements at an early stage of its occurrence;
- to evaluate (based on the results of remote measurements) the total volumetric activity of noble radionuclides in the reactor; and
- to determine the sensitivity of ionization chambers to beta particles.

The considered detection unit, methods and algorithms for increasing the efficiency of the gas systems for detecting fuel cladding failures are designed for use in power units and fast neutron research reactors of the BN, MBIR and BREST types.

Key words: LMFBR, fuel cladding failure detection systems, measurement of volumetric activity of inert gases.

REFERENCES

1. Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Kudryaev A.A., Lukyanov D.A., Shutov S.S., Khryachkov V.A., Albutova O.I., Boltunov A.N., Zverev I.D., Kereksha A.V., Salyaev A.V., Staroverov A.I., Osipov S.L. Modern Fuel Failure Detection Systems for Perspective Liquid-Metal Fast Breeder Reactors. *Apparatura i Novosti Radiatsionnykh Izmereniy* 2017, no. 2, pp. 2-11 (in Russian).
2. NP-082-07. Nuclear Safety Rules for Reactor Installations at Nuclear Power Plants. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopastnost'*. 2008, no. 1, pp. 52-77. Available at: http://gostrf.com/norma_data/52/52470/index.htm (accessed Apr. 25, 2022) (in Russian).
3. Roslyakov V.F., Lisicyn E.S., Gurev S.A., Zobnin N.A. Spectrometric System for Monitoring the Tightness of the Fuel Cladding for the BN-600 Reactor. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2005, no. 1, pp. 13-17. Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2005/01.pdf> (accessed Apr. 25, 2022) (in Russian).
4. Lukyanov D.A., Skomorokhov A.O. Bayes Diagnostic System to Locate the Defected Fuel Assembly Zone on BN-600 Reactor. *BgNS Transactions*. 2005, v. 10, no. 1, pp. 305-310.
5. Detection device UDGB-201E. Available at: <https://www.imf.ru/section/bloki-i-ustroystva-detektirovaniya-nepreryvnogo-kontrolya/ustroystvo-detektirovaniya-udgb-0> (accessed Apr. 25, 2022) (in Russian).
6. Detection device UDGB-202E. Available at: <https://www.imf.ru/section/bloki-i-ustroystva-detektirovaniya-nepreryvnogo-kontrolya/ustroystvo-detektirovaniya-udgb> (accessed Apr. 25, 2022) (in Russian).
7. Fuel Rod Cladding Tightness Control System Gas. Description of the Type of Measuring Instrument. Available at: <https://all-pribors.ru/opisanie/62008-15-gs-kgo-69873> (accessed Apr. 25, 2022) (in Russian).
8. IAEA – Nuclear Data Section. Available at: <https://nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html#dcy2> (accessed Apr. 25, 2022).

Authors

Kudryaev Andrey Alekseevich, First Deputy General Director – Technical Director
E-mail: kudryaev@diaprom.ru

Lukyanov Dmitry Aleksandrovich, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: dhluk@diaprom.ru

Guryev Sergey Alexandrovich, Leading Engineer
E-mail: gurev@diaprom.ru

Steporzhinskaya Margarita Igorevna, Engineer
E-mail: steporginskaya@diaprom.ru