

НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ МЕТОДОМ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

А. Н. Берлизов, И. А. Малюк, О. Ф. Рудык, В. В. Тришин, Р. В. Чиж

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Получены и проанализированы гамма-спектры теплоносителя первого контура водо-водяных ядерных реакторов (ВВЭР-1000 Ривненской, Хмельницкой и Запорожской АЭС, ВВР-М Института ядерных исследований НАН Украины), изучены требования нормативных документов и проведен анализ публикаций по радиационному контролю реакторов методом гамма-спектрометрии высокого разрешения. На основе проведенных исследований предложены наборы реперных радионуклидов для непрерывного контроля и исследования различных ядерно-физических процессов в активной зоне и технологических процессов первого контура водо-водяных реакторов.

Ключевые слова: гамма-спектрометрия, непрерывный контроль, теплоноситель первого контура, барьеры безопасности, водо-водяные ядерные реакторы.

Введение

Безопасность ядерных реакторов обеспечивается системой физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ при их возможном выходе из топлива в окружающую среду, а также внедрением системы технических и организационных мер по защите этих барьеров и сохранению их эффективности с целью защиты персонала, населения и окружающей среды [1, 2].

Система физических барьеров блока АЭС включает топливную матрицу, оболочку твэла, границу контура теплоносителя реактора, герметичное ограждение реакторной установки и биологическую защиту. Для радиационного контроля, как правило, ограничиваются тремя барьерами безопасности. Первый барьер – это топливная композиция и оболочки твэлов. При попадании продуктов деления (ПД) или продуктов активации (ПА) в теплоноситель их дальнейшему распространению препятствуют конструкции первого контура (ПК) – второго барьера безопасности. Наконец, при протечках ПК радиоактивные ПД и ПА задерживаются герметизацией помещений или защитной оболочкой – третьим барьером безопасности.

Согласно нормативным документам для оценки радиационного состояния активной зоны (АЗ) и теплоносителя первого контура (ТПК) требуется непрерывный контроль удельных активностей информативных (реперных) радионуклидов в ТПК.

Разработанные с участием Института ядерных исследований НАН Украины и интенсивно внедряемые на АЭС с реакторами типа ВВЭР комплексы СТПК-01 [4, 16] с возможностями беспроботборного дискретно-непрерывного анализа циркулирующего через байпасную линию

ТПК позволяют оперативно и надежно идентифицировать большое количество гамма-излучающих радионуклидов в диапазоне энергий (50 ÷ 3000) кэВ и определять их активности в диапазоне величин ($3,7 \cdot 10^3 \div 3,7 \cdot 10^8$) Бк/кг.

Получаемая при непрерывных измерениях информации о динамике активности ПД в комплексе с моделированием процессов выхода ПД из топлива [5 - 8] позволят отслеживать и интерпретировать процессы развития повреждений оболочек твэлов при работе реактора как на номинальной мощности, так и во время переходных режимов.

В настоящей работе получены и проанализированы гамма-спектры ТПК водо-водяных реакторов (ВВЭР-1000 Ривненской, Хмельницкой и Запорожской АЭС, ВВР-М ИЯИ), изучены требования нормативных документов по безопасной эксплуатации АЭС и сделан анализ публикаций, в которых изложены методы и результаты радиационного технологического контроля реакторов.

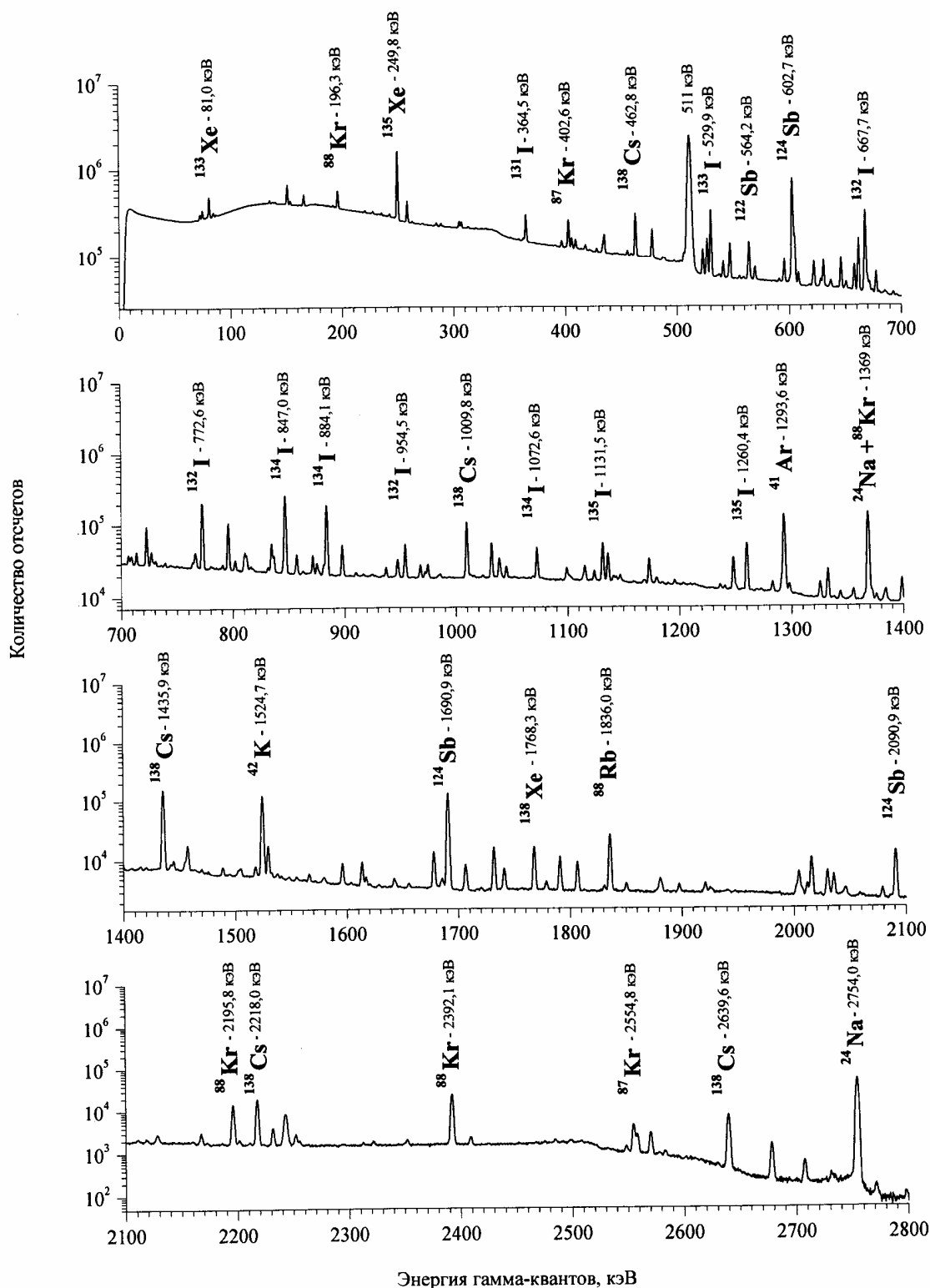
На основе проведенных исследований из массива обнаруживаемых в ТПК гамма-излучающих радионуклидов выбраны и предложены для непрерывного контроля наборы информативных (реперных) радионуклидов. Они сгруппированы в соответствии с предполагаемым их целевым использованием для контроля и исследования различных процессов в активной зоне и ТПК водо-водяных ядерных реакторов.

Гамма-излучение продуктов деления и активации в теплоносителе реакторов

С помощью спектрометрических систем нами были получены и проанализированы гамма-спектры циркулирующего по байпасной линии ТПК водо-водяных реакторов (ВВР-М и

ВВЭР-1000 Ривненской, Хмельницкой и Запорожской АЭС). Сложность спектров зависит от радиационного состояния активной зоны (поверхностного загрязнения и герметичности теп-

ловыделяющих сборок - ТВС), времени доставки теплоносителя до измерительного участка, наличия активируемых примесей в воде и эффективности очистительных фильтров.



Гамма-спектр теплоносителя реактора ВВЭР-1000.

В качестве примера на рисунке приведен типичный для реактора ВВЭР-1000 гамма-спектр ТПК, полученный на работающем на номиналь-

ной мощности энергоблоке № 3 Ривненской АЭС при допустимом количестве разгерметизированных ТВС. Измерительный тракт смонтирован на

базе детектора из сверхчистого германия ORTEC 43-TP41327B с относительной эффективностью 10 % и спектрометрического блока типа DSPEC jr™ с цифровым сигнальным процессором. Цена канала составляла 0,35 кэВ, энергетическое разрешение – 1,9 кэВ для $E_\gamma = 1332$ кэВ, входная загрузка тракта не превышала 10^4 и/с. Теплоноситель первого контура доставлялся по байпасной линии системы «АРКТУР», предусмотренной проектом для реакторов типа ВВЭР-1000. Время доставки теплоносителя от активной зоны реактора до измерительного участка байпасной линии составляло $(7,5 \pm 0,5)$ мин, что достаточно для распада короткоживущих продуктов деления и активации (в первую очередь ^{16}N и ^{19}O), усложняющих аппаратурный спектр.

Реперные нуклиды для оценки радиационного состояния активной зоны реактора

Поверхностное загрязнение активной зоны

Мешающим фактором при оценке герметичности оболочек твэлов является загрязнение поверхностей АЗ делящимися нуклидами. Активности радионуклидов ПД, обусловленные поверхностным загрязнением (ПЗ), при отсутствии негерметичных твэлов являются доминирующими в ТПК. Их величины пропорциональны кумулятивным выходам нуклидов при делении и изменяются прямо пропорционально значению мощности реактора.

Имеются изобарные цепочки, в которых образуются нелетучие радионуклиды ^{139}Ba , ^{140}Ba , ^{141}Ba , ^{142}Ba , ^{91}Sr , ^{92}Sr [10, 11], которые относительно легко идентифицируются в ТПК. Эти цепочки начинаются с короткоживущих инертных радиоактивных газов (ИРГ), вероятность выхода которых из под оболочки твэлов с микротрещинами мала. Поэтому указанные нуклиды могут попасть в теплоноситель в основном при делении в слое ПЗ и служить его индикатором. Посредством анализа результатов измерений активности нелетучих радионуклидов стронция и бария в ТПК можно контролировать ПЗ делящимися нуклидами и вводить поправки при оценке количества появляющихся негерметичных твэлов.

Контроль герметичности оболочек твэлов

В процессе эксплуатации твэлов возможно нарушение герметичности их оболочек. Различают два типа таких нарушений: образование микротрещин, через которые могут проникать только газообразные ПД (газовая неплотность), и наличие дефектов, при которых возможен непо-

средственный контакт горячего с теплоносителем, что приводит к проникновению в него кроме газообразных еще и других осколков деления. Допустимое количество твэлов с нарушенной герметичностью регламентируется общей удельной активностью реперных нуклидов в ТПК, при этом число твэлов с микродефектами не должно превышать 1 %, а с прямым контактом топлива с водой – 0,1 % общего количества твэлов.

Для оценки герметичности ТВС необходима информация об утечке ПД из-под оболочки твэлов, которую можно получить, измеряя и корректируя активности определенного набора реперных нуклидов в ТПК. С целью упрощения и надежности расчетов в качестве таковых из ПД выбираются нуклиды, которые являются летучими или газообразными и имеют не более одного летучего или газообразного "предшественника". Они должны надежно идентифицироваться и относительно легко измеряться в воде, а также слабо сорбироваться на поверхностях оборудования первого контура.

Согласно публикациям и нормативным документам [5, 12 - 15], основанным на научно-технических разработках и опыте эксплуатации реакторов в бывшем СССР и странах СНГ, к числу реперных для контроля герметичности оболочек (КГО) твэлов отнесены следующие радионуклиды: ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{139}Ba , ^{91}Sr и ^{92}Sr .

В качестве реперных могут быть также приняты ИРГ ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{138}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr и ^{88}Kr , однако их определение в теплоносителе первого контура в настоящее время метрологически не обеспечено [12].

Контроль по пяти нуклидам йода и пяти радионуклидам ИРГ (^{133}Xe , ^{135}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr) является оптимальным и позволяет оперативно и надежно обеспечивать КГО твэлов. Именно на использовании этих нуклидов [14] построены почти все расчетные модели как в Украине, так и за рубежом.

Разработанная нами методика [16] для СТПК-01 аттестована метрологическими органами и ориентирована на контроль активности ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I в циркулирующем по байпасной линии ТПК реактора ВВЭР-1000 в диапазоне величин $(3,7 \cdot 10^3 \div 3,7 \cdot 10^8)$ Бк/кг. Предельные значения указанного диапазона обусловлены снизу уровнем ПЗ делящимися нуклидами, а сверху – допустимыми значениями удельной активности радионуклидов йода в соответствии с регламентом эксплуатации реакторов типа ВВЭР-1000.

Инертные радиоактивные газы

Возникающие при пробоотборе технические трудности [17 - 22] "не позволили" радионукли-

дам ИРГ своевременно занять надлежащее им место при оценке радиационного состояния активной зоны. Следует ожидать, что при решении проблемы пробоотбора газов КГО с помощью ИРГ по сравнению с контролем на основе йодов должен быть более оперативным и точным и, как минимум, будет существенно дополнять его.

С учетом изложенного в [18, 21, 23 - 27] преимуществами ИРГ являются:

высокая способность проникать через дефекты в системе барьеров;

надежность идентификации и относительная легкость определения активности в технологических средах реакторной установки;

суммарная активность ИРГ является наиболее представительной активностью ПД в теплоносителе, составляя почти две трети от их общей активности;

ИРГ не адсорбируются на поверхностях ПК, химически нейтральны и не чувствительны к системам водоочистки, что облегчает устанавливать соответствие между количествами вышедших из-под оболочки и измеренных в теплоносителе удельных активностей газов;

динамическое равновесие активности ИРГ достигается раньше чем у радионуклидов йода; возможность использовать удобную для анализа высокоэнергетическую часть спектров гамма-излучения некоторых радионуклидов ИРГ и их дочерных продуктов распада, в частности ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{89}Kr , ^{138}Xe и ^{88}Rb , ^{89}Rb , ^{138}Cs .

На некоторых АЭС уже началось внедрение радиационного контроля на базе ИРГ [28, 29].

Надежная и оперативная информация об активности ИРГ в теплоносителе ПК очень важна как для КГО твэлов, так и для оценки возможной утечки ИРГ в помещения третьего защитного барьера и в окружающую среду [42, 43]. Контроль ИРГ позволит не только оценить состояние барьеров безопасности, но и создать цельную систему диагностирования как отдельных элементов защитной системы, так и атомной станции в целом.

Кроме ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{138}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr в качестве информативных рекомендуются еще следующие нуклиды ИРГ: $^{131\text{m}}\text{Xe}$, $^{133\text{m}}\text{Xe}$, $^{135\text{m}}\text{Xe}$, ^{137}Xe и ^{89}Kr [12 - 16, 24].

Заметим, что ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{89}Kr и ^{137}Xe являются дочерними продуктами распада короткоживущих ^{87}Br , ^{88}Br , ^{89}Br и ^{137}I – основных источников запаздывающих нейтронов в ТПК, на регистрации которых базируется принцип работы оборудования УДИН-02(06), ответственного за КГО твэлов работающего реактора. Это обстоятельство можно использовать для сравнения результатов анализа состояния оболочек твэлов, полу-

ченных на основе нейтронных и гамма-спектрометрических измерений.

При оценке состояния АЗ работающего реактора большое значение имеет определение области нахождения негерметичных твэлов. Существующие способы основаны на изменении технологического режима эксплуатации реактора [6], что требует специальной программы работы АЭС. Для этой цели можно использовать тот факт, что в петле, осуществляющей теплосъем от сектора с дефектной сборкой, должен устанавливаться повышенный уровень активности короткоживущих ПД. В публикации [41] предложена и экспериментально подтверждена модель формирования активности короткоживущих газообразных ПД и их дочерных продуктов распада (^{89}Kr , ^{88}Kr , ^{88}Rb , ^{89}Rb , ^{138}Xe , ^{138}Cs и др.) в теплоносителе отдельных петель контура реактора. Это дает основания для разработки методики обнаружения негерметичных твэлов в активной зоне с помощью анализа активности короткоживущих ПД в различных петлях первого контура.

Реперные нуклиды для оценки примесей в теплоносителе первого контура реактора

В начальный период эксплуатации реакторов типа ВВЭР при герметичных оболочках твэлов основной вклад в общую активность ТПК дают следующие ПА примесей в теплоносителе и конструкционных материалов АЗ реактора: ^{24}Na , ^{42}K , ^{18}F , ^{13}N , ^{41}Ar , ^{122}Sb , ^{124}Sb , ^{187}W , ^{75}Se , ^{38}Cl , ^{82}Br и др. Информация об активности этих радионуклидов важна с точки зрения их вклада в общую активность ТПК, а для таких как ^{24}Na , ^{42}K , ^{38}Cl , ^{82}Br и др. с возможностью оценки по ним концентрации стабильных натрия, калия, хлора и др., содержание которых регламентируется нормами водного режима.

В публикациях [30 - 32] рассмотрены принципиальные возможности и предложены методики экспрессного определения содержания технологических примесей фтора, аргона, хлора, брома, натрия и бора в ТПК с помощью гамма-спектрометрии измерительных участков непосредственно на трубопроводах или байпасных линиях отбора ТПК реактора. Особенностью методик является то, что для исключения неопределенности потока нейтронов в зоне облучения активность ПА анализируемых примесных элементов нормируется на активность нуклидов, образующихся в результате реакций на нуклидах самого теплоносителя. В качестве реперных использовались ^{19}O и ^{16}N . Время доставки теплоносителя из зоны облучения до точки детектирования определялось расчетно-экспериментальным путем на основе измеренного спектра, используя

зависимость отношения активности нуклидов с различными периодами полураспада от времени доставки (для водяного теплоносителя можно использовать ^{19}O и ^{16}N).

Контроль аэрозольных выбросов

В публикации [33] для контроля радионуклидов у выбросах, образующихся вследствие утечки теплоносителя через неплотности ПК, предлагается перенос измерений ближе к месту образования или максимальной концентрации радионуклидов, где их активность высока и легко поддается определению (например, в ТПК, который является основным источником газо-аэрозольных выбросов). В точках же выбросов контролируются лишь реперные радионуклиды, а соотношение их активностей с активностью остальных нормируемых радионуклидов определяется по данным измерений в ТПК.

Согласно [33] связь активности большинства долгоживущих нуклидов в выбросах с их концентрацией в ТПК выражается линейной зависимостью вида $a = Ra_0$, где a и a_0 – удельная активность нуклида в канале выброса и в ТПК соответственно; R – фактор разбавления. Для определения содержания нуклида в выбросе достаточно знать значение R и активность этого нуклида в ТПК. Значение R определяют по базовому реперному радионуклиду, обладающему оптимальными характеристиками с точки зрения его активности в теплоносителе, удобства измерения и отражения общих закономерностей формирования газо-аэрозольных выбросов для определенной группы радионуклидов.

В частности, как показано в [33], для ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{51}Cr , ^{92}Sr , ^{131}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{140}Ba и ^{239}Np , являющихся реперными для аэрозольных выбросов, обусловленных утечкой теплоносителя через неплотности ПК, требованиям в качестве базового в наибольшей мере отвечает ^{24}Na .

Радиоактивные продукты коррозии в первом контуре

Радиоактивные коррозионные отложения на внутренних поверхностях первого контура вызывают два отрицательных явления: ухудшение теплогидравлических параметров активной зоны (затрудняется отвод тепла от твэлов) и ухудшение радиационной обстановки в районе контура, затрудняя эксплуатацию, инспекцию, ремонт оборудования и повышая в итоге стоимость производства электроэнергии.

Результаты исследований [34 - 36] по определению активности взвесей в ТПК показали, что основная доля радиоактивности приходится на

следующие нуклиды: $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{58}Co , ^{60}Co , ^{59}Fe , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{56}Mn . Могут присутствовать и другие радионуклиды – продукты активации примесей и конструкционных материалов активной зоны: ^{65}Ni , ^{97}Zr , ^{97}Nb , ^{65}Zn , $^{69\text{m}}\text{Zn}$, ^{99}Mo , ^{182}Ta и др.

В [36, 37] показано, что снижение мощности реактора и температуры теплоносителя, а также повышение концентрации борной кислоты приводит к значительному (в десятки раз) росту активности продуктов коррозии, что объясняется сбросом отложений с поверхностей АЗ и ПК. При выходе реактора на номинальную мощность продукты коррозии практически полностью снова оседают на них. Полученные данные указывают на влияние переходных режимов на процессы перераспределения нуклидов между поверхностями в АЗ и ПК.

Особый интерес вызывает публикация [40], авторы которой подтверждают синхронный рост концентрации ^{131}I и радионуклидов коррозии после останова реактора и во время переходных процессов. Это указывает на поступление йода в контур из коррозионных отложений, на которых ^{131}I и другие ПД сорбируются во время работы энергоблока. Наличие этого механизма поступления в теплоноситель наряду со свежими поступлениями из ТВС затрудняет рекомендуемые нормативными документами [15] исследования на предмет наличия "spike-эффекта" – роста удельной активности ^{131}I после срабатывания аварийной защиты или плановых изменений мощности не менее чем на 20 % от текущего уровня.

Необходимость в контроле активностей ПК очевидна, а непрерывный контроль повышает оперативность и помогает детально отслеживать ход связанных с коррозией процессов в первом контуре, особенно во время переходных режимов работы реактора [38].

Другие информативные радионуклиды

В ТПК могут быть обнаружены как типичные для всех, так и специфичные для данного реактора радионуклиды – ПД и ПА. Чаще всего такими бывают ^{139}Ce , ^{141}Ce , ^{143}Ce , ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{106}Ru , ^{140}La , ^{136}Cs , ^{88}Rb , ^{89}Rb , ^7Be , ^{76}As , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ и др. Знание их удельных активностей в ТПК иногда бывает полезным. Так, при исследовании нами спектров ТПК новых блоков Хмельницкой и Ривненской АЭС неожиданностью оказалась высокая концентрация нуклидов ^{122}Sb и ^{124}Sb . Это было использовано для получения прецизионной градуировочной характеристики эффективности, что важно для повышения точности определяемых активностей. На Запорожской

АЭС (блок № 1) кроме ^{122}Sb , ^{124}Sb и $^{110\text{m}}\text{Ag}$ обнаружен радионуклид ^{125}Sb .

Выводы

На основе анализа требований нормативных документов, результатов научно-технических исследований, отраженных в публикациях, а также экспериментальных спектров циркулиру-

ющего по байпасным линиям теплоносителя энергетических реакторов ВВЭР-1000 и реактора ВВР-М предлагается оптимальный, с нашей точки зрения, набор реперных радионуклидов для непрерывного контроля их концентрации в ТПК водо-водяных ядерных реакторов. Приведенные в таблице радионуклиды объединены в отдельные группы в соответствии с предполагаемым их целевым использованием.

Группы реперных радионуклидов для непрерывного радиационного технологического контроля

Назначение радионуклидов	Основные реперные радионуклиды	Дополнительные реперные радионуклиды
Оценка поверхностного загрязнения активной зоны	^{139}Ba , ^{140}Ba , ^{141}Ba , ^{142}Ba , ^{91}Sr , ^{92}Sr	^{139}Cs , ^{140}La , ^{141}Ce , ^{143}Ce , ^{144}Ce , ^{239}Np
Контроль герметичности оболочек ТВС	^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{138}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr	^{89}Kr , ^{89}Rb , $^{135\text{m}}\text{Xe}$, ^{137}Xe ,
Определение содержания технологических примесей в теплоносителе реактора	^{24}Na , ^{42}K , ^{41}Ar , ^7Be , ^{38}Cl , ^{82}Br , ^{124}Sb , ^{187}W	^{122}Sb , ^{75}Se , ^{76}As , ^{182}Ta
Расчет аэрозольных выбросов, обусловленных негерметичностью первого контура	^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{99}Mo , ^{239}Np	$^{99\text{m}}\text{Tc}$
Оценка содержания продуктов коррозии в теплоносителе реактора	^{58}Co , ^{60}Co , ^{59}Fe , ^{65}Ni , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{56}Mn	^{97}Zr , ^{97}Nb , ^{65}Zn , $^{69\text{m}}\text{Zn}$
Оценка и контроль технологических параметров реактора	^{16}N , ^{19}O	

Разработана и внедрена на Ривненской, Хмельницкой и Запорожской АЭС методика дискретно-непрерывного контроля удельных

активностей реперных радионуклидов йода в ТПК ядерных реакторов типа ВВЭР-1000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій*. НП 306.1.02/1.034-2000. - К.: Державна адміністрація ядерного регулювання України, 2000. - С. 17 - 20.
2. *Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б.* Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 136 с.
3. *Леонтьев Г.Г., Некрестьянов С.Н., Кобеков В.В. и др.* Перспективы создания автоматических гамма-спектрометрических систем контроля радионуклидов в технологических средах АЭС // Сб. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара "Повышение эффективности и надежности радиационного контроля на АЭС" (Запорожье, 23 - 27 октября 1989 г.). - М., 1990. - Ч. 2. - С. 167 - 179.
4. *Бабенко В.В., Казимиров А.С., Берлизов А.Н. и др.* Гамма-спектрометрический комплекс для контроля активности радионуклидов йода в теплоносителе первого контура водо-водяных реакторов // Тез. докл. Междунар. конф. Украинского ядерного общества "Ядерная энергетика Украины - пути развития и международное сотрудничество" (Киев, 17 - 18 октября 2005 г.). - К.: 2006. - С. 46.
5. *Оценка состояния твэлов работающего реактора // Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов*. - 3-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 221 с.
6. *Ломакин С.С.* Ядерно-физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 120 с.
7. *Пассаж Г.* Расчетное исследование температурных и геометрических характеристик топлива ВВЭР на АЭС "КОЗЛОДУЙ" (Болгария) при нормальных условиях эксплуатации // Атомная энергия. - 2006. - Т. 101, вып. 5. - С. 336.
8. *Пассаж Г., Стефанова С., Щеглов А., Проселков В.* Сопоставление результатов расчета и послереакторных исследований твэлов ВВЭР-1000 выгоранием 49 Мвт-сут/кг // Атомная энергия. - 2006. - Т. 101, вып. 6. - С. 413.
9. *Рудык А.Ф., Казимиров А.С., Кротенко А.П.* Оценка радиационного состояния активной зоны реактора ВВР-М. - Киев, 1987. - 37 с. - (Препр. /НАН Украины. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-87-3).
10. *Романцов В.П.* Математическая модель оценки загрязнения поверхности активной зоны РБМК по содержанию стронция и бария в теплоносителе // Сб. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара "Повышение эффективности и надежности РК на АЭС" (Запорожье, 23 - 27 октября 1989 г.). - М., 1990. - Ч. 1. - С. 24 - 28.
11. *Романцов В.П., Романцова И.В.* Модель оценки числа негерметичных твэлов по содержанию ИРГ // Там же. - С. 38 - 47.

12. Лузанова Л.М., Мигло В.М., Славягин П.Д. Методика расчета осколочной активности воды первого контура реактора ВВЭР-440 // Радиационная безопасность и защита АЭС / Под ред. Ю. А. Егорова. - М.: Энергоиздат, 1981. - Вып. 6. - С. 63.
13. Лузанова Л.М., Мигло В.М., Славягин П.Д. Выход радиоактивных ПД в теплоноситель первого контура работающего реактора типа ВВЭР // Атомные ЭС / Под ред. Л. М. Воронина. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - Вып. 9. - С. 124.
14. Елизаров В.П., Лузанова Л.М., Мигло В.М. и др. Цели и задачи непрерывного контроля ПД в теплоносителе первого контура // Сб. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара "Повышение эффективности и надежности РК на АЭС" (Запорожье, 23 - 27 октября 1989 г.). - М., 1990. - Ч. 1. - С. 13 - 18.
15. Инструкция по контролю герметичности оболочек тепловыделяющих элементов реакторов типа ВВЭР-1000 во время работы и после остановки аппарата. 0401.00.00.00 ДНГ.
16. Бабенко В.В., Берлизов А.Н., Малюк И.А. и др. Удельная активность гамма-излучающих радионуклидов в теплоносителе первого контура ядерных реакторов типа ВВЭР-1000. Методика выполнения измерений с использованием спектрометрического комплекса СТПК-01 // Свидетельство об аттестации МВИ № 7-30-05. - Национальный научный центр "Институт метрологии", 2005. - 33 с.
17. Варначева Л.Г., Егоров Ю.А., Елизаров В.П., Скляров В.П. Определение концентрации РБГ в теплоносителе АЭС // Радиационная безопасность и защита АЭС / Под ред. Ю. А. Егорова. - М.: Энергоиздат, 1981. - Вып. 6. - С. 239.
18. Круглов В.П. Оперативные средства контроля за состоянием ТВС активной зоны работающего реактора // Атомные ЭС 1982 / Под ред. Л. М. Воронина. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - Вып. 5. - С. 182.
19. Гамалий А.Ф., Ефимов И.А., Жилкин А.С. и др. Накопление ГПД в первом контуре в начальный период работы реактора // Там же. - С. 11.
20. Дегальцев Ю.Г. Поведение высокотемпературного ядерного топлива при облучении. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 208 с.
21. Федоров В.А. Разработка и исследование установки радиометрического контроля с непрерывной подготовкой пробы теплоносителя на АЭС с ВВЭР: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ВТИ. - М., 1988. - 18 с.
22. Гимельштейн Б.Г., Мацкевич Г.В., Теплов П.В., Федоров В.А. Система автоматического радиометрического контроля радиохимического состава теплоносителя первого контура АЭС с ВВЭР // Радиационная безопасность и защита АЭС / Под ред. Ю. А. Егорова. - М.: Энергоиздат, 1981. - Вып. 6. - С. 245.
23. Дорошенко Г.Г. Определение параметров модели выхода ПД из дефектных твэлов и состояния реактора АЭС по ПД в теплоносителе // Атомные ЭС 1982 / Под ред. Л. М. Воронина. - М.: Энергоатомиздат. - 1983. - Вып. 5. - С. 157.
24. Хамянов Л.П., Терещенко В.И., Амосов М.М. Формирование активности ПД в теплоносителе ВВЭР-440 // Там же. - С. 161.
25. Барышев В.В. Перспективы развития систем КГО // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерное приборостроение. - 1987. - Вып. 3. - С. 68.
26. Дорошенко Г.Г., Панов Е.А. Радиационный контроль состояния защитных барьеров АС // Сб. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара "Повышение эффективности и надежности РК на АЭС" (Запорожье, 23 - 27 октября 1989 г.). - М., 1990. - Ч. 1. - С. 68.
27. Дорошенко Г.Г. Модель формирования активности газовых ПД в технологических средах АЭС // Атомные ЭС / Под ред. Л. М. Воронина. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - Вып. 11. - С. 78.
28. Спектрометрический монитор для контроля объемной активности радионуклидов инертных газов МАРС-010-СГГ: Руководство по эксплуатации / Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова. - М., 2003.
29. Спектрометрический монитор МАРС-012-СУГ: Руководство по эксплуатации / Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова. - Тяньваньская АЭС, 2003.
30. Жемжуров М.Л. Экспрессный гамма-спектрометрический метод определения содержания технологических примесей в теплоносителе главного контура ядерного реактора / Изв. АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук. - 1988. - № 2. - С. 6 - 13.
31. Жемжуров М.Л., Левадный В.А. Гамма-спектрометрический метод непрерывного контроля содержания примесей в теплоносителе реакторного контура // Атомная энергия. - 1991. - Т. 70, вып. 3. - С. 176.
32. Жемжуров М.Л., Левадный В.А., Лухвич А.А. Контроль содержания бора в теплоносителе ВВЭР - 1000 по регистрации мгновенных гамма-квантов ядер лития-7 // Атомная энергия. - 1991. - Т. 70, вып. 3. - С. 187.
33. Москвин Л.Н., Леонтьев Г.Г., Некрестьянов С.Н. Оперативный контроль радиоактивности аэрозолей в выбросах АЭС по реперным изотопам // Атомные электрические станции 1982 / Под ред. Л. М. Воронина. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - Вып. 5. - С. 199.
34. Варовин И.А. Исследование состояния поверхности и материала оболочек твэлов реактора РБМК-1000 // Атомные ЭС / Под ред. Л. М. Воронина. - М.: Энергоатомиздат. - 1985. - Вып. 8. - С. 78.
35. Варовин И.А. Коррозионные отложения и их удаление с теплопередающих поверхностей реактора // Там же. - С. 84.
36. Шумов Ю.А. Распределение активированных продуктов коррозии по тракту первого контура ВВЭР-440 // Атомные ЭС 1982 / Под ред. Л.М. Воронина. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - Вып. 5. - С. 189.
37. Лузанова Л.М., Проселков В.Н. Роль переходных режимов работы реактора в перераспределении радиоактивных продуктов коррозии в первом контуре // Радиационная безопасность и защита АЭС / Под ред. Ю. А. Егорова. - М.: Энергоиздат, 1981. - Вып. 6. - С. 8.

38. Романов В.М., Панкратов Д.В., Лузанова Л.М., Славягин П.Д. Анализ пространственной динамики выхода ПД из твэлов ВВЭР в переходных режимах // Атомная энергия. - 1997. - Т. 82, вып. 3. - С. 204.
39. Лузанова Л.М., Мигло В.М., Славягин П.Д. Нормирование предельно допустимой разгерметизации оболочек твэлов ВВЭР и активности ПД в теплоносителе // Атомная энергия. - 1993. - Т. 74, вып. 6. - С. 491.
40. Крицкий В.Г., Родионов Ю.А., Амелогова Н.И. Поведение радиоактивных изотопов иода в контуре многократной принудительной циркуляции РБМК // Атомная энергия. - 2005. - Т. 99, вып. 2. - С. 103.
41. Хамьянов Л.П. Метод локализации негерметичной ТВС на основе анализа короткоживущих радионуклидов ПД // Атомные ЭС / Под ред. Л. М. Воронина. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - Вып. 6. - С. 61.
42. Полянцев С.С. Актуальные вопросы контроля газоаэрозольных выбросов на АЭС // АНРИ. - 2009. - № 2. - С. 37.
43. Анализ состояния радиационной безопасности на АЭС концерна "Росэнергоатом" в 2003 г.: (Технический отчет) / ВНИИАЭС. - М., 2003.

БЕЗПЕРЕРВНИЙ КОНТРОЛЬ СТАНУ БАР'ЄРІВ БЕЗПЕКИ ВОДО-ВОДЯНИХ РЕАКТОРІВ МЕТОДОМ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРІЇ ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ

А. Н. Берлізов, І. А. Малюк, О. Ф. Рудик, В. В. Тришин, Р. В. Чиж

Отримано та проаналізовано гамма-спектри теплоносія першого контуру водо-водяних ядерних реакторів (ВВЕР-1000 Рівненської, Хмельницької та Запорізької АЕС, ВВР-М Інституту ядерних досліджень НАН України), вивчено вимоги нормативних документів, проведено аналіз публікацій з радіаційного контролю реакторів методом гамма-спектрометрії високої роздільної здатності. На базі проведених досліджень запропоновано набори реперних радіонуклідів для безперервного контролю та досліджень різних ядерно-фізичних процесів в активній зоні та технологічних режимів першого контуру водо-водяних реакторів.

Ключові слова: гамма-спектрометрія, неперервний контроль, теплоносії першого контуру, бар'єри безпеки, водо-водяні ядерні реактори.

CONTINUOUS MONITORING OF THE STATE OF SAFETY BARRIERS IN WATER-WATER NUCLEAR REACTORS USING HIGH-RESOLUTION GAMMA-SPECTROMETRY

A. N. Berlizov, I. A. Maliuk, O. F. Rudyk, V. V. Tryshyn, R. V. Chyzh

Gamma-spectra from the first loop coolant of the light water power reactors VVER-1000 at Rivne, Khmelnytskyi and Zaporizhzhia NPPs and of the water-water nuclear research reactor WWR-10M at the Institute for Nuclear Research, Kyiv, were acquired and analyzed. Publications on the reactor radiation control using high-resolution gamma-spectrometry as well as respective regulations and requirements in the area were studied and analyzed. Based on the carried out research, sets of reference radionuclides were proposed for the continuous control and monitoring of different nuclear processes in a reactor core and technological regimes of the first loop in water-water reactors.

Keywords: gamma-spectrometry, continuous monitoring, first loop coolant, safety barriers, water-water nuclear reactors.

Поступила в редакцію 24.11.09,
после доработки - 10.12.09.